



การพัฒนาจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อใช้งานซ่อมผิวทาง
Development of Geopolymer from Agro-Industrial Wastes
for Use in Pavement Repair

อาบีเต็ง ฮาวา
Abideng Hawa

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctor of Philosophy in Civil Engineering
Prince of Songkla University
2557
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมเกษตรเพื่องานซ่อม
 ผิวทาง
 ผู้เขียน นายอาบีเต็ง ฮาวา
 สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.พิชัย ธานีรณานนท์)	(ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมกรรมการ
.....	(ศาสตราจารย์ ดร.พิชัย ธานีรณานนท์)
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตฤพล ตันนโยภาส)กรรมการ
.....	(รองศาสตราจารย์ ดร.ตฤพล ตันนโยภาส)
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)
กรรมการ
	(รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล สัจจาณิชย์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ศาสตราจารย์ ดร.พิชัย ธานีรณานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายอาบีเต็ง ฮาวา)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายอาปีเต็ง ฮาวา)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมเกษตรเพื่องานซ่อมผิวทาง
ผู้เขียน	นายอาปีเต็ง ฮาวา
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ให้กำลังอัดสูงตั้งแต่ช่วงต้น อันเป็นสมบัติที่สำคัญสำหรับวัสดุซ่อมผิวทางคอนกรีต ซึ่งจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผลิตจากดินขาวเผาแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถพัฒนาสมบัติที่สำคัญดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบกำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง ความคงทนต่อการขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตกำลังการยัดหน่วงระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติและได้ทำการวิเคราะห์ทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิคการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทางออสซิลโลกราฟีของจีโอพอลิเมอร์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์โดยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด โดยแปรผันอัตราส่วนผสมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน 13 สูตร ได้แก่ 0:0, 10:0, 20:0, 30:0, 0:5, 0:10, 0:15, 10:5, 10:10, 10:15, 20:5, 20:10 และ 20:15 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 0.45 และแปรผันเวลาโดยบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (บ่มร้อน) เป็นเวลา 0.5, 1, 2 และ 4 ชั่วโมง และทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 75 ± 5) จนกระทั่งครบอายุการทดสอบที่ 2, 6, 24 ชั่วโมง 7 และ 28 วัน

จากผลการศึกษาพบว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มที่จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ส่วนผลของระยะเวลาบ่มร้อนต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์นั้น พบว่าการให้ระยะเวลาบ่มร้อนนานขึ้น มีผลในการเร่งพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ให้สูงขึ้นที่อายุเริ่มต้น ในขณะที่การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาบ่มร้อนนานขึ้น และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อส่วนผสมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง ส่วนความคงทนต่อการขยายตัวเมื่อแช่สารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนผสม และพบว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ขึ้นไป จะทำให้การขยายตัวสูงขึ้นอย่างชัดเจน การยัดหน่วงระหว่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์กับปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ปกตินั้น พบว่าการเพิ่มระยะเวลาบ่มร้อนมีผลทำให้กำลังการยัดหน่วงดีขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราหรือเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถให้ค่ากำลังการยัดหน่วงดีขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาแล้วในทุกอายุบ่มร้อน

ผลการทดสอบจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แทนที่ดินขาวเผาด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชั่วโมง และบ่มในบรรยากาศห้องอายุ 2 ชั่วโมง และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 60, 62 และ 66 เมกะพาสคัล และ 69, 70 และ 72 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ในขณะที่การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 4 และ 30 สัปดาห์ มีค่าเท่ากับร้อยละ -0.044, -0.018 และ -0.017 และ -0.079, -0.050 และ -0.043 ที่การบ่มร้อนเป็นเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มร้อน 2 ชั่วโมง ที่อายุ 4 และ 30 สัปดาห์ และแก้ไขในสารละลายโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 5 พบว่ามีค่าขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.023 และ 0.013 ตามลำดับ และหลังจากที่แก้ไขในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 5 ค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.028 และ 0.014 ตามลำดับ ซึ่งมีความทนทานต่อสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตสูง ส่วนกำลังยึดหน่วงของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติให้ค่าสูงสุดเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 โดยให้ค่ากำลังยึดหน่วงเท่ากับ 12 เมกะพาสคัล ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 มีเนื้อแน่นและแสดงความสมบูรณ์ของการทำปฏิกิริยาของวัสดุตั้งต้นซึ่งทำให้ได้กำลังอัดที่สูงกว่า การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทางอ้อมของจีโอพอลิเมอร์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นั้น แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีความเป็นผลึกสูงมีกำลังอัดสูงไปด้วย นอกจากนี้กำลังอัดที่มีค่าสูงของผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ก็มีการดูดกลืนแสงสูงด้วยตามที่แสดงในแบบลายพิมพ์หมึกฟุ้งกึ่งชั้นการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

ส่วนผสมที่เหมาะสมในทางปฏิบัติของจีโอพอลิเมอร์ เมื่อพิจารณาจากราคาในการผลิต ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและสมบัติทางวิศวกรรม พบว่าจีโอพอลิเมอร์ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 10 (P10-1) และเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 (O10-1) ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง สามารถให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์, เถ้าไม้ยางพารา, เถ้าปาล์มน้ำมัน, กำลังอัด, การหดตัวแบบแห้ง, การขยายตัวจากซัลเฟต, กำลังการยึดหน่วง, โครงสร้างจุลภาค

Thesis Title	Development of Geopolymer from Agro-Industrial Wastes for Use in Pavement Repair
Author	Mr.Abideng Hawa
Major Program	Civil Engineering
Academic Year	2013

Abstract

This research describes the study and development of a geopolymer mortar which is capable of developing high early strength, the most important property of concrete pavement repair materials. The geopolymers were produced by partial replacement of metakaolin (MK) by Parawood ash (PWA) and oil palm ash (OPA). The geopolymer samples were characterized by compressive strength, drying shrinkage, sodium and magnesium sulfate expansion, strong bonding with Portland cement mortar, and microstructure, which can explain the mechanism by which the geopolymer mixture attain high early strength. The chemical and microstructure were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR). The mix percentage design of PWA and OPA were varied in 13 combinations of 0:0, 10:0, 20:0, 30:0, 0:5, 0:10, 0:15, 10:5, 10:10, 10:15, 20:5, 20:10 and 20:15. Water to raw materials of the geopolymer mortar of 0.45 was used in this study. The geopolymer samples were cured at 80°C for 0.5, 1, 2, or 4 hours and kept at ambient temperature (30±2°C and 70±5%RH) for testing at 2, 6, 24 hours and 7 and 28 days.

The testing results revealed that the geopolymer mortars with 5% OPA by weight gave the highest compressive strength. For all the mixtures, longer heat curing time was found to accelerate the development of compressive strength at early age. The drying shrinkage of the geopolymer mortar decreased with longer curing time at elevated temperature and decreased with the increasing ash contents for 2 and 4 hours. The expansion attack caused by sodium and magnesium sulfate solutions were similar for all the mixtures, and with 30% ash, the expansion was excessive. The bond strength between the geopolymer mortar and Portland cement mortar improved with heat curing time for all formulations, and the samples containing PWA or OPA showed dramatically higher slant shear strengths than the control sample of the geopolymer with only MK for all heat curing times tested.

Experimental results showed that the geopolymer mortars with 5% OPA gave the compressive strength with curing periods of 1, 2 and 4 hours of 60, 62 and 66 MPa, respectively at 2 hours and 69, 70 and 72 MPa at 28 days. The geopolymer mortars had drying shrinkage with curing periods of 1, 2 and 4 hours of -0.044, -0.018 and -0.017% respectively at 4 weeks and -0.079, -0.050 and -0.043% at 30 weeks. The geopolymer mortars had high resistance to the sodium and magnesium sulfates attack. After submersion in 5% Na_2SO_4 solution for 4 and 30 weeks following 2 hours of heat curing, the elongation values were recorded at 0.023 and 0.013%, respectively. After submersion in 5% MgSO_4 solution, the elongation of geopolymer mortars measured were 0.028 and 0.014% for 4 and 30 weeks, respectively. The highest bond strength of 12 MPa was obtained from the geopolymer mortar with 10% OPA, heated for 4 hours at 80°C and cured for 24 hours at ambient temperature.

Scanning electron microscopy (SEM) indicated that the 5% OPA sample had a dense-compact matrix and displayed complete chemical reaction of the starting raw materials; this microstructure explained the mixture's higher compressive strength. In the X-ray diffraction (XRD) patterns, the sample with higher amount of crystallinity also showed higher compressive strength. In addition, the compressive strength of the geopolymer mortars with high absorption capacity also displayed high strength as in the FT-IR pattern.

The optimum practical composition of the geopolymer mortar taking into consideration the cost of production, environmental impacts and engineering properties was 10% PWA (P10-1) and 10% OPA (O10-1) at 1 hour.

Keyword: Geopolymer, Parawood ash, Oil palm ash, Compressive strength, Drying shrinkage, Sulfate expansion, Bond strength, Microstructure

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.พิชัย ธานีรณานนท์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ตฤพล ตันนโยภาส ที่ได้ชี้แนะแนวทางในการศึกษาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นทั้งทางด้านวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบและการจัดทำเอกสารต่างๆ ตลอดจนการสนับสนุนอุปกรณ์และห้องทดสอบ นอกจากนี้ผู้เขียนยังขอขอบคุณ ผู้ศาสตราจารย์ ดร.วรวจน์ ประชาเสรี ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและคำชี้แนะแนวทางและวิธีการเขียนบทความวิจัยตลอดจนขั้นตอนต่างๆ ตลอดจนการปฏิบัติงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล สัจจาณิษฐ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องแม่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้เอื้อเพื่อเครื่องมือทดสอบกำลังอัด

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ภายใต้โครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา และทุนอุดหนุนเพื่องานวิจัยบัณฑิตศึกษา ที่เอื้อเพื่อทุนทำวิจัยในการศึกษาครั้งนี้

อาบีเต็ง ฮาวา

สารบัญ

	หน้า
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(14)
สัญลักษณ์และคำย่อ	(18)
รายการผลงานที่ตีพิมพ์	(19)
สำเนาต้นฉบับที่ได้รับการยินยอมจากผู้พิมพ์ผลงาน	(20)
บทนำ	1
ความสำคัญและที่มา	1
เอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
จีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์	2
วัสดุตั้งต้น	3
1. ดินขาวเผา	3
2. เถ้าลอย	6
3. อื่นๆ	8
การประยุกต์ใช้งาน	8
วัตถุประสงค์	13
ผลและการวิเคราะห์	15
สมบัติของดินขาวเผา เถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน	15
สมบัติทางกายภาพ	15
องค์ประกอบทางเคมี	17
โครงสร้างทางจุลภาค	18
องค์ประกอบแร่	22
หมู่ฟังก์ชัน	23
กำลังอัด	25
อิทธิพลของเถ้าไม้ยางพารา	25
อิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมัน	28
อิทธิพลของเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน	30
อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน	32
อิทธิพลของปริมาณน้ำ	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ดัชนีกำลังอัด	36
การหัดตัวแบบแห้ง	38
อิทธิพลของเถาไม้ยางพารา	38
อิทธิพลของเถาปาล์มน้ำมัน	40
อิทธิพลของเถาไม้ยางพาราและเถาปาล์มน้ำมัน	42
อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน	44
การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต	47
อิทธิพลของเถาไม้ยางพารา	47
อิทธิพลของเถาปาล์มน้ำมัน	49
อิทธิพลของเถาไม้ยางพาราและเถาปาล์มน้ำมัน	50
อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน	53
กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์ปกติ	56
อิทธิพลของเถาไม้ยางพารา	56
อิทธิพลของเถาปาล์มน้ำมัน	56
อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน	56
การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค	58
อิทธิพลของเถาไม้ยางพารา	58
อิทธิพลของเถาปาล์มน้ำมัน	61
อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน	64
การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบแร่	68
อิทธิพลของเถาไม้ยางพารา	68
อิทธิพลของเถาปาล์มน้ำมัน	70
อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน	71
การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิค X-ray fluorescence	75
อิทธิพลของเถาไม้ยางพารา	75
อิทธิพลของเถาปาล์มน้ำมัน	76
การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีโดยวิเคราะห์แบบอัตราส่วนโมลาร์	77
ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนทางเคมีโดยน้ำหนักและโดยอัตราส่วนโมลาร์	78

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	79
สรุปผล	85
สรุปผล	85
ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารอ้างอิง	87
บทความ	93
บทความ ก สมบัติวัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาเพื่องานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต	93
บทความ ข Development and Performance Evaluation of Very High Early Strength Geopolymer for Rapid Road Repair	107
บทความ ค Performance Evaluation and Microstructure Characterization of Metakaolin-Based Geopolymer Containing Oil Palm Ash	119
บทความ ง Effect of Parawood Ash on Drying Shrinkage, Compressive Strength and Microstructural Characterization of Metakaolin-based Geopolymer Mortar	131
ภาคผนวก	139
ภาคผนวก ก การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ให้อุณหภูมิสูงก่อนนำเข้าสู่ตู้อบ	139
ภาคผนวก ข การทดสอบกำลังยึดหน่วงระหว่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์กับปูนซีเมนต์มอร์ตาร์	143
ภาคผนวก ค กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	147
ภาคผนวก ง การหัดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	193
ภาคผนวก จ การขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	235
ภาคผนวก ฉ การขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมเฟต	257
ภาคผนวก ช กำลังยึดหน่วงระหว่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์กับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์	279
ภาคผนวก ซ วารสารระดับนานาชาติ Materials Science (Minor Revision)	285
ประวัติผู้เขียน	293

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1	กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์แก้ลอย	8
2	ชนิดและลักษณะของวัสดุซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต	11
3	สมบัติของวัสดุซ่อมแซมผิวทางคอนกรีตแบบรวดเร็วพิเศษ	12
4	ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของดินขาวเผา ถ้ำไม้ยางพารา และถ้ำปาล์มน้ำมัน	17
5	ดัชนีกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์	37
6	องค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนขององค์ประกอบของจีโอพอลิเมอร์	76
7	องค์ประกอบทางเคมีโดยอัตราส่วนโมลาร์	78

รายการภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาที่อุณหภูมิเผาต่างกัน	3
2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาที่อุณหภูมิเผาต่างกัน	4
3 ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์บ่มร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	4
4 การพัฒนา กำลังอัดและกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มร้อนอุณหภูมิแตกต่างกันที่ระยะเวลา 4 ชม.	5
5 กำลังอัดและกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่มร้อนแตกต่างกัน	5
6 แสดงการนำไปใช้ในงานก่อสร้างและซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต	9
7 การกระจายขนาดอนุภาคดินขาวเผา	15
8 การกระจายขนาดอนุภาคเถ้าไม้ยางพารา	16
9 การกระจายขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน	16
10 ภาพขยายอนุภาคของดินขาวเผา	19
11 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าไม้ยางพารา	20
12 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน	21
13 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินขาวเผา	22
14 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของเถ้าไม้ยางพารา	23
15 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของเถ้าปาล์มน้ำมัน	23
16 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของดินขาวเผา	24
17 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเถ้าไม้ยางพารา	24
18 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเถ้าปาล์มน้ำมัน	25
19 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารา	27
20 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน	29
21 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารา และเถ้าปาล์มน้ำมัน บ่มร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	30
22 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารา และเถ้าปาล์มน้ำมัน บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง	31
23 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารา และเถ้าปาล์มน้ำมัน บ่มร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง	31
24 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่มร้อนต่างกัน	34

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
25	35
26	39
27	41
28	42
29	43
30	43
31	47
32	49
33	50
34	51
35	52
36	53
37	54
38	55
39	57

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
40 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Control-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	59
41 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 20 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (P20-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	60
42 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O5-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	62
43 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O15-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	63
44 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (O15-1) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	65
45 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O15-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	66
46 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (O15-4) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	67
47 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Control-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	69
48 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 20 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (P20-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	69
49 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O5-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	70
50 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O15-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	71
51 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว บ่มร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Control-1) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	72
52 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Control-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	72
53 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว บ่มร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (Control-4) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	73

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
54 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วปาล์ม น้ำมันร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (O5-1) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	74
55 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วปาล์ม น้ำมันร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O5-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	74
56 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วปาล์ม น้ำมันร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (O5-4) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	75
57 ความสัมพันธ์ของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ระหว่างโดยน้ำหนักและโดยอัตราส่วนโมลาร์	79
58 ความสัมพันธ์ของ CaO/SiO_2 ระหว่างโดยน้ำหนักและโดยอัตราส่วนโมลาร์	79
59 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Control-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	80
60 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 10 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (P10-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	81
61 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O5-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	81
62 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O10-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	82
63 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O15-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	82
64 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วปาล์มน้ำมัน บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O15-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	83

สัญลักษณ์และคำย่อ

°C	=	องศาเซลเซียส
Kg/m ³	=	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
MPa	=	เมกะพาสคัล
Na ₂ SiO ₃	=	โซเดียมซิลิเกต
NaOH	=	โซเดียมไฮดรอกไซด์
Psi	=	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
θ	=	Theta
ASTM	=	American Standard for Testing of Materials
BET	=	Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett, Edward Teller
FT-IR	=	Fourier transform infrared spectroscopy
LOI	=	Loss On Ignition
MK	=	Metakaolin
OPA	=	Oil Palm Ash
PWA	=	Parawood Ash
RTA	=	The Roads and Traffic Authority of New South Wales
SEM	=	Scanning Electron Microscope
XRD	=	X-ray diffraction
XRF	=	X-ray fluorescence

บทนำ

ความสำคัญและที่มา

ตลอดทศวรรษที่ผ่านมาเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมโยธาได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นด้านวัสดุและการออกแบบ การก่อสร้าง การบริหารจัดการ การซ่อมบำรุงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับอุปสงค์ อุปทานของมนุษย์ แม้กระทั่งงานสาธารณูปโภค เช่น ด้านผิวทาง ทั้งการก่อสร้างและการซ่อมบำรุง ที่จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีสมบัติพิเศษ เช่น ระยะเวลาการแข็งตัวของคอนกรีตที่รวดเร็ว เพื่อเปิดการจราจรได้ในเวลาที่รวดเร็ว ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากต่อถนน ทางหลวง สนามบินที่มีการขนส่งปริมาณมากขึ้นทุกปี งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตร นำมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนการใช้ปูนซีเมนต์และวัสดุประสานอื่นๆ เพื่อเป็นการลดต้นทุน และเป็นการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมให้เกิดคุณค่าและเกิดประโยชน์มากที่สุด

ประเทศไทยเป็นประเทศอุตสาหกรรมเกษตรประเทศหนึ่งที่มีวัสดุเหลือใช้ ที่เกิดจากผลิตผลทางการเกษตรมากมาย เช่น แกลบ (Rice husk ash) แกลบอ้อย (Bagasse ash) แกลบปาล์มน้ำมัน (Oil palm ash) และแกลบไม้ยางพารา (Parawood ash) เป็นต้น บรรดาแกลบเหล่านี้เป็นของเหลือที่ได้มาจากใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ดังนั้นในแต่ละวันจึงมีปริมาณแกลบวัสดุดังกล่าวจำนวนมาก แต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยหรือแทบไม่ได้เลย เป็นผลทำให้เกิดมลภาวะสิ่งแวดล้อมตามมา จึงเป็นที่มาของความสนใจที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุประสานเพื่อใช้ในงานผิวทาง

นอกจากนี้นโยบายของรัฐบาลที่มีความต้องการเพิ่มพื้นที่ปลูกยางพาราทั่วประเทศ ทำให้มีไม้ยางพาราเพิ่มมากขึ้น ไม้ยางพาราส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบทำเฟอร์นิเจอร์ เป็นผลให้เหลือเศษไม้ยางพาราเป็นจำนวนมากและก็ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการอบไม้ยางพารา และปัจจุบันยังนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น โรงไฟฟ้าชีวมวลที่จังหวัดยะลา ที่ใช้เศษไม้ยางพาราหรือที่เรียกว่า ปีกไม้ยางและไม้ยางทอนขนาดเล็ก เพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้มีแกลบที่เหลือจากการเผาไหม้เป็นจำนวนมากในแต่ละวัน ทำให้มีแกลบไม้ยางพาราเพิ่มมากขึ้นทุกปี กำจัดโดยการฝังกลบซึ่งต้องใช้พื้นที่ฝังกลบมากขึ้นเรื่อยๆ หากยังไม่สามารถหาหนทางกำจัดได้โดยวิธีอื่น นอกจากนี้บรรดาโรงงานผลิตถลุงมีอย่างและโรงงานผลิตอาหารทะเลก็ได้ใช้เศษไม้ยางพาราดังกล่าวเช่นกัน ปริมาณแกลบไม้ยางพาราที่เพิ่มมากขึ้นแต่มีการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะด้านวัสดุก่อสร้างไม่ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ การผลิตอิฐบล็อก ทำให้มีความจำเป็นที่ต้องนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น

สารปอซโซลานที่เริ่มมีการใช้กันอีกประเภทหนึ่งได้แก่ ดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งประกอบไปด้วยซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อผ่านการเผาเรียบร้อยแล้ว สามารถเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ได้ ดินขาว (Kaolin) นั้นสามารถพบได้ทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยพบมากที่จังหวัดลำปาง ปราจีนบุรี เป็นต้น และในภาคใต้ที่สามารถพบได้ที่จังหวัดระนองและนราธิวาส ในส่วนของแกลบปาล์ม น้ำมันนั้นได้จากอุตสาหกรรมเกี่ยวเนื่องกับปาล์มน้ำมัน โดยปาล์มน้ำมันมีพื้นที่การปลูกเป็นจำนวน

มากในภาคใต้ และประเทศไทยมีผลผลิตปาล์มน้ำมันปี 2555 ประมาณ 11,326,000 ตัน (www.oae.go.th) ซึ่งหลังจากการสกัดเอาเนื้อปาล์มออกมาแล้ว ได้ของเหลือที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงหม้อต้มน้ำที่อุณหภูมิ 800-1,000 องศาเซลเซียส ของเสียที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงจะเหลือเป็นเถ้าประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ([Chandara et al. 2010](#), [Sata et al. 2004](#), [Tonnyapopas et al. 2006](#)) [Dalimin \(1995\)](#) โดยของเสียที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยกะลาปาล์มร้อยละ 6-7 เส้นใยปาล์มร้อยละ 14-15 กากปาล์มร้อยละ 6-7 และช่อทะลายปาล์มร้อยละ 23 เมื่อนำมาคำนวณกลับพบว่าในปี 2555 ประเทศไทยมีเถ้าปาล์มน้ำมันประมาณ 294,000 ตัน การที่เถ้าปาล์มน้ำมันมี SiO_2 เป็นองค์หลักทางเคมี ทำให้มีความเป็นไปได้ที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพื่อใช้การผลิตจีโอพอลิเมอร์

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ๆ เพื่อใช้ในการก่อสร้าง และซ่อมแซมผิวทาง ที่มีความเหมาะสมกับความต้องการใช้งาน เช่น ความรวดเร็วของการแข็งตัว ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการก่อสร้างและซ่อมแซมผิวทางโดยเฉพาะผิวทางคอนกรีต เนื่องจากความเร่งด่วนในการใช้งาน โดยเฉพาะผิวทางที่มีปริมาณการจราจรมาก เช่น การจราจรในเมืองใหญ่ที่เมื่อมีการซ่อมบำรุงผิวทางทำให้มีความจำเป็นต้องมีการปิดช่องจราจร ซึ่งทำให้เกิดการจราจรติดขัดเป็นเวลานานจนกว่าวัสดุที่ใช้ในการซ่อมบำรุงจะแข็งตัวรับน้ำหนักได้ ปัจจุบันในต่างประเทศได้มีการใช้และศึกษาวิจัยวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะในการซ่อมผิวทางคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติการแข็งตัวรวดเร็วไม่ว่าจะเป็น พอลิยูรีเทนพอลิเมอร์ (polyurethane polymer) อีพอกซีพอลิเมอร์ (epoxy polymer) เทอร์โมเซตติงไวนิลพอลิเมอร์ (thermosetting vinyl polymer) และแมกนีเซียมพอลิฟอสเฟต (magnesium polyphosphate) ([Fowler, 2008](#)) ยังมีราคาค่อนข้างสูง ทำให้มีปัญหากับการนำมาใช้

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

จีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์

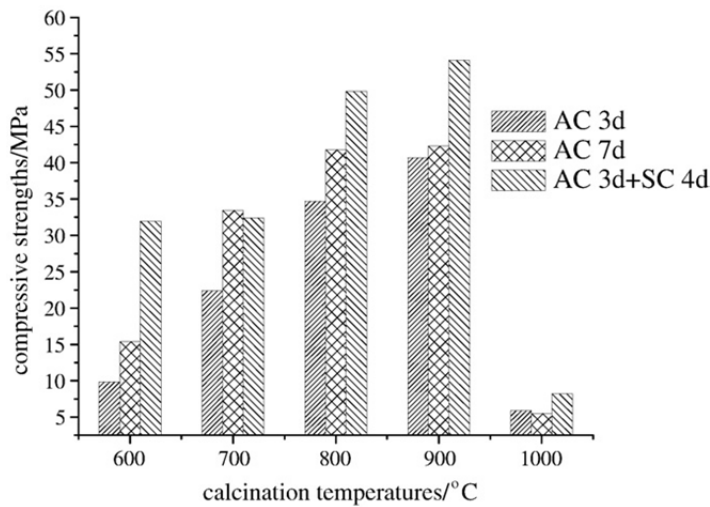
จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุประสานชนิดหนึ่งที่เกิดจากทำปฏิกิริยาทางเคมี โดยใช้วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีของธาตุที่อยู่ในรูปของอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ โดยจะถูกทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยสารอัลคาไลด์ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น ซึ่งจะใช้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการแข็งตัวได้เร็วยิ่งขึ้น โดยให้ความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 60-90 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามวัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ยังสามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติ ([Kumar and Kumar, 2011](#), [Somna et al., 2011](#)) แต่จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยทั่วไปแล้ว วัสดุตั้งต้นที่จะนำมาผลิตจีโอพอลิเมอร์ มักเตรียมขึ้นจากเถ้าลอย ([Guo et al., 2009](#), [Oh et al., 2012](#)) และดินขาวเผา ([Favier et al., 2013](#), [Kong et al., 2008](#)) เป็นหลัก อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันยังสามารถนำเอาวัสดุตั้งต้นชนิดอื่นๆ เข้าไปผสมในวัสดุหลัก เช่น เถ้าปาล์มน้ำมัน ([Ai et al. 2011](#)) และเถ้าแกลบ ([Riahi et al. 2012](#)) เป็นต้น

จีโอพอลิเมอร์สามารถประยุกต์ไปใช้ในงานต่างๆ เช่น งานเซรามิก คอมโพสิตไฟเบอร์ที่สามารถทนความร้อน และซีเมนต์คอนกรีต (Chang, 2009) เป็นต้น ในปัจจุบันจีโอพอลิเมอร์กำลังได้รับการพัฒนา และศึกษาสมบัติให้สามารถใช้งานถนน (van Dam and Thomas, 2010, Yeon et al., 2013, Abideng et al., 2013) ด้วยสมบัติทางวิศวกรรมที่ดี ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีโอกาที่จะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะทางด้าน การก่อสร้าง ดังนั้น ในอนาคตต้องมีการปฏิวัติอุตสาหกรรมโดยใช้จีโอพอลิเมอร์เข้ามาแทนที่ปูนซีเมนต์หรือวัสดุซีเมนต์อื่นๆ

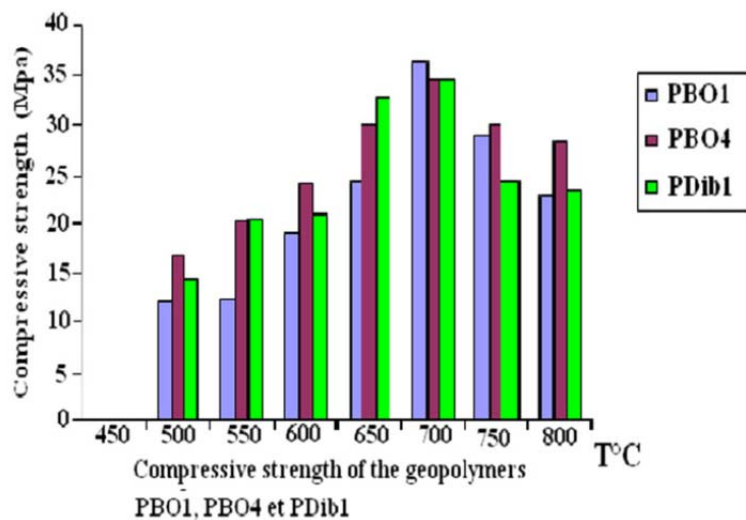
วัสดุตั้งต้น

1. ดินขาวเผา

Wang et al. (2005) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา โดยใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น ในการทดสอบใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 4-12 โมลาร์ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความเข้มข้นที่มีต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลอย่างมากต่อค่ากำลังอัด กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาจะเพิ่มขึ้นอย่างมากจากการใช้ความเข้มข้น 4-8 โมลาร์ เป็น 10-12 โมลาร์ Zuhua et al. (2009a) ได้ใช้ดินขาวเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยเน้นไปที่การเผาดินขาวที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 600-1000 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 1 (Zuhua et al., 2009a) แสดงว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1000 องศาเซลเซียส กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง เช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้านี้ (Zuhua et al. 2009b) ที่กำลังอัดได้ลดลงอย่างฉับพลัน ในขณะที่ Elimbi et al. (2011) ได้ศึกษาในลักษณะเดียวกัน โดยการเผาดินขาวที่อุณหภูมิ 450-800 องศาเซลเซียส เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:1 ทดสอบระยะเวลาก่อตัว การหดตัว และกำลังอัด ซึ่งในส่วนระยะเวลาก่อตัวนั้นที่ทุกอุณหภูมิไม่มีนัยสำคัญ แต่การหดตัวจะหดตัวน้อยลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง ด้านกำลังอัดให้ค่าที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสดังภาพที่ 2 (Elimbi et al., 2011)

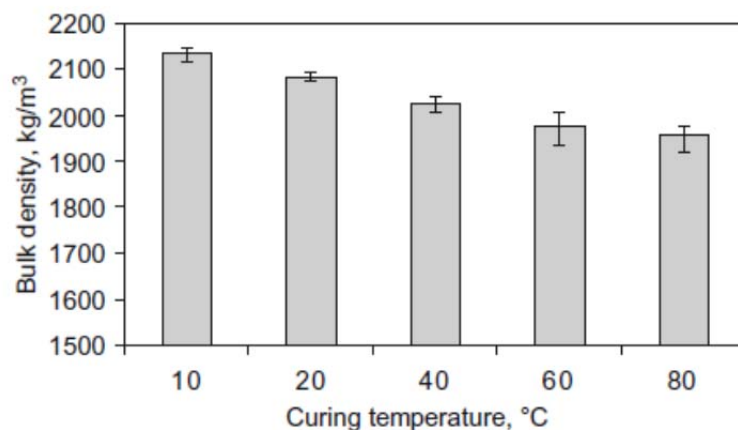


ภาพที่ 1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาที่อุณหภูมิเผาต่างกัน (Zuhua et al., 2009a)

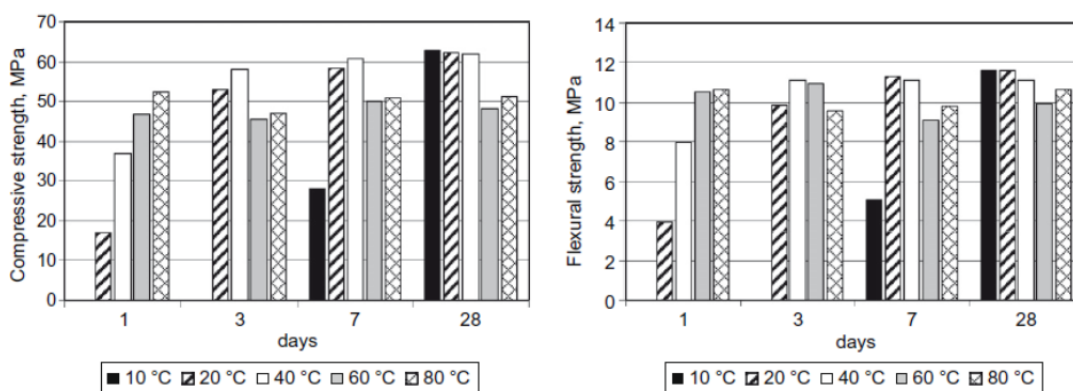


ภาพที่ 2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาที่อุณหภูมิเผาต่างกัน (Elimbi et al., 2011)

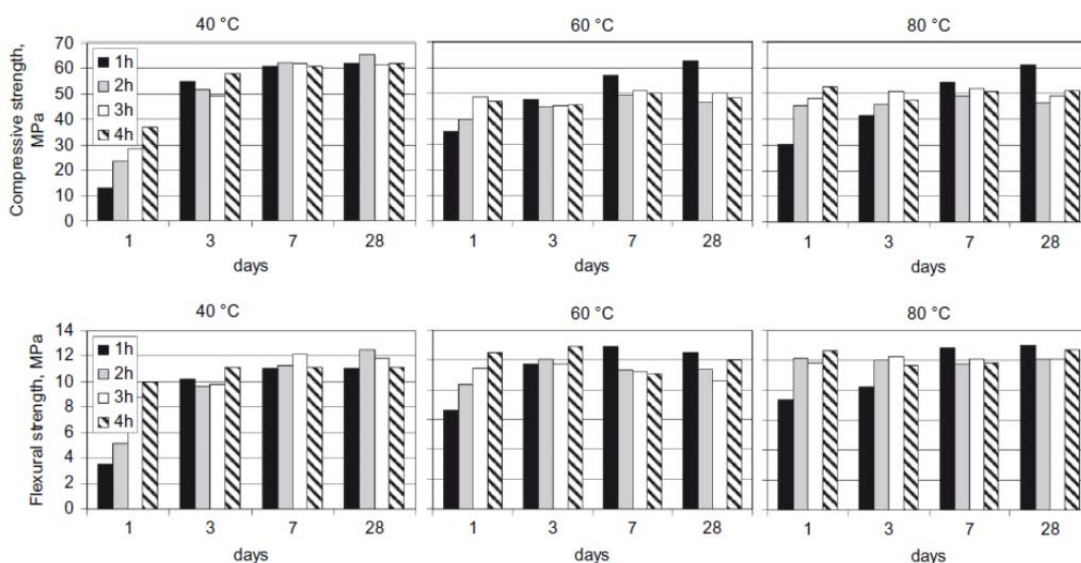
Rovnanik (2010) ได้ศึกษาผลกระทบจากการบ่มร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ดินขาวเผาเป็นวัสดุตั้งต้น โดยการทดสอบความหนาแน่น กำลังอัด กำลังดัดตั้งภาพที่ 3-5 และการกระจายรูโพรง (Pore) และโครงสร้างทางจุลภาค บ่มร้อนเป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า การบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส สามารถให้กำลังอัดและกำลังดัด ในระยะเวลาที่รวดเร็ว ในขณะที่การบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 20 และ 40 องศาเซลเซียส กำลังอัดและกำลังดัดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในส่วนของคุณค่าความหนาแน่นพบว่าการบ่มร้อนที่อุณหภูมิสูงค่าความหนาแน่นจะลดลงเรื่อยๆ Muniz-Villarreal et al. (2011) ได้ทดสอบเป็นการบ่มร้อนเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรก 2 ชั่วโมง บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ต่อด้วยการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 30-90 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้กำลังอัดได้ดีที่สุด



ภาพที่ 3 ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (Rovnanik, 2010)



ภาพที่ 4 การพัฒนากำลังอัดและกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มร้อนอุณหภูมิแตกต่างกันที่ระยะเวลา 4 ชม. (Rovnanik, 2010)



ภาพที่ 5 กำลังอัดและกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่มร้อนแตกต่างกัน (Rovnanik, 2010)

Yip et al. (2008) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการเพิ่มปริมาณแคลไซต์ (Calcite) และโดโลไมต์ (Dolomite) ในส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินขาวเผา ศึกษาบทบาทของไอออนแคลเซียม (Calcium ions) และไอออนคาร์บอเนต (Carbonate ions) ที่มีต่อกำลังอัดจากผลการทดสอบการเพิ่มร้อยละ 20 ของแคลไซต์และโดโลไมต์ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น แต่จะเป็นการเพิ่มการหดตัวในช่วง 90 วัน การเพิ่มขึ้นของแคลไซต์และโดโลไมต์มากกว่าร้อยละ 20 จะส่งผลกระทบต่อกำลังอัด สังเกตได้จากการไปกีดขวางการเกิดวุ้นจีโอพอลิเมอร์และลดปริมาณอะมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) อนุภาคสารตั้งต้นมีผลต่อปฏิกิริยาการเกิดวุ้นจีโอพอลิเมอร์เหนือกว่าความสัมพันธ์ด้านพื้นที่ผิว (Lee and Van Deventer, 2002)

2. เถ้าลอย

Hardjito et al. (2004a) ได้ทดสอบเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆ ว่าจะมีผลกระทบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้น โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น (activator) พอสรุปได้ว่า

1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ที่มีความเข้มข้นในหน่วยโมลาร์ จะมีผลทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น
2. อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น มีผลให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นเช่นกัน
3. อุณหภูมิที่บ่มควรอยู่ในช่วง 30-90 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นตามไปด้วย
4. ระยะเวลาในการบ่มร้อนในช่วง 6-96 ชั่วโมง มีผลทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น แต่การบ่มที่ 48 ชั่วโมง ขึ้นไปไม่ได้ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นมากนัก ในขณะที่ Davidovits ได้เสนอให้บ่ม 24-48 ชั่วโมง
5. การเพิ่มสารลดน้ำในปริมาณไม่เกินร้อยละ 2 ของน้ำหนักเถ้าลอย ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์ แต่จะมีผลน้อยมากต่อกำลังอัด
6. อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างน้ำต่อวัสดุตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง
7. กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไม่ขึ้นกับอายุบ่ม

การศึกษาผลกระทบจากเถ้าลอยที่มีต่อจีโอพอลิเมอร์ดังกล่าว โดยใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวก่อกัมมันต์นั้น โดยเน้นไปที่การทดสอบกำลังอัดเป็นหลัก พบว่าอายุบ่มไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มากนัก แต่ขณะเดียวกันพบว่าการบ่มที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานสามารถเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น นอกจากนั้นยังมีการทดสอบการเพิ่มสารลดน้ำเข้าไปเป็นส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ มีผลทำให้ความสามารถในการทำงานในขณะเหลวได้ดีขึ้น และยังตรวจพบอีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุตั้งต้นสูงขึ้นไปทำให้กำลังอัดลดลง Hardjito et al. (2008) กล่าวว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์

จากถั่วลันเตามีค่าเพิ่มขึ้น อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารละลายต่อวัสดุตั้งต้นควรจะอยู่ประมาณ 0.4 โดยน้ำหนัก และยิ่งกล่าวเพิ่มเติมอีกว่าอุณหภูมิในการบ่มที่สูงขึ้นจะมีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์จากการเกิดจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymerization) ในส่วนของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุตั้งต้นก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบของ [Hardjito and Tsen \(2008\)](#) ได้ทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากถั่วลันเตา แต่ได้ใช้โพแทสเซียมซิลิเกตและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นแทน จากผลการทดสอบพบว่าถึงแม้จะเปลี่ยนมาใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มาเป็นตัวกระตุ้น กำลังอัดก็จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเช่นเดียวกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นสูง กำลังอัดก็จะสูงตามไปด้วย ได้แนะนำอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมซิลิเกตต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ให้อยู่ในช่วง 0.8-1.5 จะสามารถให้กำลังอัดได้ดี

ในขณะที่ [Ravikumar et al. \(2010\)](#). ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวกระตุ้น ที่ความเข้มข้น 4, 6 และ 8 โมลาร์ และอัตราส่วนระหว่างตัวกระตุ้นกับวัสดุตั้งต้นที่ 0.4, 0.5 และ 0.6 ที่มีต่อกำลังอัด รูพรุน และโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ใช้ถั่วลันเตาประเภท C หรือตะกรันเตา เหล็กหลอมบดเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยศึกษาถึงอุณหภูมิระยะเวลาบ่ม จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นสารละลายที่เพิ่มขึ้นมีให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างตัวกระตุ้นกับวัสดุตั้งต้นที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.4 สอดคล้องกับการทดสอบของ [Hardjito et al. \(2008\)](#) ในส่วนของรูพรุนนั้นพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างตัวกระตุ้นกับวัสดุตั้งต้นมากขึ้น รูพรุนจะมีเพิ่มมากขึ้นทั้งถั่วลันเตาและตะกรันเตาเหล็กหลอมบด [Chindaprasirt et al. \(2007\)](#) ได้ศึกษาสมบัติพื้นฐาน ด้านความสามารถเทได้และกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตาที่มีแคลเซียมสูง ใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้น จากศึกษาพบว่าความสามารถในการไหลจะอยู่ในช่วงร้อยละ 105-140 และอัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ควรอยู่ที่ 0.67-1.0 ถึงจะให้กำลังอัดได้ดี จากการทดสอบนี้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สามารถให้ค่าได้สูงถึง 65 เมกะพาสคัล ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ [Chindaprasirt et al. \(2009\)](#). ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมและเปรียบเทียบจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ถั่วลันเตาและถั่วหนังกบด ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนเท่ากับ 1.5 และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์ โดยบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พร้อมทั้งได้ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ทั้งสองถั่วให้กำลังอัดสูงสุด 35 และ 18 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบปริมาณสารซิลิกา ว่าถั่วลันเตามีปริมาณซิลิกามากกว่าถั่วหนังกบด ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ เช่นเดียวกันกับการทดสอบก่อนหน้านี้ของ [Alvarez-Ayuso et al. \(2008\)](#) ที่ทำการทดสอบในลักษณะใกล้เคียงกันนี้ พบว่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 โมลาร์ ให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตาได้สูงสุดเช่นกัน

โดยทั่วไปการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาสมบัติในช่วงระยะเวลา 1, 7 และ 28 วัน โดยเฉพาะการศึกษาด้านกำลังอัด อย่างไรก็ตามมีนักวิจัยบางกลุ่มที่ทำการศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ในช่วงอายุต่ำกว่า 1 วัน เช่น [Criado et al. \(2010\)](#) ที่ทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตา ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วนต่างกัน และยังใช้โซเดียมซิลิเกตเข้าไปผสมบางส่วน ทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส จากผลการทดสอบพบว่าจีโอ

พอลิเมอร์ที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเดี่ยว (N) และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับโซเดียมซิลเฟต (NS) ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่อายุ 8 ชม. เช่นเดียวกันกับจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 85 ผสมกับโซเดียมซิลิเกตร้อยละ 15 (W15) และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 85 ผสมกับโซเดียมซิลิเกตร้อยละ 15 และผสมโซเดียมซิลเฟต (W15S) อย่างไรก็ตามหลังจาก 7 วัน กำลังอัดสูงอย่างมากเมื่อเทียบกับที่อายุ 8 ชม. ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณน้อย ผสมกับโซเดียมซิลิเกตปริมาณสูงทั้งที่เป็นแบบผสมและไม่ผสมโซเดียมซิลเฟต ต่างก็ให้กำลังอัดที่สูงในช่วงอายุ 8 ชม. ไปจนถึง 180 วัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอย (Criado et al., 2010)

ตัวอย่าง	กำลังอัด (เมกะพาสคัล)				
	8 ชม.	20 ชม.	7 วัน	28 วัน	180 วัน
NS	10.53	13.76	35.46	37.16	40.51
N	19.38	54.45	55.53	68.59	77.98
W15S	12.19	14.31	42.47	47.33	63.26
W15	16.43	48.15	56.11	65.33	73.72
W84S	45.38	54.96	57.66	67.57	69.27
W84	43.12	46.92	52.92	55.87	79.27

3. วัสดุอื่นๆ

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์ได้มีการขยายขอบเขตการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ นอกเหนือจากเถ้าลอยและดินขาว ไปเป็นวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น ทังสเทน (Tungsten) เหล็กปนนิเกิล (Ferronickel) เป็นต้น และยังได้ก้าวไปถึงการใช้วัสดุตั้งต้นมากกว่าหนึ่งชนิดในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดย Pacheco-Torgal et al. (2008) ได้ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากโคลนแร่ทังสเทน เพื่อเป็นซีเมนต์ชนิดใหม่ ซึ่งพบว่าให้กำลังอัดสูงในเวลาอันรวดเร็ว โดยการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH) และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นทดสอบสมบัติต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์ไม่ว่าจะเป็น การทดสอบความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว การหดตัว การดูดซึมน้ำและโมดูลัสความยืดหยุ่น ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสมบัติความชื้นเหลวและระยะเวลาก่อตัวไม่เป็นที่น่าพอใจเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ ในขณะที่สามารถป้องกันการดูดซึมน้ำได้ดี ในส่วนโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่าง Al/Si สูงขึ้น

การประยุกต์ใช้งาน

เทคโนโลยีจีโอพอลิเมอร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การนำไปใช้ในงานก่อสร้าง และซ่อมแซมผิวทางคอนกรีตดังภาพที่ 6 ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านนี้เริ่มนำมาใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศแล้ว ในส่วนของงานคอนกรีตสามารถใช้ในการก่อสร้างหรือซ่อมแซม บำรุงรักษาผิวทางคอนกรีต ทางหลวง สนามบิน เป็นต้น เนื่องจาก วัสดุจีโอ

พอลิเมอร์บางชนิด สามารถให้กำลังได้ในเวลาอันรวดเร็วขึ้นอยู่กับวัสดุตั้งต้น อัตราส่วนผสม ความเข้มข้นของสารละลาย (Hardjito et al., 2004, Wang et al., 2005, Alvarez-Ayuso et al., 2008, Prinya et al., 2009) และขั้นตอนวิธีการการผสม (Abideng et al., 2013a, Abideng et al., 2013b) สำหรับสมบัติทางด้านวิศวกรรมโดยทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์นั้น พบว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตหนึ่งเท่า ค่าของสมบัติต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกำลังอัด กำลังรับแรงดึง และโมดูลัสการแตกหักมีค่ามากกว่าสองเท่า เว้นแต่ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีค่าใกล้เคียงกัน (ชยธันว์, 2540) ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมในงานคอนกรีตเป็นอย่างดี ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ให้มีคุณภาพที่ดีนั้นมีตัวแปรหลายตัว เช่น ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่างๆ อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม ระยะเวลาก่อนการบ่ม ร้อน ระยะเวลาในการบ่ม เป็นต้น



ก) ก่อสร้างผิวทาง



ข) ซ่อมผิวทาง

ภาพที่ 6 การนำไปใช้ในงานก่อสร้างและซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต

ที่มา : ก) www.geopolymer.org

ข) www.transtechengg.com

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาคุณภาพของผิวทางทั้งที่เป็นแบบคอนกรีตและแอสฟัลต์คอนกรีตให้ดียิ่งขึ้นเพื่อการใช้งานที่เหมาะสมและมีอายุใช้งานได้นานกว่าผิวทางที่มีอยู่เดิม ทั้งนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา จึงทำให้นักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุผิวทางทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทยเอง ในต่างประเทศมีการศึกษาวิจัยคอนกรีตผิวทางถึงระดับนาโนเพื่อเป็นการปรับปรุงพัฒนาสมบัติทางวิศวกรรมให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานและสภาพภูมิประเทศ ในการบำรุงซ่อมแซมผิวทางคอนกรีตนั้น จำเป็นอย่างมากที่วัสดุประสานที่ใช้ต้องมีสมบัติความสามารถในการแข็งตัวที่รวดเร็ว อันจะมีผลต่อการเปิดการใช้ช่องจราจรที่รวดเร็ว ไม่ทำให้รถติดและเกิดอุบัติเหตุ วัสดุประสานที่ใช้ในการซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต เช่น คอนกรีตพอร์ตแลนด์ตัดแปรด้วยเขม่าซิลิกา (Microsilica-modified PC concrete), คอนกรีตซีเมนต์ผสมแมกนีเซียมฟอสเฟต

(Magnesium phosphate cement concrete), อีพอกซีมอร์ตาร์ (Epoxy mortar), ปูนซีเมนต์ผสมน้ำยางหรือพอลิเมอร์ดัดแปร (latex or Polymer-modified Cement), คอนกรีตผสมเมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate (MMA) concrete), คอนกรีตซีเมนต์แคลเซียมอะลูมิเนต (Calcium aluminate cement concrete) เป็นต้น วัสดุประสานเหล่านี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ พร้อมทั้งยังมีการปรับปรุงเพิ่มสมบัติอยู่ตลอดเวลา หรือแม้กระทั่งการนำปูนซีเมนต์ธรรมดาทั่วไป ไปพัฒนาปรับปรุงโดยการผสมสารเคมีบางชนิด อย่างเช่น **ณัฐสม (2546)** ทำการวิจัยการนำสารยึดหน่วงน้ำยาง (Latex Bonding Agents) สองชนิดผสมลงในมอร์ตาร์ ที่ปริมาณต่างๆ กันเพื่อใช้ในการซ่อมแซมคอนกรีตผิวทางที่เกิดจากความเสียหายของคอนกรีตเดิม แล้วศึกษาเปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆ ของมอร์ตาร์ดัดแปรด้วยน้ำยาง (Latex Modified Mortar) กับมอร์ตาร์ธรรมดาในเชิงวิศวกรรมโยธา จากการวิจัยพบว่า เมื่อทำการบ่มมอร์ตาร์ดัดแปรด้วยน้ำยาง จนอายุครบ 28 วัน ปรากฏว่ากำลังดึงและกำลังดัดของมอร์ตาร์ดัดแปรด้วยน้ำยาง มีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ปกติ แต่กำลังอัดของมอร์ตาร์ดัดแปรด้วยน้ำยางกลับต่ำกว่ามอร์ตาร์ปกติ

ในรัฐนิวเซาท์เวลส์ของประเทศออสเตรเลียได้กำหนดมาตรฐานวัสดุซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต (**Cement Concrete and Aggregate Australia, 2009**) โดยหน่วยงานทางถนนและการจราจรของรัฐนิวเซาท์เวลส์ (RTA) ไว้ดัง**ตารางที่ 2** ซึ่งจะเห็นได้ว่า RTA ได้กำหนดเกณฑ์ขั้นต่ำกำลังอัดของวัสดุที่จะนำไปใช้ในการซ่อมแซมผิวทางคอนกรีตที่อายุ 6 ชั่วโมง ไว้ที่ 5 เมกะพาสคัล ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปกติไม่สามารถให้กำลังอัดได้ และจะให้ค่ากำลังอัดที่ 24 ชั่วโมง (1 วัน) เท่ากับ 5 เมกะพาสคัล ซึ่งไม่เพียงพอที่จะเปิดผิวทางหลังจากซ่อมแซมภายในระยะเวลาที่รวดเร็ว ในขณะที่สำนักทางหลวงแห่งรัฐเท็กซัสของสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดสมบัติวัสดุซ่อมแซมผิวทางคอนกรีตแบบรวดเร็วพิเศษดัง**ตารางที่ 3** จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดพบว่าที่ 2 และ 4 ชั่วโมง วัสดุที่จะใช้ในการซ่อมแซมผิวทางคอนกรีตต้องมีกำลังอัดเท่ากับ 2,000 และ 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วหรือ (13.79 และ 27.60 เมกะพาสคัล ตามลำดับ)

ตารางที่ 2 ชนิดและลักษณะของวัสดุซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต (RTA, 2009)

วัสดุ	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	การหดตัว แบบแห้ง (ร้อยละ)	กำลังอัด (เมกะพาสคัล)				โวลูมิสความ ยืดหยุ่น (จีกะพาสคัล)	การซึม ผ่าน (ร้อยละ)
			1 ชม.	24 ชม.	3 วัน	28 วัน		
RTA spec			5 (6-h)	20	-	40	-	-
ปูนซีเมนต์คอนกรีต (Portland cement concrete)	5-32	0.025-0.05	0	5	20	35	26	90
ปูนซีเมนต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยไมโครซิลิกา (Microsilica-modified PC concrete)	5-32	0.025-0.05	-	25	30	50	28	60
แมกนีเนียมซีเมนต์คอนกรีต (Magnesium phosphate cement concrete)	-18-40	0.025-0.05	14	44	50	60	22	90
อีพอกซีมอร์ตาร์ (Epoxy mortar)	10-32	0.025-0.05	0	70	80	85	11	10
เมทิลเมตาไครเลตคอนกรีต (Methyl methacrylate (MMA) concrete)	-6-50	0.05-0.1	30	85	85	85	14	10
แคลเซียมอะลูมิเนียมซีเมนต์คอนกรีต (Calcium aluminate cement concrete)	20 30 50 70	0.025-0.05	40 (6-h)	70	77 78 55.5 34.5	-	คล้ายกับ ปูนซีเมนต์ คอนกรีต	ต่ำ

ตารางที่ 3 สมบัติของวัสดุซ่อมแซมผิวทางคอนกรีตแบบรวดเร็วพิเศษ (www.txdot.gov)

สมบัติ	ความต้องการ	การทดสอบ
กำลังต้านแรงดึงแยก Splitting Tensile Strength, psi, min.	400 ที่ 24 ชม.	ASTM C496
แรงเฉือนแนวเฉียง Slant Shear, psi, min.	2,000 ที่ 1 วัน	ASTM C882
การหดตัว Shrinkage, %, max.	0.07 ที่ 28 วัน	ASTM C157
ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวจากความร้อน Coefficient of Thermal Expansion, micro strain /°F, max.	6.0 ที่ 28 วัน	Tex-428-A
กำลังอัด (ทรงกระบอกขนาด 4x8 นิ้ว) Compressive Strength using 4"x8" cylinders, psi, min.	2,000 ที่ 2 ชม. 4,000 ที่ 4 ชม.	ASTM C39

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมและระยะเวลาบ่มร้อนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีผลต่อกำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง การขยายตัวเนื่องจากโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต และการยึดหยุ่นระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติ
2. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ให้กำลังอัดในระยะเวลารวดเร็ว
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนผสมและระยะเวลาบ่มร้อนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค (SEM) องค์ประกอบแร่ (XRD) องค์ประกอบทางเคมี (XRF) และหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)
4. เพื่อหาอัตราส่วนผสมและระยะเวลาบ่มร้อนที่เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาด้านราคา ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสมบัติทางวิศวกรรมที่จะนำไปใช้ซ่อมผิวทางคอนกรีต

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงอัตราส่วนผสม ระยะเวลาบ่มร้อนและกระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์ต่อสมบัติทางกล ทางกายภาพและความทนทาน
2. ทำให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุซ่อมผิวทางคอนกรีต

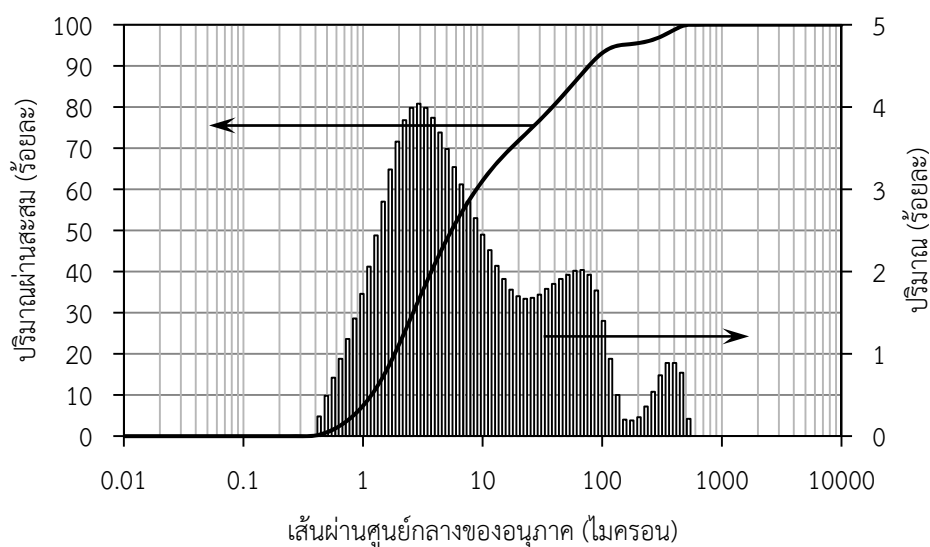
ผลการทดสอบและการอภิปราย

ในบทนี้กล่าวถึงอิทธิพลของการใช้เถ้าเฝ้ายางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา ต่อกำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต และการทดสอบการยึดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์กับปูนซีเมนต์ปกติ พร้อมทั้งผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบแร่ องค์ประกอบทางเคมี และผลการทดสอบห่มู่ ฟังซันก์ และยังคงกล่าวถึงความสัมพันธ์ต่างๆ ระหว่างผลการทดสอบ

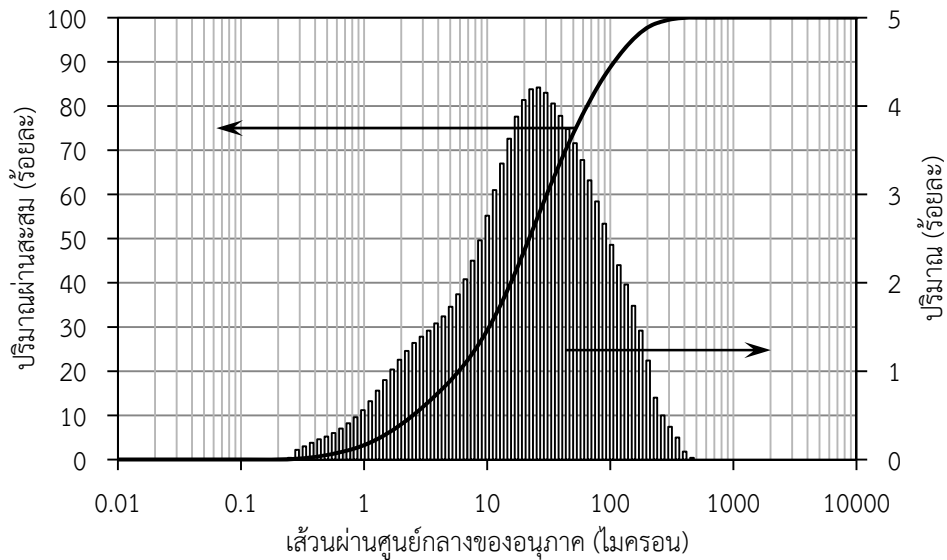
สมบัติของดินขาวเผา เถ้าเฝ้ายางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน

สมบัติทางกายภาพ

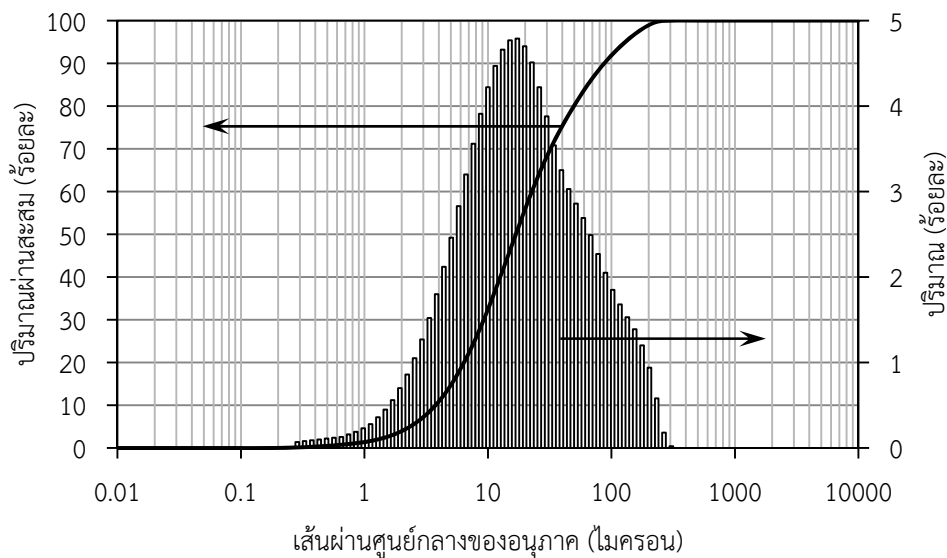
ผลการทดสอบการกระจายขนาดของดินขาวเผา (MK) เถ้าเฝ้ายางพารา (PWA) และเถ้าปาล์มน้ำมัน (OPA) ดังแสดงในภาพที่ 7, 8 และ 9 ตามลำดับ และตารางที่ 4 ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้ผ่านบดละเอียด พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคของดินขาวเผา เถ้าเฝ้ายางพารา และเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งเส้นกราฟของเถ้าเฝ้ายางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันที่ต่ำกว่าดินขาวเผา (Abideng et al., 2013) โดยพบว่าดินขาวเผามีอนุภาคเฉลี่ย 6.31 ไมครอน พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 13.61 ตารางเมตรต่อกรัม



ภาพที่ 7 การกระจายขนาดอนุภาคดินขาวเผา



ภาพที่ 8 การกระจายขนาดอนุภาคเถ้าไม้ยางพารา



ภาพที่ 9 การกระจายขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน

และมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมครอน ร้อยละ 82 ซึ่งมากกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C618 ที่ยอมให้ค้ำบนตะแกรง 325 เมช ไม่เกินร้อยละ 34 ในส่วนของเถ้าไม้ยางพารา นั้น พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 25.13 ไมครอน ขนาดใหญ่กว่าดินขาวเผาประมาณ 4 เท่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 8.71 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมครอน ร้อยละ 71 และเช่นเดียวกันกับเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ที่มีอนุภาคเฉลี่ย 19.30 ไมครอน พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 13.06 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมครอน ร้อยละ 78 จากการทดสอบเป็น

ที่น่าสังเกตว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวเผาและเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะไปได้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีรูพรongจำนวนมากกว่าดินขาวเผา นำมาซึ่งการมีพื้นที่ผิวมากขึ้น

องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิค X-ray fluorescence; XRF ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 พบว่าดินขาวเผามี ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 50.30 และ 41.02 ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าไม้ยางพารามีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และโพแทสเซียมไดออกไซด์ (K_2O) เป็นองค์ประกอบหลัก มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 41.19 และ 16.11 ตามลำดับ ซึ่งเถ้าไม้ยางพาราไม่จัดอยู่ในวัสดุพอลิไซลิกาน

ตารางที่ 4 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของดินขาวเผา เถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน

ออกไซด์	ดินขาวเผา	เถ้าไม้ยางพารา	เถ้าปาล์มน้ำมัน
SiO_2	50.30	2.57	38.37
Al_2O_3	41.02	0.53	1.48
Fe_2O_3	1.05	0.56	3.01
CaO	0.33	41.19	13.84
TiO_2	1.50	-	0.21
MgO	-	4.52	3.00
K_2O	4.08	16.11	14.09
P_2O_5	-	3.06	4.15
SO_3	-	5.54	1.42
Cl	-	0.82	-
MgO_2	-	1.36	-
LOI	1.72	23.74	20.43
สมบัติทางกายภาพ			
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.) BET	13.61	8.71	13.06
ขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน (ร้อยละ)	82	71	78
d_{10}	1.35	2.86	4.32
d_{50}	6.31	25.13	19.30
d_{90}	88.80	123.45	100.11

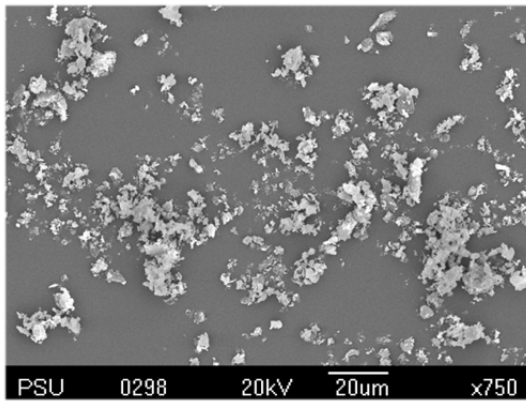
(ASTM C618) ในส่วนขององค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน คือซิลิกอนไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และโพแทสเซียมไดออกไซด์ ซึ่งมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 38.37, 13.84 และ 14.09 ตามลำดับ จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันนี้จัดอยู่ในเถ้าที่มีแคลเซียมออกไซด์สูง และผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับร้อยละ 42.86 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 50 ตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังนั้น เถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ไม่จัดอยู่ในวัสดุปอซโซลานเช่นกัน

โครงสร้างทางจุลภาค

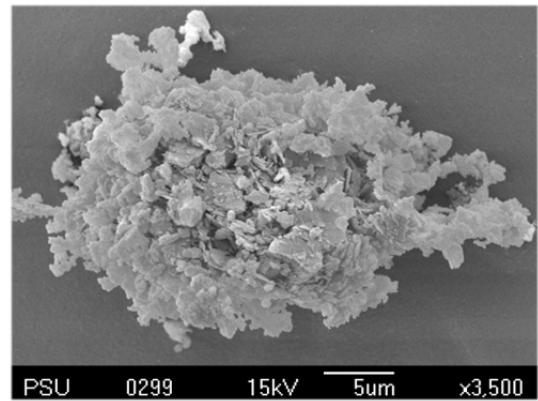
รูปร่างลักษณะของดินขาวเผา เถ้าไม้ยางพารา และเถ้าปาล์มน้ำมัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope; SEM ภาพถ่ายกำลังขยายสูง ดังในภาพที่ 10-12 ตามลำดับ ภาพที่ 10 พบว่าอนุภาคของดินขาวเผาหลังจากบดละเอียด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) เมื่อเพิ่มกำลังขยายมากขึ้นพบว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นแผ่นๆ เกะก้าง กลุ่มก้อนดังภาพที่ 10ข) ในขณะที่พื้นผิวอนุภาคของดินขาวเผา มีลักษณะเป็นแผ่นเรียงซ้อนๆ กันดังภาพที่ 10ค)

ภาพที่ 11 รูปร่างลักษณะของเถ้าไม้ยางพารา ที่มีรูปร่างไม่แน่นอนมีทั้งที่เป็นกลมมน ทั้งที่เป็นเหลี่ยมปะปนกันอยู่ มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับดินขาวเผา โดยเมื่อพิจารณาไปที่พื้นผิวพบว่าเถ้าไม้ยางพารา มีลักษณะพื้นผิวที่ผิวกลมมนคล้ายเม็ดทราย กรวดที่มีขนาดไม่เท่ากันเรียงตัวกันอยู่ดังภาพที่ 11ข)

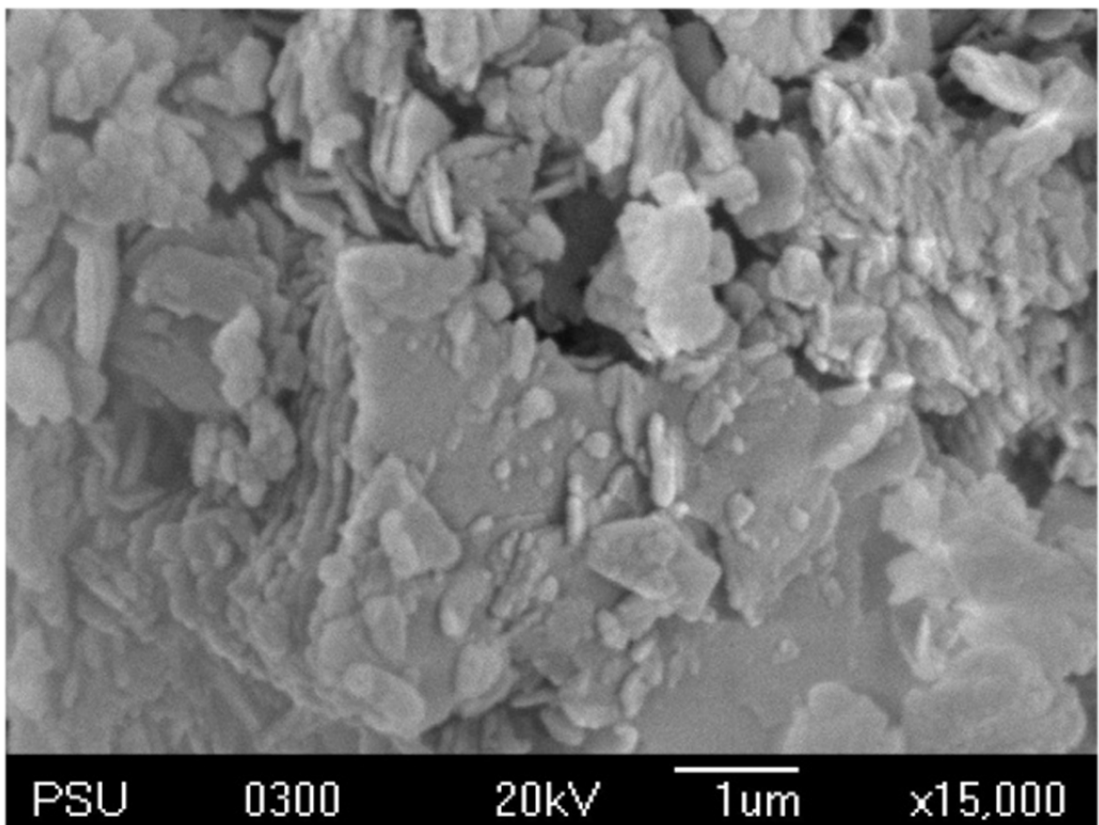
ภาพที่ 12 รูปร่างลักษณะของเถ้าปาล์มน้ำมัน รูปร่างส่วนใหญ่จะเป็นไปในลักษณะกลมมน และมีขนาดใหญ่มากกว่าดินขาวเผาแต่เล็กกว่าเถ้าไม้ยางพารา โดยเมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูง จะพบว่าที่บริเวณพื้นผิวของเถ้าปาล์มน้ำมันดังภาพที่ 12ค) มีลักษณะคล้ายคลึงกับทราย และกรวดอยู่ปะปนกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งการที่ผิวของเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเช่นนี้ส่งผลให้เถ้าปาล์มน้ำมันมีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกับดินขาวเผา ทั้งที่เถ้าปาล์มน้ำมันมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าดินขาวเผา ดังตารางที่ 4



ก) การกระจายตัว

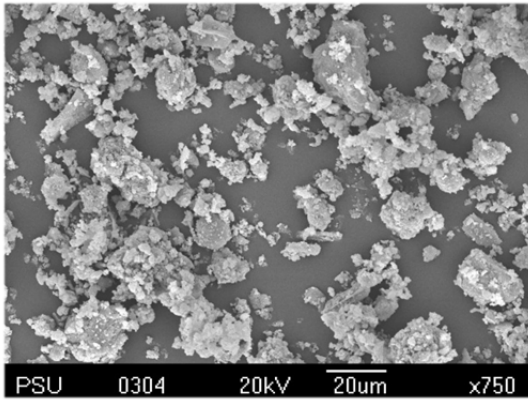


ข) รูปร่าง

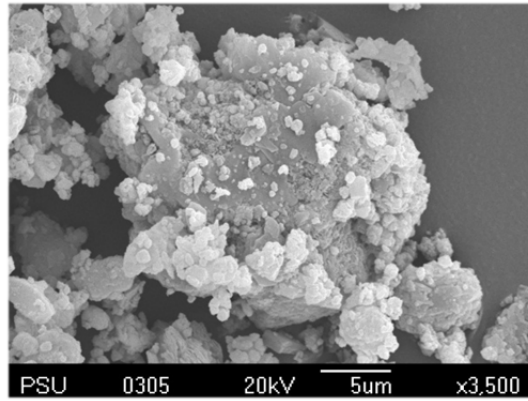


ค) ลักษณะพื้นผิว

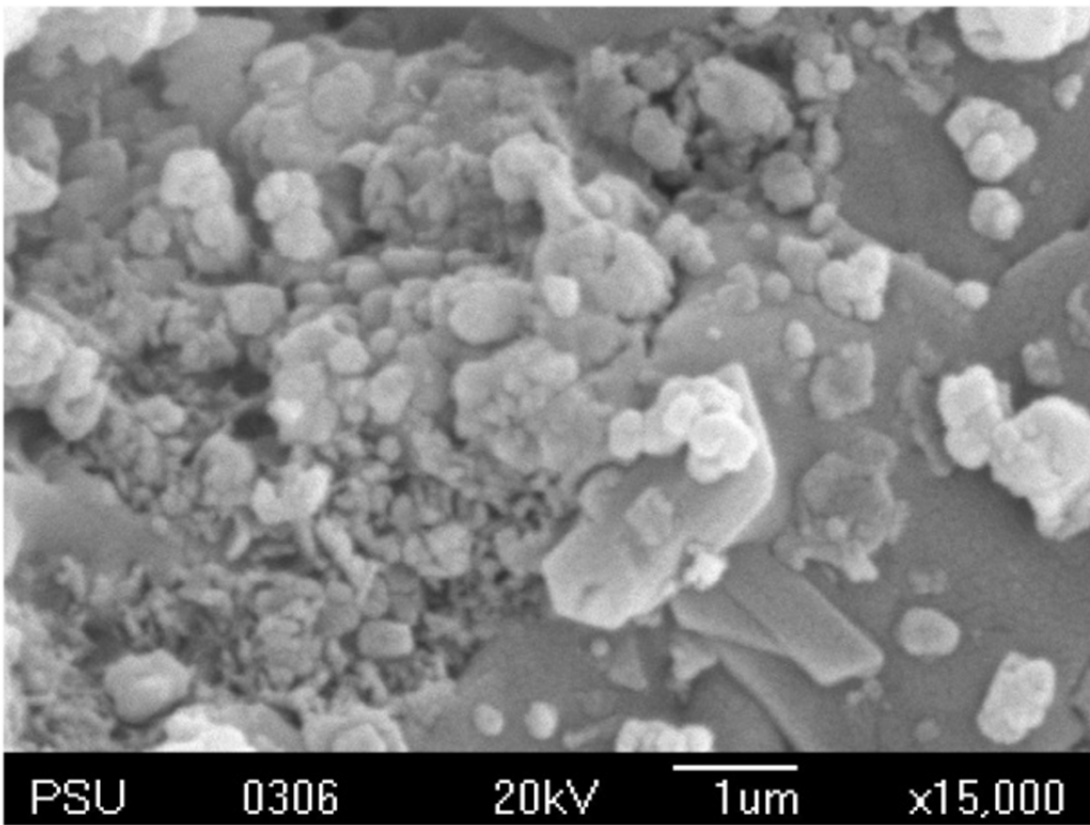
ภาพที่ 10 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคดินขาวเผา



ก) การกระจายตัว

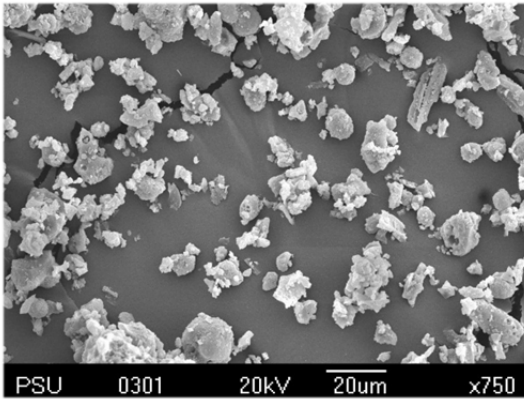


ข) รูปร่าง

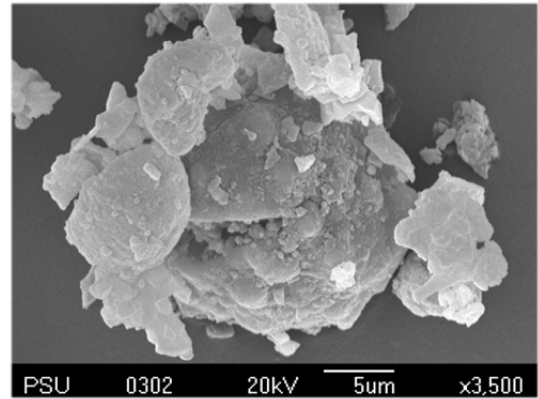


ค) ลักษณะพื้นผิว

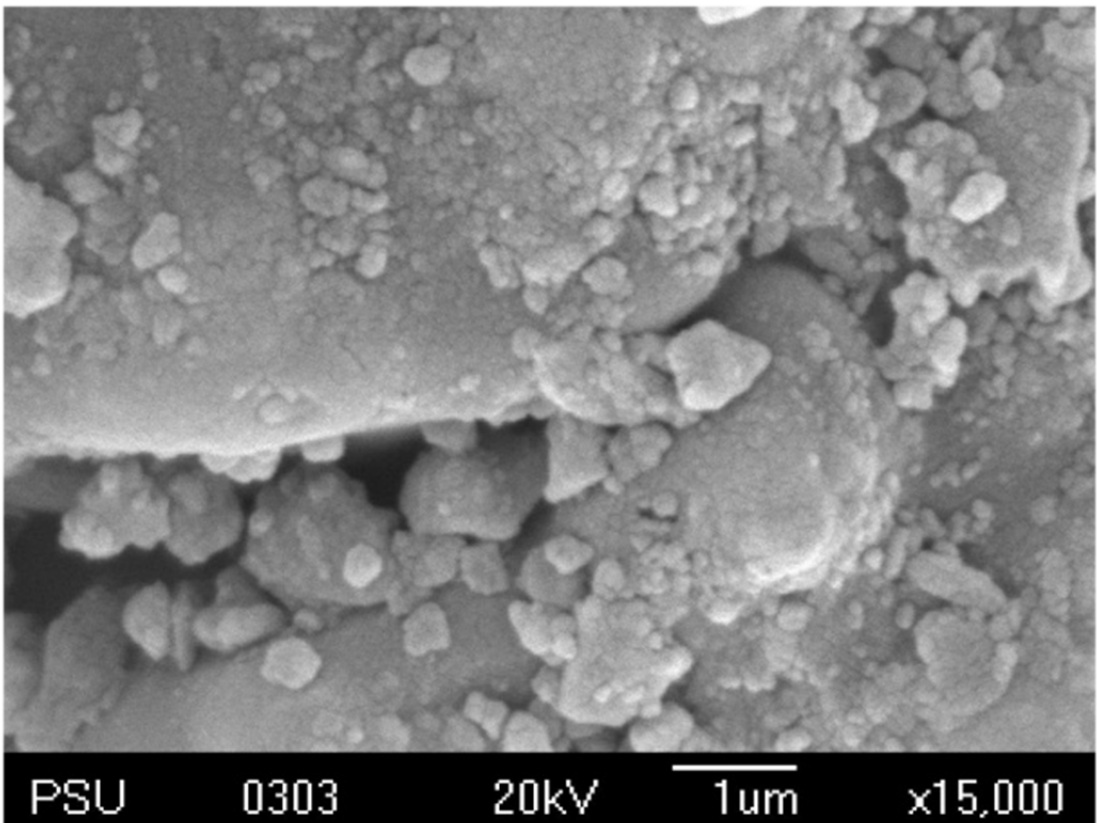
ภาพที่ 11 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคเก้าไม้ยางพารา



ก) การกระจายตัว



ข) รูปร่าง



ค) ลักษณะพื้นผิว

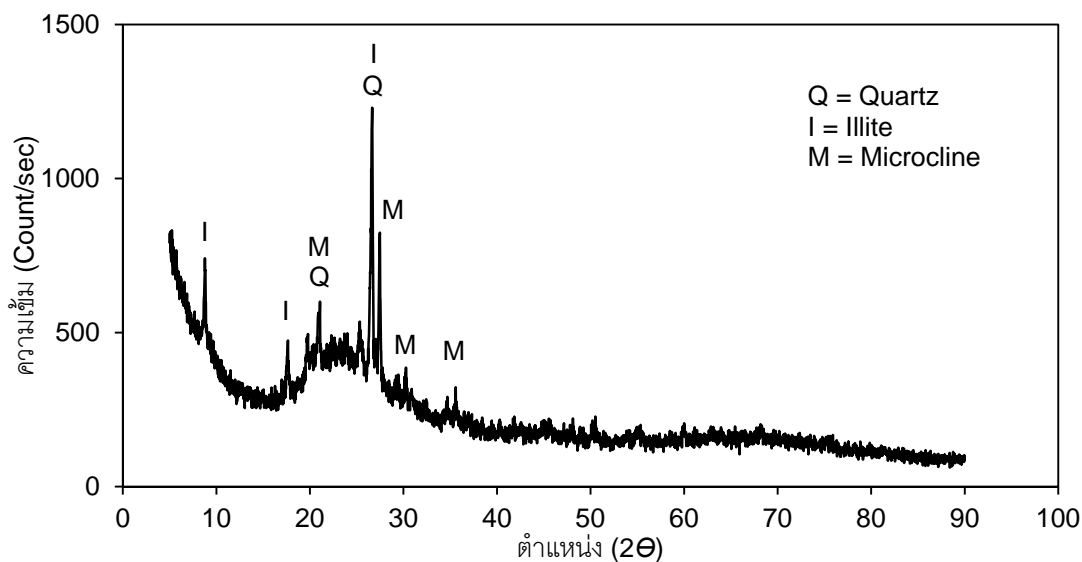
ภาพที่ 12 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน

องค์ประกอบแร่

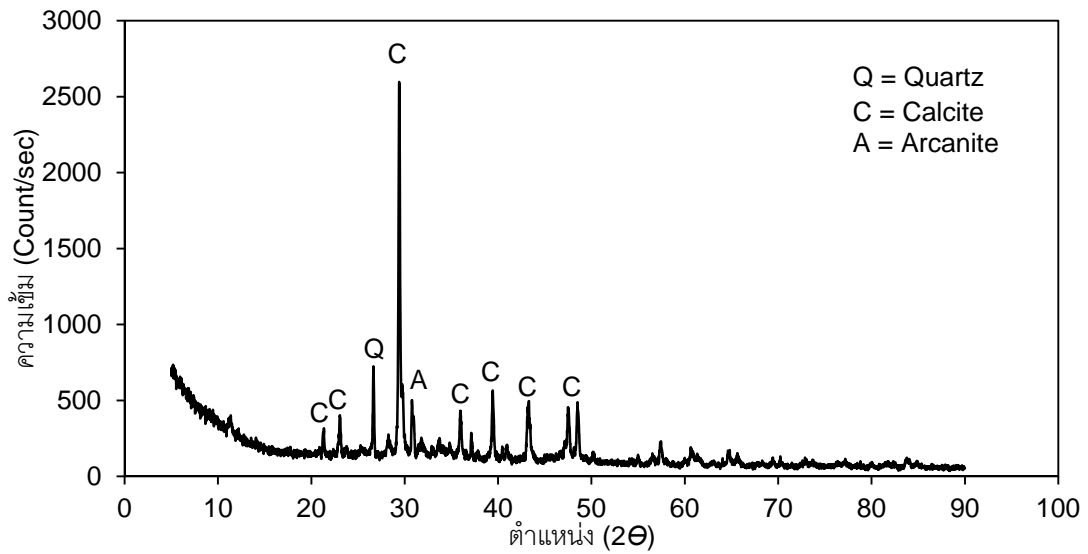
การทดสอบโครงสร้างจุลภาคทางอณูฐานวิทยาของดินขาวเผา เถ้าไม้ยางพารา และเถ้าปาล์มน้ำมันโดยเทคนิค X-ray diffraction; XRD ดังภาพที่ 13-15 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของดินขาวเผาดังภาพที่ 13 พบว่าดินขาวเผา มีเฟสของผลึกควอตซ์ (Quartz; SiO_2) อิลไลต์ (Illite; $\text{Al}_2\text{SiO}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$) และไมโครไคลน์ (Microcline; KAlSi_3O_8) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังพบพิกัดลักษณะฐานกว้างอยู่ในช่วง 15-30 (2θ) แสดงถึงความเป็นอณูฐานของดินขาวเผา ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับเถ้าลอยจากการตรวจสอบของ อุดลักษ์ณ์ และ ปริญา (2554)

ภาพที่ 14 โครงสร้างจุลภาคทางอณูฐานวิทยาของเถ้าไม้ยางพารา พบว่ามีเฟสของผลึกควอตซ์ แคลไซต์ (Calcite; CaCO_3) และอาคาไนต์ (Arcanite; K_2SO_4) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยไม่พบพิกัดในลักษณะฐานกว้างเหมือนกับที่พบในดินขาวเผา อย่างไรก็ตามจากภาพจะพบว่าช่วงของพิกัดที่ชัดเจนอยู่ในช่วง 20-50 (2θ)

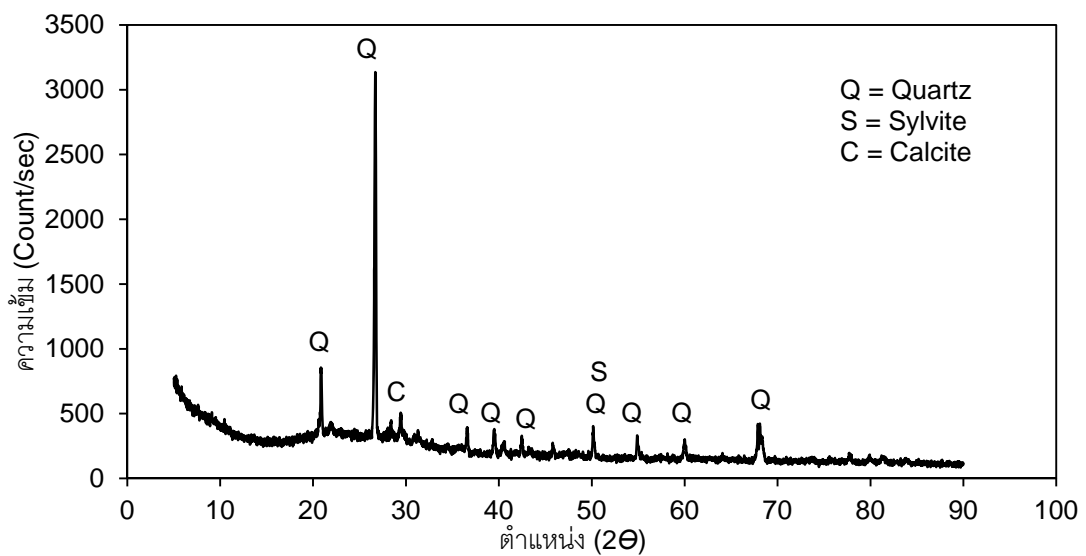
ภาพที่ 15 ในส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่ามีเฟสของผลึกควอตซ์ แคลไซต์ และซิลไวต์ (Sylvite; KCl) เป็นองค์ประกอบหลัก มีลักษณะคล้ายกับเฟสของเถ้าไม้ยางพารา ทั้งเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันพบเฟสของแคลไซต์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบวิเคราะห์ XRF



ภาพที่ 13 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินขาวเผา



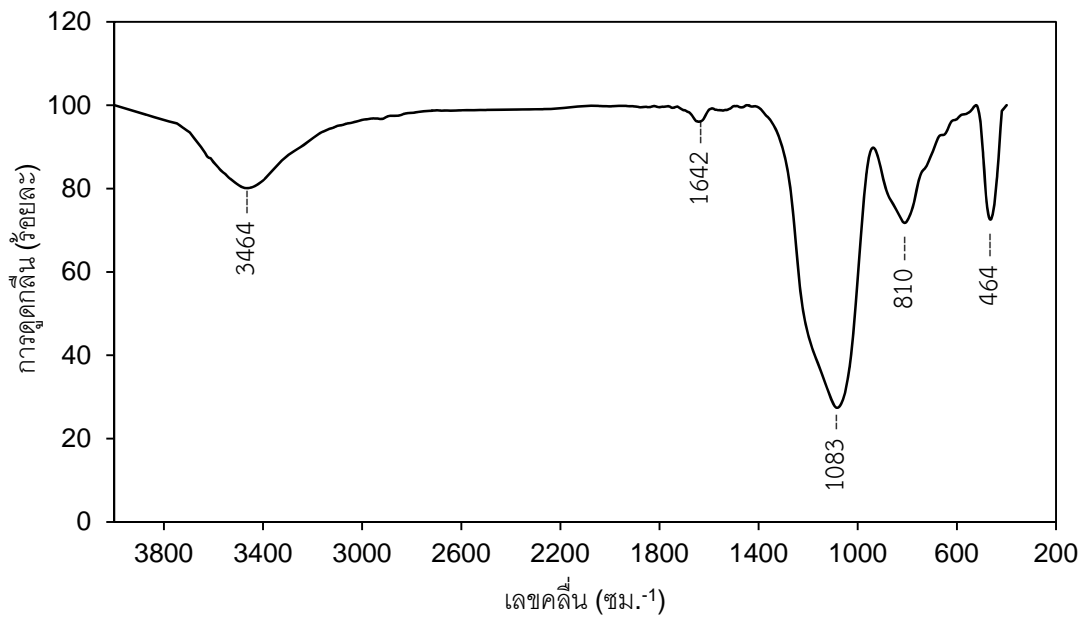
ภาพที่ 14 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่ของถ้ำไม้ยางพารา



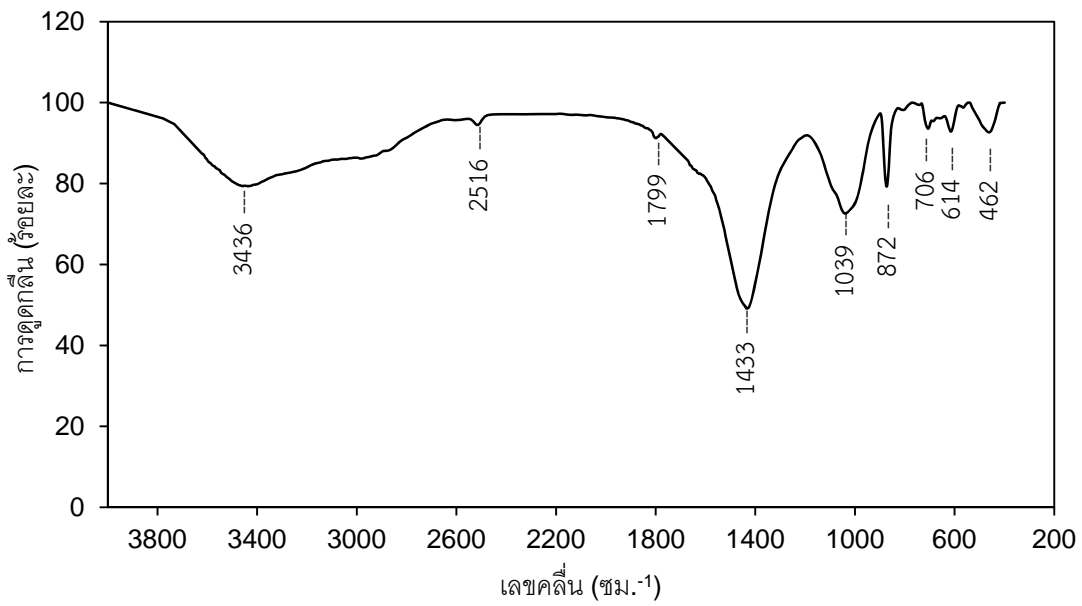
ภาพที่ 15 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่ของถ้ำปาล์มน้ำมัน

หมู่ฟังก์ชัน

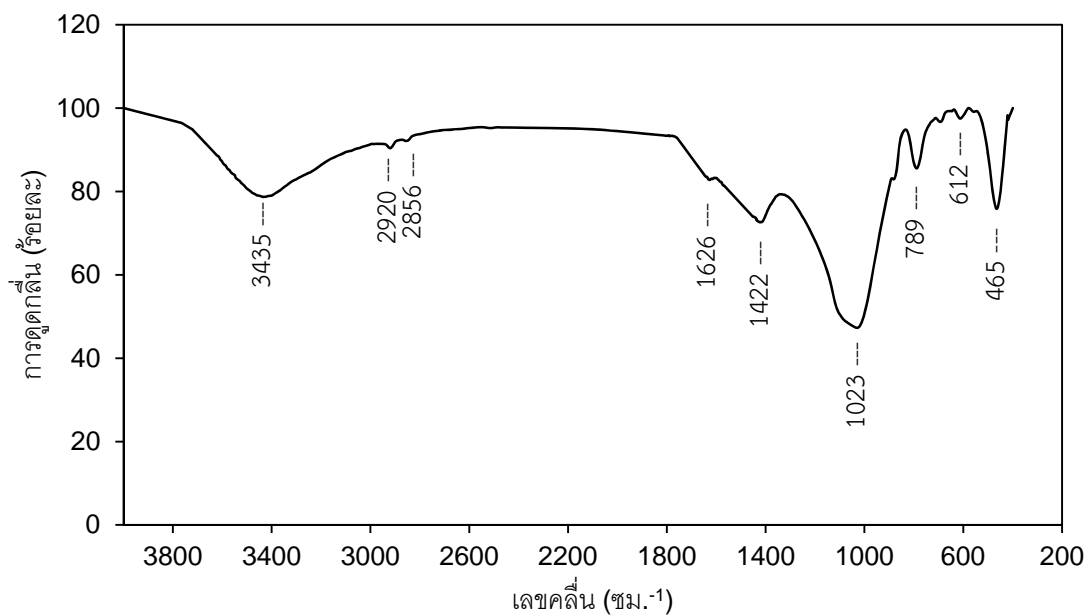
การหาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบ โดยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR ใช้เลขคลื่น (Wave number) ในช่วง $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ ของดินขาว เถ้าไม้ยางพารา และถ้ำปาล์มน้ำมันดังภาพที่ 16-18 ตามลำดับ ภาพที่ 16 แสดงเส้นรูปแบบการดูดกลืนของดินขาวเถ้า โดยได้แสดงพีก (Peak) ที่เด่น (Very strong) อยู่ที่สเปกตรัม 1083 และ 464 cm^{-1} ที่สอดคล้องกับการสั่น (Vibration) ของพันธะโมเลกุล Si-O ซึ่งความถี่



ภาพที่ 16 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของดินขาวเผา



ภาพที่ 17 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเถาไม้ยางพารา



ภาพที่ 18 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเถ้าปาล์มน้ำมัน

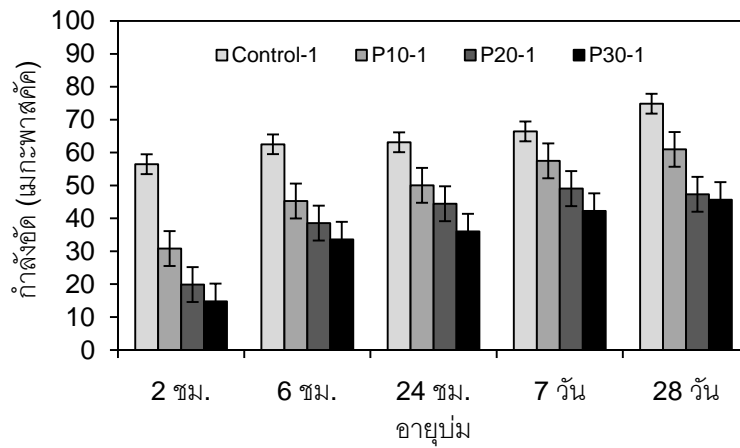
ของการสั่นอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับการศึกษาของ [van Jaarsveld et al. \(2003\)](#) และ [Zhang et al. \(2008\)](#) ในส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันมีสเปกตรัม 1030 ซม.⁻¹ ซึ่งเป็นพีคของพันธะที่อยู่ในกลุ่ม Si-O แบบยืด-งอ (Stretching) โดยมีการสลับกับพันธะ Al-O และที่สเปกตรัม 789 ซม.⁻¹ แสดงให้เห็นถึงพันธะในกลุ่ม Si-O-Al โดยการวิเคราะห์เถ้าปาล์มน้ำมันครั้งนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานของ [Yin et al. \(2008\)](#) ดังภาพที่ 18 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงเถ้าไม้ยางพาราพบว่ามีพีคของพันธะ Si-O อยู่ที่สเปกตรัม 1039 ซม.⁻¹ ซึ่งไม่ใช่พีคที่โดดเด่นที่สุด โดยพีคที่เด่นที่สุดของเถ้าไม้ยางพาราอยู่ที่สเปกตรัม 1433 ซม.⁻¹ ซึ่งเป็นพันธะ C-H ดังภาพที่ 17

กำลังอัด

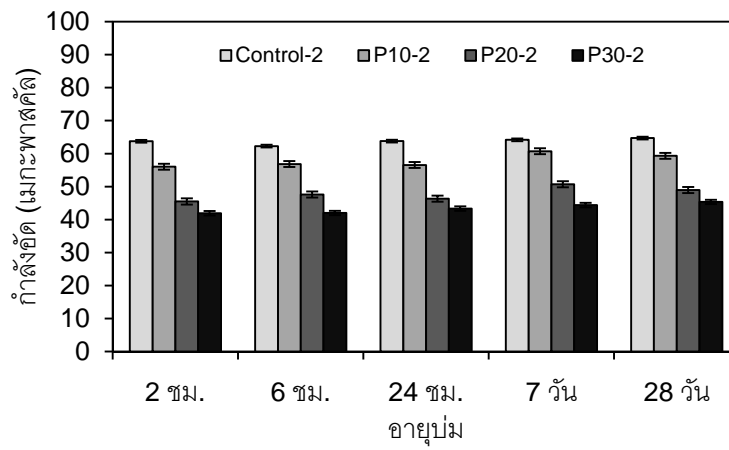
กำลังอัดเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่สำคัญของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกำลังอัดระยะเริ่มต้นเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมถนนคอนกรีต ให้สามารถเปิดการใช้งานได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม สำหรับจีโอพอลิเมอร์นั้นค่ากำลังอัดที่แตกต่างกันนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิในการบ่ม อัตราส่วนผสมต่างๆ และรวมไปถึงขั้นตอนและวิธีการผสม เป็นต้น โดยระยะเวลาบ่มที่อุณหภูมิห้องของจีโอพอลิเมอร์ที่แสดงดังต่อไปนี้ไม่ได้รวมระยะเวลาในการบ่มร้อนเข้าไปด้วย

อิทธิพลของเถ้าไม้ยางพารา

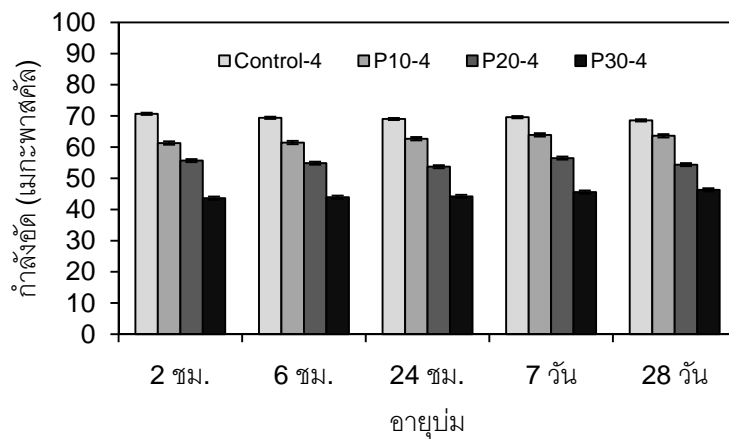
ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการผสมเถ้าไม้ยางพาราเข้าไปแทนที่ดินขาวเผาบางส่วนเป็นปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยใช้การบ่มร้อนด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หลังจากหุ้มด้วยพลาสติกไวนิล (Vinyl film) โดยการพันรอบๆ แบบหลอให้ทั่วเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำระเหยออกในตู้อบบ่มร้อนในตู้อบ ทำการบ่มร้อนที่ระยะเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 2, 6, 25 ชั่วโมง และ 28 วัน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 19 จากภาพจะพบว่ากำลังอัดจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นในทุกระยะเวลาบ่มร้อน เช่น ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว (Control-1) ที่สูงถึง 56.46 และ 74.87 เมกะพาสคัล ที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อย 30 (P30-1) ได้ค่ากำลังอัดลดลงไม่ว่าที่อายุ 2 ชั่วโมง หรือ 28 วัน ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 14.78 และ 45.65 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราไม่ว่าที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 หรือ 4 ชั่วโมง ค่ากำลังอัดได้ลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ระยะเวลาบ่มร้อนที่ 1, 2 และ 4 ชั่วโมงนั้น มีค่าแตกต่างกันที่เกิดจากอิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน ซึ่งจะอธิบายในหัวข้ออิทธิพลเนื่องจากระยะเวลาบ่มร้อน จากผลการทดสอบนี้จึงเห็นได้ว่าเถ้าไม้ยางพารามีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักมากถึงร้อยละ 41.19 โดยน้ำหนัก ซึ่งแคลเซียมออกไซด์ส่งผลทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์จะใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) เป็นองค์ประกอบหลัก และใช้ Na₂O จากสารละลาย ด้วยผลการทดสอบนี้มีแนวโน้มคล้ายคลึงกันของการศึกษาของ Winnefeld et al. (2010) ว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยที่ปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงมีค่ากำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์ปริมาณน้อย เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยที่แคลเซียมออกไซด์สูงทำปฏิกิริยาได้ไม่ดีกับด่างที่ใช้เป็นตัวกระตุ้น และ Temuujin et al. (2009) รายงานว่าจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยที่แทนที่ด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) โดยการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง ในอีกแง่หนึ่งค่ากำลังอัดที่ลดลงของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารานั้น เนื่องมาจากขนาดของเถ้าไม้ยางพาราที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าดินขาวเผาดังแสดงไว้ในภาพที่ 7 และตารางที่ 4 ซึ่งขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่ามีผลทำให้เถ้าไม้ยางพารามีพื้นที่ผิวน้อย ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการทำปฏิกิริยาได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า



ก) ป้อนร้อน 1 ชั่วโมง



ข) ป้อนร้อน 2 ชั่วโมง

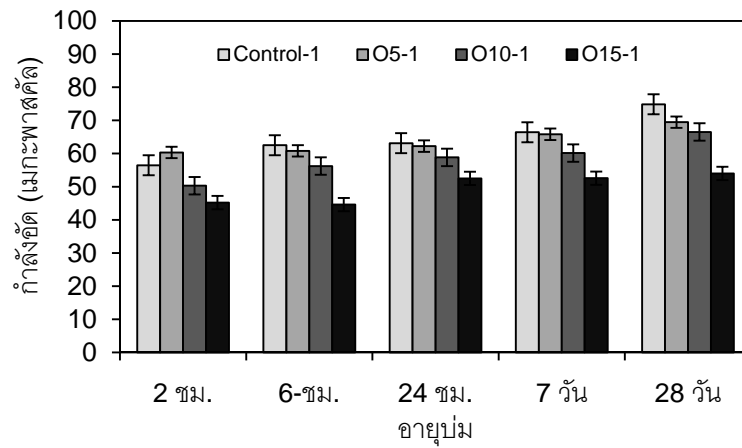


ค) ป้อนร้อน 4 ชั่วโมง

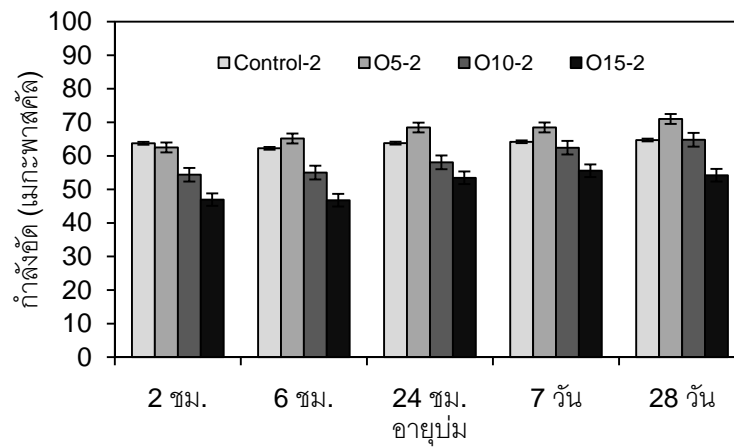
ภาพที่ 19 ก้างัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราในระดับต่างๆ (ร้อยละ 10-30)

อิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมัน

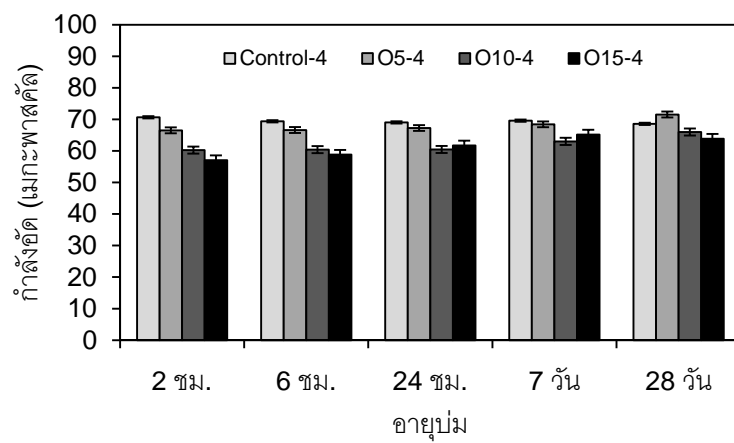
การผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเข้าไปแทนที่ดินขาวเผาบางส่วนเป็นปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยใช้การบ่มร้อนด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หลังจากหุ้มด้วยพลาสติกไวไนล โดย การพันรอบๆ แบบหล่อย่างมิดชิดเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำระเหยออกในตู้อบร้อนในตู้อบ ทำการบ่ม ร้อนที่ระยะเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 2, 6, 25 ชั่วโมง 7 และ 28 วัน เช่นเดียวกันกับการทดสอบจีโอพอลิเมอร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพารา ดังแสดงไว้ในภาพที่ 20 จาก ภาพจะพบว่ากำลังอัดได้ลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นในทุกระยะเวลาบ่มร้อน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่บางส่วนร้อยละ 10 และ 15 เช่น ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว (Control-1) ที่สูงถึง 56.46 และ 74.87 เมกะพาสคัล ที่บ่มใน อากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อทำการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบางส่วนร้อยละ 15 (O15-1) ทำให้ค่ากำลังอัดลดลงไม่ว่าที่อายุ 2 ชั่วโมง หรือ 28 วัน ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 45.20 และ 54.00 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราไม่ว่าที่ ระยะเวลาบ่มร้อน 2 หรือ 4 ชั่วโมง ค่ากำลังอัดก็ลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น จากผลการ ทดสอบนี้จะเห็นได้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่ประมาณร้อยละ 13.84 โดย น้ำหนัก ซึ่งถือว่าเป็นเถ้าที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง มีผลทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามการแทนที่บางส่วน ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก นั้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ได้กำลังอัดที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ที่ได้จากดินขาวเผาอย่างเดียว เนื่องจากว่าเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นมีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 38.76 โดย น้ำหนัก ซึ่งจะมีผลต่อการทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ที่ต้องใช้ SiO_2 และ Al_2O_3 จากวัสดุตั้งต้นเป็น หลัก อย่างไรก็ตามค่าความแตกต่างของ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่จะมีผลต่อกำลังอัด จะมีการอธิบายใน หัวข้ออิทธิพลเนื่องมาจาก SiO_2 และ Al_2O_3 ดังนั้นจากผลการทดสอบครั้งนี้จะเห็นได้ว่าการแทนที่ด้วย เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลังอัดดีที่สุด



ก) ปมร้อน 1 ชั่วโมง



ข) ปมร้อน 2 ชั่วโมง

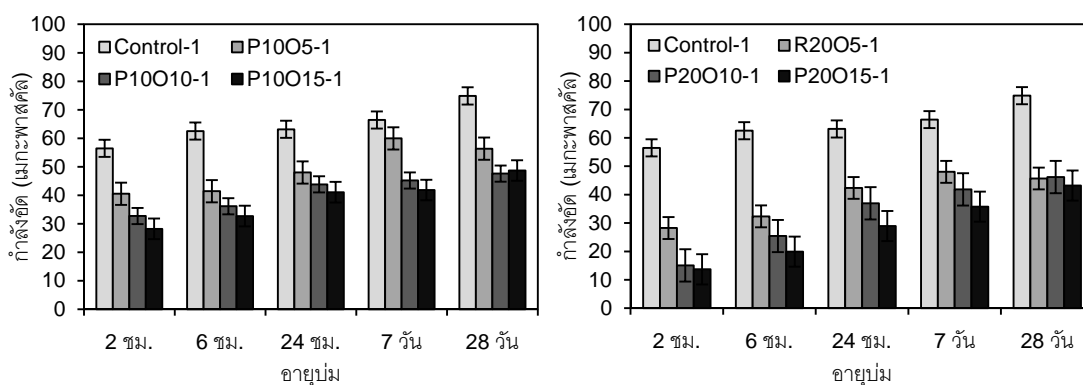


ค) ปมร้อน 4 ชั่วโมง

ภาพที่ 20 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่ด้วยแก้วปาล์มน้ำมันในระดับต่างๆ (ร้อยละ 5-15)

อิทธิพลของเถาไม้ยางพาราและเถาปาล์มน้ำมัน

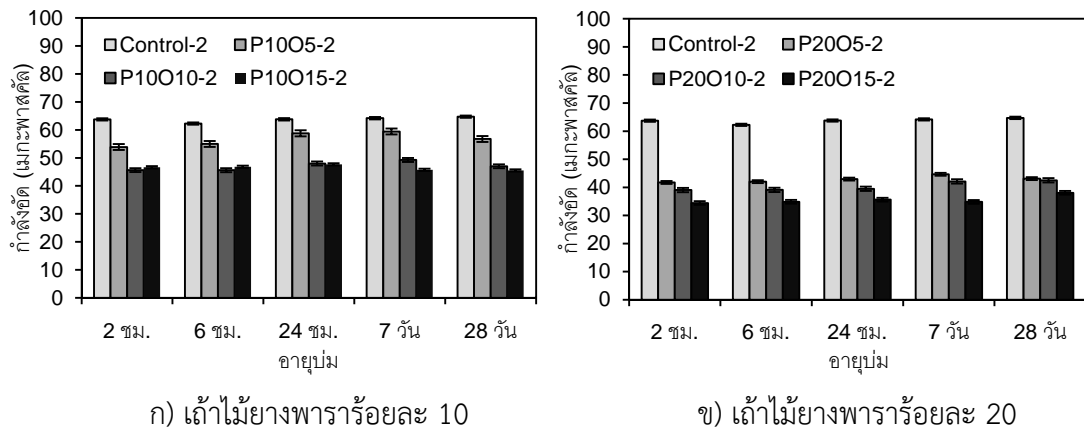
ผลการศึกษาโดยใช้เถาไม้ยางพาราหรือเถาปาล์มน้ำมันเขาไปแทนที่บางส่วนของดินขาวเผา นั้น มีผลโดยตรงต่อกำลัลด่างที่กล่าวมาข้างต้น ในส่วนของการทดสอบจีโอพอลิเมอร์ที่แทนที่บางส่วนด้วยเถาไม้ยางพาราและเถาปาล์มน้ำมันดังแสดงไว้ใน **ภาพที่ 21-23** จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้เถาไม้ยางพาราและเถาปาล์มน้ำเข้าไปแทนที่บางส่วนพร้อมกันมีผลต่อกำลัลด่างของจีโอพอลิเมอร์ เมื่อการแทนที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้กำลัลด่างต่ำลง โดยเฉพาะการแทนที่บางส่วนด้วยเถาไม้ยางพาราร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก การแทนที่บางส่วนด้วยเถาไม้ยางพาราร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลัลด่างลดลงอย่างชัดเจนในทุกอายุบ่มจาก 2 ชั่วโมง ไปจนถึง 28 วัน และในทุกระยะเวลาบ่มร้อน เมื่อเทียบกับการแทนที่บางส่วนด้วยเถาไม้ยางพาราร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าการแทนที่บางส่วนด้วยเถาไม้ยางพาราร้อยละ 10 และเถาปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (P10O5) นั้นสามารถให้ค่ากำลัลด่างที่สูงกว่าส่วนผสมอื่นๆ อย่างชัดเจน ยกเว้นส่วนผสมที่ใช้ดินขาวเผาอย่างเดียว (Control) ในทุกระยะเวลาบ่มร้อน (1, 2 และ 4 ชั่วโมง) ดังแสดงไว้ใน **ภาพที่ 21-23** ซึ่งเป็นที่ยืนยันได้ระดับหนึ่งว่าการแทนที่บางส่วนด้วยเถาปาล์มน้ำมันส่งผลต่อกำลัลด่างของจีโอพอลิเมอร์ ดังเช่นที่ได้อธิบายในหัวข้ออิทธิพลเนื่องจากการแทนที่เถาปาล์มน้ำมันบางส่วน ตัวอย่างเช่นจีโอพอลิเมอร์ **ภาพที่ 23** จีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถาไม้ยางพาราร้อยละ 10 และเถาปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง (P10O5-2) ให้กำลัลด่างเท่ากับ 53.88, 54.98, 58.79, 59.44 และ 56.77 เมกะพาสคัล ที่อายุบ่ม 2, 6, 24 ชั่วโมง 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถาไม้ยางพาราร้อยละ 10 และเถาปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง (P10O15-2) ให้กำลัลด่างเท่ากับ 46.65, 46.84, 47.70, 45.72 และ



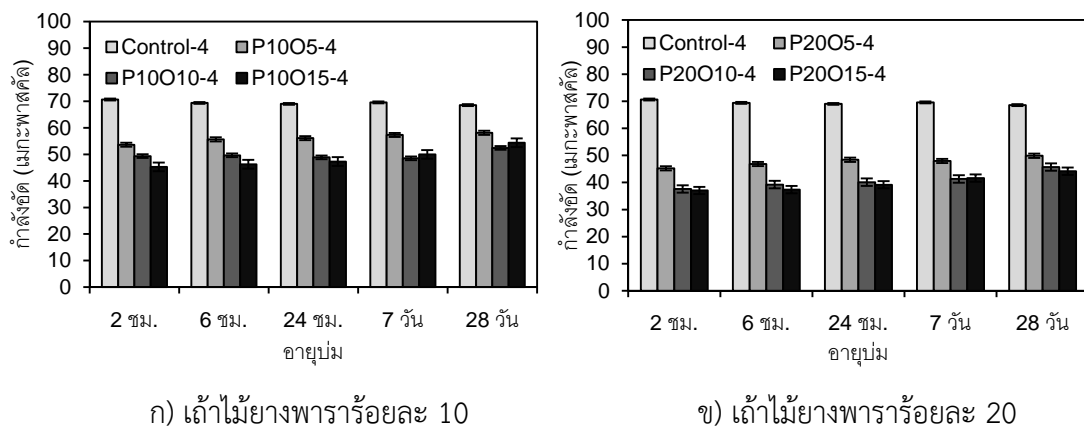
ก) เถาไม้ยางพาราร้อยละ 10

ข) เถาไม้ยางพาราร้อยละ 20

ภาพที่ 21 กำลัลด่างของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่ด้วยเถาไม้ยางพาราและเถาปาล์มน้ำมันในปริมาณต่างๆ บ่มร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพที่ 22 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณต่างๆ บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



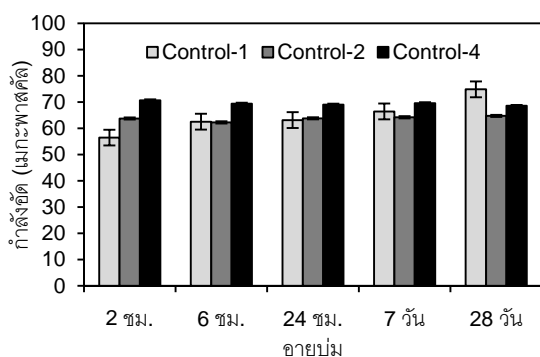
ภาพที่ 23 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณต่างๆ บ่มร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

45.50 เมกะพาสคัล ที่อายุบ่มเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีแคลเซียมออกไซด์ปริมาณที่สูง มีผลโดยตรงต่อการเกิดจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymerization Reaction) ที่ใช้ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยทั้งเถ้าไม้ยางพารา ร้อยละ 20 และเถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (P20O5-2) ที่ระยะเวลาบ่มร้อนและที่อายุบ่มเดียวกัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์ให้กำลังอัดเท่ากับ 41.74, 42.02, 42.94, 44.66 และ 43.09 เมกะพาสคัล แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของเถ้าไม้ยางพาราที่มีต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ เป็นที่ยืนยันอย่างชัดเจนว่าเถ้าไม้ยางพาราที่มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในปริมาณสูงมีผลเสียต่อกำลังอัด

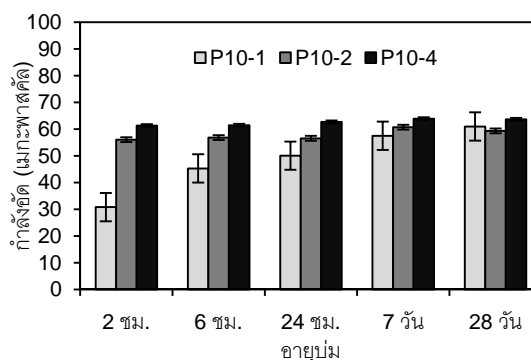
ของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับในรายงานที่ได้เสนอไว้ใน www.geopolymer.org ที่แสดงถึงผลเสียของ CaO ที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ และเป็นที่น่าสังเกตว่ากำลังอัดของตัวอย่าง P10O15 มีค่าสูงกว่าตัวอย่าง P20O5 ซึ่งมีการแทนที่รวมเท่ากับร้อยละ 25 ในทุกระยะเวลาบ่มร้อน

อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน

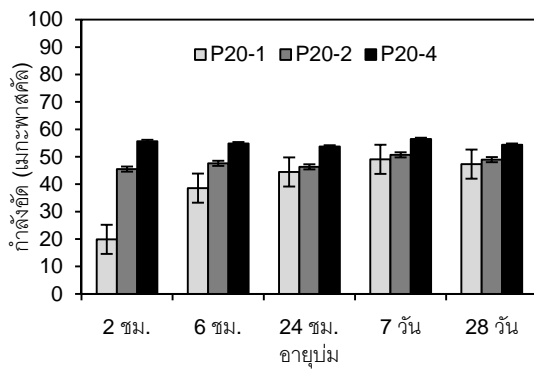
ในการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราและ/หรือเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาบ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ซึ่งเพื่อต้องการศึกษาผลเนื่องจากระยะเวลาของการบ่มร้อน ผลการทดสอบกำลังอัดดังได้แสดงไว้ใน [ภาพที่ 24](#) จากผลการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาบ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมงสามารถให้ค่ากำลังอัดได้ดี โดยเฉพาะที่อายุบ่มในอากาศ 2 ชั่วโมง จะมีค่ากำลังอัดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดสอบนี้เห็นได้ชัดเจนในจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารา ไม่ว่าจะเป็นการแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราล้วนหรือผสมทั้งเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน เนื่องจากขนาดผลึกของเถ้าไม้ยางพารามีขนาดใหญ่กว่าดินขาวเผา (มีพื้นที่ผิวว้น้อย) ทำให้ความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่า ผลการทดสอบที่ให้ผลคล้ายกับการทดสอบของ [van Jaarsveld et al \(2003\)](#) อย่างไรก็ตามเมื่ออายุบ่มในอากาศเพิ่มมากขึ้นไปจนถึง 7 วันขึ้นไป จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับกับจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาเพียงอย่างเดียว (Control) ดังแสดงไว้ใน [ภาพที่ 24ก\)](#) นั้น ค่ากำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกันทั้งที่บ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ในทุกอายุบ่มในอากาศ แต่อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าจีโอพอลิเมอร์บ่มร้อน 1 ชั่วโมง ที่อายุบ่มในอากาศ 28 วันนั้นมีค่าสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบของ [Rovnanik \(2010\)](#)



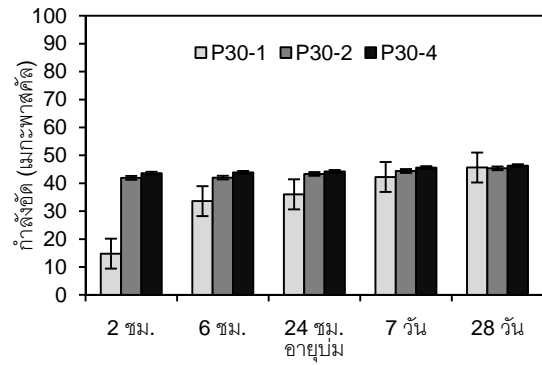
ก) ดินขาวเผาอย่างเดียว



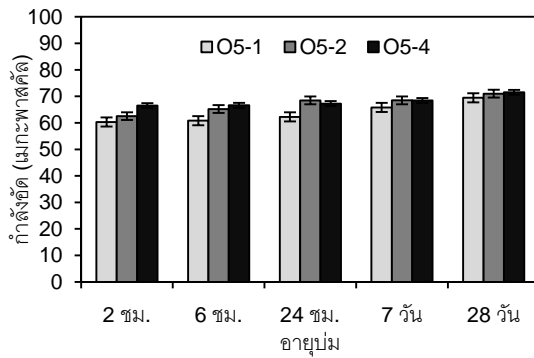
ข) เถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 10



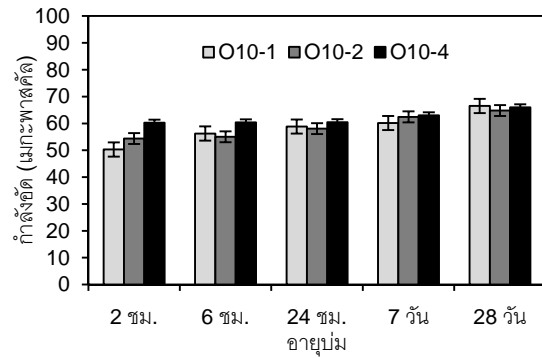
ค) ถั่วไม้ย่างพาราร้อยละ 20



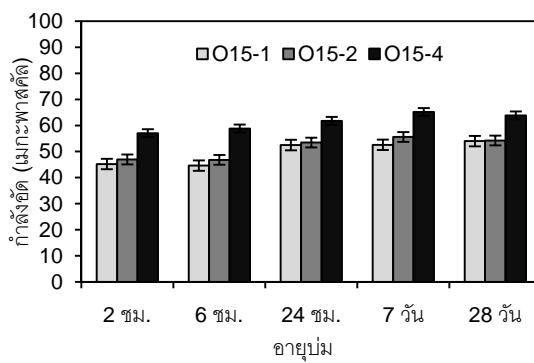
ง) ถั่วไม้ย่างพาราร้อยละ 30



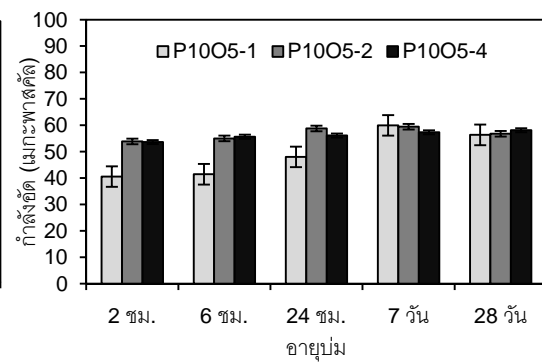
จ) ถั่วปาล์มน้ำมันร้อยละ 5



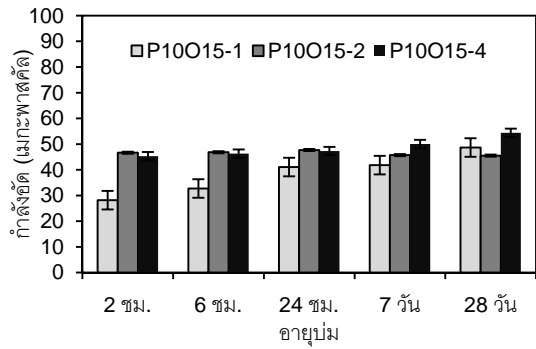
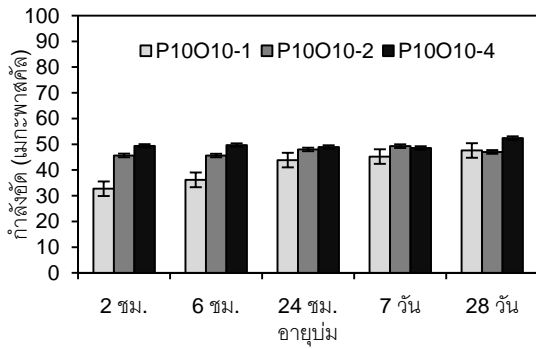
ฉ) ถั่วปาล์มน้ำมันร้อยละ 10



ช) ถั่วปาล์มน้ำมันร้อยละ 15

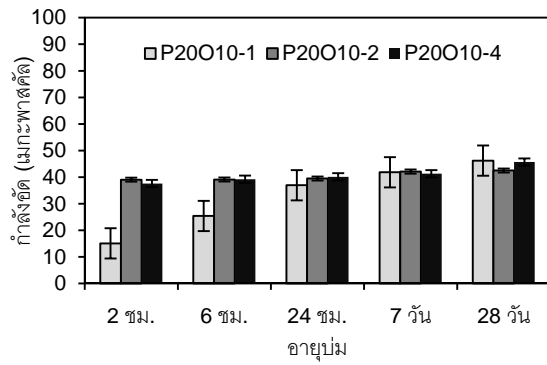
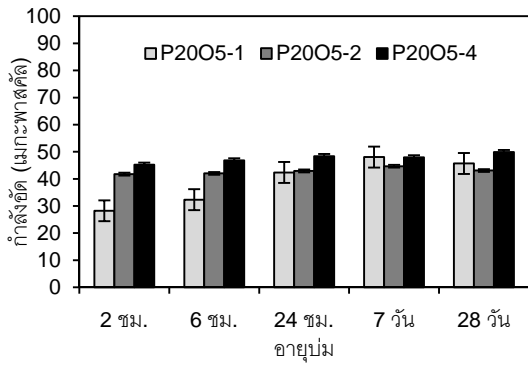


ซ) ถั่วไม้ย่างพาราร้อยละ 10 และถั่วปาล์ม น้ำมันร้อยละ 5



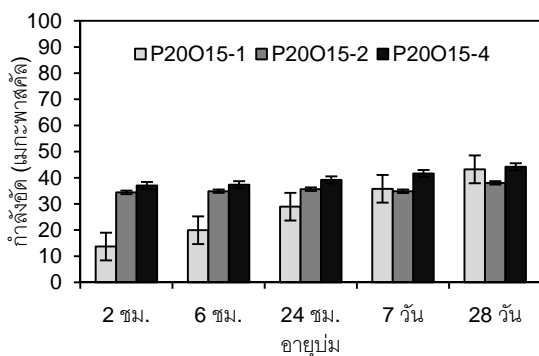
ฅ) ถ้ำไม้ยงพารร้อยละ 10 และถ้ำปาล์ม น้้ำมันร้อยละ 10

ญ) ถ้ำไม้ยงพารร้อยละ 10 และถ้ำปาล์ม น้้ำมันร้อยละ 15



ฅ) ถ้ำไม้ยงพารร้อยละ 20 และถ้ำปาล์ม น้้ำมันร้อยละ 5

ญ) ถ้ำไม้ยงพารร้อยละ 20 และถ้ำปาล์ม น้้ำมันร้อยละ 10



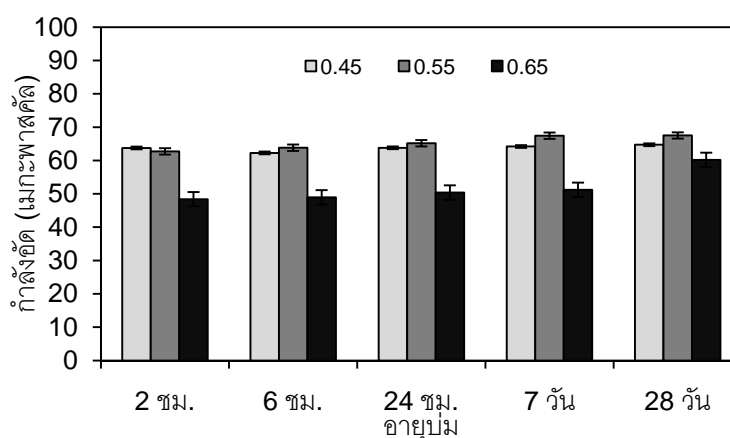
ฐ) ถ้ำไม้ยงพารร้อยละ 30 และถ้ำปาล์ม น้้ำมันร้อยละ 15

ภาพที่ 24 ก้ำลั้งอัดของจีโอฟอลิเมอร์ที่ระยยะเวลาบ่มร้อนต่างกััน

ผลทดสอบจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราและ/หรือเถ้าปาล์มน้ำมันที่บ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชั่วโมงนั้น สังเกตว่าที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง กำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกันระหว่างที่อายุบ่มในอากาศ 2 ชั่วโมง ไปจนถึง 28 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง ก็เพียงพอที่ทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าดีขึ้น ในขณะที่เมื่อทำการบ่มร้อนเพียง 1 ชั่วโมง กำลังอัดพัฒนาขึ้นตามอายุบ่มในอากาศอย่างช้าๆ

อิทธิพลเนื่องจากปริมาณน้ำ

ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำจะใช้ระยะเวลาการบ่มร้อน 2 ชั่วโมง โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำต่อดินขาวเผาเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ ผลการทดสอบ กำลังอัดแสดงไว้ใน **ภาพที่ 25** ซึ่งพบว่าอิทธิพลจากปริมาณน้ำ (อัตราส่วนน้ำต่อดินขาวเผา) พบว่าที่อัตราส่วน 0.45 และ 0.55 สามารถให้ค่ากำลังอัดสูงสุด และมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกันในทุกอายุบ่มในอากาศอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อดินขาวเผาเท่ากับ 0.65 ได้ค่ากำลังอัดต่ำสุด เนื่องมาจากปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้นเกินความเหมาะสมในการทำปฏิกิริยาด้วยความร้อน ซึ่งจะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับซีเมนต์-ปอซโซลานปกติของปฏิกิริยาไฮเดรชันและ/หรือปฏิกิริยาปอซโซลานิก ในอีกแง่หนึ่งการเพิ่มปริมาณน้ำจะส่งผลทำให้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางลง ซึ่งความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่น้อยลงจะส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดต่ำลงสอดคล้องกับการศึกษาของ [Pacheco-Torgal et al \(2011\)](#)



ภาพที่ 25 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อดินขาวเผาต่างกัน

ดัชนีกำลังอัด

จากผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารา เมื่อมีการเปรียบเทียบระหว่างกันเป็นค่าดัชนีกำลัง ตัวอย่างเช่น จีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง มีค่าดัชนีกำลังเท่ากับ 54.6, 72.4, 79.3, 86.6 และ 81.4 ที่อายุบ่ม 2, 6, 24 ชม. 7 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังทุกอายุบ่มในอุณหภูมิห้องมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ดินขาวอย่างเดียวที่บ่มร้อน 1 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามค่าดัชนีกำลังมีค่ามากกว่าร้อยละ 75 ที่อายุบ่ม 24 ชม. 7 และ 28 วัน ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 20 และ 30 ค่าดัชนีกำลังมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 75 ในทุกอายุบ่ม และเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มร้อนเท่ากับ 2 และ 4 ชั่วโมง มีค่าดัชนีกำลังมากกว่าร้อยละ 75 ในทุกอายุบ่ม โดยเฉพาะอายุบ่มช่วง 2 และ 6 ชั่วโมง และเป็นที่น่าสนใจที่จีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 20 ที่บ่มร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง สามารถให้ค่าดัชนีกำลังมากกว่าร้อยละ 75 ทุกอายุบ่ม ยกเว้นที่อายุ 28 วัน ซึ่งเนื่องมาจากกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเฝ้าอย่างเดียวยังมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อกำลังอัดและยังส่งผลให้ค่าดัชนีกำลังของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเฝ้าอย่างเดียวยุที่บ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง มีค่าน้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเฝ้าอย่างเดียวยุที่บ่มร้อน 1 ชั่วโมง ถึงแม้ว่าที่อายุบ่มอื่นๆ ได้ให้ค่าใกล้เคียงกันมากและบางอายุบ่มสามารถให้ค่าที่สูงกว่า

ในส่วนของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ค่าดัชนีกำลังของจีโอพอลิเมอร์แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 และ 10 ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง มีค่าลดลงเล็กน้อย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5 เนื่องจากความสามารถในการรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน และยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง จะมีค่าดัชนีกำลังที่ดีกว่าโดยเฉพาะที่การแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ส่วนในการแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีค่าดัชนีกำลังน้อยกว่าทุกอัตราส่วนผสม ทุกอายุบ่มร้อน และทุกอายุบ่ม ในอากาศ เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง พบว่าเมื่อมีการแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 มีแนวโน้มว่าจีโอพอลิเมอร์สามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเฝ้าอย่างเดียวยุในแต่ละระยะเวลาบ่มร้อน โดยเฉพาะที่อายุบ่ม 28 วัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง เป็นที่น่าสนใจที่ค่าดัชนีกำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ตั้งแต่ อายุบ่ม 2 ชั่วโมง ไปถึง 28 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลของ SiO_2 มีผลกำลังอัดไม่มากเมื่อใช้ระยะเวลาบ่มร้อนมากกว่า 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 5 ดัชนีกำลังอัดอายุบ่มต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์ที่ผันแปรระยะเวลาการบ่มร้อน

ตัวอย่าง	ดัชนีกำลังอัดที่อายุบ่มต่างๆ									
	2 ชม.		6 ชม.		24 ชม.		7 วัน		28 วัน	
Control-1	100		100		100		100		100	
P10-1	54.6		72.4		79.3		86.6		81.4	
P20-1	35.2		61.7		70.4		73.8		63.2	
P30-1	26.2		53.8		57.1		63.6		61.0	
O5-1	106.8		97.3		98.6		99.1		92.8	
O10-1	89.1		89.9		93.2		90.6		88.8	
O15-1	80.0		71.3		83.2		79.2		72.1	
P10O5-1	71.8		66.3		76.0		90.3		75.3	
P10O10-1	58.0		57.8		69.4		68.0		63.6	
P10O15-1	50.0		52.3		65.1		63.0		65.0	
P20O5-1	50.0		51.7		67.1		72.3		61.0	
P20O10-1	26.7		40.7		58.5		63.0		61.7	
P20O15-1	24.2		31.9		45.8		53.9		57.7	
Control-2	112.9	100	99.6	100	101.0	100	96.6	100	86.5	100
P10-2	99.2	87.9	90.9	91.3	89.6	88.6	91.4	94.6	79.2	91.7
P20-2	80.6	71.4	76.1	76.5	73.4	72.6	76.4	79.0	65.4	75.7
P30-2	74.3	65.8	67.2	67.5	68.6	67.9	66.8	69.2	60.6	70.1
O5-2	110.7	98.1	104.3	104.7	108.4	107.3	103.1	106.7	94.8	109.7
O10-2	96.3	85.3	88.0	88.4	92.0	91.0	94.0	97.3	86.5	100.1
O15-2	83.2	73.7	74.8	75.2	84.7	83.8	83.7	86.6	72.4	83.8
P10O5-2	95.4	84.5	87.9	88.3	93.1	92.2	89.5	92.6	75.8	87.7
P10O10-2	80.8	71.6	73.0	73.3	76.0	75.2	72.3	76.8	62.8	72.6
P10O15-2	82.6	73.2	74.9	75.2	75.5	74.8	68.8	71.2	60.8	70.3
P20O5-2	73.9	65.5	67.2	67.5	68.0	67.3	67.2	69.6	57.6	66.6
P20O10-2	69.2	61.3	62.6	62.8	62.5	61.9	63.4	65.6	56.8	65.7
P20O15-2	60.9	54.0	55.7	56.0	56.4	55.8	52.4	54.3	50.8	58.8
Control-4	125.1	100	111.0	100	109.3	100	104.8	100	91.6	100
P10-4	108.6	86.8	98.3	88.6	99.3	90.8	96.2	91.8	85.0	92.8
P20-4	98.6	78.8	87.8	79.1	85.1	77.8	85.0	81.2	72.6	79.3
P30-4	77.3	61.7	70.2	63.3	70.0	64.1	68.6	65.5	61.8	67.5
O5-4	117.8	94.1	106.5	96.0	106.5	97.4	103.0	98.3	95.5	104.3
O10-4	106.7	85.3	96.6	87.0	95.7	87.6	94.9	90.6	88.2	96.3
O15-4	101.0	80.7	94.1	84.8	97.8	89.5	98.1	93.6	85.3	93.1
P10O5-4	95.0	75.9	89.0	80.2	88.9	81.3	86.3	82.4	77.6	84.8
P10O10-4	87.4	69.8	79.4	71.6	77.4	70.8	73.1	69.7	70.0	76.4

ตารางที่ 5 ดัชนีกำลังอัดอายุบ่มต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์ที่ผันแปรระยะเวลาการบ่มร้อน (ต่อ)

ตัวอย่าง	ดัชนีกำลังอัดที่อายุบ่มต่างๆ									
	2 ชม.		6 ชม.		24 ชม.		7 วัน		28 วัน	
P10O15-4	80.2	64.1	74.0	66.7	74.9	68.5	75.3	71.9	72.6	79.3
P20O5-4	80.1	64.0	74.9	67.5	76.6	70.1	72.2	68.9	66.6	72.7
P20O10-4	66.6	53.2	62.7	56.5	63.5	58.1	62.2	59.3	61.0	66.6
P20O15-4	65.6	52.4	59.7	53.8	62.0	56.7	62.7	59.8	59.0	64.4

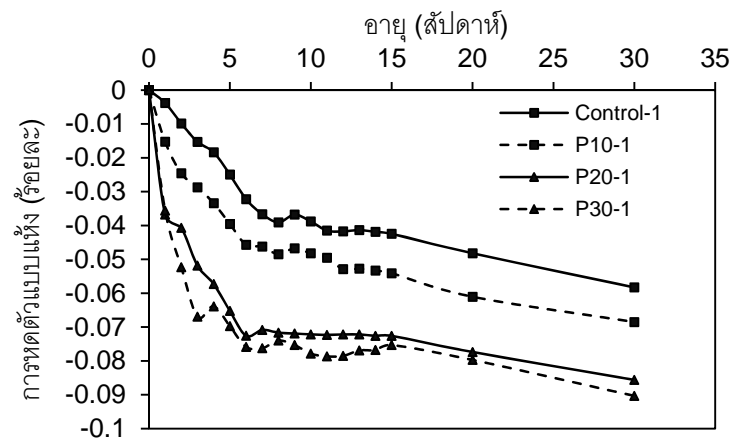
สรุป ถ้าไม่ียงพาราสามารถใช้แทนที่ดินขาวเผาได้ไม่เกินร้อยละ 20 โดยมีเงื่อนไขที่ระยะเวลาบ่มร้อน 4 ชั่วโมง ส่วนถ้าปาล์มน้ำมันสามารถใช้แทนที่ได้ถึงร้อยละ 15 ของการบ่มร้อน 4 ชั่วโมง และจากผลการทดสอบการใช้ถ้าไม่ียงพาราและถ้าปาล์มน้ำมันเขาไปแทนที่บางส่วนร่วมกันสามารถใช้ได้ร้อยละ 15 โดยแบ่งเป็นถ้าไม่ียงพาราร้อยละ 10 และถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง สามารถให้ค่าดัชนีกำลังอัดมากกว่า 75 เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาบ่มร้อนเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่แสดงให้เห็นว่า สามารถให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติ ในทุกอัตราส่วนผสม

การหดตัวแบบแห้ง

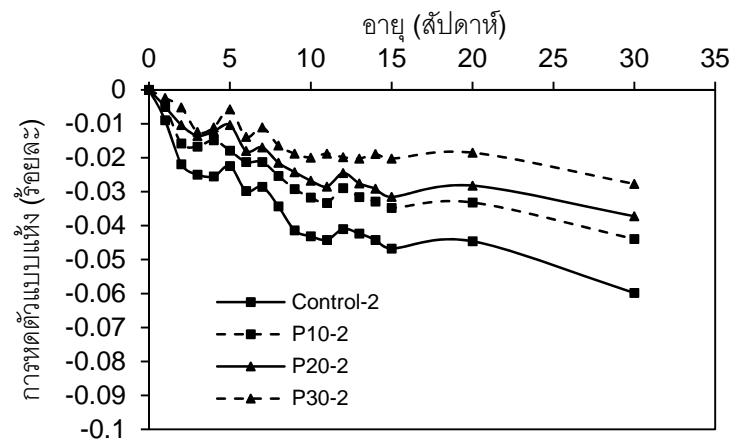
การหดตัวแบบแห้งเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญต่อวัสดุที่จะใช้ในงานก่อสร้างหรือซ่อมแซม ซึ่งรวมถึงจีโอพอลิเมอร์ด้วย การหดตัวแบบแห้งนั้นเป็นการทำความเสียหายให้วัสดุเกิดการแตกร้าวในแบบที่ใช้ระยะเวลานาน วัสดุที่มีสมบัติการหดตัวน้อยจะทำให้สามารถนำไปใช้งานได้ดี

อิทธิพลของถ้าไม่ียงพารา

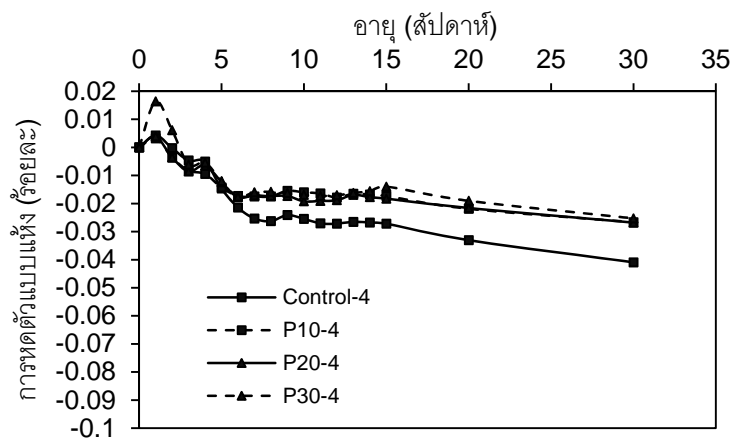
การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์ในการทดสอบครั้งนี้ ได้ใช้ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยถ้าไม่ียงพาราร้อยละ 10, 20 และ 30 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงไว้ในภาพที่ 26 จากผลการทดสอบการจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยถ้าไม่ียงพาราที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 26ก) นั้น พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีการหดตัวแบบแห้งอย่างรวดเร็วไปจนถึง 8 สัปดาห์ โดยตัวอย่าง Control-1, P10-1, P20-1 และ P30-1 ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 70 ± 5 จะมีค่าการหดตัวแบบแห้งเท่ากับร้อยละ -0.039, -0.048, -0.072 และ -0.074 ตามลำดับ หลังจาก 8 สัปดาห์ขึ้นไปค่าการหดตัวแบบแห้งมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ไปจนถึงอายุ 30 สัปดาห์ ซึ่งมีค่าการหดตัวแบบแห้งเท่ากับร้อยละ -0.058, -0.068, -0.086 และ -0.090 ตามลำดับ จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยถ้าไม่ียงพาราที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง ค่าการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ถ้าไม่ียงพารา



ก) ป้อนร้อน 1 ชั่วโมง



ข) ป้อนร้อน 2 ชั่วโมง



ค) ป้อนร้อน 4 ชั่วโมง

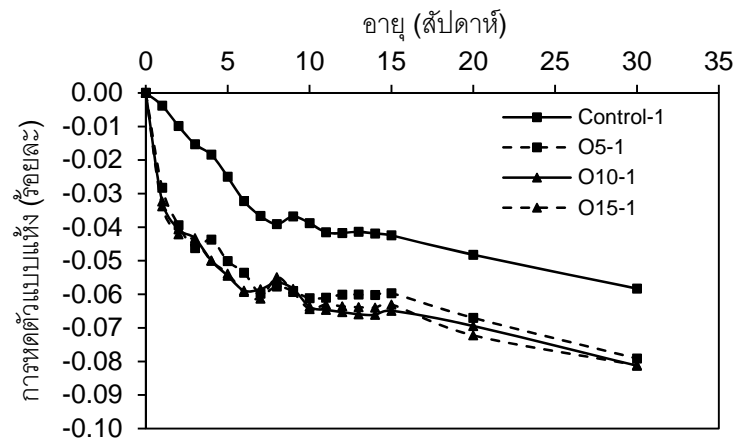
ภาพที่ 26 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่ด้วยเก้าไม้ยางพารา

มากขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคของเถ้าไม้ยางพารามีทรงเป็นเหลี่ยมหน้าไม้สม่ำเสมอ และมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของดินขาวเผา ซึ่งจะมีผลให้เถ้าไม้ยางพาราที่มีพื้นที่ผิวน้อย ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อาจจะเป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ทำให้เหลือน้ำเป็นจำนวนมากที่ถูกดูดซึมเข้าไปในเถ้าไม้ยางพารา แต่น้ำนั้นไม่สามารถระเหยออกมาได้ถึงแม้ว่าจะเป็นกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนก็ตาม เนื่องจากตัวอย่างห่อหุ้มด้วยพลาสติกไวไนล (Vinyl film) หลังจากแกะแท่งตัวอย่างออกน้ำที่เหลือเป็นจำนวนมากจากการทำปฏิกิริยาจะระเหยออก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อจีโอพอลิเมอร์ที่ได้ทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพที่ 26ข) ค่าการหดตัวแบบแห้งจะลดลงอย่างช้าๆ ไปจนถึงอายุ 30 สัปดาห์ โดยค่าการหดตัวที่อายุ 8 สัปดาห์ เท่ากับร้อยละ -0.034, -0.025, -0.025 และ -0.016 ของตัวอย่าง Control-2, P10-2, P20-2 และ P30-2 ตามลำดับ หลังจาก 8 สัปดาห์ขึ้นไปค่าการหดตัวแบบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยเฉพาะจีโอพอลิเมอร์ที่แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารา ซึ่งค่าการหดที่อายุ 30 สัปดาห์ มีค่าเท่ากับร้อยละ -0.059, -0.044, -0.037 และ -0.028 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาของ Zuhua (2009a) ที่รายงานว่าอนุภาคของวัสดุตั้งต้นของจีโอพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งได้มากขึ้น

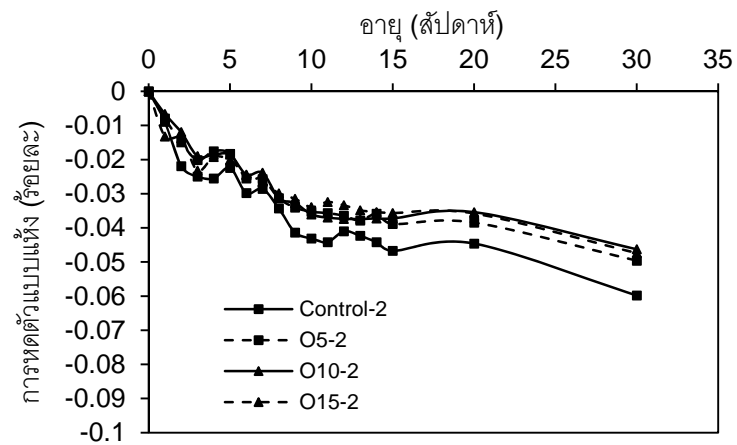
อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มร้อนเป็น 4 ชั่วโมง ค่าการหดตัวแบบแห้งจะมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอายุบ่มไปจนถึง 30 สัปดาห์ โดยเฉพาะจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราดังแสดงไว้ในภาพที่ 26ค) และเป็นที่น่าสนใจที่ว่าจีโอพอลิเมอร์ที่อายุ 1 สัปดาห์ มีการขยายตัวเล็กน้อยเนื่องจากการบ่มร้อนเป็นระยะเวลานาน (4 ชั่วโมง) ทำให้แท่งตัวอย่างมีความร้อนสูงเนื่องจากได้รับความร้อนเป็นเวลานาน และเมื่อทำการแกะแท่งตัวอย่างทันที มาเก็บไว้ในอุณหภูมิห้องที่มีอุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส จากที่แท่งตัวอย่างมีความร้อนสูงเมื่อมาอยู่ในที่ที่อุณหภูมิต่ำในทันทีทันใดนั้นสามารถทำให้เกิดการขยายตัวได้

อิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมัน

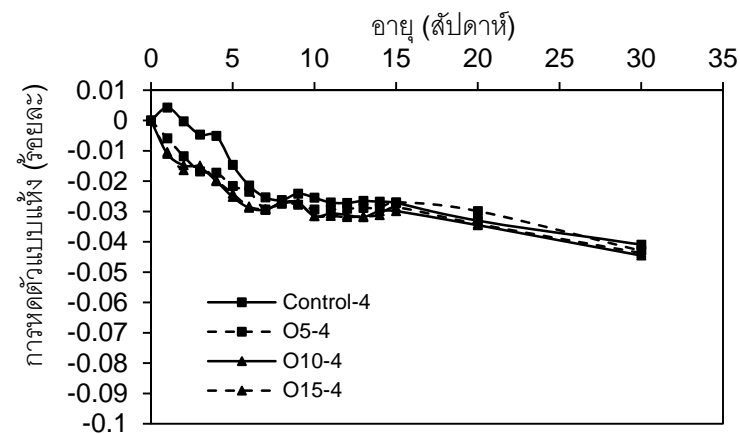
ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์ ใช้ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5, 10 และ 15 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง (ภาพที่ 27) แท่งตัวอย่างที่บ่มร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังภาพที่ 27ก) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ทำให้การหดตัวแบบแห้งเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้ดินขาวเผาอย่างเดียว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสนใจที่ว่าค่าการหดตัวของตัวอย่างแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกันมากอย่างมีนัยสำคัญ จากภาพที่ 27ก) ยังพบอีกว่าที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง การหดตัวแบบแห้งในช่วง 8 สัปดาห์ แรกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิด



ก) ป่มร้อน 1 ชั่วโมง



ข) ป่มร้อน 2 ชั่วโมง



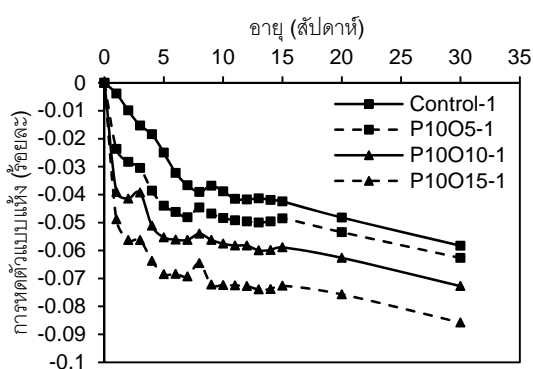
ค) ป่มร้อน 4 ชั่วโมง

ภาพที่ 27 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่ด้วยแก้วปาล์มน้ำมัน

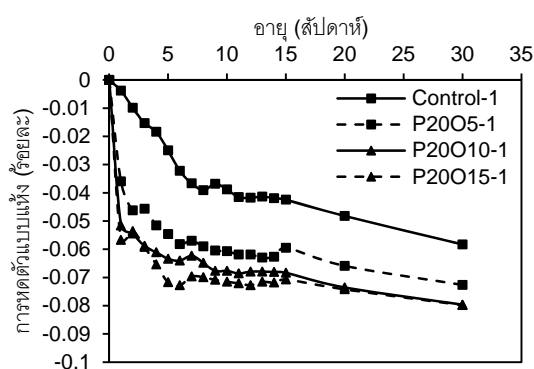
การหดตัวอย่างช้าๆ ไปจนถึงอายุ 30 สัปดาห์ ซึ่งพฤติกรรมนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับการหดตัวแบบ
 แห่งของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วไม้อย่างพารา ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1 ในขณะที่ตัว
 อย่างที่บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงดังภาพที่ 27ข) ค่าการหดตัวมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก เนื่องจาก
 อนุภาคของแก้วปาล์มน้ำมันนั้นมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับดินขาวเผา จึงส่งผลให้ค่าการหดตัวมีความ
 แตกต่างกันไม่มากการใช้ความร้อน 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงมีความเพียงพอต่อสมบัติ
 การหดตัวแบบแทนที่บางส่วนด้วยแก้วปาล์มน้ำมันในปริมาณต่างๆ กัน และยังไปกว่านั้น
 แห่งตัวอย่างที่บ่มร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมงดังภาพที่ 27ค) มีค่าการหดตัวแบบแห่งเกือบเท่ากันในทุก
 อัตราส่วนผสม

อิทธิพลของแก้วไม้อย่างพาราและแก้วปาล์มน้ำมัน

ภาพที่ 28-30 แสดงการหดตัวแบบแห่งของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วไม้อย่างพาราและแก้วปาล์มน้ำมัน โดยใช้แก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 10 และ 20 เป็นฐานและเปลี่ยนแปลงปริมาณแก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 5, 10 และ 15 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง การบ่มร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของการแทนที่บางส่วนด้วยแก้วไม้อย่างพาราและแก้วปาล์มน้ำมันดังแสดงไว้ในภาพที่ 28ก) และ 28ข) ลักษณะพฤติกรรมการหดตัวแบบแห่งมีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณแก้วปาล์มน้ำมันค่าการหดตัวเพิ่มมากยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับจะพบว่ามีลักษณะพฤติกรรมเหมือนกับจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วไม้อย่างพาราที่บ่มร้อน 1 ชั่วโมง การใช้แก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 10 และ 20 เป็นพื้นฐานมีผลให้การหดตัวสูงขึ้น ดังเช่นจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วไม้อย่างพาราอย่างเดียว (ภาพที่ 26ก) เมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มร้อนเป็น 2

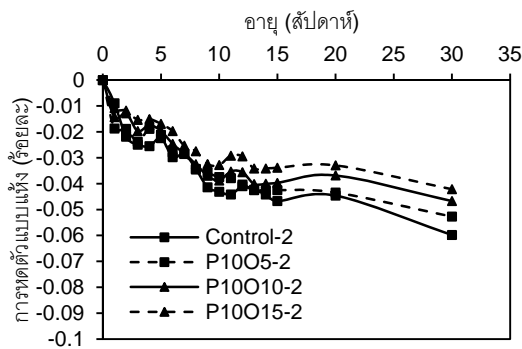


ก) แก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 10

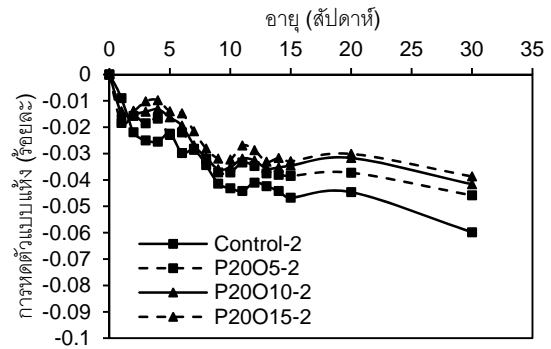


ข) แก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 20

ภาพที่ 28 การหดตัวแบบแห่งของจีโอพอลิเมอร์บ่มร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อแทนที่ด้วยแก้วไม้อย่างพาราและแก้วปาล์มน้ำมัน

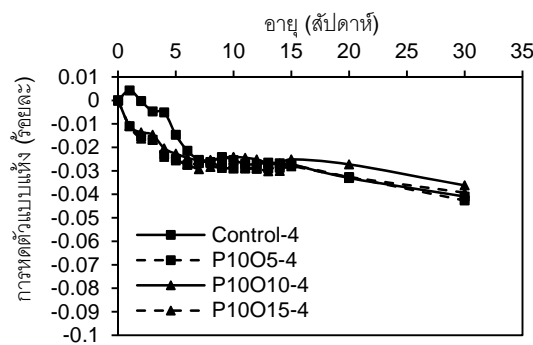


ก) เถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 10

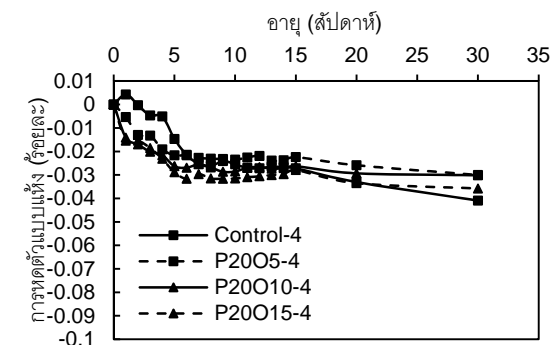


ข) เถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 20

ภาพที่ 29 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน



ก) เถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 10



ข) เถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 20

ภาพที่ 30 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์บ่มร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน

ชั่วโมง ค่าการหดตัวแบบแห้งลดลง เนื่องจากน้ำที่ถูกดูดซึมอยู่ในเถ้าไม้ยางพาราถูกนำไปใช้ในกระบวนการทำปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้เมื่อแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อไปไว้ในอุณหภูมิห้อง น้ำมีการระเหยออกมาน้อย อย่างไรก็ตามการแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันดังภาพที่ 29ก) และ 29ข) นั้น เมื่อเปรียบเทียบกับแห้งตัวอย่างมอร์ตาร์จากดินขาวเผา พบว่าค่าการหดตัวของแห้งตัวอย่างแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าลดลงเล็กน้อย

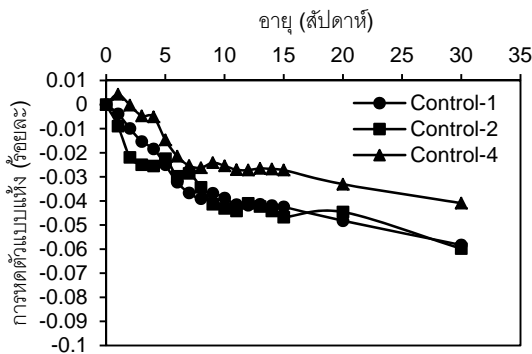
จีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันที่บ่มอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 30ก) และ 30ข) จากผลการทดลองพบว่าจีโอพอลิเมอร์มีการหดตัวแบบแห้งอย่างรวดเร็วที่อายุต้นๆ ไปจนถึง 6 สัปดาห์ กล่าวคือ ตัวอย่าง Control-

4, P10O5-4, P10O10-4 และ P10O15-4 ที่ระยะเวลาบ่ม 6 สัปดาห์ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง จะให้ค่าการหดตัวแบบแห้งร้อยละ -0.021, -0.027, -0.024 และ -0.027 ตามลำดับ หลังจาก 6 สัปดาห์ขึ้นไปจนถึง 30 สัปดาห์ ค่าการหดตัวแบบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงต่ำมาก โดยค่าการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 30 สัปดาห์ มีค่าเท่ากับร้อยละ -0.041, -0.043, -0.036 และ -0.039 ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่าง Control-4, P20O5-4, P20O10-4 และ P20O15-4 มีค่าการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 6 สัปดาห์ เท่ากับร้อยละ -0.021, -0.022, -0.027 และ -0.032 ตามลำดับ และที่เวลาบ่มอุณหภูมิห้อง 30 สัปดาห์ ค่าการหดตัวแบบแห้งเท่ากับร้อยละ -0.041, -0.030, -0.030 และ -0.036 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ระยะเวลาบ่มร้อน 4 ชั่วโมง มีความเสถียรในแง่ของการเปลี่ยนแปลงการหดตัวแบบแห้ง ถึงแม้ว่าจีโอพอลิเมอร์มีการแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าเถ้าขี้เถ้าและเถ้าปาล์มน้ำมันก็ตาม และยังแสดงให้เห็นว่าการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างที่บ่มร้อน 4 ชั่วโมง ได้สิ้นสุดการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 6 สัปดาห์ ซึ่งหลังจากนั้นการหดตัวแบบแห้งจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

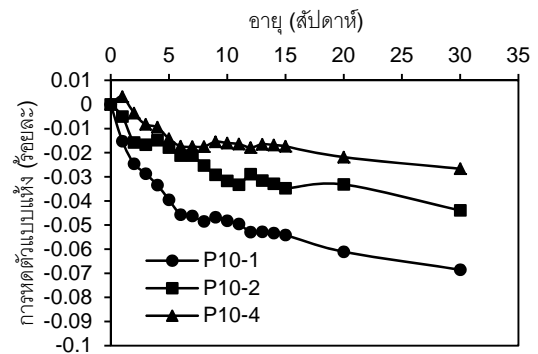
อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน

ภาพที่ 31 แสดงการหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์ทุกอัตราส่วนผสม โดยการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาบ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชั่วโมง การหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวอย่างเดียวดัง **ภาพที่ 31ก)** ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการหดตัวมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 และ 2 ชั่วโมง ในทุกอายุบ่มที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ระยะเวลาบ่มร้อน 4 ชั่วโมง มีค่าการหดตัวน้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากว่าการที่ดินขาวเผามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กประมาณ 6.3 ไมครอน จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยาได้ดี ถึงแม้ว่าได้รับความร้อนในช่วงเวลาที่สั้น กล่าวคือระยะเวลาบ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชั่วโมง มีผลเล็กน้อยต่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียวดังจะเห็นได้จากกำลังอัดดัง **ภาพที่ 24ก)** อย่างไรก็ตาม เมื่อจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าเถ้าขี้เถ้าและ/หรือเถ้าปาล์มน้ำมัน การหดตัวแบบแห้งได้มีพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงแตกต่างกันกับจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว คือการหดตัวแบบแห้งมีค่าแตกต่างชัดเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาบ่มร้อนจาก 1 ชั่วโมงไปเป็น 2 หรือ 4 ชั่วโมง ตัวอย่างเช่น เมื่อตัวอย่างแทนที่ด้วยเถ้าเถ้าขี้เถ้าร้อยละ 30 (P30) การหดตัวแบบแห้งที่อายุ 30 สัปดาห์มีค่าเท่ากับร้อยละ -0.090, -0.028 และ -0.027 ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ จึงเห็นได้ว่าที่บ่มร้อน 1 ชั่วโมง มีค่าการหดตัวแบบแห้งสูงมากเมื่อเทียบกับที่บ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง เนื่องจากเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าเถ้าขี้เถ้าเข้าไป ทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาลดลงดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อกำลังอัด ส่งผลโดยตรงต่อค่าการหดตัว เมื่อจีโอพอลิเมอร์ยังทำปฏิกิริยาได้ไม่สมบูรณ์ คือใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาน้อย จึงทำให้ยังมีน้ำที่เหลืออยู่ปริมาณมากและน้ำจะระเหยออกจากโพรงหลังแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อ ในส่วนระยะเวลาบ่มร้อน 2 กับ 4

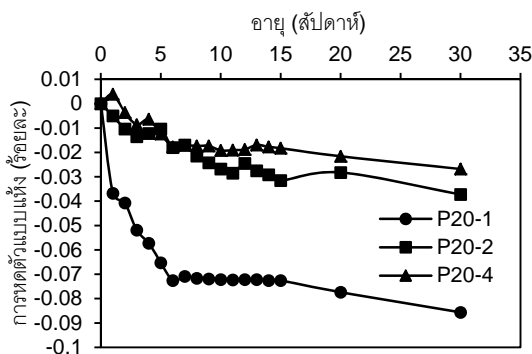
ชั่วโมง มีความแตกต่างเล็กน้อย ซึ่งพอสรุปได้ว่าระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง ก็เพียงพอแล้วสำหรับการทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ในการทดสอบนี้ และเป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อมีการแทนที่บางส่วนด้วยแก้วไม้อย่างพาราและ/หรือแก้วปาล์มน้ำมันมากขึ้น ความแตกต่างระหว่างระยะเวลาบ่มร้อน 1 กับ 2 หรือ 4 ชั่วโมง มีค่าการหดตัวแบบแห้งต่างกันมากขึ้น



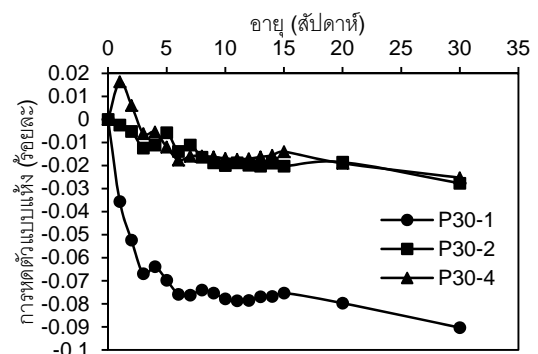
ก) ดินขาวเผาถั่ว



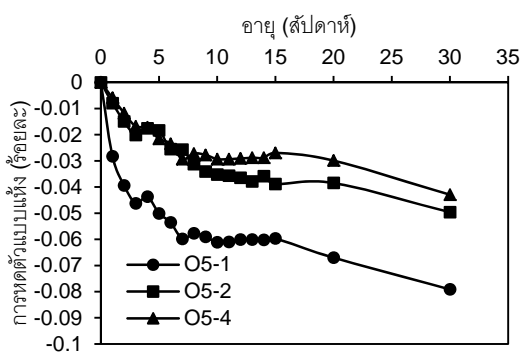
ข) แก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 10



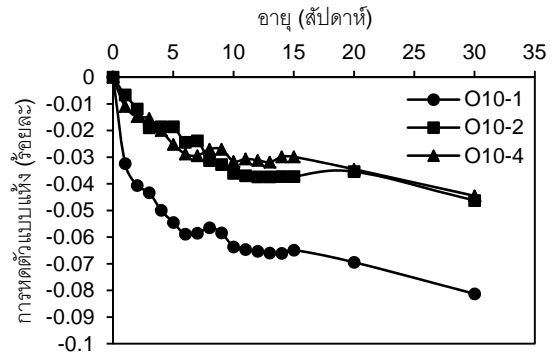
ค) แก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 20



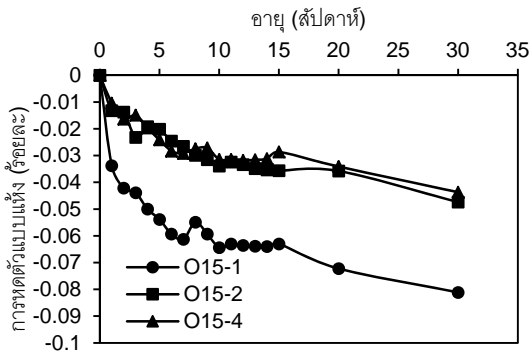
ง) แก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 30



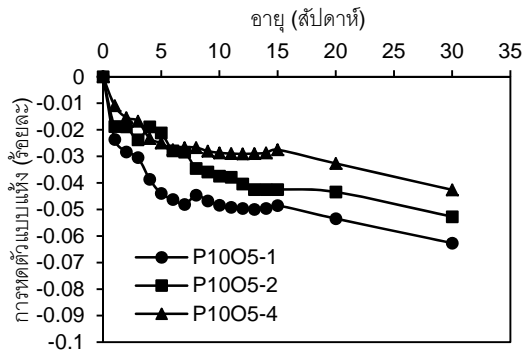
จ) แก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 5



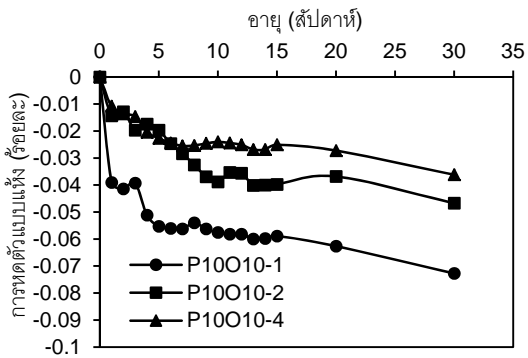
ฉ) แก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 10



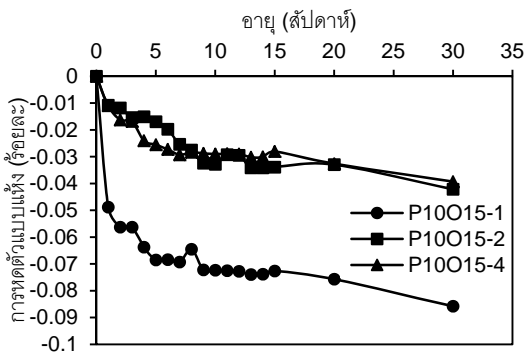
ข) เล้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15



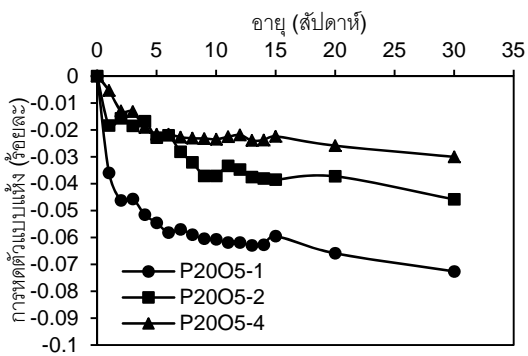
ช) เล้าไม้ยางพาราร้อยละ 10 และเล้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 5



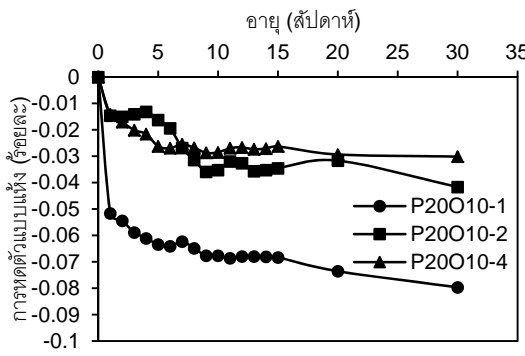
ฅ) เล้าไม้ยางพาราร้อยละ 10 และเล้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 10



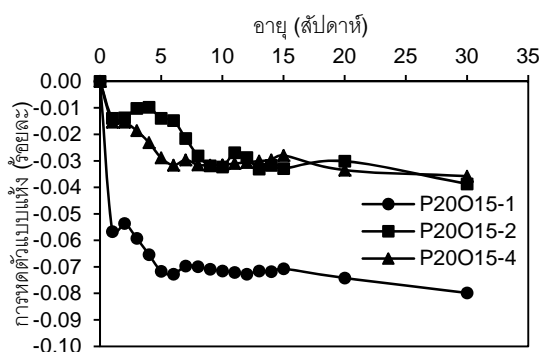
ฉ) เล้าไม้ยางพาราร้อยละ 10 และเล้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 15



ฎ) เล้าไม้ยางพาราร้อยละ 20 และเล้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 5



ฏ) เล้าไม้ยางพาราร้อยละ 20 และเล้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 10



รูป) ถ้ำไม้ยางพารา ร้อยละ 20 และถ้ำปาล์ม
น้ำมัน ร้อยละ 15

ภาพที่ 31 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่มร้อนต่างกัน

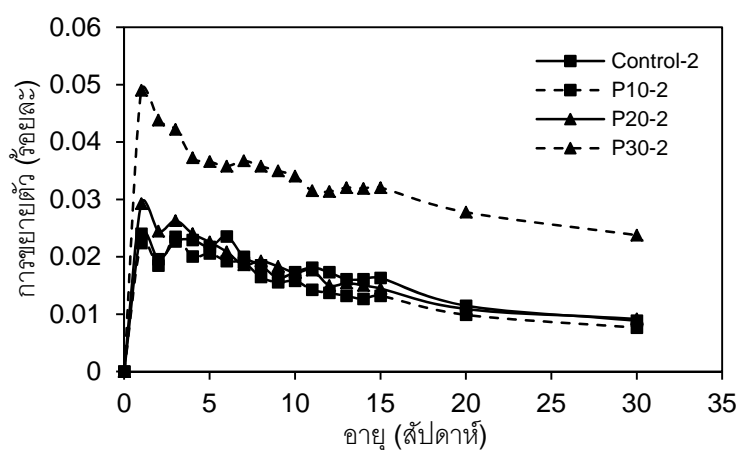
การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต

เนื่องด้วยผิวทางทางภาคใต้มีการสัมผัสกับซัลเฟต อันเนื่องมาจากพาหนะขนส่งเศษยางพารา ที่มีกจะมีของเสียที่เป็นของเหลวไหลลงสู่ผิวทางอยู่ทั่วไป ของเหลวเหล่านั้นจะมีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณสูง ทำให้มีความจำเป็นที่ต้องมีการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดี่ยวและแทนที่บางส่วนด้วยถ้ำไม้ยางพาราและ/หรือถ้ำปาล์มน้ำมัน เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 5 (5% Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 5 (5% MgSO_4) เป็นระยะเวลา 30 สัปดาห์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับความยาวก่อนแช่ในสารละลาย จากการทดสอบพบว่าเมื่อมีการเปรียบเทียบที่ระยะเวลาแช่ 1 สัปดาห์เปรียบเทียบกับก่อนแช่ในสารละลาย การขยายตัวจะอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 0.020-0.055 ดังแสดงในภาพที่ 32-38 เช่นตัวอย่าง Control-2 และ P30-2 ที่แช่ในสารละลาย 5% Na_2SO_4 มีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.024 และ 0.049 ตามลำดับ ที่ระยะเวลาแช่ 1 สัปดาห์ และที่แช่ในสารละลาย 5% MgSO_4 มีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.020 และ 0.052 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม หลังจาก 1 สัปดาห์ขึ้นไปพบว่า การขยายตัวมีแนวโน้มลดลงไปจนถึงระยะเวลาแช่ 30 สัปดาห์อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นผลการทดสอบการขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์ครั้งนี้ เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 5 แทนไม่สามารถทำลายโครงสร้างการยึดประสานกันของเนื้อจีโอพอลิเมอร์นี้ได้

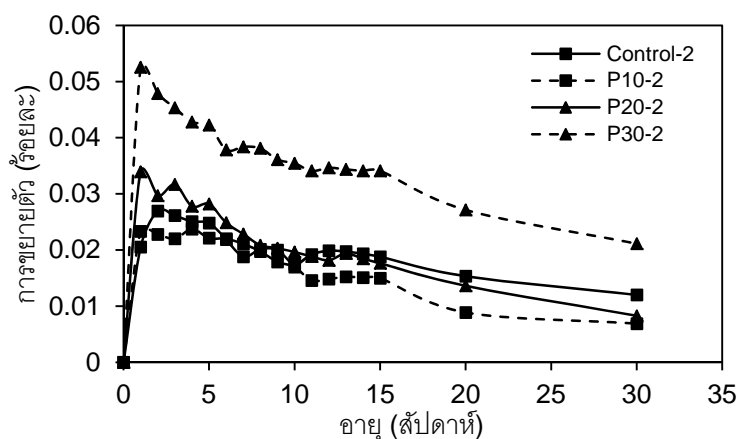
อิทธิพลของถ้ำไม้ยางพารา

ภาพที่ 32ก) และ 32ข) แสดงการขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยถ้ำไม้ยางพารา ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตตาม

ลำดับ พบว่าเมื่อแช่ตัวอย่างเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มีการขยายตัวสูง มีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.024, 0.023, 0.029 และ 0.049 ของตัวอย่าง Control-2, P10-2, P20-2 และ P30-2 ตามลำดับ ในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ในขณะที่การขยายตัวของตัวอย่างเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.021, 0.023, 0.034 และ 0.053 และเมื่อแช่ในสารละลายนานขึ้นการขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลงทุกอัตราส่วนผสมทั้งในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต โดยที่ระยะเวลาแช่ 30 สัปดาห์ ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 0.009, 0.008, 0.009 และ 0.024 และการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 0.012, 0.007, 0.008 และ 0.021 จากการขยายตัวที่ลดลงดังกล่าวอาจจะเป็นเนื่องจากว่าสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 5 ไม่สามารถไปทำลายโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ได้ ซึ่งจากการทดสอบของ Bakharev (2005) พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมแมกนีเซียมซัลเฟต และโซเดียมผสมแมกนีเซียมซัลเฟตยังมีโครงสร้างที่มีความเสถียรอยู่ กล่าวคือ โครงข่ายผลิตภัณฑ์จากการเกิดพอลิเมอร์ไม่สามารถถูกทำลายจากการแช่ในสารละลายซัลเฟต และจากการศึกษานี้เป็นที่น่าสังเกตอีกว่าเมื่อแทนที่บางส่วนด้วยแก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 30 ทำให้เกิดการขยายตัวสูงสุด ในขณะที่ส่วนผสมอื่นๆ มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงกันในทุกระยะเวลาแช่ ซึ่งผลการทดสอบนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบของ อามา (2553) ที่ใช้แก้วลอยที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า มีการขยายตัวมากกว่า เช่นเดียวกับกับขนาดอนุภาคของแก้วไม้อย่างพาราที่มีขนาดใหญ่กว่าดินขาวเผา ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4



ก) สารละลายโซเดียมซัลเฟต

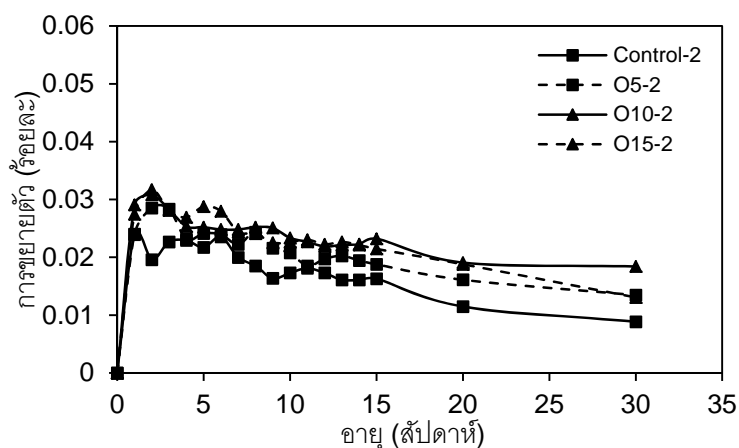


ข) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

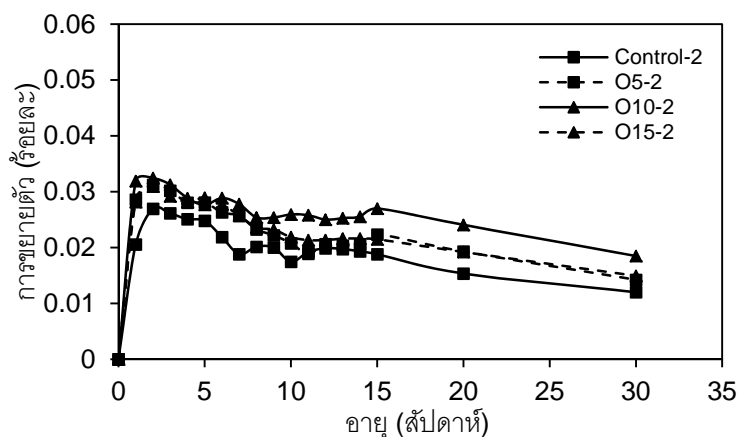
ภาพที่ 32 การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยแก้วไม้อย่างพาราที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง

อิทธิพลของแก้วปาล์มน้ำมัน

ภาพที่ 33ก) และ 33ข) แสดงการขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วปาล์มน้ำมัน ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีการขยายตัวคล้ายคลึงกับจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วไม้อย่างพารา คือขยายตัวสูงที่สัปดาห์แรกและค่อยลดลงเมื่อระยะเวลาแช่เพิ่มมากขึ้นไปจนถึง 30 สัปดาห์ ของการแช่ในสารละลายทั้งโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต แต่อย่างไรก็ตามค่าการขยายจะตัวเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่บางส่วนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคของแก้วปาล์มน้ำมันมีขนาดใหญ่กว่าดินขาวเผาตังแสดงไว้ในตารางที่ 4 แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าการขยายตัวมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เช่นเมื่อระยะเวลาแช่ 30 สัปดาห์ ค่าการขยายตัวของ Control-2, O5-2, O10-2 และ O15-2 แช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 0.009, 0.013, 0.018 และ 0.013 และเท่ากับร้อยละ 0.012, 0.014, 0.018 และ 0.014 ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการแทนที่บางส่วนด้วยแก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 5, 10 และ 15 ไม่ได้มีผลต่อการขยายตัวมากนัก



ก) สารละลายโซเดียมซัลเฟต

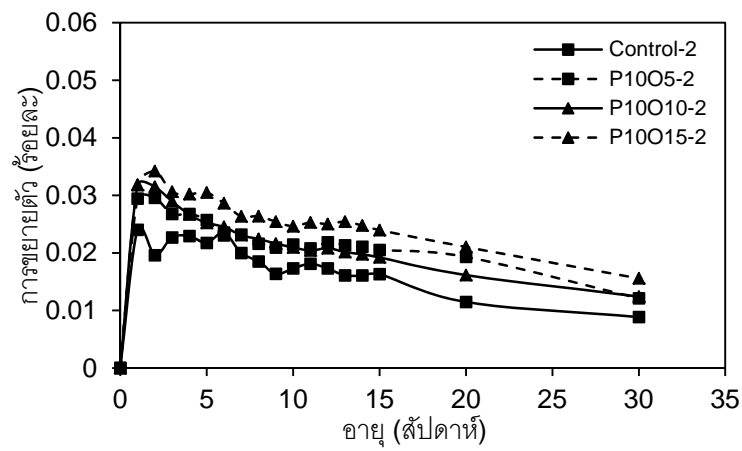


ข) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

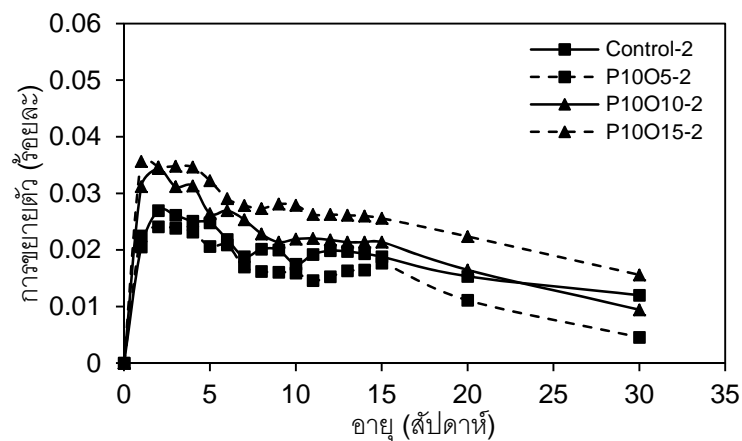
ภาพที่ 33 การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง

อิทธิพลของเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน

ภาพที่ 34 และ 35 แสดงการขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าเมื่อแช่ตัวอย่างเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มีการขยายตัวสูงในทุกอัตราส่วนผสม และเมื่อแช่เป็นเวลานานขึ้นการขยายตัวมีแนวโน้มลดลง คล้ายคลึงกับการขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพารา และแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน จากผลการทดสอบยังพบอีกว่าเมื่อมีการแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน รวมกันแล้วไม่เกินร้อยละ 25 เช่น เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 10 และเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ



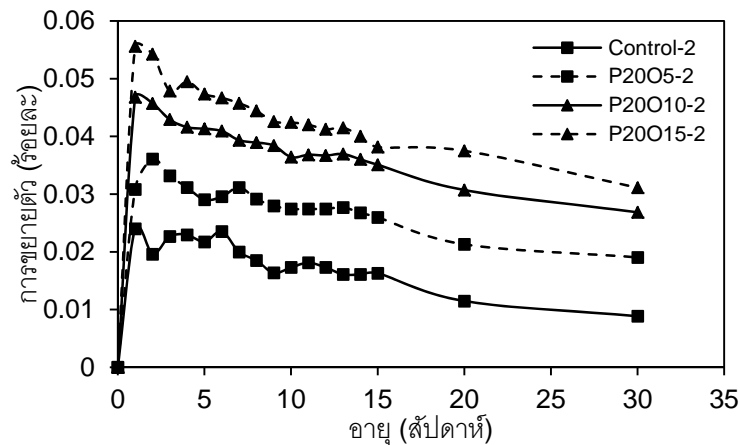
ก) สารละลายโซเดียมซัลเฟต



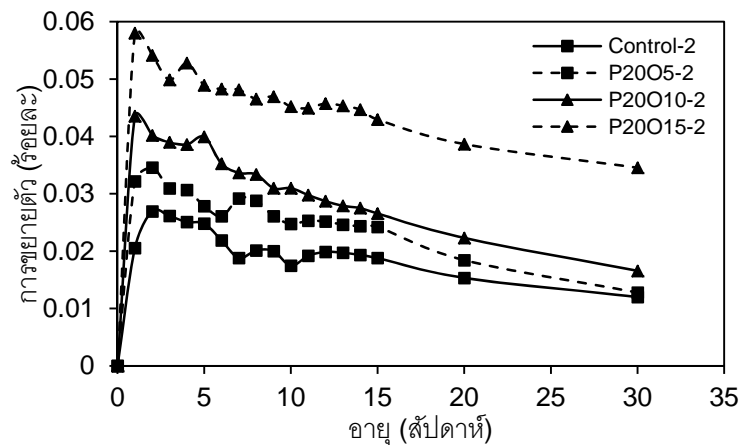
ข) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 34 การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยแก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 10 และแก้วปาล์มน้ำมันที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง

ละ 15 ค่าการขยายตัวที่ 30 สัปดาห์ เท่ากับร้อยละ 0.016 และ 0.016 เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยแก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 20 และแก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ค่าการขยายตัวที่ 30 สัปดาห์เท่ากับร้อยละ 0.019 และ 0.013 เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อการแทนที่บางส่วนเท่ากับร้อยละ 30 ขึ้นไป ค่าการขยายตัวจะสูงกว่าอัตราส่วนผสมอื่นๆ อย่างชัดเจนดังแสดงไว้ในภาพที่ 35 ที่บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ก) สารละลายโซเดียมซัลเฟต



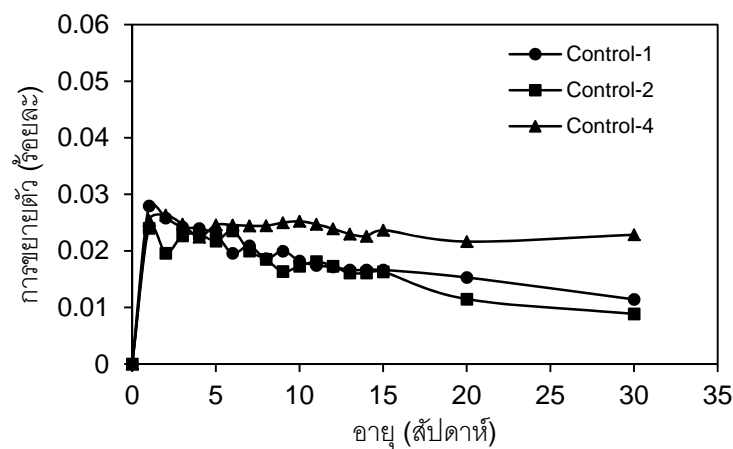
ข) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 35 การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยแก้วไม้อย่างพาราร้อยละ 20 และแก้วปาล์มน้ำมันที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง

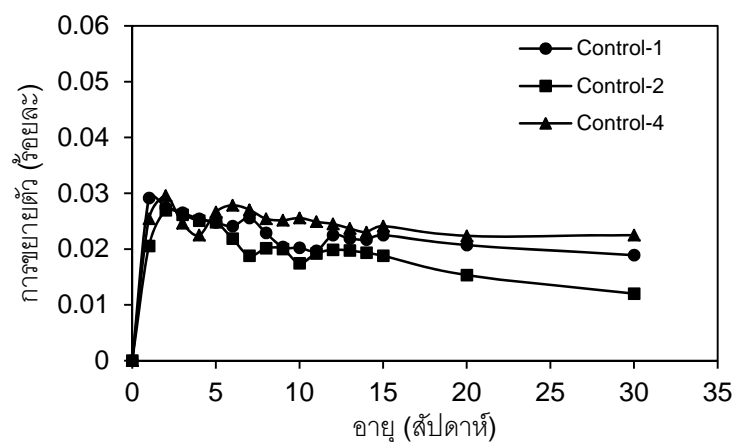
สรุปการขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต มีการขยายตัวสูงในช่วงสัปดาห์แรก และการขยายตัวค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาแช่นานขึ้นจนถึง 30 สัปดาห์ มีการขยายตัวสูงในจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วยแก้วไม้อย่างพาราและ/หรือแก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไป เช่นตัวอย่าง P30-2, P20O10-2 และ P20O15-2

อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน

ผลการทดสอบการขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์ เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นระยะเวลา 30 สัปดาห์ โดยการศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลการขยายตัวเนื่องจากระยะเวลาบ่มร้อนที่แตกต่างกันที่ 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ของตัวอย่าง Control, P10 และ O10 พบว่าเมื่อแช่ตัวอย่างเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มีการขยายตัวสูงในทุกอัตราส่วนผสมและทุกระยะเวลาบ่มร้อนดังแสดงไว้ในภาพที่ 36-38 และเมื่อแช่เป็นระยะเวลานานขึ้น

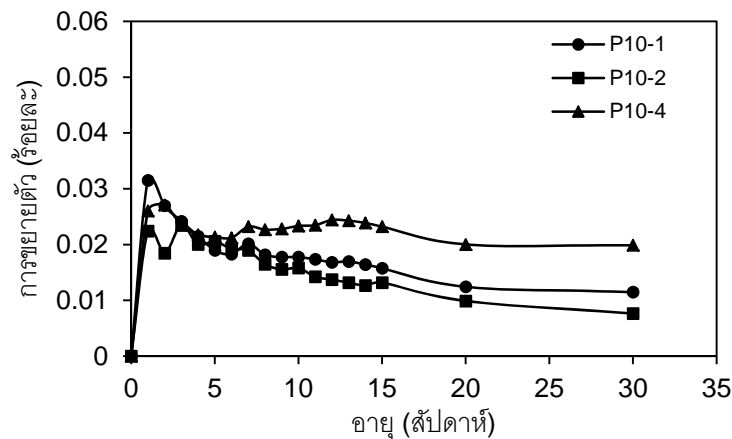


ก) สารละลายโซเดียมซัลเฟต

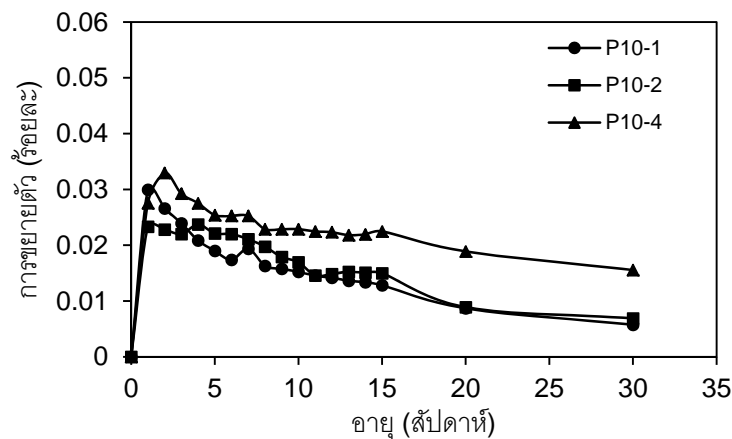


ข) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 36 การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์ดินขาว เปรียบเทียบที่ระยะเวลาบ่มร้อนต่างกัน



ก) สารละลายโซเดียมซัลเฟต

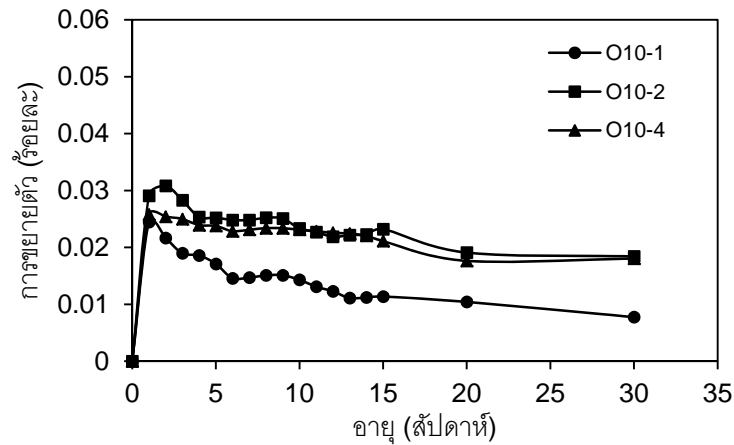


ข) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

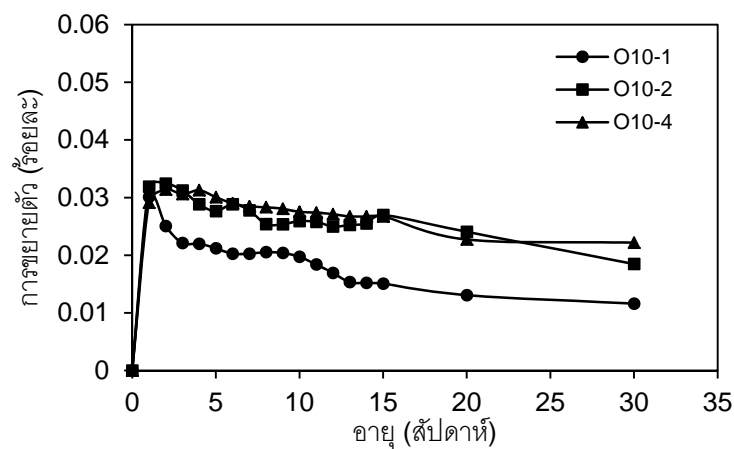
ภาพที่ 37 การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มร้อนต่างกัน

การขยายตัวมีแนวโน้มลดลง และเป็นที่น่าสังเกตว่าตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มร้อน 1 และ 2 ชั่วโมง มีอัตราการขยายตัวลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการขยายตัวที่ 1 สัปดาห์ และตัวอย่างได้รับความร้อนในขั้นตอนการบ่มในตู้อบเป็นเวลานาน (4 ชั่วโมง) ทำให้ตัวอย่างมีความเสถียรมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับที่ใช้เวลาบ่มร้อน 1 และ 2 ชั่วโมง [Bakharev \(2005\)](#) กล่าวว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังอัดสูงโครงสร้างอะลูมิเนียมซิลิเกตพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์จะมีความเสถียรมากกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังอัดน้อย ตัวอย่างเช่นค่าการขยายตัวของ Control-1, Control-2 และ Control-4 ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตระยะเวลา 1 สัปดาห์ เท่ากับร้อยละ 0.028, 0.024 และ 0.025 และเมื่อแช่นานขึ้นเป็นระยะเวลา 30 สัปดาห์ ค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.011, 0.009 และ 0.023 ตามลำดับ ซึ่งจะ

เห็นได้ว่าตัวอย่าง Control-4 ค่าการขยายตัวที่ 1 และ 30 สัปดาห์ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากและมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ก) สารละลายโซเดียมซัลเฟต



ข) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 38 การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มร้อนต่างกัน

กำลังยึดหน่วงระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์ปกติ

อิทธิพลของเถาไม้ยางพารา

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการยึดหน่วง (Bond strength) ระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์ปกติ เมื่อบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ดังแสดงไว้ใน **ภาพที่ 39** เมื่อเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถาไม้ยางพาราร้อยละ 10 กับจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผอย่างเดี่ยว พบว่าจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถาไม้ยางพาราร้อยละ 10 จะมีค่ากำลังยึดเหนี่ยวสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผอย่างเดี่ยวอย่างมากในทุกระยะเวลาบ่มร้อน เช่นตัวอย่าง P10-1 (บ่มร้อน 1 ชั่วโมง) มีค่ากำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 9.59 เมกะพาสคัล ในขณะที่ตัวอย่าง Control-1 มีค่ากำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 2.64 เมกะพาสคัล เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผอย่างเดี่ยวมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วจากความละเอียดสูงของดินขาวเผาและจากการผสมในขณะที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการปล่อยความร้อนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดการก่อตัวในตัวเองขึ้นอย่างรวดเร็วไม่เกิดการประสานกับเนื้อปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ จึงเกิดการยึดหน่วงที่ผิวรอยต่อกับซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติได้น้อย ในส่วนของตัวอย่าง P10-1 นั้น การที่เถาไม้ยางพารามีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าดินขาวเผา (พื้นที่ผิวน้อย) ทำให้ตัวอย่างเกิดการไหลได้มากกว่า ส่งผลให้เกิดการก่อตัวได้ช้า ซึ่งทำให้เนื้อจีโอพอลิเมอร์มีเวลาสัมผัส แทรกซึมเข้าไปในเนื้อผิวซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติ จนเกิดการยึดหน่วงประสานที่ดีขึ้น

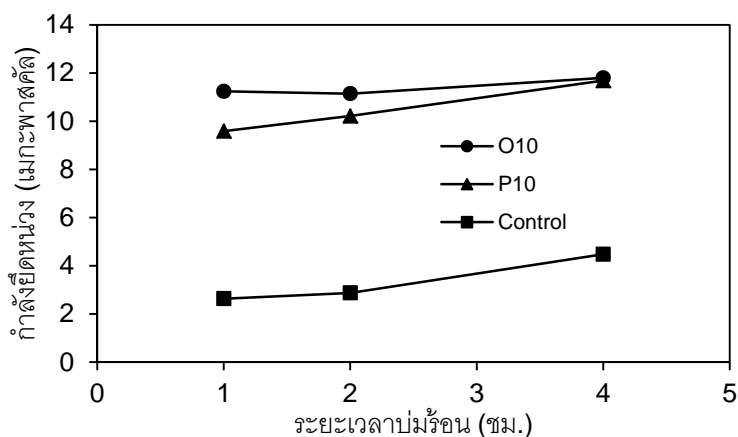
อิทธิพลของเถาปาล์มน้ำมัน

ผลค่าการยึดหน่วงของจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติดัง **ภาพที่ 39** โดยพิจารณาตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถาปาล์มน้ำมัน จากการทดสอบพบว่า มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดสอบของตัวอย่างแทนที่บางส่วนด้วยเถาไม้ยางพารา ที่มีค่าการยึดหน่วงสูงกว่าตัวอย่างจากดินขาวเผอย่างเดี่ยวมาก ในทุกอายุบ่มที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าตัวอย่าง O10-1 มีค่ากำลังยึดหน่วงสูงกว่าตัวอย่าง P10-1 เล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ

อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน

ผลการทดสอบกำลังยึดหน่วงโดยพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาบ่มร้อน จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อระยะเวลาบ่มร้อนเพิ่มขึ้น กำลังยึดหน่วงได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยของทุกอัตราส่วนผสมดังแสดงไว้ใน **ภาพที่ 39** เช่นตัวอย่าง P10-1, P10-2 และ P10-4 ระยะเวลาบ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชั่วโมง มีค่ากำลังยึดหน่วงเท่ากับ 9.59, 10.22 และ 11.68 เมกะพาสคัล ตามลำดับ

เนื่องระยะเวลาบ่มร้อนที่นานขึ้นจะทำให้กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้นาน ซึ่งจะส่งผลโดยให้ความสามารถในการยึดหน่วงได้ดีขึ้น



ภาพที่ 39 กำลังยึดหน่วงของอีพอกซีโพลีเมอร์ที่ระยะเวลาบ่มร้อนต่างกัน

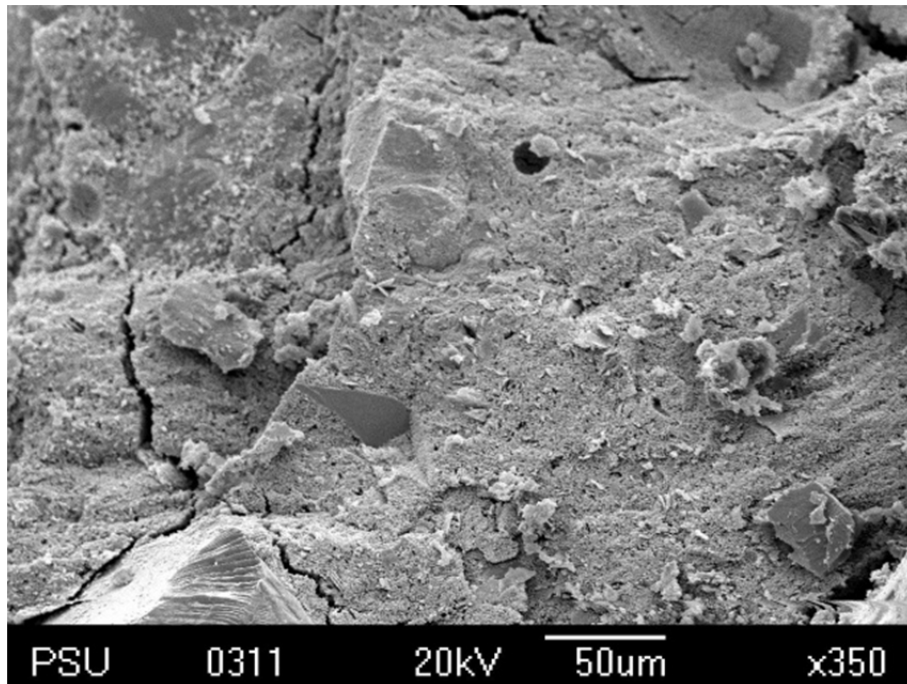
การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

อิทธิพลของเถ้าไม้ยางพารา

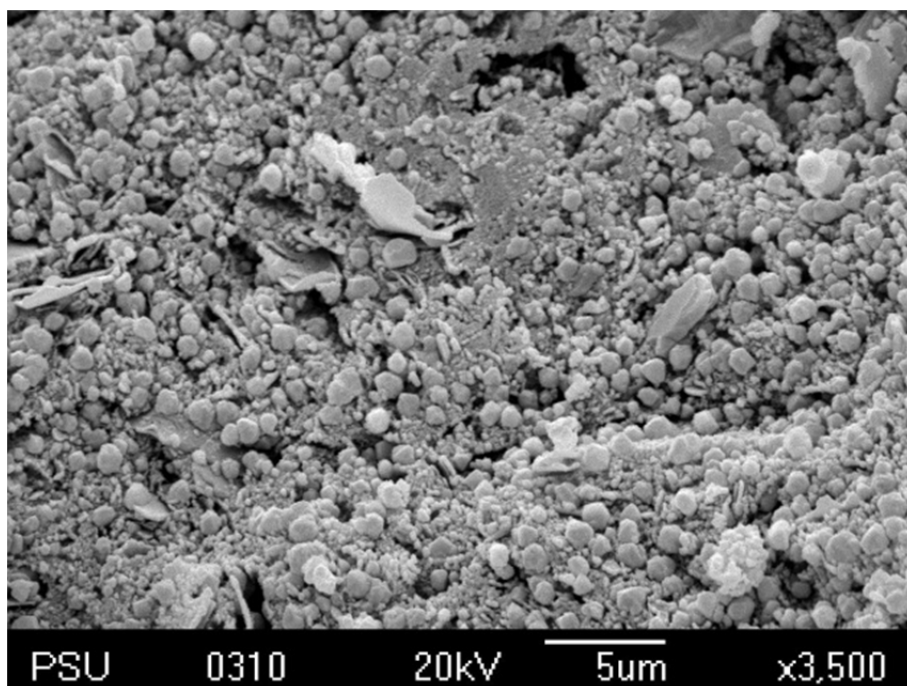
จากการศึกษาภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของอีพอกซีโพลีเมอร์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของอีพอกซีโพลีเมอร์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ และระยะเวลาบ่มร้อนที่ต่างกัน ดังเช่นภาพที่ 40 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอีพอกซีโพลีเมอร์ดินขาวเฝ้าอย่างเดี่ยว (Control-2) ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง จากภาพที่ 40ก) จะเห็นได้ว่าเนื้ออีพอกซีโพลีเมอร์มีความแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) แต่ยังสามารถพบเห็นเกล็ดเป็นแผ่นที่ยังทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ และยังมีรูพรong อยู่เล็กน้อย ความหนาแน่นของเนื้ออีพอกซีโพลีเมอร์นี้ส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัด (เนื้อแน่นให้ค่ากำลังอัดสูง) ในขณะที่ภาพที่ 40ข) ได้แสดงผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นก้อนเล็กๆ เรียงรายเป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจจะเป็นการแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาที่ดีในระดับหนึ่ง

ภาพที่ 41 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอีพอกซีโพลีเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 20 (P20-2) ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง ภาพที่ 41ก) จะพบว่าเนื้ออีพอกซีโพลีเมอร์ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Non-homogeneous) พร้อมทั้งยังแสดงให้เห็นรูพรong เป็นจำนวนมาก และยังมีเกล็ดเป็นแผ่นที่หลุดจากการทำปฏิกิริยาเป็นจำนวนมากกว่าเมื่อเทียบกับอีพอกซีโพลีเมอร์ดินขาวเฝ้าอย่างเดี่ยว (Control-2 ภาพที่ 40ก)) ส่วนหนึ่งอันเนื่องมาจากขนาดอนุภาคของเถ้าไม้

ยางพาราที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคดินขาวเผาที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดีมากนัก ในขณะที่การทำปฏิกิริยาของอนุภาคดินขาวเผาที่มีขนาดเล็กหรือมีความละเอียด ซึ่งทรงผลให้มีพื้นที่ผิวสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น (van Jaarsveld et al, 2003, Fernandez-Jimenez et al, 2005,) ในอีกแง่หนึ่งจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารามีเนื้อวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) มีผลมาจากแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าไม้ยางพารา ซึ่งมีมากถึงประมาณร้อยละ 41 โดยน้ำหนัก แต่การเกิดจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymerization) จะใช้ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะได้จากวัสดุตั้งต้นเช่นเถ้าลอย (Fly ash) และดินขาวเผา (Metakaolin) การที่เถ้าไม้ยางพารามีแคลเซียมออกไซด์ปริมาณมากนั้นจะส่งผลเสีย (Hostile) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดลองนี้มีแนวโน้มสอดคล้องกับการศึกษาของ Winnefeldt et al. (2010) และ Temuujin et al. (2009) นอกจากนี้ภาพที่ 41ข) ได้แสดงภาพกำลังขยายสูงที่ผิวภายในของจีโอพอลิเมอร์ จะพบอนุภาคผลิตภัณฑ์ที่มีภาพร่างทรงมนที่มีขนาดใหญ่กว่าของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดี๋ยวดังภาพที่ 40ข) ผลิตภัณฑ์ภาพร่างทรงมนที่มีขนาดใหญ่กว่านั้นอาจจะเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาได้ไม่ดี

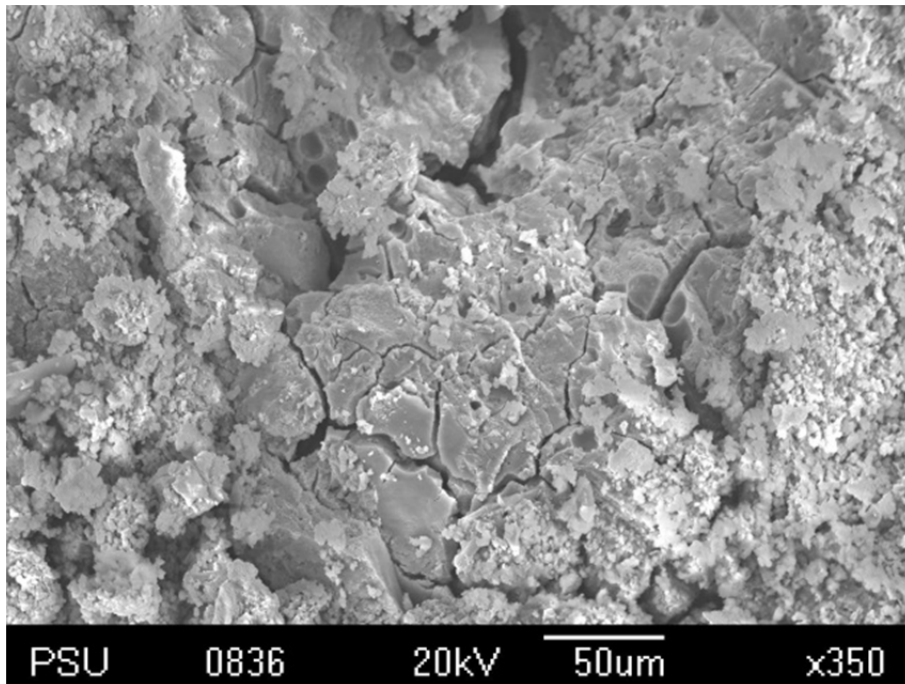


ก) กำลังขยาย 350

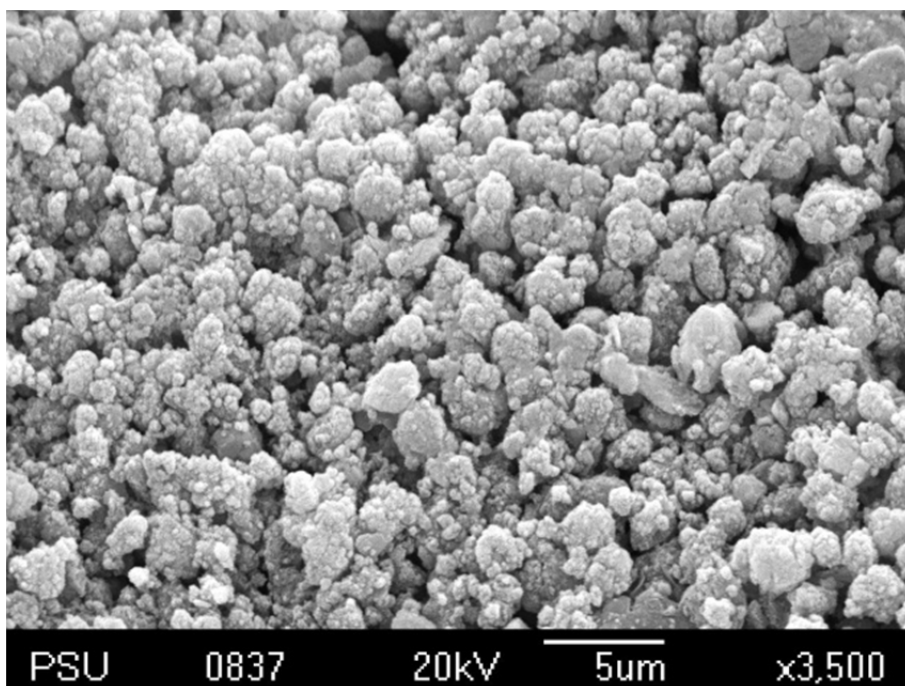


ข) กำลังขยาย 3,500

ภาพที่ 40 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาแล้วน ป่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Control-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ก) กำลังขยาย 350



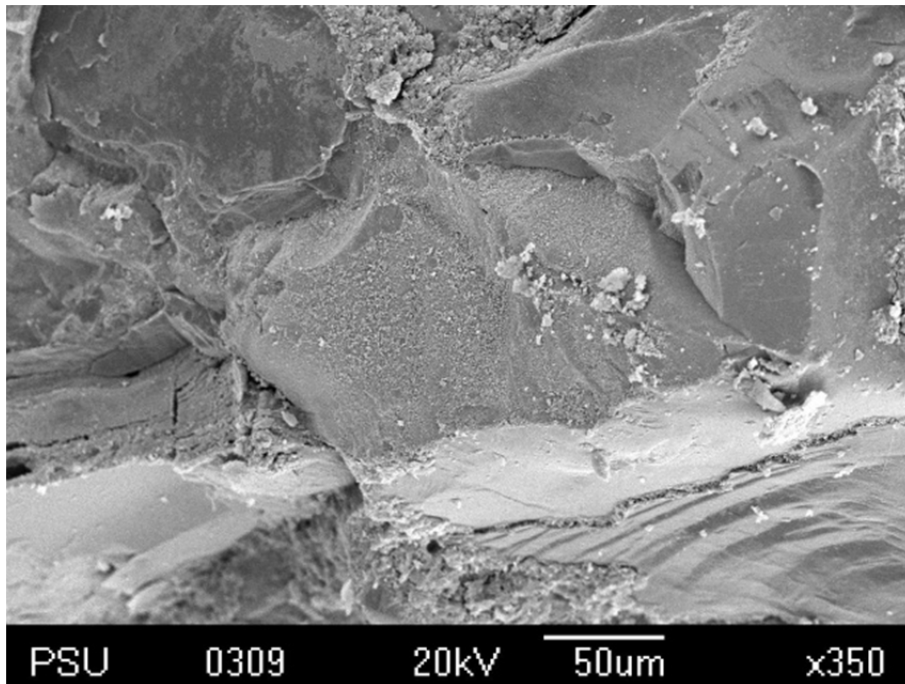
ข) กำลังขยาย 3,500

ภาพที่ 41 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาแทนที่ด้วยแก้ว
ไม่ยางพาราร้อยละ 20 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (P20-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

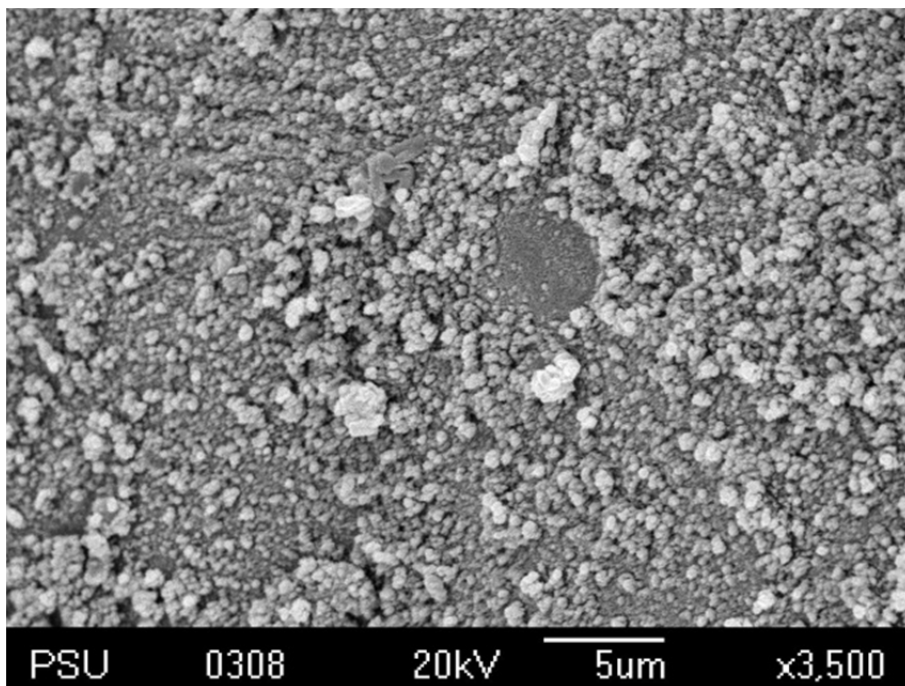
อิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมัน

ภาพที่ 42 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง (O5-2) **ภาพที่ 42ก)** พบว่าเนื้อของจีโอพอลิเมอร์มีความแน่นและเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้อย่างพาราหรือแม้กระทั่งจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว พร้อมทั้งยังพบอีกว่าเนื้อจีโอพอลิเมอร์แทบไม่มีโพรงให้เห็นแม้แต่น้อยและยังไม่ปรากฏเห็นแผ่นเกล็ดที่หลุดจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งแสดงว่าจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 นั้นสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีจึงส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดเนื่องด้วยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มนั้นมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 38.37 ถึงแม้ว่าจะมี CaO อยู่ในปริมาณสูงก็ตาม แต่เนื่องใช้ไปร้อยละ 5 และในอีกแง่หนึ่งเถ้าปาล์มน้ำมันมีพื้นที่ผิวจำเพาะใกล้เคียงกับดินขาวเผาจึงส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา **ภาพที่ 42ข)** แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยา ว่าเกิดได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์อัตราส่วนผสมอื่นๆ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีความละเอียดเป็นอย่างมากกระจายอย่างสม่ำเสมอและไม่มีช่องว่างหรือรูโพรงแสดงให้เห็น การเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่มีขนาดละเอียดส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มมากขึ้น เช่นเมื่อมีการแทนที่ร้อยละ 15 จะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีเนื้อไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน มีรูโพรงเป็นจำนวนมากและที่สำคัญพบว่ามีส่วนที่หลุดจากการทำปฏิกิริยาเป็นจำนวนมากดังแสดงไว้ใน**ภาพที่ 43** กล่าวได้ว่าเกิดปฏิกิริยาได้ไม่สมบูรณ์ เหตุผลเนื่องจากถึงแม้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันจะมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก แต่ยังมี CaO ในปริมาณสูงประมาณร้อยละ 13.84 ซึ่ง CaO ไม่ใช่องค์ประกอบทางเคมีของการเกิดจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลเสียต่อกำลังอัด จากการวิเคราะห์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าในเนื้อจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 เนื้อของจีโอพอลิเมอร์ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีรูโพรงจำนวนมากและยังมีอนุภาคที่เป็นเกล็ดที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ เหล่านี้ล้วนเป็นตัวยืนยันได้ระดับหนึ่งถึงเหตุผลของความแตกต่างของกำลังอัด

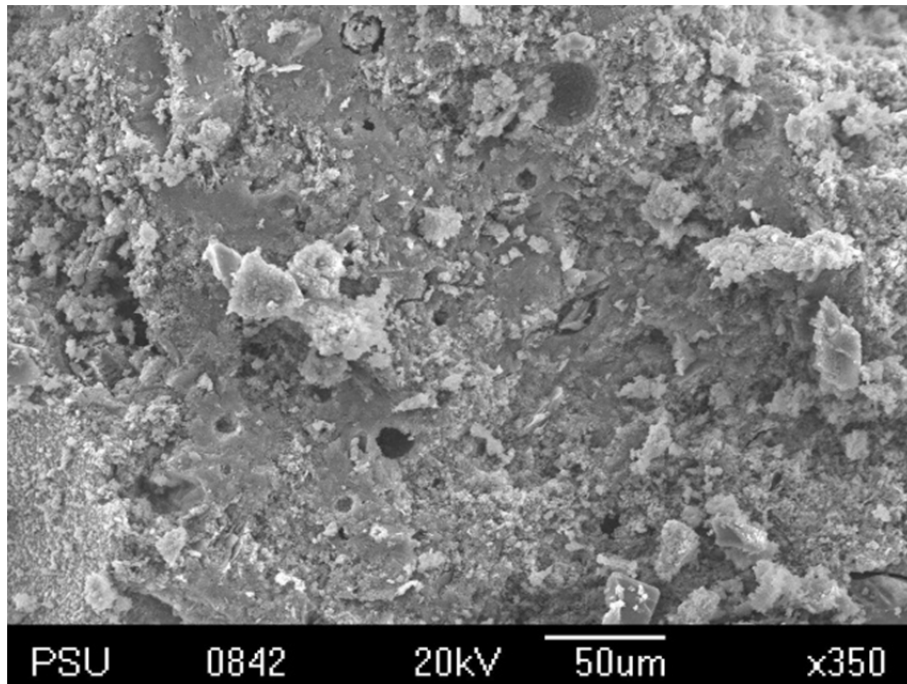


ก) กำลังขยาย 350

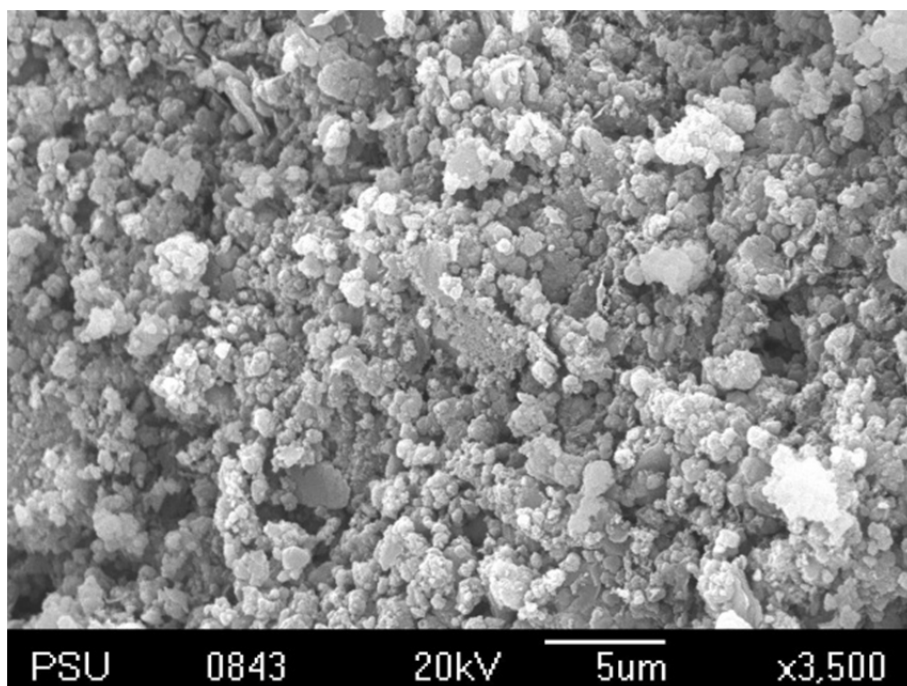


ข) กำลังขยาย 3,500

ภาพที่ 42 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยแก้วปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O5-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ก) กำลังขยาย 350

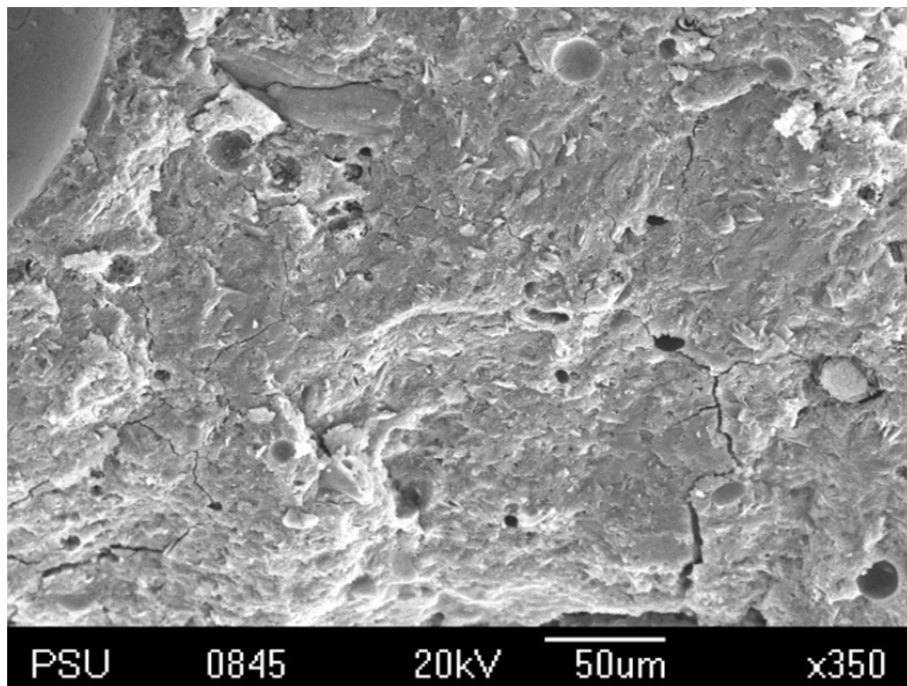


ข) กำลังขยาย 3,500

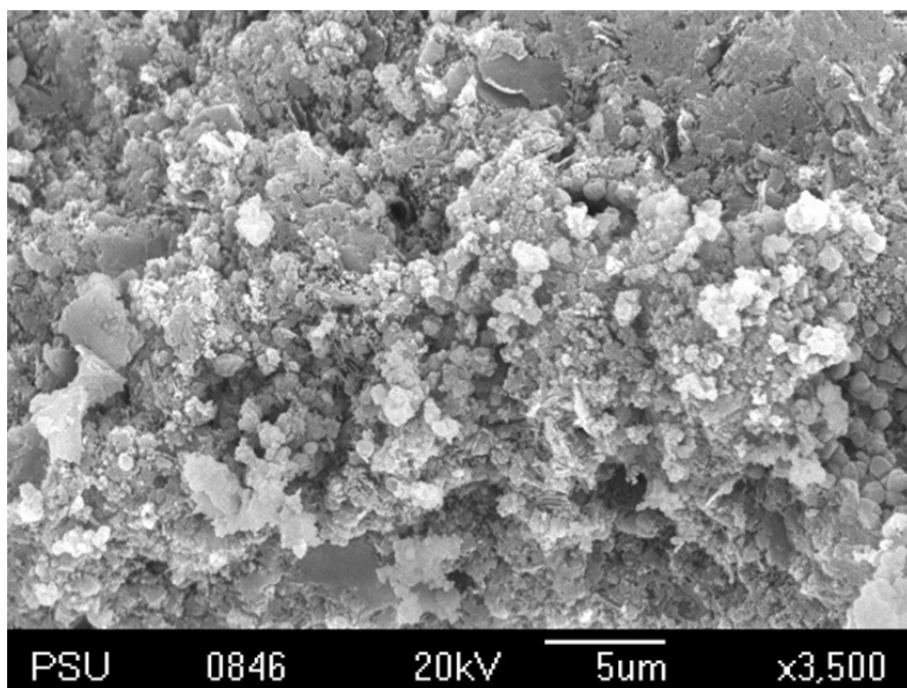
ภาพที่ 43 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยแก้วปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O15-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยแก้วปาล์ม น้ำมันร้อยละ 15 ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 44-46 เพื่อติดตามตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เนื่องจากระยะเวลาบ่มร้อน ภาพที่ 44ก) แสดงให้เห็นเนื้อจีโอพอลิเมอร์ที่มีรูพรองอยู่จำนวนมาก และยิ่งไปกว่านั้นจะเห็นได้ว่าเนื้อจีโอพอลิเมอร์มีความพรุน (ไม่แน่น) เนื่องจากระยะเวลาบ่มร้อนน้อยเกินไปจึงไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาที่จะทำให้ได้เนื้อจีโอพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นสูง และยังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยามีแผ่นเกล็ด ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าเนื้อจีโอพอลิเมอร์ที่มีแผ่นเกล็ดปริมาณมากจะส่งผลทำให้กำลังอัดลดลง เมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มร้อนมากขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาขยายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะมีผลให้เนื้อของจีโอพอลิเมอร์มีความหนาแน่นสูงดังแสดงในภาพที่ 45 และ 46 การเพิ่มระยะเวลาบ่มร้อนเป็นการเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ของจีโอพอลิเมอร์

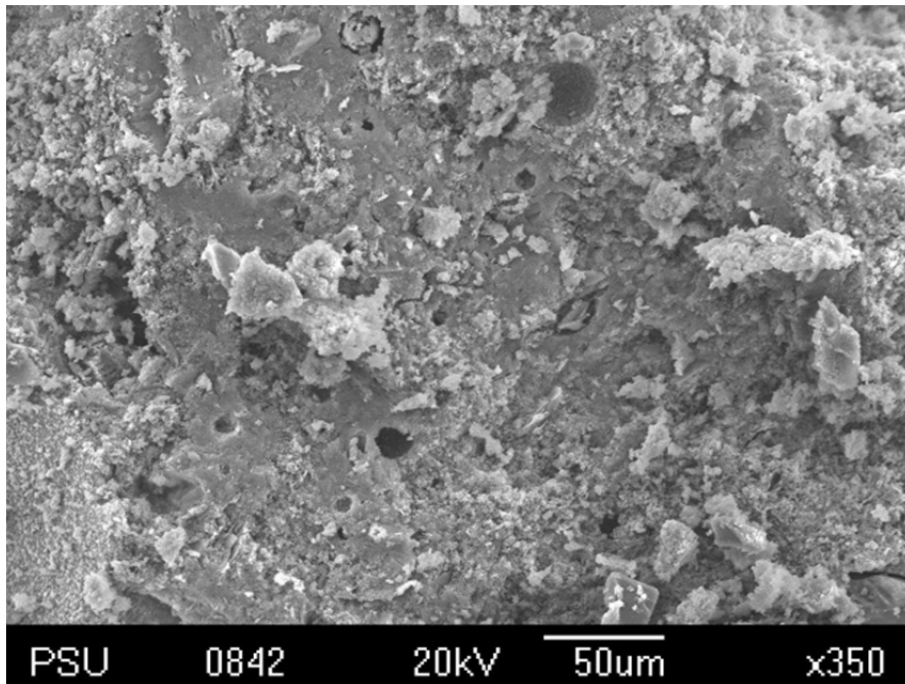


ก) กำลังขยาย 350

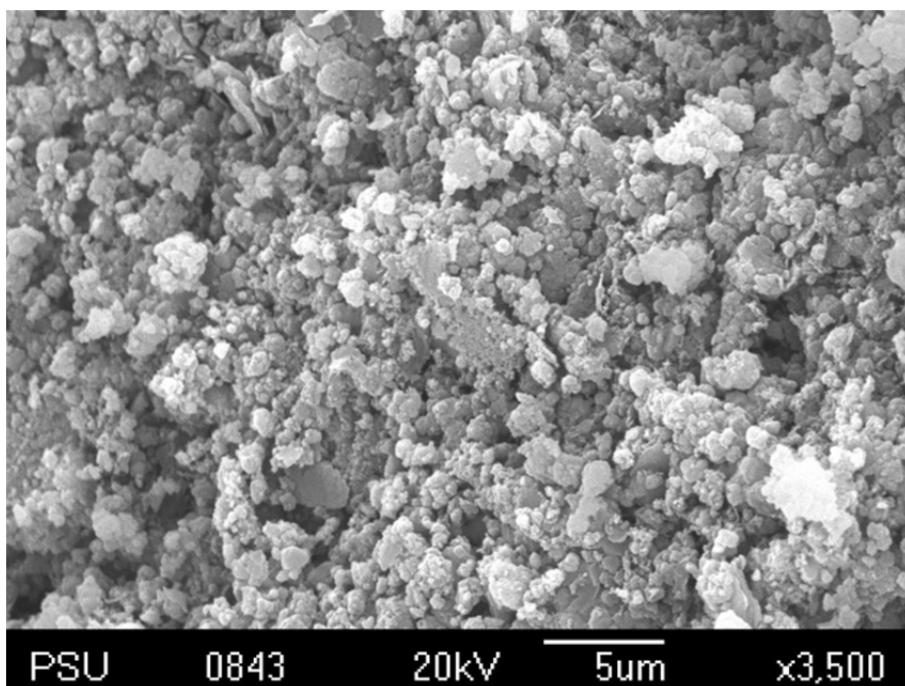


ข) กำลังขยาย 3,500

ภาพที่ 44 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอีพ็อกซีเรซินที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (O15-1) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

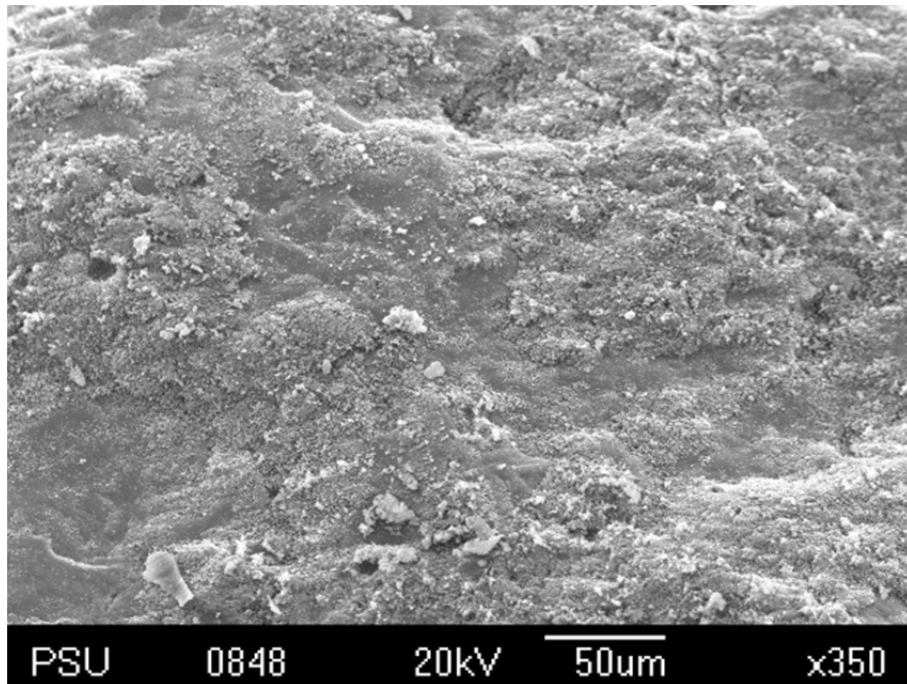


ก) กำลังขยาย 350

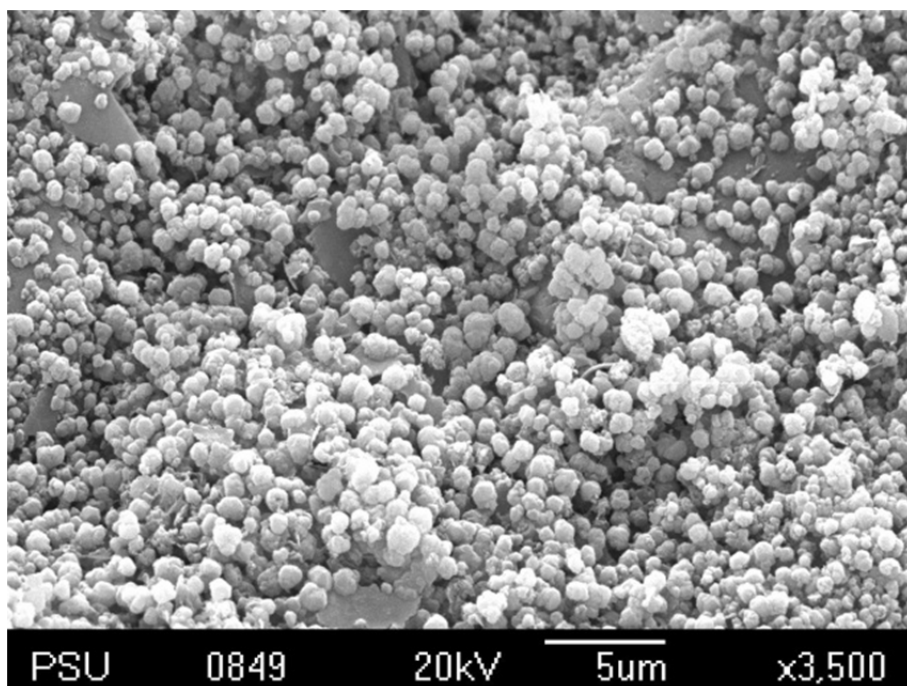


ข) กำลังขยาย 3,500

ภาพที่ 45 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยแก้วปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O15-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ก) กำลังขยาย 350



ข) กำลังขยาย 3,500

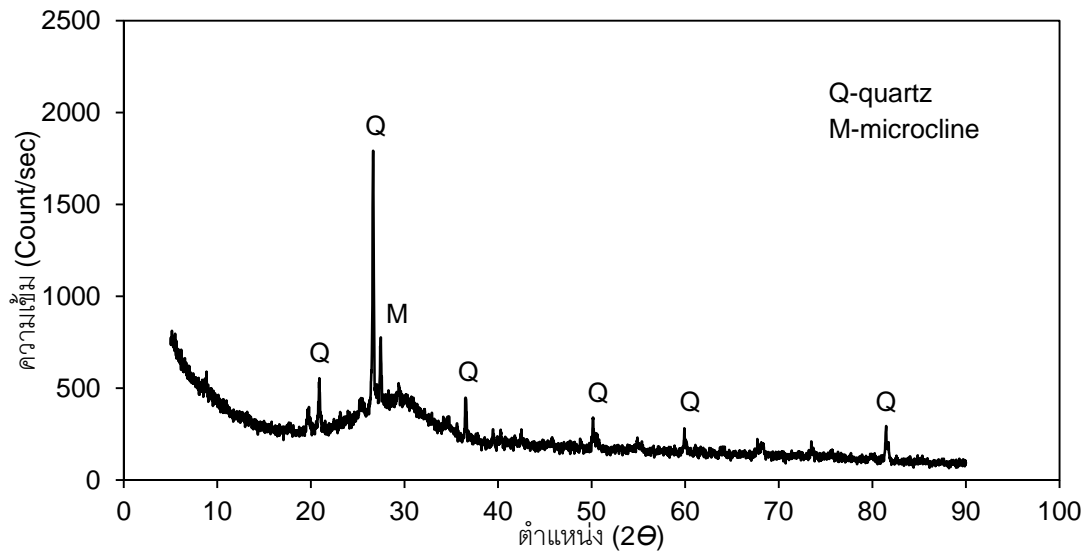
ภาพที่ 46 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยแก้วปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (O15-4) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่

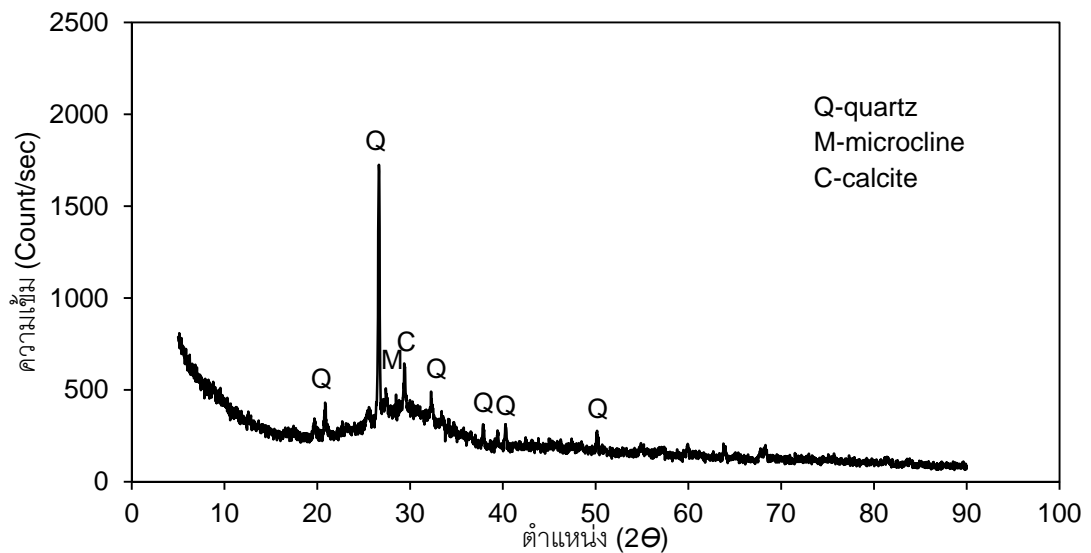
อิทธิพลของเถ้าไม้ยางพารา

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทางอสังฐานวิทยาของจีโอพอลิเมอร์เพสต์โดยเทคนิค (X-ray diffraction; XRD) โดยใช้จีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแร่ จากตัวอย่างที่ใช้ดินขาวเผาอย่างเดียว และใช้ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง จากการตรวจสอบพบว่าในจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียวดัง **ภาพที่ 47** นั้นประกอบไปด้วยวัฏภาคของผลึกควอตซ์ (Quartz; SiO_2) และไมโครไคลน์ (Microcline; KAlSi_3O_8) โดยแร่ดังกล่าวที่ปรากฏอยู่นั้นมาจากดินขาวเผา ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยเทคนิค XRD ประกอบกับเทคนิค XRF พบว่ามีซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งหมดนี้จะยึดเหนี่ยวแบบโครงข่าย (Cross-link Network) (Bakharev, 2005) ของจีโอพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามดินขาวเผายังพบอิลไลต์ (Illite; $\text{Al}_2\text{SiO}_5\text{AlO}_4(\text{OH})_2$) อยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งหลังจากผสมกับโซเดียมซิลิเกต โซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ไม่พบอิลไลต์ในส่วนประกอบของเนื้อจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าปฏิกิริยาเกิดจีโอพอลิเมอร์ได้เปลี่ยนแปลงให้เป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ

ภาพที่ 48 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 20 โดยประกอบไปด้วยผลึกควอตซ์ ไมโครไคลน์และแคลไซต์ (Calcite; CaCO_3) โดยควอตซ์และไมโครไคลน์ได้มาจากดินขาวเผา และแคลไซต์ได้มาจากเถ้าไม้ยางพารา ซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก จากผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค XRD เป็นตัวยืนยันได้อีกทางหนึ่งของการมีแคลเซียม ซึ่งจะมีผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลงดังแสดงไว้ในหัวข้อของกำลังอัด



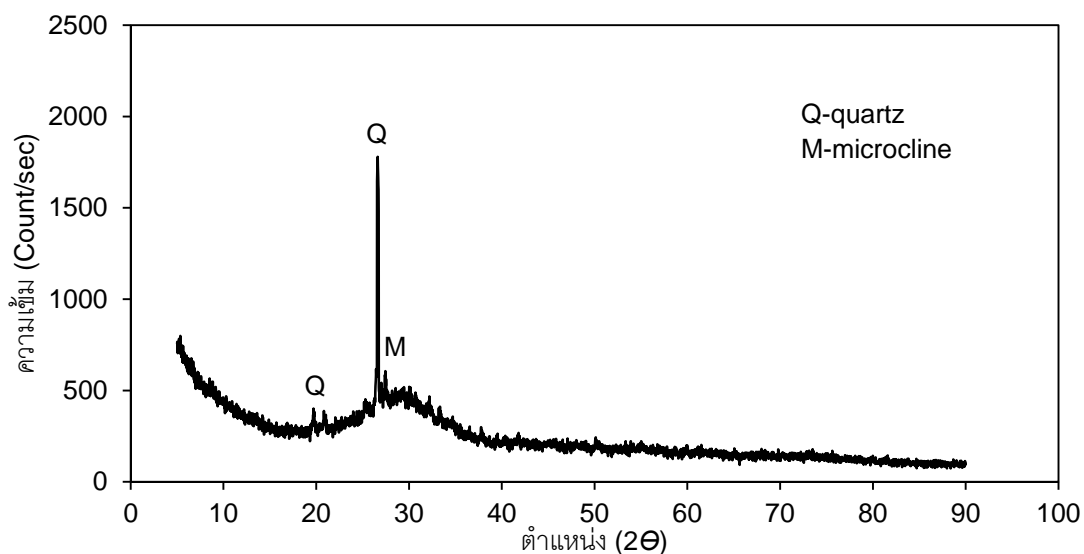
ภาพที่ 47 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผา ล้วน บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Control-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



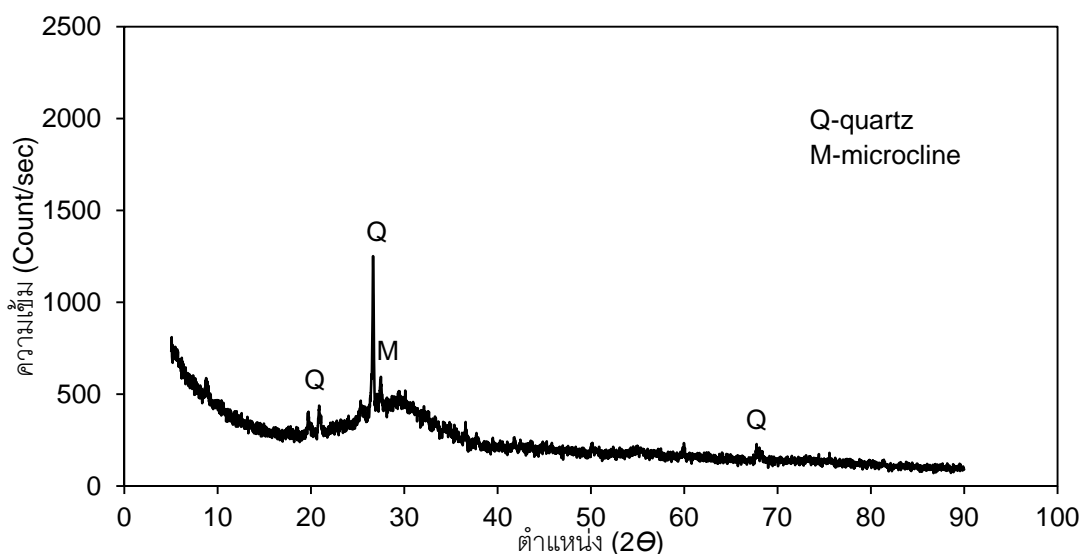
ภาพที่ 48 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วย เถ้าไม้ยางพารา ร้อยละ 20 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (P20-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมัน

ภาพที่ 49 และ 50 เป็นลายพิมพ์ XRD ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 และ 15 ตามลำดับ พบว่าเป็นลายพิมพ์ XRD ทั้งสองเส้นจะปรากฏลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่คล้ายคลึงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียวที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยผลึกที่เป็นชนิดเดียวกัน ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz; SiO_2) และ ไมโครไคลน (Microcline; KAlSi_3O_8) จากลายพิมพ์ XRD ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันจะแสดงความเป็นผลึกได้ไม่ค่อยชัดเจน โดยเฉพาะผลึกควอตซ์ที่พบอย่างชัดเจนในจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว และเป็นที่น่าสังเกตว่าเส้นภาพแบบ XRD ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันไม่พบผลึกแคลไซต์อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งในวัสดุตั้งต้นเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่ก็ตาม



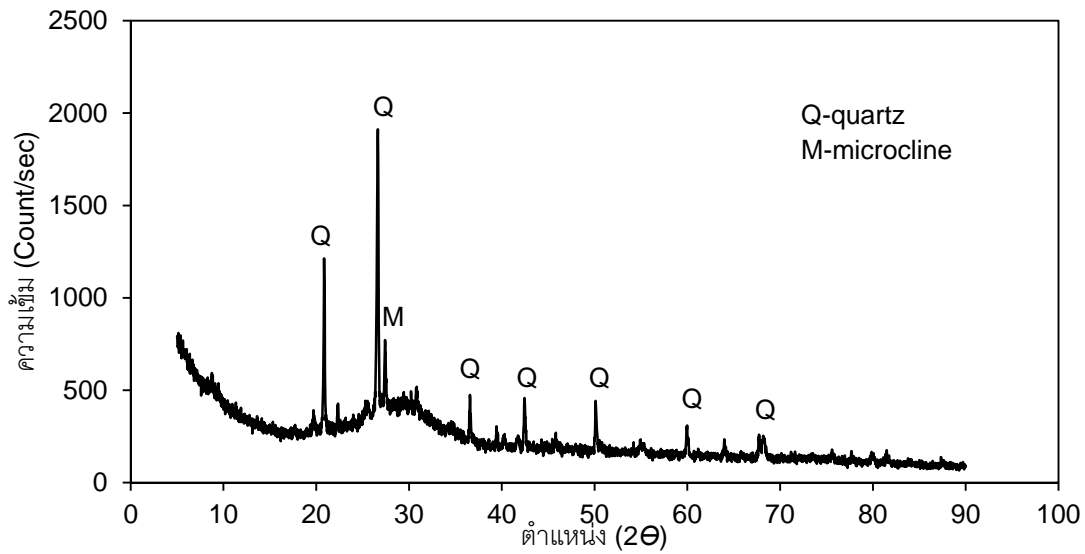
ภาพที่ 49 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O5-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



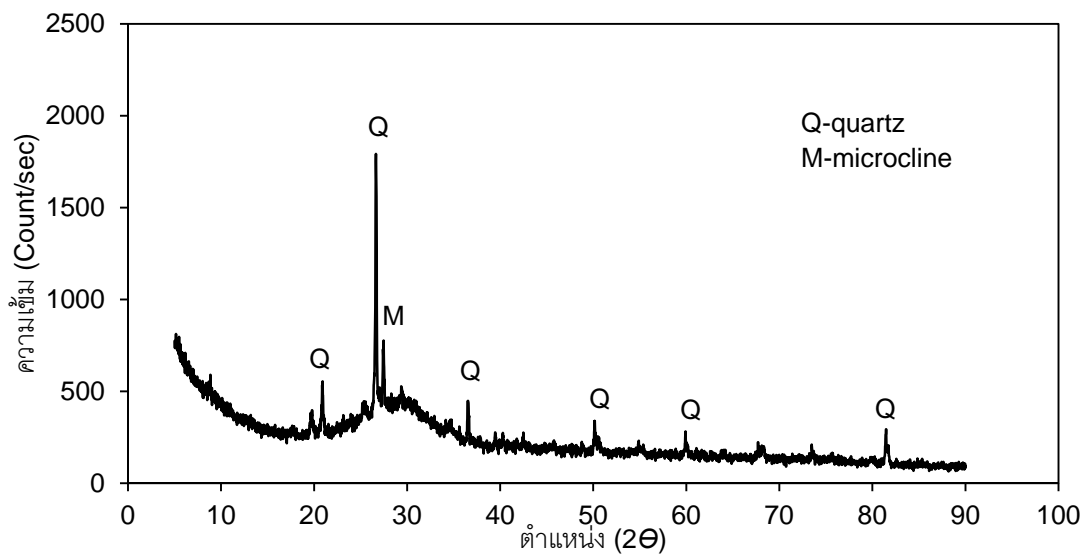
ภาพที่ 50 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วย
 แก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O15-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศา
 เซลเซียส

อิทธิพลของระยะเวลาบ่มร้อน

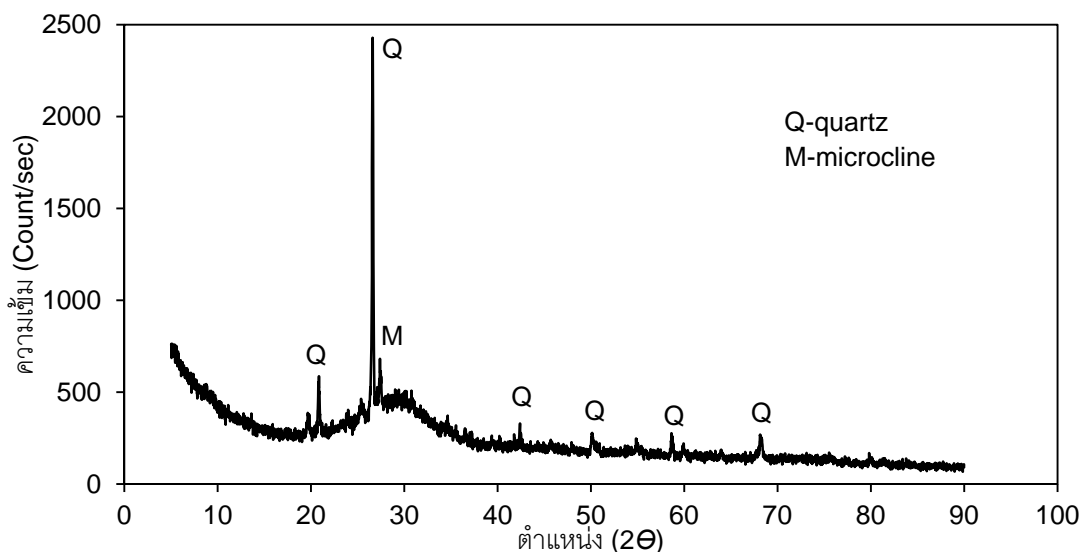
ภาพที่ 51-53 แสดงลักษณะเส้นภาพแบบ XRD ของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่าง
 เดียว โดยบ่มร้อนที่ระยะเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ จากการตรวจสอบพบว่าเส้นภาพแบบ
 XRD ของทั้ง 3 ตัวอย่างจะปรากฏช่วงของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยจะพบ
 ผลึกควอตซ์ และไมโครไคลน์ ซึ่งเป็นผลึกชนิดเดียวกันที่พบในดินขาวเผา ถึงกระนั้นก็ตามเป็นที่น่า
 สังเกตว่าลักษณะเส้นภาพแบบ XRD จะมีความแตกต่างทางด้านความชัดเจนของผลึก (ความชัดเจน
 ของพีก) โดยเฉพาะควอตซ์ เช่น จีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียวที่บ่มร้อน 1 ชั่วโมง จะมีเส้นภาพ
 แบบ XRD ที่มีพีกสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียวที่บ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง ซึ่งความ
 ชัดเจนของพีกอาจจะสามารถแสดงเป็นนัยที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสม
 เดียวกัน ดังที่แสดงค่ากำลังอัดไว้ใน**ภาพที่ 24ก**) กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียวบ่มร้อน
 1 ชั่วโมงที่ 28 วัน มีค่าสูงกว่าที่บ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมงอย่างชัดเจน ซึ่งจะมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทาง
 เดียวกันกับงานวิจัยของ **Mustafa Al Bakri et al. (2012)** ที่ใช้แก้วลอยเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอ
 พอลิเมอร์ และใช้ XRD และ SEM เพื่อตรวจสอบอธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคว่ามีผลต่อ
 กำลังอัด ในผลการทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาล้วนบ่มร้อน 1 ชั่วโมง ที่อายุบ่มในอากาศ
 28 วัน นั้นมีค่าสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดสอบนี้มีความสอดคล้อง
 กับผลการทดสอบของ **Rovnanik (2010)** และผลการวิเคราะห์ XRD แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเส้น



ภาพที่ 51 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของจีโอพอลิเมอร์ดินเขาเผาล้วน บ่มร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Control-1) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



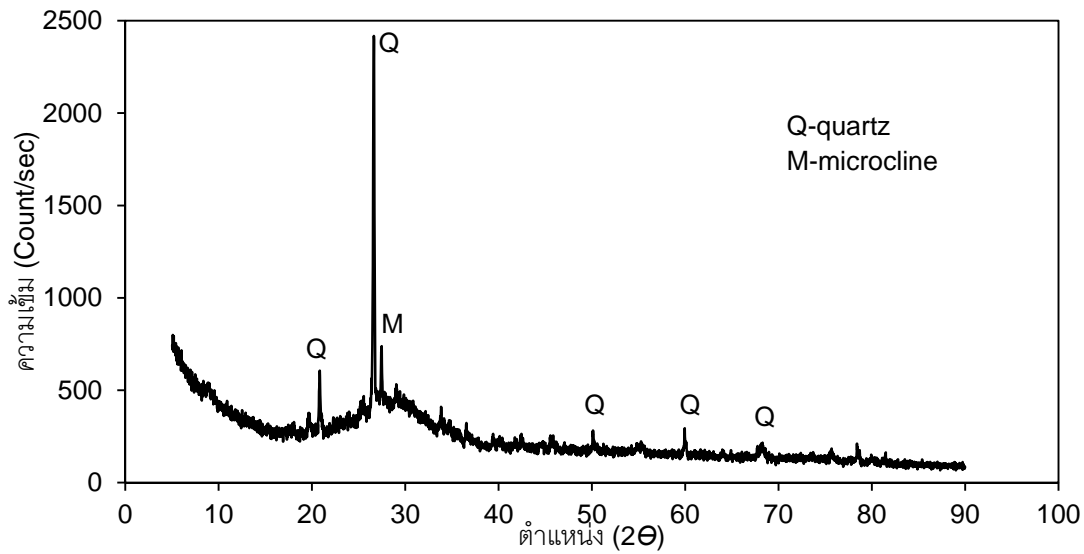
ภาพที่ 52 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของจีโอพอลิเมอร์ดินเขาเผาล้วน บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Control-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



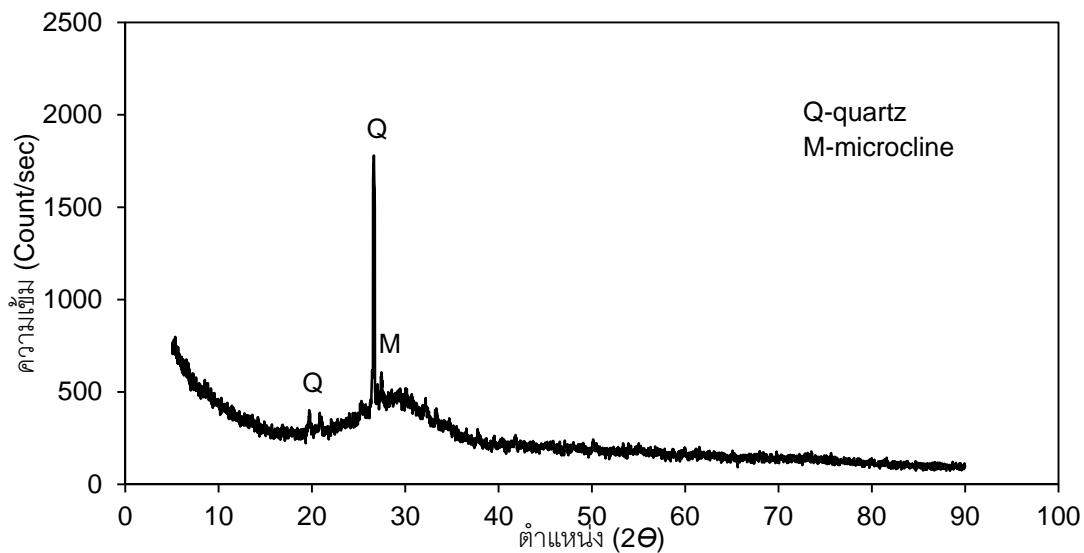
ภาพที่ 53 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผา ล้วน บ่มร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (Control-4) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ภาพ XRD มีพีคสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาล้วนที่บ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง

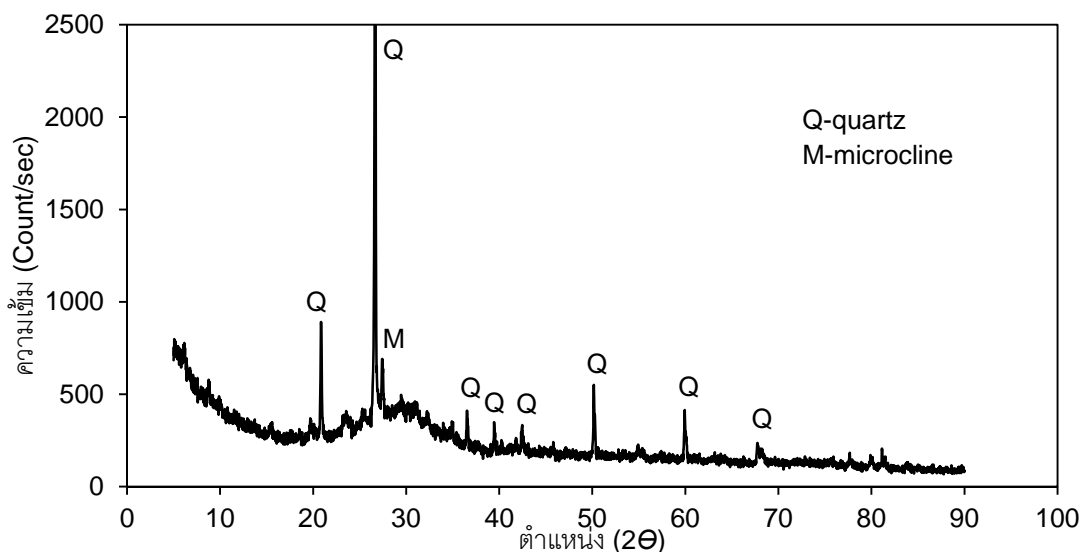
ภาพที่ 54-56 แสดงเส้นภาพแบบจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ จากการตรวจสอบพบว่าเส้นภาพแบบ XRD ของทั้ง 3 ตัวอย่างจะปรากฏช่วงของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยจะพบ ผลึกควอตซ์ และไมโครไคลน์ ซึ่งเป็นผลึกชนิดเดียวกันที่พบในดินขาวเผา และเป็นที่น่าสังเกตว่าเส้น ภาพแบบ XRD ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ไม่พบผลึกแคลไซต์ อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งในวัสดุตั้งต้นเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่ก็ตาม ถึงกระนั้นก็ตามเป็นที่น่าสนใจว่าลักษณะเส้นภาพแบบ XRD จะมีความแตกต่างทางด้านความชัดเจนของผลึก (ความชัดเจนของพีค) โดยเฉพาะควอตซ์ เช่นจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ที่บ่มร้อน 4 ชั่วโมง จะมีเส้นภาพแบบ XRD ที่มีพีคสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มร้อน 1 และ 2 ชั่วโมง ซึ่ง ความชัดเจนของพีคอาจจะสามารถแสดงเป็นนัยที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสม เดียวกัน ดังที่แสดงค่ากำลังอัดไว้ใน**ภาพที่ 24จ**) กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ ยางพาราร้อยละ 5 บ่มร้อน 4 ชั่วโมงที่ 28 วัน มีค่าสูงกว่าที่บ่มร้อน 1 และ 2 ชั่วโมง ซึ่งจะมีแนวโน้ม เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ [Mustafa Al Bakri et al. \(2012\)](#) ที่รายงานว่าความชัดเจน ของผลึกในเนื้อจีโอพอลิเมอร์ให้ผลกำลังอัดดีกว่าเนื้อจีโอพอลิเมอร์ที่มีผลึกไม่เด่นชัด ทั้งนี้เพราะพีคที่ ชัดเจนแสดงถึงปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ได้เกิดผลึกขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยการทดสอบที่ใช้เถ้าลอยเป็น



ภาพที่ 54 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ่าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (O5-1) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 55 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ่าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O5-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 56 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (O5-4) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

วัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ และใช้ XRD และ SEM เพื่อตรวจสอบอธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจะมีผลต่อกำลังอัดอย่างไร

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF (X-ray fluorescence)

อิทธิพลของเถ้าไม้ยางพารา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ โดยเทคนิค (X-ray fluorescence; XRF) โดยใช้จีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี จากตัวอย่างที่ใช้ดินขาวเผาอย่างเดียว ใช้ตัวอย่างระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง จากการตรวจสอบพบว่าในจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียวดังตารางที่ 6 มี Na_2O , Al_2O_3 และ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีปริมาณโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 18.33, 21.00 และ 41.22 ตามลำดับ เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราเพิ่มมากขึ้นปริมาณ Na_2O , Al_2O_3 และ SiO_2 ลดลงแปรผันตามปริมาณเถ้าไม้ยางพารา ตัวอย่างเช่นปริมาณ Al_2O_3 เท่ากับร้อยละ 21.00, 18.16, 16.03 และ 15.59 ที่ตัวอย่าง Control-2, P10-2, P20-2 และ P30-2 ตามลำดับ การลดลงนี้เนื่องจากเถ้าไม้ยางพารามี Al_2O_3 ในปริมาณที่น้อยมาก เช่นเดียวกับกับ SiO_2 ในขณะที่ Na_2O ได้มาจากโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณลดลงนั้นอันเนื่องมาจากร้อยละของปริมาณถูก

ตั้งจากร้อยละของ SO_3 , K_2O และ CaO ซึ่งจะมีปริมาณมากในเถ้าไม้่างพารา และจะส่งผลให้ปริมาณเพิ่มขึ้นตัวอย่าง P10-2, P20-2 และ P30-2 ตามลำดับ ตัวอย่างเช่นปริมาณ CaO ในตัวอย่าง Control-2, P10-2, P20-2 และ P30-2 มีปริมาณร้อยละ 0.27, 2.29, 5.92 และ 7.51 ตามลำดับดังแสดงไว้ในตารางที่ 6 จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์มีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงวัสดุตั้งต้น

อิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมัน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ โดยเทคนิค X-ray fluorescence; XRF โดยใช้จีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี จากตัวอย่างที่ใช้ดินขาวเผาอย่างเดียว ใช้ตัวอย่างระยะเวลา

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนร้อยละขององค์ประกอบของจีโอพอลิเมอร์

ตัวอย่าง ออกไซด์	Control-2	P10-2	P20-2	P30-2	O5-2	O10-2	O15-2
Na_2O	18.33	18.18	15.54	15.56	18.07	17.49	17.66
Al_2O_3	21.00	18.16	16.03	15.59	20.68	19.60	18.33
SiO_2	41.22	38.00	35.01	34.08	41.37	42.00	41.46
SO_3	-	1.30	1.32	1.40	-	-	-
K_2O	1.88	3.75	4.75	6.64	2.18	1.47	2.44
CaO	0.27	2.29	5.92	7.51	0.43	0.89	1.27
TiO_2	0.99	1.12	1.34	0.98	0.99	1.02	0.89
Fe_2O_3	0.86	1.20	1.17	1.28	0.96	1.02	1.09
Rb_2O	0.07	0.10	0.14	0.16	0.06	0.08	0.07
Y_2O_3	0.03	-	-	-	-	0.04	0.03
ZrO_2	0.09	-	-	-	0.08	0.09	0.09
P_2O_5	-	-	-	0.53	-	-	-
MnO	-	-	-	0.26	-	-	-
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (by weight)	1.96	2.09	2.18	2.19	2.00	2.14	2.26
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ (by weight)	0.44	0.48	0.44	0.46	0.44	0.42	0.43
CaO/SiO_2 (by weight)	0.007	0.060	0.169	0.220	0.010	0.021	0.031

บมร้อน 2 ชั่วโมง จากการตรวจสอบพบว่าในจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียวดังตารางที่ 6 มี Na_2O , Al_2O_3 และ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ อิทธิพลเนื่องจากการแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารา อย่างไรก็ตามจากความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีระหว่างเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมันส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างที่แทนที่เถ้าทั้งสองแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังอัดด้วยเช่นกัน จากตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่าปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของ Al_2O_3 ลดลง เช่นตัวอย่าง Control-2, O5-2, O10-2 และ O15-2 มี Al_2O_3 มีค่าเท่าร้อยละ 21.00, 20.68, 19.60 และ 18.33 ตามลำดับ มีผลมาจากเถ้าปาล์มน้ำมันมี Al_2O_3 น้อยมากประมาณร้อยละ 1.48 ในขณะที่ SiO_2 มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจาก 41.22 เป็น 41.37, 42.00 และ 41.46 ในตัวอย่าง O5-2, O10-2 และ O15-2 ตามลำดับ เป็นผลมาจากปริมาณ SiO_2 ในเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอยู่สูง ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเถ้าปาล์มน้ำมัน เช่นเดียวกับ K_2O และ CaO ที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวอย่างเดียวดังแสดงไว้ในตารางที่ 6

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิเคราะห์แบบอัตราส่วนโมลาร์

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยอัตราส่วนโมลาร์ของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, CaO/SiO_2 , $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของเถ้าไม้ยางพาราและ/หรือเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีผลต่ออัตราส่วนโมลาร์ดังตารางที่ 7 จากผลการวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วนโมลาร์ของ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการทดสอบครั้งนี้มีการใช้น้ำ โซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่ จึงทำให้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามอัตราส่วนโมลาร์ของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, CaO/SiO_2 , $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ได้มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันของวัสดุตั้งต้นทั้งดินขาวเผา เถ้าไม้ยางพารา และเถ้าปาล์มน้ำมัน และอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันของแต่ละตัวอย่าง เมื่อพิจารณาอัตราส่วนโมลาร์ของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ พบว่าอัตราส่วนโมลาร์ของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2.88 (O5-1, O5-2 และ O5-4) สามารถให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มใกล้เคียงกับงานวิจัย Chindaprasirt et al. (2012) ที่มีการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์สูง โดยการปรับปรุงสมบัติด้วยนาโนซิลิกา (Nano-silica) หรือนาโนอะลูมินา (Nano-alumina) ซึ่งเมื่อเพิ่มอะลูมินาทำให้ได้อัตราส่วนโมลาร์เท่ากับ 2.87 ให้ค่ากำลังอัดประมาณ 63.2 เมกะพาสคัล แต่จะมีค่าการก่อตัวต่ำ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาค่าอัตราส่วนโมลาร์ของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ อยู่ในช่วง 2-4 (Silva et al., 2007; Silva et al., 2008) จะให้ค่ากำลังอัดได้ดี การทดสอบครั้งนี้ค่าอัตราส่วนโมลาร์ของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ อยู่ในช่วงระหว่าง 2.77-3.49 ซึ่งจัดได้ว่าอยู่ในช่วงที่สามารถให้ค่ากำลังอัดที่ดี แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาผลกระทบเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่จะมีผลต่อกำลังอัด ยังมีองค์ประกอบทางเคมีชนิดอื่นที่จะมีผลต่อกำลัง ดังเช่นปริมาณของ CaO ในวัสดุตั้งต้น โดยการศึกษาที่ผ่านมาของ Winnefeld et al.

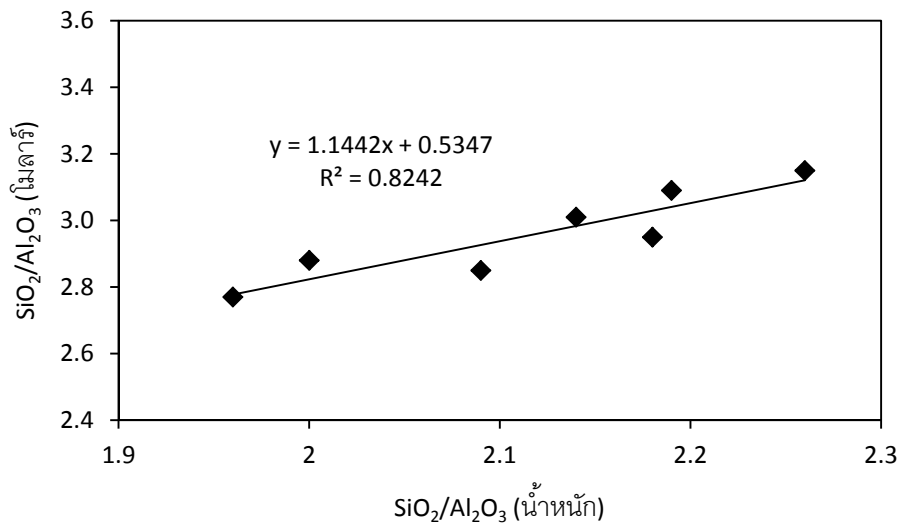
(2010) พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ให้กำลังอัดค่อนข้างต่ำ เนื่องจากทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ไม่ดีและ เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ [Temuujin et al. \(2009\)](#) ที่ใช้ CaO หรือ Ca(OH)₂ ผสมกับเถ้าลอยในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CaO หรือ Ca(OH)₂ เข้าไปทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง เมื่อทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ดังนั้นจากการทดสอบครั้งนี้พบว่าเมื่ออัตราส่วนโมลาร์ของ CaO/SiO₂ เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้กำลังอัดลดลงสอดคล้องกับบรรดางานวิจัยที่กล่าวมา

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีโดยอัตราส่วนโมลาร์

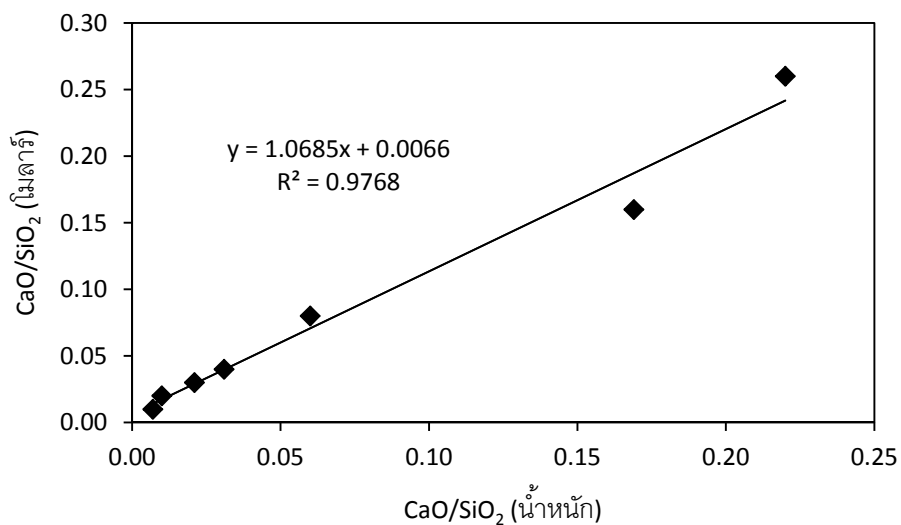
ตัวอย่าง	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/SiO ₂	Na ₂ O/SiO ₂	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/Na ₂ O
Control	2.77	0.01	0.21	0.59	11.43
P10	2.85	0.08	0.23	0.66	11.43
P20	2.95	0.16	0.25	0.74	11.43
P30	3.09	0.26	0.27	0.84	11.43
O5	2.88	0.02	0.22	0.62	11.43
O10	3.01	0.03	0.22	0.66	11.43
O15	3.15	0.04	0.22	0.69	11.43
P10O5	2.98	0.09	0.23	0.69	11.43
P10O10	3.13	0.10	0.23	0.74	11.43
P10O15	3.30	0.11	0.24	0.78	11.43
P20O5	3.11	0.17	0.25	0.78	11.43
P20O10	3.29	0.18	0.26	0.84	11.43
P20O15	3.49	0.19	0.26	0.90	11.43

ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนทางเคมีโดยน้ำหนักและโดยอัตราส่วนโมลาร์

ภาพที่ 57 และ 58 แสดงความสัมพันธ์ของ SiO₂/Al₂O₃ และ CaO/SiO₂ ตามลำดับ โดยการวิเคราะห์แบบการทดสอบด้วยเทคนิค XRF และการคำนวณค่าโดยใช้ค่าอัตราส่วนโมลาร์ จากการทดสอบจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้อย่างพาราหรือเถ้าปาล์มน้ำมัน ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง ตัวอย่าง Control-2, P10-2, P20-2, P30-2, O5-2, O10-2 และ O15-2 ได้ค่าองค์ประกอบทางเคมี นำมาหาอัตราส่วนต่างๆ ดัง**ตารางที่ 6** แล้วนำมาสร้างกราฟระหว่างค่าจาก XRF กับค่าจากการคำนวณอัตราส่วนโมลาร์ จากภาพพบว่าค่าอัตราส่วนโมลาร์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าอัตราส่วนจากเทคนิค XRF เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งของอัตราส่วน SiO₂/Al₂O₃ และ CaO/SiO₂



ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ของ SiO₂/Al₂O₃ โดยน้ำหนักกับโดยอัตราส่วนโมลาร์

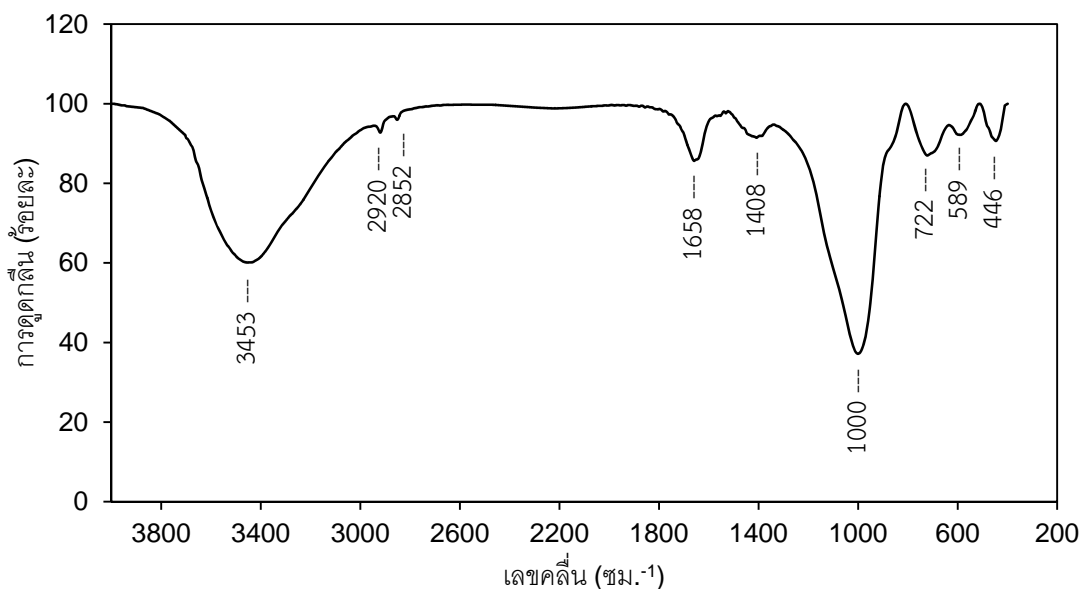


ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์ของ CaO/SiO₂ โดยน้ำหนักกับโดยอัตราส่วนโมลาร์

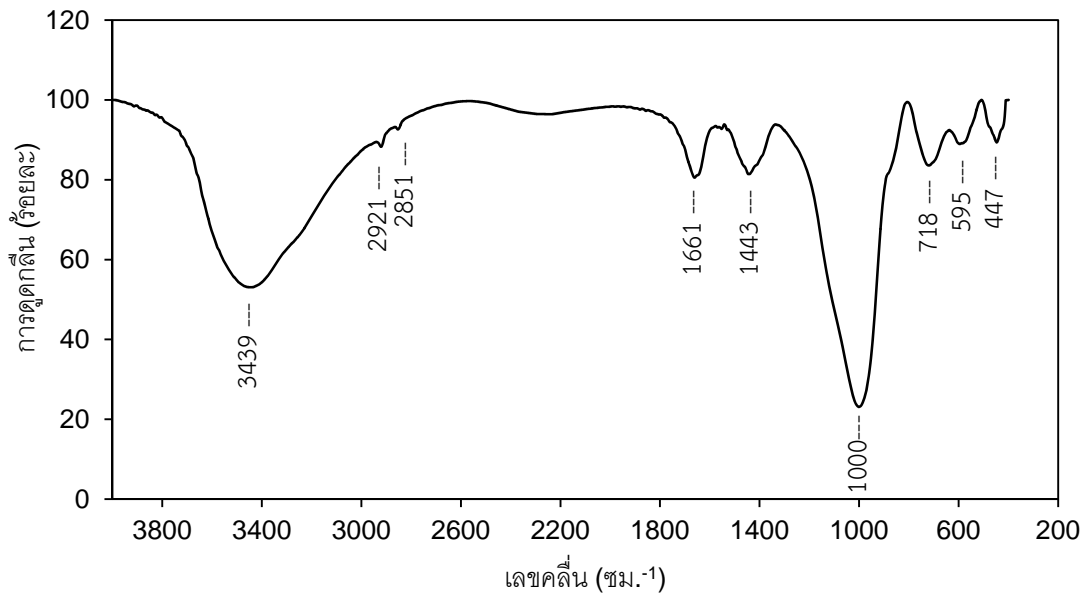
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์โดยเทคนิค (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเส้นสเปกตรัม ถึงการส่งผลต่อกำลั่งอัดของจีโอพอลิเมอร์ และเปรียบเทียบพีก (Peak) ต่างๆ ระหว่างวัสดุตั้งต้นกับจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยใช้ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง ดังภาพที่ 59-63 จากการวิเคราะห์พบว่าตัวอย่าง Control-2 มีเส้นสเปกตรัมที่เด่นชัดอยู่ที่เลขคลื่น 3453, 1658

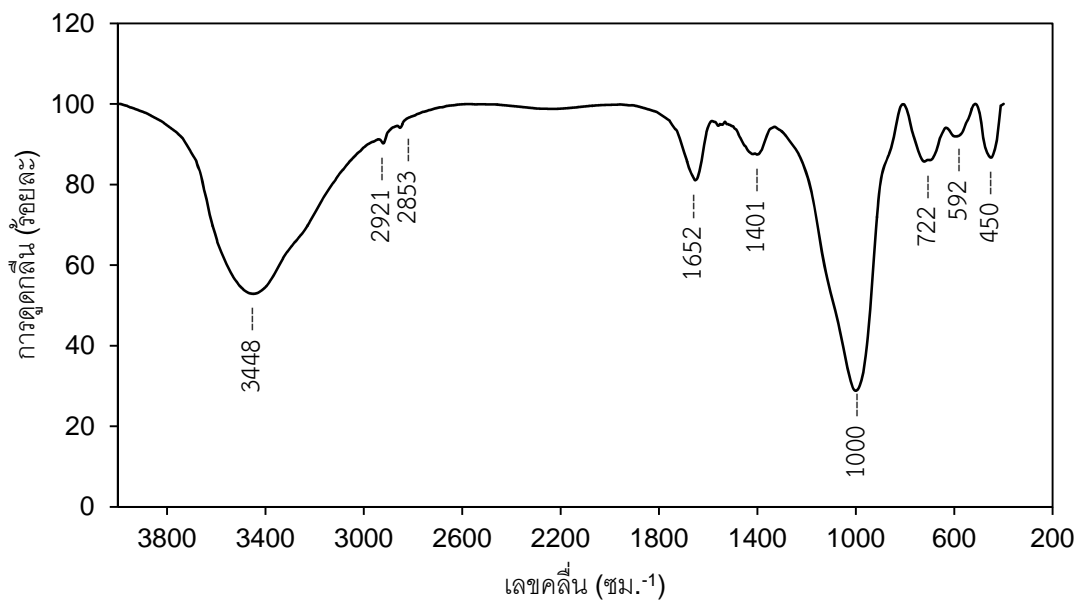
1408, 1000, 722, 589 และ 446 cm^{-1} โดยสเปกตรัม 3453 และ 1658 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของพันธะ O-H แบบยืด-หด (Stretching) และ H-O-H แบบโค้งงอ (Bending) ตามลำดับ และอยู่ในกลุ่มไฮดรอกไซด์มีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ [van Jaarsveld et al \(2003\)](#) และ [Frost and Vassallo \(1996\)](#) สเปกตรัมหลักที่เด่นชัดที่สุดอยู่ที่ 1000 cm^{-1} เป็นพีคของพันธะ Si-O-Al แบบยืด-หด ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาเกิดจีโอพอลิเมอร์โดยการศึกษาของ [Granizo et al. \(2007\)](#) จากพีคที่โดดเด่นเหล่านี้เมื่อเปรียบเทียบกับพีคของดินขาวเผา พบว่าพีคมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งจากการศึกษาของ [Hongling et al. \(2005\)](#) ได้กล่าวว่าพีคที่เลขคลื่นระหว่าง 450-1200 cm^{-1} เป็นช่วงที่สำคัญของผลิตภัณฑ์เกิดจากปฏิกิริยาเกิดจีโอพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในส่วนของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ แสดงให้เห็นว่าพีคที่เด่นชัดของแต่ละตัวอย่างมีพีคที่เด่นชัดที่เลขคลื่นใกล้เคียงกันมาก กล่าวคือผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมซิลิเกตจากปฏิกิริยาเกิดจีโอพอลิเมอร์ระหว่างวัสดุตั้งต้น (ดินขาวเผา เถ้าไม้ยางพารา และเถ้าปาล์มน้ำมัน) กับต่างที่ใช้ในการกระตุ้น (โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์) ให้รูปแบบเส้นสเปกตรัมที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน จีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราหรือเถ้าปาล์มน้ำมัน ไม่ได้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพีคของสเปกตรัม โดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาของ [Ismail et al. \(2013\)](#) ที่รายงานว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอยไม่ได้ส่งผลต่อลักษณะเส้นสเปกตรัม



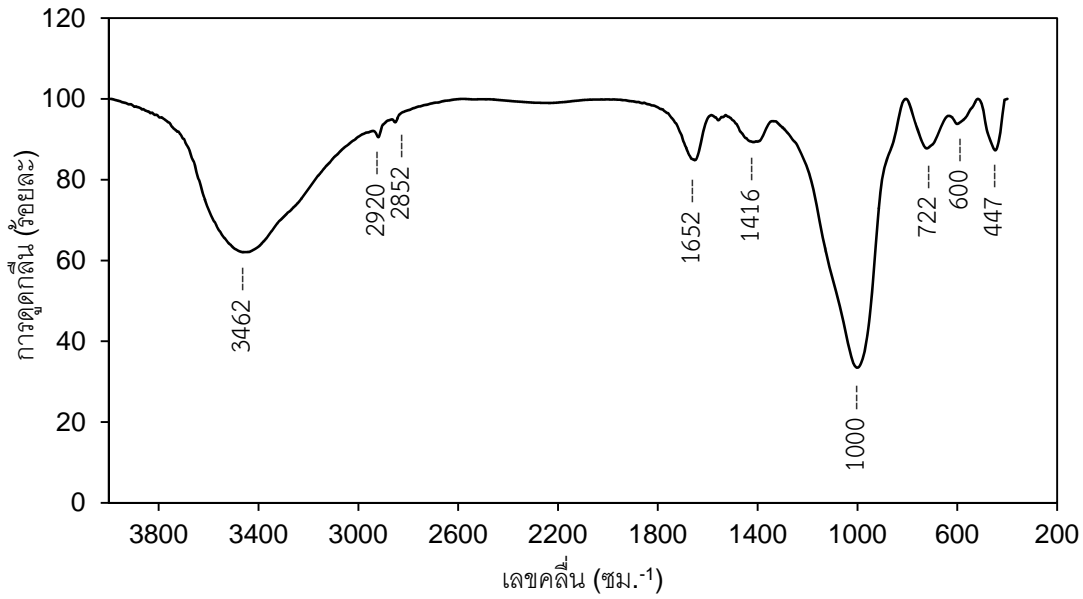
ภาพที่ 59 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Control-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



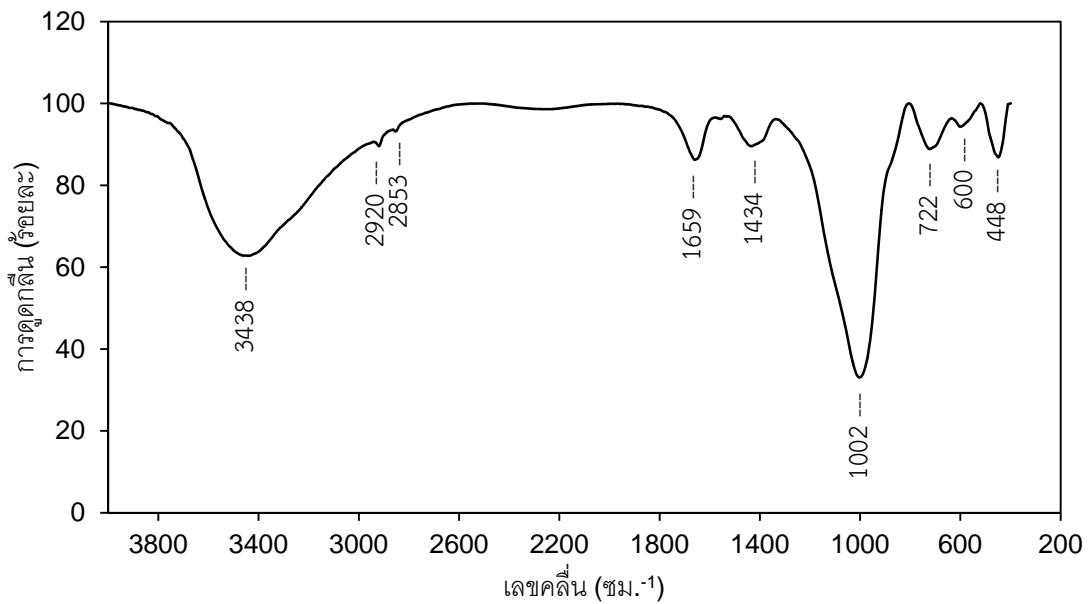
ภาพที่ 60 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเอ้าไม้อย่างพาราร้อยละ 10 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (P10-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 61 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเอ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O5-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

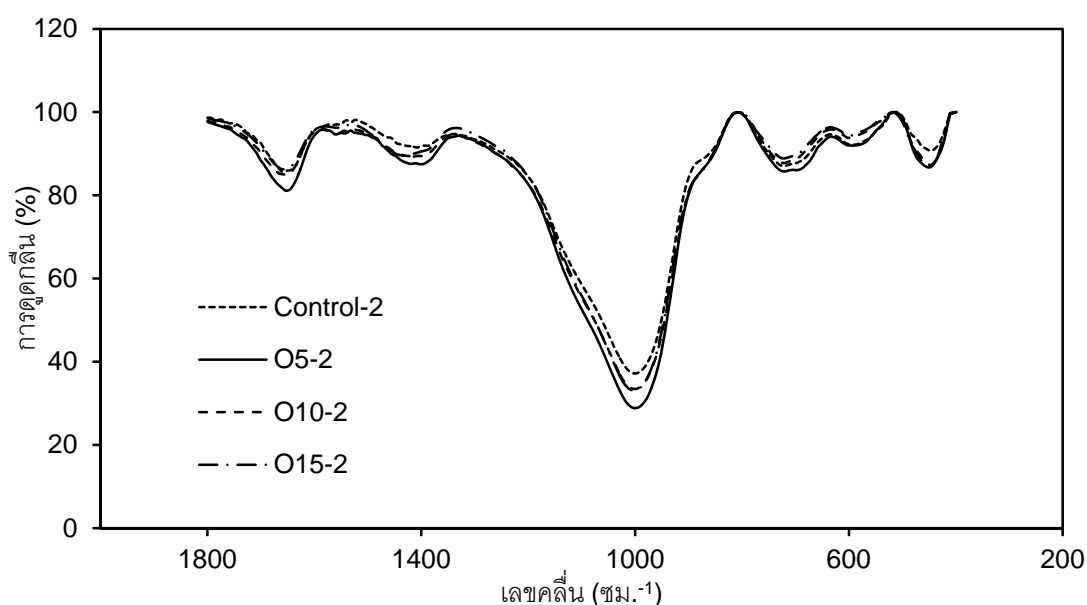


ภาพที่ 62 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเอ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O10-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 63 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเอ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O15-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ตาม เมื่อการเปรียบเทียบเส้นการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่น 400-1800 cm^{-1} **ดังภาพที่ 64** ซึ่งเป็นช่วงที่แสดงพีกที่เด่น (Very strong) โดยเฉพาะที่บริเวณเลขคลื่นเท่ากับ 1000 cm^{-1} จากผลศึกษาพบว่าเส้นการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สูง การดูดกลืนแสงอาจเป็นองค์ปัจจัยหนึ่งในหลายปัจจัยที่สามารถใช้ในอธิบายถึงระดับการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าที่บริเวณเลขคลื่นเท่ากับ 1000 cm^{-1} ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ Control-2, O5-2, O10-2 และ O15-2 มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 63, 71, 67 และ 67 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดดัง**ภาพที่ 20ข**) ที่การดูดกลืนสูง (ร้อยละการดูดกลืนต่ำ) ให้ค่ากำลังอัดสูง อย่างไรก็ตามอาจสามารถมาเปรียบเทียบได้ในจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน และจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์แบบอื่นๆ มาประกอบ เช่น SEM และ XRD เป็นต้น



ภาพที่ 64 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเก้าปาล์มน้ำมัน บ่มร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (O15-2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผล

1. ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารา มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าไม้ยางพารามากขึ้นในทุกอายุบ่ม เช่นเดียวกันกับจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน

2. ระยะเวลาบ่มร้อนมีผลเล็กน้อยต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดียว และจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 และ 10 ที่อายุบ่มในอากาศเท่ากับ 2 ชั่วโมง ในขณะที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสมอื่นๆ มีค่ากำลังอัดลดลงตามระยะเวลาบ่มร้อน โดยเฉพาะที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง ค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาบ่มในอากาศ 2 ชั่วโมง มีค่าน้อยกว่าระยะเวลาบ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมงเป็นอย่างมาก ซึ่งจะเห็นได้ชัดยิ่งขึ้นเมื่อมีการแทนที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง สามารถให้ค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดที่ระยะเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง ที่ 7 วันขึ้นไป

3. จีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ให้ค่ากำลังอัดดีที่สุด

4. ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง ค่ากำลังอัดที่ 2, 6, 24 ชั่วโมง, 7 และ 28 วัน มีค่าใกล้เคียงกัน

5. อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุตั้งต้นเท่า 0.45 และ 0.55 มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่อัตราส่วนเท่า 0.65 ค่ากำลังอัดลดลงอย่างชัดเจนในทุกอายุบ่มในอากาศ

6. การแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นทำให้มีการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง ในขณะที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชั่วโมง ค่าการหดตัวแบบแห้งลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าไม้ยางพารา อย่างไรก็ตามที่ระยะเวลาบ่มร้อน 4 ชั่วโมง ค่าการหดตัวแบบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันมีพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับเถ้าไม้ยางพารา และพฤติกรรมลักษณะนี้ยังส่งผลไปถึงการแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน

7. ระยะเวลาบ่มร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวแบบแห้งลดลง โดยเมื่อมีการแทนที่ของเถ้าไม้ยางพาราและ/หรือเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นค่าการหดตัวห่างกันมากขึ้น กล่าวคือระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง มีค่าการหดตัวสูงสุดและการหดตัวลดลงที่ระยะเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยค่าการหดตัวระหว่างการบ่มร้อน 1 กับ 2 ชั่วโมง ยังมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าไม้ยางพาราและ/หรือเถ้าปาล์มน้ำมัน อย่างไรก็ตามที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 และ 4 ชั่วโมง ค่าการหดตัวใกล้เคียงกัน ยกเว้นจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวอย่างเดียว

8. การแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นทำให้มีการขยายตัวสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ร้อยละ 30 ทั้งในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต ในขณะที่การแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันการขยายตัวมีค่าใกล้เคียงกัน ในกรณีของจีโอพอลิเมอร์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าไม้ยางพารา

และถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อรวมกันไม่ถึงร้อยละ 30 ค่าการขยายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างเดี่ยว (Control-2) แต่เมื่อเพิ่มการแทนที่เป็นร้อยละ 30 หรือมากกว่า (P20O10-2 และ P20O15-2) การขยายตัวสูงขึ้นอย่างชัดเจนทั้งที่แช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต

9. ระยะเวลาบ่มร้อน 1 และ 2 การขยายตัวลดลงเมื่อระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตนานขึ้น แต่ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 4 ชั่วโมง ค่าการขยายตัวคงที่ไปถึง 30 สัปดาห์

10. การแทนที่บางส่วนด้วยถ่านไม้ยางพาราหรือถ่านปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ส่งผลให้กำลังยึดติระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติดีขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มร้อนนานขึ้นการยึดติดีขึ้นเล็กน้อยในทุกอัตราส่วนผสม

11. จากการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ครั้งนี้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานซ่อมผิวทางคอนกรีต โดยเมื่อพิจารณาจากราคาในการผลิต ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและสมบัติทางวิศวกรรม พบว่าจีโอพอลิเมอร์แทนที่ด้วยถ่านไม้ยางพาราร้อยละ 10 (P10-1) และถ่านปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 (O10-1) ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชั่วโมง สามารถให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาผลการใช้ดินขาวเผาแทนที่บางส่วนด้วยถ่านไม้ยางพาราและถ่านปาล์มน้ำมันเพื่อผลิตจีโอพอลิเมอร์ที่ให้กำลังอัดรวดเร็ว ในด้านความสามารถต่อการทนทานการกัดกร่อนของกรด การซึมผ่านของคลอไรด์ เป็นต้น และศึกษาถึงความทนทานต่อการขัดสี

2. ควรมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคในแต่ละช่วงอายุ ตั้งแต่ 2 ชั่วโมงขึ้นไป

3. ควรมีการศึกษาสมบัติต่างๆ โดยเฉพาะกำลังอัดที่ระยะเวลาบ่มร้อนตั้งแต่ 10 นาที ทั้งนี้เพื่อให้มีสมบัติที่ดียิ่งขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการซ่อมผิวทาง

4. ควรมีการศึกษาการหดตัวและการขยายตัวเนื่องซัลเฟตในช่วงเวลานานจนกว่าค่าเสถียร

5. ควรมีการศึกษาการแทนที่บางส่วนด้วยถ่านไม้ยางพาราและ/หรือถ่านปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูง เพื่อเป็นการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งให้มากที่สุดโดยยังคงมีสมบัติอยู่ในขอบเขตการใช้งานทางวิศวกรรมได้

เอกสารอ้างอิง

- ชยจันทร์ พรหมศร (2540). การใช้วัสดุพอลิเมอร์ในงานก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีต. โยธาสาร หน้า 51-54 มกราคม 2540
- ณัฐสม สงวนวงษ์ (2546). การวิเคราะห์และวิจัยคุณสมบัติด้านกำลังของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมด้วยสาร POLYMER LATEX. รายงานฉบับที่ วพ. 201 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง มกราคม 2546
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. www.oae.go.th เมื่อ 21 มิถุนายน พ.ศ. 2556
- อาภา สธนเสาวภาคย์, การศึกษาเปรียบเทียบการกัดกร่อนของซัลเฟตและกรดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานปริมาณมากและมอร์ตาร์จีโอพอลิเมอร์เก้าหนัก, วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2553
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ การศึกษาคุณสมบัติจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินผสม รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ MRG528001 2554
- Abideng, H., Danupon, T., Woraphot, P., and Pichai, T. (2013). Development and Performance Evaluation of Very High Early Strength Geopolymer for Rapid Road Repair. Advances in Materials Science and Engineering. Vol. 2013.
- Abideng, H., Danupon, T., and Woraphot, P. (2013). Performance Evaluation and Microstructure Characterization of Metakaolin-Based Geopolymer Containing Oil Palm Ash. Scientific World Journal. Vol. 2013.
- Ai, Z., Zhang, X., Kim, Y.H., and Yarlağadda, P. (2011). Mix Design and Compressive Strength of Geopolymer Concrete Containing Blended Ash from Agro-Industrial Wastes. Advanced Materials Research. 339: 452-457.
- Alvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., Font, O., Moreno, T., Diez, S., Vázquez, E., and Barra, M. (2008). Environmental, physical and Structural characterization of geopolymer matrixes synthesized from coal (co-) combustion fly ash. Journal of Hazardous Materials. 154(1-3): 175-183.
- Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. Cement and Concrete Research. 35(6): 1233 – 1246.
- Cement Concrete and Aggregate Australia (2009). Concrete pavement maintenance/repair. Report July 2009.
- Chang, E.H. (2009). Shear and Bond Behaviour of Reinforced Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Beams. PhD thesis, Curtin University of Technology, Australia.

- Chandara, C., Sakai, E., Azizli, K.A.M., Ahmad, Z.A., and Hashim, S.F.S. (2010). The effect of unburned carbon in palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer. Construction and Building Materials. 24(9): 1590-1593.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. Cement and Concrete Composites. 29(3): 224-229.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymer. Waste Management. 29(2): 539-543.
- Chindaprasirt, P., Silva, P.D., Sagoe-Crenstil, K., and Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. Journal of Materials Science. 47(12): 4876-4883.
- Criado, M., Fernández Jiménez, A., and Palomo, A. (2010). Effect of sodium sulfate on the alkali activation of fly ash. Cement and Concrete Composites, 32(8): 589-594.
- Dalimin, M.N. (1995). Renewable energy update: Malaysia. Renewable Energy. 6(4): 435-439.
- Elimbi, A., Tchakoute, H.K., and Njopwouo, D. (2011). Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements. Construction and Building Materials. 25(6): 2805-2812.
- Favier, A., Habert, G., d'Espinose de Lacaillerie J.B., and Roussel, N. (2013). Mechanical properties and compositional heterogeneities of fresh geopolymer pastes. Cement and Concrete Research. 48: 9-16.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., and Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. Cement and Concrete Research. 35(): 1204-1209.
- Fowler, D., Zollinger, D., and Whitney, D. (2008). Implementation of Best Spall Repair Practices for Concrete Pavement. Technical Report 5-5110-01-1. Center for Transportation Research at The University of Texas at Austin.
- Frost, R.L. and Vassallo, A.M. (1996). The Dehydroxylation of the kaolinite clay minerals using infrared emission spectroscopy. Clays and Clay Minerals. 44(5): 635-651.
- Granizo, M.L., Blanco-Varela, M.T., and Martenes-Ramirez, S. (2007). Alkali activation of metakaolin: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties. Journal of Materials Science. 42(9): 2934-2943.

- Guo, X., Shi, H., and Dick, W.A. (2009). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. Cement and Concrete Composites. 32(2): 142-147.
- Hardjito, D., Cheak, C.C., and Ing, C.H.L. (2008). Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash-based geopolymer mortar. Modern Applied Science. 2(4): 3-11.
- Hardjito, D. and Tsem, M.Z. (2008). Strength and thermal stability of fly ash based geopolymer mortar. The 3rd International Conference-ACF/VCA. 144-150.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Ramgan, B.V. (2004a). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. ACI Materials Journal. 101(52): 467-472.
- Hongling, W., Haihong, L., and Fengyuan, Y. (2005). Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 268(1-3): 1-6.
- Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., Hamdan, S., and van Deventer, J.S.J. (2013). Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. Materials and Structure. 46(3): 361-373.
- Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., and Sagoe-Crentsil, K. (2008). Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures. Journal of Materials Science. 43(3): 824–831.
- Kumar, S. and Kumar, R. (2011). Mechanical activation of fly ash: effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. Ceramics International. 37(2): 533–541.
- Lee, W.K.W. and van Deventer, J.S.J. (2002). The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. Colloids and Surfaces A: Physicochem and Engineering Aspects. 211(2-3): 115-126.
- Muñiz-Villarreal, M.S., Manzano-Ramírez, A., Sampieri-Bulbarela, S., Ramón Gasca-Tirado, J., Reyes-Araiza, J.L., Rubio-Ávalos, J.C., Pérez-Bueno, J.J., Apatiga, L.M., Zaldivar-Cadena, A., and Amigó-Borrás, V. (2011). The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. Materials Letters. 65(6): 995-998.
- Mustafa Al Bakri, A.M., Kamarudin, H., Bnhussian, M., Rafiza, A.R., and Zarina, Y. (2012). Effect of Na₂SiO₃/NaOH ratios and NaOH molarities on compressive strength of fly ash-based geopolymer. ACI Materials Journal. 109(48): 503-508.
- Oh, J.E., Moon, J., Oh, S.G., Clark, S.M., and Monteiro P.J.M. (2012). Microstructural and compositional change of NaOH-activated high calcium fly ash by incorporating

- Na-aluminate and co-existence of geopolymeric gel and C-S-H(I). Cement and Concrete Research. 42(5): 673-685.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., and Jalali, S. (2008). Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder. Construction and Building Materials. 22(6): 1201-1211.
- Pacheco-Torgal, F., Moura, D., Ding, Y., and Jalali, S. (2011). Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. Construction and Building Materials. 25(9): 3732-3745.
- Riahi, S., Nazari, A., Zaarei, D., Khalaj, G., Bohlooli, H., and Kaykha, M.M. (2012). Compressive strength of ash-based geopolymers at early ages designed by Taguchi method. Materials and Design. 37: 443-449.
- Rovnanik, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. Construction and Building Materials. 24(7): 1176-1183.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomaol, K. (2004). Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 16(6): 623-628.
- Silva, P.D., and Sagoe-Crentil, K. (2008). Medium-term phase stability of Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O geopolymer system. Cement and Concrete Research. 38(6): 870-876.
- Silva, P.D., Sagoe-Crenstil, K., and Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. Cement and Concrete Research. 37(4): 512-518.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., and Chindaprasirt, P. (2011). NaOH activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. Fuel. 90(6): 2118-2124.
- Temuujin, J., Riessen, A.V., and Williams, R. (2009). Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. Journal of Hazardous Materials. 167(1-3): 82-88.
- Tonnayopas, D., Nilrat, F., Putto, K., and Tantivitayawanich, J. (2006). Effect of oil palm fiber fuel ash on compressive strength of hardening concrete. Proc. 4th Thailand Materials Science and Technology Conference, March 31 -April 1, 2006, Thailand Science Park Convention Center, Pathumthani Thailand, 64-66.
- van Dam and Thomas, J. (2010). Geopolymer Concrete. Transportation Research Board. TechBrief, Federal Highway Administration.

- van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J., and Lukey, G.C. (2003). The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. *Materials Letters*. 57(7): 1272–1280.
- Wang, H., Li, H., and Yan, F. (2005). Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. *Colloids and Surfaces A: Physicochem and Engineering Aspects*. 268(1-3): 1-6.
- Winnefeld, F., Leemann, A., Lucuk, M., Svoboda, P., and Neuroth, M. (2010). Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials. *Construction and Building Materials*. 24(6): 1086–1093.
- Yeon, K.S., Choi, Y.S., Yeon, J.H., and Kawakami, M. (2013). Recent development and application of concrete-polymer composites in Korea. *Transportation Research Board*. 19(2): 135-145.
- Yin, C.Y., Kadir, S.A.S.A., Lim, Y.P., Syed-Arifin, S.N., and Zamzuri, Z. (2008). An investigation into physicochemical characteristics of ash produced from combustion of oil palm biomass waste in a boiler. *Fuel Processing Technology*. 89(7): 693–696.
- Yip, C.K., Provis, J.L., Lukey, G.C., and van Deventer, J.S.J. (2008). Carbonate mineral addition to metakaolin-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*. 30(10): 979-985.
- Zhang, Y., Sun, W., and Li, Z. (2008). Infrared spectroscopy study of structural nature of geopolymeric products. *Journal of Wuhan University of Technology*. 23(4): 522-527.
- Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., and Yue, C. (2009a). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*. 42(2): 218-223.
- Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., Sudong, H., and Yue, C. (2009b). Activating Process of Geopolymer Source Material: Kaolinite. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*. 24(1): 132-136.

บทความ

วารสารระดับชาติในฐานข้อมูล TCI

วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

สมบัติวัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาเพื่องานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต



สมบัติวัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาเพื่องานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต
**Properties of metakaolin based geopolymer binder used
 in repair of concrete pavement**

อาบีเต็ง ฮาวา วศ.ม. (Abideng Hawa. M.Eng.)¹

دنوپล ตันนโยกาส ปร.ด. (Danupon Tonnayopas. Ph.D.)²

วรพจน์ ประชาเสรี ปร.ด. (Woraphot Prachasaree. Ph.D.)³

พิชัย ธานีรณานนท์ ปร.ด. (Pichai Taneerananon. Ph.D.)⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เตรียมจากดินขาวเผา โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในงานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต ที่ต้องการการแข็งตัวที่รวดเร็ว ให้สามารถเปิดใช้งานได้ภายในระยะเวลา 2.5 ชม. โดยทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การทดสอบกำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง และการขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต ใช้อัตราส่วนน้ำต่อดินขาวเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 โดยน้ำหนัก และบ่มร้อนเป็นเวลานาน 0.5, 1, 2 และ 4 ชม. ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตัวอย่างทดสอบกำลังอัดบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2, 6, 24 ชม., 7 และ 28 วัน จากการทดสอบพบว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อดินขาวเผาเท่ากับ 0.45 อายุ 2.5 ชม. (บ่มร้อน 0.5 ชม. และบ่มที่อุณหภูมิห้อง 2 ชม.) ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 37 เมกะพาสคัล

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์ กำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง มอร์ตาร์ การขยายตัว

Abstract

In this study, the geopolymer was prepared from metakaolin, sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) for repairing the concrete pavement. It was used early strength that can be re-opened to traffic after 2.5-h. Several variables were used testing in laboratory experiment, including compressive strength, drying shrinkage and sodium and magnesium sulfate expansions. Various water ratios was used with metakaolin (w/m) ratios of 0.45, 0.55 and 0.65 by weight, and curing temperature at 80°C for 0.5-, 1-, 2-, and 4-h were performed in this work. Specimens for compressive strength were cured 2-, 6-, 24-h, 7-, and 28-day in ambient temperature. The result of compressive strength obtained 37 MPa from w/m of 0.45 curing for 2.5-h (0.5-h in oven and 2-h in ambient temperature).

Keywords: Geopolymer, Compressive strength, Drying shrinkage, Mortar, Expansion

¹ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

⁴ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาพัฒนาวัสดุเพื่อใช้ในงานก่อสร้างและงานซ่อมแซม ไม่ว่าจะเป็นผิวทางคอนกรีต พื้นสะพาน ยกระดับ พื้นลานสนามบิน เป็นต้น ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้ใน งานซ่อมแซมนั้น จำเป็นจะต้องมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น กำลังอัดสูง การแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งสมบัตินี้ จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่องานอาคารสีเขียวและโครงสร้างพื้นฐาน (Komnitsas, 2011; Sakulich, 2011) เนื่องจากความเร่งรีบในการใช้งาน โดยเฉพาะในเมืองขนาดใหญ่ที่มีปริมาณ การจราจรหนาแน่น ซึ่งการซ่อมบำรุงผิวทางทำให้มีการปิดช่องจราจร ส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดเป็นเวลานาน จนกว่าวัสดุที่ใช้ในการซ่อมบำรุงจะแข็งตัวรับน้ำหนักได้ วัสดุที่ใช้กันในปัจจุบันสำหรับซ่อมแซมผิวทางคอนกรีตมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น พอลิยูรีเทนพอลิเมอร์ (polyurethane polymer) อีพอกซีพอลิเมอร์ (epoxy polymer) เทอร์โมเซตติงไวนิลพอลิเมอร์ (thermosetting vinyl polymer) และแมกนีเซียมพอลิฟอสเฟต (magnesium polyphosphate) เป็นต้น แต่เนื่องจากราคาที่ค่อนข้างสูง จึงไม่เป็นที่แพร่หลาย

การพัฒนาวัสดุประสานที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่เป็นการใช้สารปอซโซลานที่ประกอบไปด้วยซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบในการผลิตวัสดุประสาน จีโอพอลิเมอร์เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถเป็นสารเชื่อมประสานที่ใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยมีหลักการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียม ในสารละลาย ที่ความเข้มข้นสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา ได้วัสดุประสานที่มีสมบัติความแข็งแรงได้ และมีกำลังอัดช่วงต้นได้สูง (Silva, Mathias, and Thaumaturgo, 1999) ยังพบว่ากำลังหน่วง (bond strength) และทนไฟเผาได้สูง (Temuujin, Rickard, Lee, and van Riessen, 2011) สำหรับวัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นได้แก่ แก่ลอย (Criado, Jimenez, and Palomo, 2010; Chindaprasit, Chareerat, Hatanaka, and Cao, 2011; Ibrahim, Hamid, and Taha, 2012) และดินขาวเผา (Kamseu, Rizzuti, Leonelli, and Perera, 2010; Yunsheng, Wei, and Zongjin, 2010; Ouyang, Xu, Lo, and Sham, 2011) เนื่องจากมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก

ดินขาวเผาสามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง ที่ได้มาจากการเผาดินขาวที่อุณหภูมิระหว่าง 600-800 องศาเซลเซียส (Elimbi, Tchakoute and Njopwouo, 2011; Ouyang, Xu, Lo and Sham, 2011) เป็นส่วนใหญ่ ในประเทศไทย มีดินขาวอยู่หลายจังหวัด เช่น เชียงราย ลำปาง ปราจีนบุรี อุตรดิตถ์ หนอง และนครราชสีมา เป็นต้น (دنพล ตันนโยภาส, 2553)

จากงานวิจัยจีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านมาเป็นการวิจัยสมบัติทั่วไป เช่น กำลังอัดที่ 1, 7 และ 28 วัน โดยบ่มร้อนที่เวลา 24-48 ชม. ไม่ว่าเป็นการเตรียมจากแก่ลอยหรือดินขาวเผา ซึ่งใช้เวลานานในการแข็งตัวอยู่เมื่อเทียบกับภาวะจะนำไปใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นศึกษาถึงสมบัติในการแข็งตัวที่รวดเร็วขึ้น และด้วยสภาวะแวดล้อมและภูมิอากาศของประเทศไทย ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผิวทางอายุการใช้งานสั้นลง จากความร้อนในเวลากลางวันและอากาศเย็นในเวลากลางคืนจะทำให้ผิวทางคอนกรีตเกิดการขยายแตกต่างกันเกิดแตกร้าว รวมถึงความเสียหายที่เกิดจากซัลเฟต อันเนื่องมาจากพาหนะขนส่งน้ำยางและเศษยางพารา ที่มีกำมะถันซึ่งเป็นของเหลวไหลลงสู่ผิวทางอยู่ทั่วไป ของเหลวนั้นจะมีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณสูง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เตรียมจากดินขาวเผา โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในงานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต ที่ต้องการการแข็งตัวที่รวดเร็ว ให้สามารถเปิดใช้งานได้ภายในระยะเวลา 2.5 ชม.



การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

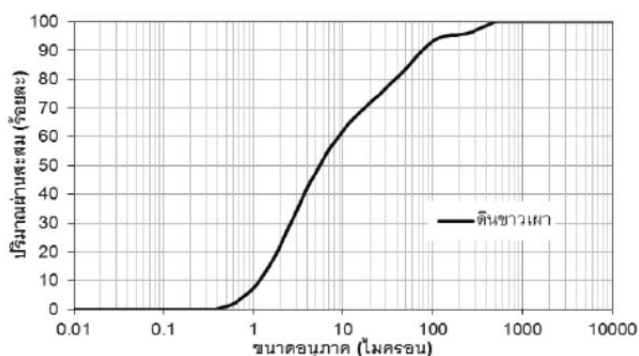
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ดินขาวเผาเป็นวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ นำมาจากจังหวัดนราธิวาส เหนือที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชม. แล้วนำไปบดให้ละเอียดได้ขนาดอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมครอน ประมาณร้อยละ 82 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเผาแสดงไว้ในตารางที่ 1

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.51 โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.12 ค่าการดูดซึมน้ำที่ 24 ชม. เท่ากับร้อยละ 1.41 และมีขนาดใหญ่สุด 4.75 มม. สารละลายที่ใช้ผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ประกอบด้วย โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่มีสารประกอบดังตารางที่ 1 และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การเตรียมส่วนผสมผสม

สัดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ใช้อัตราส่วนทรายแม่น้ำต่อดินขาวเผาเท่ากับ 3 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 และทำการแปรผันอัตราส่วนน้ำ/ดินขาวเผาดังแต่ 0.45, 0.55 และ 0.65 ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 2 ทำการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5, 1, 2 และ 4 ชม. โดยการผสมจีโอพอลิเมอร์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนนำไปเทในแบบหล่อมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม. สำหรับตัวอย่างทดสอบกำลังอัด และแบบหล่อขนาด 25x25x285 มม. สำหรับตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบแห้งและการขยายตัวในสารละลายซัลเฟต จากนั้นในขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนได้ทำการหุ้มแบบหล่อ ด้วยพลาสติกไว้นิล เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเมื่อได้รับความร้อน ควบคุมกำหนดบ่มด้วยความร้อนที่แก่พลาสติกและบ่มต่อในอุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $70 \pm 5\%$) จนกระทั่งถึงกำหนดนำไปทดสอบ



รูปที่ 1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคดินขาวเผา



ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของดินขาวเผาและโซเดียมซิลิเกต

องค์ประกอบทางเคมี (จำนวนร้อยละ)	ดินขาวเผา	โซเดียมซิลิเกต
SiO ₂	50.30	27.67
Al ₂ O ₃	41.02	-
Fe ₂ O ₃	1.05	-
CaO	0.33	-
TiO ₂	1.05	-
K ₂ O	4.08	-
Na ₂ O	-	14.14
H ₂ O	-	56.28
สมบัติทางกายภาพ		
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./กรัม) BET	13.61	-
ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมครอน (ร้อยละ)	82	-
d ₁₀	1.352	-
d ₅₀	6.308	-
d ₉₀	88.803	-

ตารางที่ 2 สัดส่วนการผสมซีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ (โดยน้ำหนัก)

สัญลักษณ์สูตรผสม	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	น้ำ/ดินขาวเผา	บ่มร้อน (ชม.)
MK-0.5-0.45	2.5	0.45	0.5
MK-1-0.45	2.5	0.45	1
MK-2-0.45	2.5	0.45	2
MK-4-0.45	2.5	0.45	4
MK-2-0.55	2.5	0.55	2
MK-2-0.65	2.5	0.65	2

การทดสอบตัวอย่าง

การทดสอบกำลังอัดใช้แบบหลอมมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม. ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 2, 6, 24 ชม., 7 วัน และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-98 ส่วนการทดสอบการหดตัวแบบแห้งใช้แบบหลอมมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มม. ทำการวัดการหดตัวด้วยเครื่องเปรียบเทียบความยาว (Length comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C490-96 สัปดาห์ละ 1 ครั้ง เป็นเวลา 15 สัปดาห์



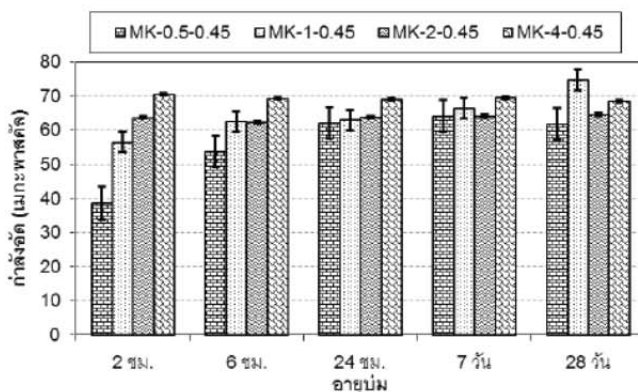
การทดสอบการขยายตัวของเนื้อเซในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ใช้ขนาดเดียวกับการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง โดยตัวอย่างนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตทั้งสองที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อครบกำหนดทดสอบนำตัวอย่างขึ้นจากสารละลายเช็ดผิวให้แห้ง จากนั้นไปวางวัดการขยายตัวด้วยเครื่องเปรียบเทียบความยาว เวลาในการทดสอบ 15 สัปดาห์ เช่นกัน

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

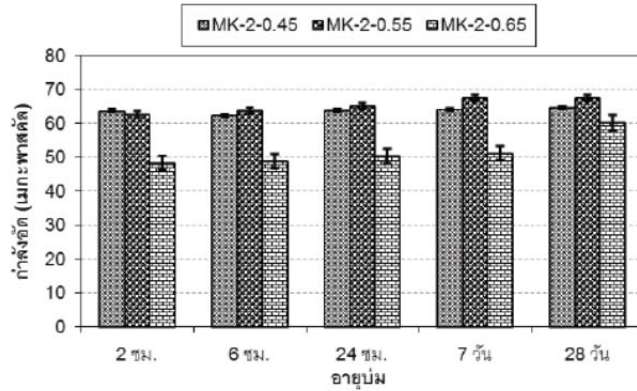
กำลังอัด

จากผลการทดสอบพบว่า ระยะเวลาในการบ่มด้วยความร้อนที่ 0.5 ชม. ให้ค่ากำลังอัดน้อยที่อายุบ่ม 2 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่เมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาบ่มร้อนมากขึ้น ค่ากำลังอัดที่อายุ 2 ชม. ให้ค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม ซึ่งให้ค่าสูงสุดที่ระยะเวลาบ่มร้อน 4 ชม. ดังแสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากวัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ ที่ผสมครั้งนี้ทำปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิสูง และเมื่อระยะเวลาบ่มร้อนขึ้นการเกิดจีโอพอลิเมอร์ก็ก่อตัวขึ้นได้อีก อันมีผลโดยตรงต่อกำลังอัด การบ่มร้อนที่ 0.5 ชม. ค่ากำลังอัดค่อยๆ พัฒนาขึ้นไปจนถึงอายุ 24 ชม. จึงมีค่าใกล้เคียงกับที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชม. อย่างไรก็ตามเมื่ออายุบ่มที่ 1, 7 และ 28 วัน ค่ากำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกันทุกระยะเวลาบ่มร้อน ซึ่งตัวอย่างบ่มร้อนนาน 4 ชม. ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในตัวอย่างเกือบทุกอายุบ่ม แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าที่อายุบ่ม 28 วัน ของจีโอพอลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1 ชม. ได้ให้กำลังอัดสูงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rovnanik, (2010) เมื่อพิจารณาถึงค่าความเบี่ยงเบนพบว่าที่ระยะเวลาบ่มร้อน 0.5 และ 1 ชม. มีค่าความเบี่ยงเบนพิสัยกว้างกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาบ่มร้อน 2 และ 4 ชม. สันนิษฐานว่าช่วงเวลาบ่มร้อน 0.5 และ 1 ชม. การเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) โครงสร้างยังไม่ค่อยงอกเติบโตสมบูรณ์ อันเนื่องมาจากความร้อนที่ช่วยกระตุ้นในการทำปฏิกิริยาในระยะเวลาที่สั้นไป

สำหรับค่ากำลังอัดที่แปรผันอัตราส่วนน้ำต่อดินขาวเผา (รูปที่ 3) พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อดินขาวเผาที่ 0.45 และ 0.55 ได้ให้ค่าสูงสุด นอกจากนี้ยังให้ค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกอายุบ่มอีกด้วย ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อดินขาวเผา 0.65 ได้ค่ากำลังอัดต่ำสุด เนื่องจากปริมาณน้ำที่มากเกินไปเกิดความเหมาะสมในการกอบปฏิกิริยาด้วยความร้อน ทำนองเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน และยังส่งผลให้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางลง ซึ่งความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงนั้นส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดสูงด้วย (Pacheco-Torgal, Moura, Ding and Jalali, 2011)

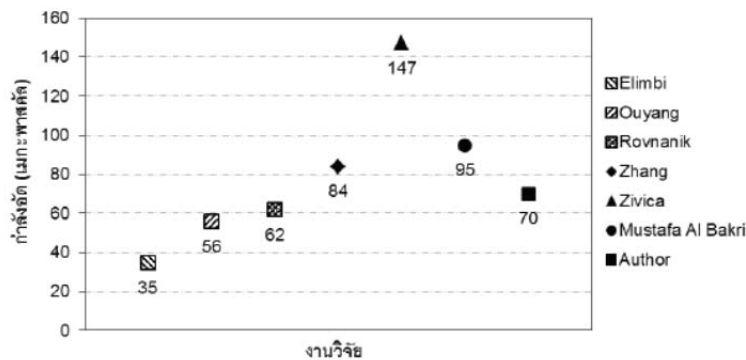


รูปที่ 2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่มร้อนต่างกัน



รูปที่ 3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำตอดินขาวแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตาม พบว่า กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์หล่อครั้งนี้ได้ให้ค่ากำลังอัดที่ค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา (Elimbi, Tchakoute and Njopwouo, 2011; Ouyang, Xu, Lo and Sham, 2011; Rovnanik, 2010) ซึ่งมีค่าสูงสุดประมาณ 35-62 เมกะพาสคัล ค่ากำลังอัดที่แตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลาบ่มร้อน อุณหภูมิในการบ่ม อัตราส่วนผสมต่างๆ ขั้นตอนหรือวิธีการผสม เป็นต้น หรือแม้กระทั่งที่มาของวัสดุตั้งต้นในแต่ละแหล่งก็ส่งผลเช่นกัน ถึงกระนั้นก็ตาม ก็ยังมีงานวิจัยที่ให้ค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงหรือสูงกว่างานวิจัยครั้งนี้ ทั้งจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินขาวเผาและถั่วลันเตา ดังเช่นงานวิจัยของ Zhang, Li, and Xu, et al, 2010; Zivica, Balkovic and Drabik, 2011; Mustafa Al Bakri, Kamarudin, Bnhussain, Rafiza and Zarina, 2012 ซึ่งมีค่ากำลังอัดที่ดีที่สุดเท่ากับ 84, 147 และ 95 (เตรียมจากถั่วลันเตา) เมกะพาสคัล ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4



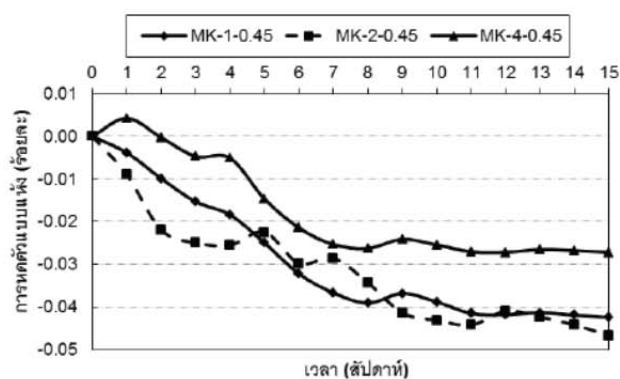
รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของผลการทดลองของนักวิจัย

การหัดตัวแบบแห้ง

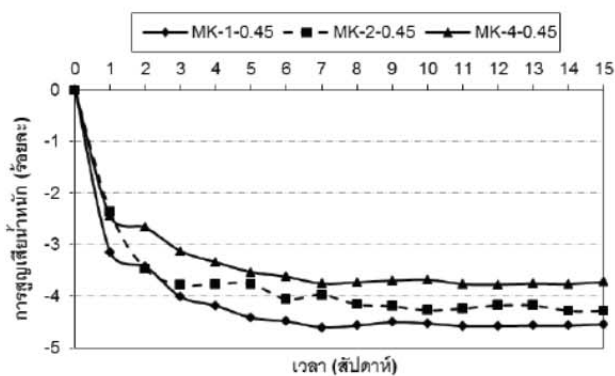
จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจากดินขาวเผาที่อัตราส่วนน้ำตอดินขาวเท่ากับ 0.45 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 4 ชม. ผลการทดสอบดังกล่าวได้แสดงไว้รูปที่ 5(ก) พบว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีการหดตัวแบบแห้งน้อยในช่วงอายุต้น โดยเฉพาะที่ระยะเวลาบ่มร้อน 4 ชม. หลังจากผ่านไป 8 สัปดาห์ ห่างตัวอย่างได้หดตัวมากยิ่งขึ้น



โดยที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชม. มีค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ -0.0391, -0.0343 และ -0.0263 ตามลำดับ หลังจาก 8 สัปดาห์ ขึ้นไป พบว่า ค่าการหดตัวเริ่มทรงตัวและมีอัตราการหดตัว น้อยมากไปจนถึงอายุ 15 สัปดาห์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ -0.0424, -0.0467 และ -0.0272 ตามลำดับ ผลทดสอบดังกล่าวพอสรุปเป็นนัยว่าระยะเวลาบ่มร้อนนานทำให้การหดตัวลดลง เนื่องจากการบ่มร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานได้ทำให้พื้นที่ที่อยู่ในเนื้อมอร์ตาร์บางส่วนถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาก่อตัวจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งทำให้เกิดการเสียน้ำ และน้ำส่วนที่เกินได้ระเหยออกไปด้วยความร้อนหลังการแกะพลาสติกไว้นิลเช่นกัน จึงส่งผลให้น้ำหนักมอร์ตาร์ลดลง ดังในรูปที่ 5(ข)



(ก) การหดตัวแบบแห้ง



(ข) การสูญเสียน้ำหนัก

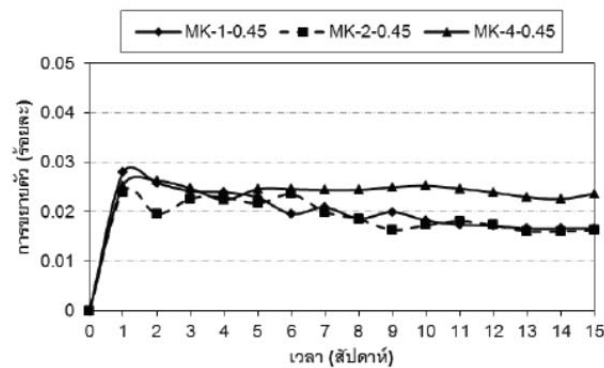
รูปที่ 5 การหดตัวแบบแห้งและการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่มร้อนต่างกัน

การขยายตัวในสารละลายซัลเฟต

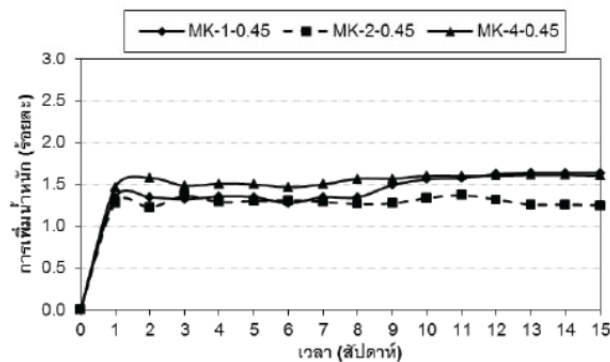
มอร์ตาร์ผลิตจากดินขาวเผาที่อัตราส่วนน้ำต่อดินขาวเท่ากับ 0.45 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 4 ชม. เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6(ก) พบว่าการขยายตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 สัปดาห์แรก ในทุกระยะเวลาบ่มร้อน หลังจากนั้นค่าการขยายตัวมีแนวโน้มคงที่ไปจนครบ 15 สัปดาห์ มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.0166, 0.0160 และ 0.0236 ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชม. ตามลำดับ แต่เป็นที่น่าสังเกตว่า ที่ระยะเวลาบ่ม 1 และ 2 ชม. ค่าการขยายตัว



ลดลงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับที่แช่ 1 สัปดาห์ ซึ่งค่าการขยายตัวสอดคล้องกับค่าการเพิ่มน้ำหนักดังแสดงไว้ในรูปที่ 6(ข) ที่มีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกัน จากผลการทดสอบพบว่าสารละลายโซเดียมซัลเฟตไม่ออกฤทธิ์พอที่จะทำให้ลายโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ทำจากดินขาวเผา และไม่มากพอที่จะทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เกิดการแตกร้าวหรือการขยายตัวในปริมาณมาก



(ก) การขยายตัว



(ข) การเพิ่มน้ำหนัก

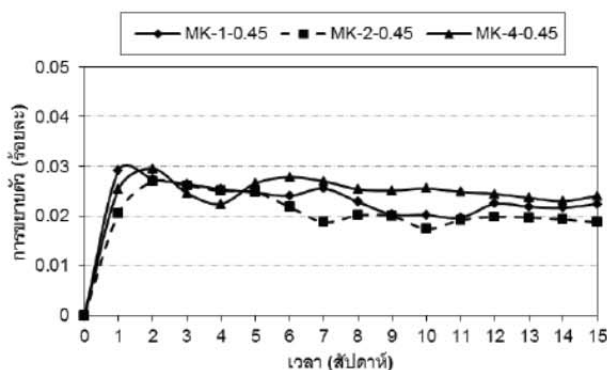
รูปที่ 6 จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่มร้อนต่างกันเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 5

ก) การขยายตัว และ ข) การเพิ่มน้ำหนัก

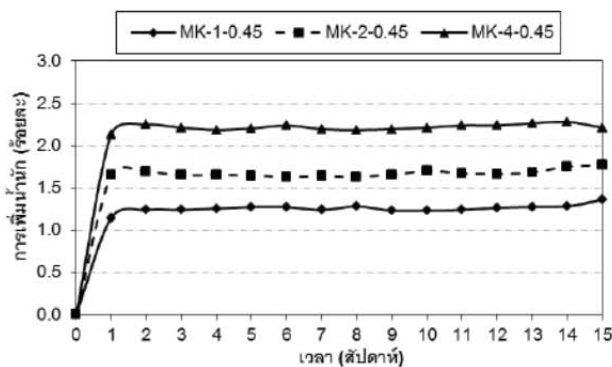
จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาบ่ม 4 ชม. ดังในรูปที่ 7(ก) มีการขยายตัวมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.0241 ระยะเวลา 15 สัปดาห์ มอร์ตาร์มีค่าการขยายตัวอย่างรวดเร็วในช่วง 1 สัปดาห์แรกในทุกระยะเวลาบ่มร้อน หลังจากนั้นค่าการขยายตัวได้มีแนวโน้มทรงตัวไปจนครบ 15 สัปดาห์ เช่นเดียวกับกับแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และยังมีค่าการขยายตัวสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตในทุกระยะเวลาบ่มที่เวลาบ่ม 15 สัปดาห์ ในขณะที่น้ำหนักของมอร์ตาร์ตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1, 2 และ 4 ชม. มีค่าเพิ่มเท่ากับร้อยละ 1.36, 1.76 และ 2.21 ตามลำดับ เวลานาน 15 สัปดาห์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7(ข) ด้วยสาเหตุที่วาระยะเวลาบ่มร้อนที่นานมีการใช้น้ำเป็นส่วนหนึ่งในการทำปฏิกิริยาในรูปของสารละลายต่อไปอีก ทำให้ก้อนตัวอย่างหลังจากแกะแบบหลอมมีน้ำซังอยู่ภายในเนื้อมอร์ตาร์ปริมาณน้อย



หลังจากถอดแบบหล่อแล้ววัดขนาดและน้ำหนักของตัวอย่าง นำไปแช่ในสารละลายต่อ ทำให้ปริมาตรช่องว่างในก้อนตัวอย่างมีที่โพรงอากาศอยู่ เมื่อนำไปแช่ในสารละลายซัลเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำให้สารละลายสามารถซึมเข้าไปได้ปริมาณมาก ในระยะเวลาบ่มร้อนที่นานกว่า ด้วยเหตุผลเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการแทรกซึมเข้าไปในรูโพรงของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ของสารละลายในปริมาณมาก มีแนวโน้มทำให้เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นทั้งไซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต



(ก) การขยายตัว



(ข) การเพิ่มน้ำหนัก

รูปที่ 7 จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่มร้อนต่างกันแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 5

ก) การขยายตัว และ ข) การเพิ่มน้ำหนัก

สรุปผล

จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่สังเคราะห์ขึ้นในการศึกษานี้ มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต เนื่องจากสามารถพัฒนากำลังอัดภายในเวลาอันสั้น เพื่อเปิดการใช้งานได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ค่าการหดตัวที่น้อย และความคงทนต่อสารเคมีสูง มีผลกระทบโดยตรงกับความคงทนต่อความชื้นแสงแดดกับผิวทางคอนกรีตและผลกระทบจากน้ำเสียจากรถบรรทุกเศษยางพาราที่มีปริมาณซัลเฟตสูง ดังมีแนวทางสรุปต่อไปนี้



- 1) การบ่มร้อนเป็นเวลา 0.5-4 ชม. ที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำตอหินขาวเท่ากับ 0.45 ได้ให้ค่ากำลังอัดที่สูงภายในเวลาที่รวดเร็วที่ (2 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง) ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 37-71 เมกะปาสคาล และที่ระยะเวลาบ่มร้อน 2 ชม. ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อน้ำตอหินขาวเท่ากับ 0.45 และ 0.55 สามารถให้ค่ากำลังอัดได้สูงทุกอายุบ่มที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 62-68 เมกะปาสคาล
- 2) การบ่มร้อนที่ระยะเวลา 4 ชม. ทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำตอหินขาวเท่ากับ 0.45 มีค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยสุด
- 3) การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต มีลักษณะคล้ายกัน ที่ระยะเวลาบ่มร้อน 1-4 ชม. มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงกันทั้ง 15 สัปดาห์

รายการอ้างอิง

- คณกุล ดันนโยภาส (2553). แร่และหิน. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Chindaprasirt, P., Chareerat T., Hatanaka S. & Cao, T. (2011). High-strength geopolymer using fine High-calcium fly ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, **23**(3), 264-270.
- Criado, M., Jimenez, A.F. & Palomo, A. (2010). Effect of sodium sulfate on the alkali activation of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, **32**(8), 589-594.
- Elimbi, A., Tchakoute, H.K. & Njopwouo, D. (2011). Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements. **Construction and Building Materials**, **25**(6), 2805-2812.
- Ibrahim, R. K., Hamid, R. & Taha M.R. (2012). Fire resistance of high-volume fly ash mortars with nanosilica addition. **Construction and Building Materials**, **36**, 779-786.
- Kamseu, E., Rizzuti, A., Leonelli, C. & Perera, D. (2010). Enhanced thermal stability in K₂O-metakaolin-based geopolymer concretes by Al₂O₃ and SiO₂ fillers addition. **Journal of Materials Science**, **45**(7), 1715-1724.
- Komnitsas, K.A. (2011). Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. **Procedia Engineering**, **21**, 1023-1032.
- Mustafa Al Bakri, A.M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Rafiza, A.R. & Zarina, Y. (2012). Effect of Na₂SiO₃/NaOH ratios and NaOH molarities on compressive strength of fly-ash-based geopolymer. **ACI Materials Journal**, **109**(5), 503-508.
- Ouyang, D., Xu, W., Lo, T. Y. & Sham, J. F.C. (2011). Increasing mortar strength with the use of activated kaolin by-products from paper industry. **Construction and Building Materials**, **25**(4), 1537-1545.
- Pacheco-Torgal, F, Moura, D., Ding, Y. & Jalali S. (2011). Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. **Construction and Building Materials**, **25**(9), 3732-3745.
- Rovnanik P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, **24**(7), 1176-1183.
- Sakulich, A.R. (2011). Reinforced geopolymer composites for enhanced material greenness and durability. **Sustainable Cities and Society**, **1**(4), 195-210.



- Silva, F.J., Mathias, A.F. & Thaumaturgo C. (1999). Evaluation of the fracture toughness in Poly (Sialate Siloxo) composite matrix. **Geopolymer 1999 Conference**, June 30 to July 2, 1999, Institute Geopolymer, Saint- Quentin, France, 97-106.
- Temuujin, J., Rickard, W., Lee, M. & van Riessen, A. (2011). Preparation and thermal properties of fire resistant metakaolin-based geopolymer-type coatings. **Journal of Non-Crystalline Solids**, **357**(5), 1399-1404.
- Yunsheng, Z., Wei, S. & Zongjin, L., (2010). Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. **Applied Clay Science**, **47**(3-4), 271-275.
- Zhang, Y.J., Li, S., Xu, D.L., Wang, B.Q., Xu, G.M., Yang, D.F., Wang, N., Liu, H.C. & Wang, Y.C., (2010). A novel method for preparation of organic resins reinforced geopolymer composites. **Journal of Materials Science**, **45**(5), 1189-1192.
- Zivica, V., Balkovoc, S. & Drabik, M., (2011). Properties of metakaolin geopolymer hardened paste prepared by high-pressure compaction. **Construction and Building Materials**, **25**(5), 2206-2213.

วารสารระดับนานาชาติในฐานข้อมูล ISI

Advances in Materials Science and Engineering

Development and Performance Evaluation of Very High Early Strength Geopolymer
for Rapid Road Repair

Research Article

Development and Performance Evaluation of Very High Early Strength Geopolymer for Rapid Road Repair

Abideng Hawa,¹ Danupon Tonnayopas,²
 Woraphot Prachasaree,¹ and Pichai Taneerananon¹

¹Department of Civil Engineering, Prince of Songkla University, HatYai, Songkhla 90112, Thailand

²Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkla University, HatYai, Songkhla 90112, Thailand

Correspondence should be addressed to Abideng Hawa; abideng.hawa@gmail.com

Received 23 February 2013; Revised 11 July 2013; Accepted 13 July 2013

Academic Editor: Dachamir Hotza

Copyright © 2013 Abideng Hawa et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

High early strength is the most important property of pavement repair materials to allow quick reopening to traffic. With this in mind, we have experimentally investigated geopolymers using low cost raw materials available in Thailand. The geopolymer mortar was metakaolin (MK), mixed with parawood ash (PWA, rubberwood ash) or oil palm ash (OPA) as binder agent. Rubberwood is often used as raw material for biomass power plants in Thailand, especially at latex glove factories and seafood factories, and burning rubberwood generates PWA. Both PWA and OPA are therefore low cost residual waste, locally available in mass quantities. The geopolymer samples were characterized for compressive strength, drying shrinkage, and bond strength to Portland cement mortar with slant shear test. The experimental design varied the contents of PWA and OPA and the heat curing time (1, 2 and 4 h) after hot mixture process. The hot mixture process resulted in very high early strength. In addition, we achieved high compressive strengths, low drying shrinkage, and very significant bond strength enhancement by use of the ashes.

1. Introduction

Many concrete infrastructures, such as concrete pavement, bridge decks, parking structures, highways, and airport runways, have high repair costs when damaged. This is partly because special very-rapid-setting materials are used to shorten the repair time in order to quickly get back to normal use. The materials for rapid road repair must have high early compressive strength, and include polyurethane polymer, epoxy polymer, thermosetting vinyl polymer, and magnesium polyphosphate.

Rapid concrete repair methods are of economic significance and therefore have been widely studied. Relatively recent extensive studies have taken place at the Center for Transportation Research of the University of Texas at Austin [1] and the Texas Transportation Institute at the Texas A&M University [2]. Modified Portland cement has been investigated [3, 4] along with magnesia-phosphate [5, 6]. These studies have emphasized rapid setting. The current study used materials locally available in Thailand, including waste

streams, in the production of geopolymers for these applications.

Studied in materials science and engineering, the geopolymer process takes place by chemical reactions between aluminosilicate materials and alkaline solutions, under elevated curing temperatures. Common raw materials for geopolymer are fly ash and metakaolin containing SiO_2 and Al_2O_3 . The geopolymer benefits include high strength and high early strength [7]. However, some studies [8–10] have also assessed other mechanical properties such as the compressive strength at 1, 7, and 28 days. These other properties are not of primary importance in concrete pavement repair, with the priority on early opening to traffic.

The current study focuses on metakaolin (MK), with parawood ash (PWA, i.e., ash from rubberwood) or oil palm ash (OPA).

Little research is available on the utilization of PWA or OPA waste. In addition, the mechanical properties and behavior of MK-based geopolymers with PWA or OPA are still not well established or understood. Thus, further research is

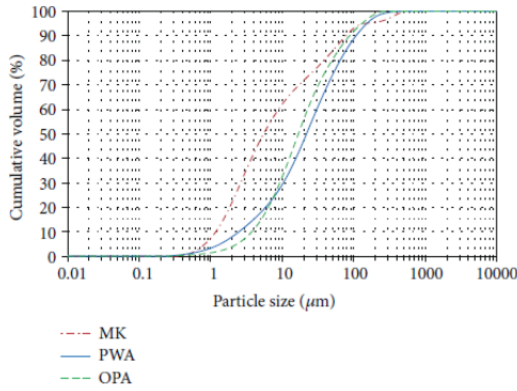


FIGURE 1: Particle size distributions of raw materials.

needed to evaluate the effects of PWA or OPA in geopolymer composite materials. The current study on MK-based geopolymers containing PWA or OPA addresses these gaps in knowledge about new environmentally friendly materials particularly for concrete pavement repair.

We have created and tested MK-based geopolymers containing PWA or OPA as partial replacements for MK. The amount of PWA ranged up to 30% and of OPA up to 15% by weight of MK. We also tested different heat curing times, so that all of the main factors influencing geopolymer properties were varied in the experimental design. Various key characteristics of concrete repair materials were determined for the geopolymer.

2. Experimental Program

2.1. Materials. The kaolin used in this study was calcined at 750°C for 2 h and used as Si-Al cementitious material. The chemical composition of the MK was analyzed using X-ray fluorescence (XRF); it had the main components 50.30% SiO₂ and 41.02% Al₂O₃. Grinding the MK in a ball mill produced particles with mass-average size $d_{50} = 6.31 \mu\text{m}$ (Figure 1). Both chemical composition and physical properties of this MK are listed in Table 1.

PWA generated during the combustion of parawood for electricity production was collected from a biomass thermal power plant. The OPA used in this study was collected from a palm oil mill. Both the PWA and the OPA were ground in a ball mill for approximately 4 h. The particle size distributions determined by laser scattering are shown in Figure 1: the d_{50} values were 25.13 μm for PWA and 19.31 μm for OPA. The chemical compositions were analyzed by XRF. OPA had the main chemical components 13.84% K₂O, 38.37% SiO₂, and 14.09% CaO by weight, while PWA had similarly 16.11% K₂O and 41.19% CaO. The chemical compositions and physical properties of PWA and OPA are listed in Table 1.

The alkaline activator used was a mixture of sodium hydroxide (NaOH) in flakes of 98% purity, sodium silicate

TABLE 1: Chemical compositions (wt%) and physical properties of cementitious materials used.

Chemical compositions	MK	PWA	OPA
SiO ₂	50.30	2.57	38.37
Al ₂ O ₃	41.02	0.53	1.48
Fe ₂ O ₃	1.05	0.56	3.01
CaO	0.33	41.19	13.84
TiO ₂	1.50	—	0.21
MgO	—	4.52	3.00
K ₂ O	4.08	16.11	14.09
P ₂ O ₅	—	3.06	4.15
SO ₃	—	5.54	1.42
Cl	—	0.82	—
Na ₂ O	—	1.36	—
Loss on ignition (LOI)	1.72	23.74	20.43
Specific surface area (m ² /g) BET	13.61	8.71	13.06
d_{10} (μm)	1.352	2.860	4.321
d_{50} (μm)	6.308	25.128	19.305
d_{90} (μm)	88.803	123.450	100.109

(Na₂SiO₃), and water. The sodium silicate solution contained 14.14% Na₂O, 27.67% SiO₂, and 56.28% H₂O by weight.

River sand was used as the fine aggregate inert component of the geopolymer mortars. The specific gravity of the river sand was 2.51 and the maximum size was 4.75 mm. The water absorption of the river sand was 1.48%, tested in accordance with ASTM C128 [11].

2.2. Mixed Proportions. Geopolymer mortars were prepared by mixing the raw materials (MK with PWA or OPA), river sand, and alkaline activators (sodium silicate, sodium hydroxide, and water). The alkaline activator was mixed first at 74 ± 2°C from reaction heat. The final mixing of alkaline activator, reactive raw material, and river sand took place at 48 ± 2°C. These elevated temperatures were essential to fast setting. Details of the ingredient proportions and molar ratios are shown in Tables 2 and 3, respectively. The samples were mixed manually, not with a motorized mixer. The slurries were poured into acrylic 50 × 50 × 50 mm molds to set and form samples for compressive strength testing. The samples were compacted in accordance with ASTM 109/C109M [12]. Samples were also formed in acrylic 25 × 25 × 285 mm molds, compacted in accordance with ASTM C596 [13], for use in tests of drying shrinkage. The samples in acrylic molds were wrapped with polyvinyl sheets to prevent loss of moisture. All of the samples were heated in an electric oven at 80°C after casting. After curing for 1, 2, or 4 h, they were removed from the oven. After unwrapping and demolding, the samples were stored at ambient temperature of 30 ± 2°C with a relative humidity 70 ± 5% until they were tested. The bond strength test samples were prepared in 50 × 50 × 50 mm acrylic molds slanted to give an interface at 45° (Figure 2) against Portland cement mortar, which was cured at ambient temperature for 7 days. Afterwards, the geopolymer was added to these molds to form a cube with the set Portland cement. The molds

TABLE 2: Mixed proportions of geopolymer mortars (by weight).

Mix	MK (%)	PWA (%)	OPA (%)	SS/N ratio	A/R ratio	W/R ratio	RS/R ratio	Heat curing (h)
Control-1	100	—	—					
P10-1	90	10	—					
P20-1	80	20	—					
P30-1	70	30	—	2.5	0.83	0.45	3	1
O5-1	95	—	5					
O10-1	90	—	10					
O15-1	85	—	15					
Control-2	100	—	—					
P10-2	90	10	—					
P20-2	80	20	—					
P30-2	70	30	—	2.5	0.83	0.45	3	2
O5-2	95	—	5					
O10-2	90	—	10					
O15-2	85	—	15					
Control-4	100	—	—					
P10-4	90	10	—					
P20-4	80	20	—					
P30-4	70	30	—	2.5	0.83	0.45	3	4
O5-4	95	—	5					
O10-4	90	—	10					
O15-4	85	—	15					

Note: SS: sodium silicate; N: sodium hydroxide; A: (SS + N);
R: raw materials (MK, PWA, and OPA); W: water; RS: river sand.

TABLE 3: Mixture formulations.

Sample	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (molar ratio)	CaO/SiO ₂ (molar ratio)	Na ₂ O/SiO ₂ (molar ratio)	H ₂ O/Na ₂ O (molar ratio)
Control	2.77	0.01	0.21	11.43
P10	2.85	0.08	0.23	11.43
P20	2.95	0.16	0.25	11.43
P30	3.09	0.26	0.27	11.43
O5	2.88	0.02	0.22	11.43
O10	3.01	0.03	0.22	11.43
O15	3.15	0.04	0.22	11.43

were wrapped with polyvinyl sheet and heated to 80°C. After curing for 1, 2, or 4 h, the samples were unwrapped and demolded. They were stored at ambient temperature for 24 h and then tested.

2.3. Test Procedure. Geopolymer mortars were wrapped with polyvinyl sheets to prevent moisture loss, cured in an oven at 80°C for 1, 2, or 4 h, and cooled at ambient temperature of 30 ± 2°C with 70 ± 5% relative humidity. The compressive strengths of geopolymer mortars were determined according to ASTM 109/C109M [12], using a universal testing machine at a loading rate of 5.00 mm/min. For each mixture, three cast samples were tested at each age of 2, 6, 24 h, and 7 days.

The drying shrinkage was determined with a length comparator in accordance with ASTM C490 [14]. The geopolymer



FIGURE 2: Typical specimens with geopolymer mortar bonded to Portland cement mortar.

mortars were prepared using 1, 2, or 4 h of curing at 80°C. Measurements were taken up to 30 weeks of age after curing.

The bond strength between Portland cement mortar and geopolymer mortar was determined by a shear test, from 50 × 50 × 50 mm slant shear samples with interface line at 45° (see Figure 2). The samples were tested under compression using the standard procedure for testing compressive strength. The bond strength was tested 24 h after heat curing, in ambient temperature. Bond failure of a slant shear sample is shown in Figure 3. The slant shear test has become the most widely accepted test for the bonding of repair materials to concrete [15]. However, there is no general standard available for this test [15, 16].



FIGURE 3: Slant shear sample after failure in compression test.

3. Results and Discussion

3.1. Compressive Strength. The effects of PWA or OPA content on the compressive strength of metakaolin-based geopolymer mortar are shown in Figures 4 to 8. The early 2 h compressive strength is high, partly because the geopolymer mortars were prepared as a hot mixture before curing in an oven.

The compressive strengths for different mixtures at the observed ages are presented in Figure 4. The early 2 h compressive strength ranged from 15 MPa to 71 MPa, while the final observation at 7 days ranged from 42 MPa to 70 MPa. The different curing times had no effect on the final compressive strength of these geopolymers.

The compressive strength of geopolymer mortars with PWA, heat-cured at 80°C for 1 h, is shown in Figure 5. The compressive strength clearly decreased with PWA content, especially at 2 h observation time. This may partly be due to particle size effects (d_{50} 6.31 μm of MK against 25.13 μm of PWA); the greater surface area of finer particles makes them more active in polymerization [17]. Another contributing factor may be the reduction of Si and Al when MK is replaced with PWA. The CaO in PWA did not participate in geopolymerization and may have hydrated slowly. Winnefeld et al. [18] found that the lower strength incurred by high calcium content may in part be caused by poor reactivity with alkaline activators in fly-ash-based geopolymers. Test results confirmed that adding CaO into raw materials decreased compressive strength. Promising results have also been reported [19] for a curing temperature of 70°C.

Compressive strengths with OPA, heat-cured at 80°C for 1 h, are shown in Figure 6. The compressive strengths again decrease with OPA content, but at 5% OPA the final 7-day strength remains unchanged. The compressive strength values remain acceptable also at OPA contents of 10% and 15%. The main chemical component in OPA was SiO₂, while PWA mainly had CaO, partly causing the different effects on compressive strength. Also, the average particles size differs, and the smaller-sized OPA may be more reactive due to this [17].

The effects on compressive strength might also be explained with molar ratios (SiO₂/Al₂O₃). Figure 4 shows the

variation in compressive strengths of the samples measured after heat curing. Assuming this ratio was the determining factor, the most favorable SiO₂/Al₂O₃ molar ratios were in control and O5, these being SiO₂/Al₂O₃ = 2.77 and 2.88, respectively. Chindaprasirt et al. [20] have reported similar trends, with SiO₂/Al₂O₃ up to 2.87, for high calcium fly-ash-based geopolymer systems. However, adding OPA beyond the optimal amount decreases the compressive strength because it also contains CaO. In addition, the compressive strength decreased with the amount of PWA (high CaO). This is consistent with previous studies [19] on fly-ash-based geopolymers. Previous studies [20–22] have also suggested that the ratio SiO₂/Al₂O₃ influences the properties of the geopolymer binders. Generally, the geopolymer binders have been prepared using fly ash and metakaolin, with the ratio SiO₂/Al₂O₃ within the range from 2 to 4 [20, 21].

For all mixtures, long heat curing times increased the compressive strength observed at 2 h in ambient temperature. Heat curing may accelerate the degree of geopolymerization by encouraging the formation of mineral phases. For the samples cured for 1, 2, and 4 h, with 10% PWA or OPA, the compressive strengths for up to 7 days of age are shown in Figures 7 and 8. The samples cured for 2 and 4 h did not develop dramatically higher long-term compressive strengths; instead, the prominent effects are in the early strength development. Furthermore, with 10% OPA, the curing time only had a marginal effect; see Figure 8.

3.2. Drying Shrinkage. All geopolymer mortars were exposed to 30 ± 2°C and 70 ± 5% relative humidity for a prolonged time, up to 30 weeks. The drying shrinkages of all samples are presented in Figures 9 to 12. The drying shrinkage of control samples is lower than with 10%, 20%, and 30% PWA (Figure 9.). The average particle size of PWA is larger than of MK and correlates negatively with the specific surface area. The geopolymer reaction was incomplete (see Figures 5 and 6) after heat curing at 80°C for 1 h, but the excess water could not evaporate because the samples were wrapped with polyvinyl sheets. After carving off the polyvinyl sheet, the evaporation of pore water could take place; this is easier with large pores corresponding to coarser particles. This is how PWA content may contribute to the drying shrinkage and increase it relative to control samples. Also, OPA tends to increase drying shrinkage (Figure 10). In the control and with 5%, 10%, or 15% OPA, drying shrinkage was rapid in the 1 to 8 h interval. Our MK-based geopolymer containing PWA or OPA had lower drying shrinkages than those reported for slag mortar with sodium silicate, sodium hydroxide, and sodium carbonate activators [23].

Figures 11 and 12 illustrate the drying shrinkage of geopolymer mortars containing 10% PWA and 10% OPA, respectively, heat-cured at 80°C for 1, 2, or 4 h. The samples exhibited similar behavior, in terms of longer curing decreasing the drying shrinkage. The shrinkage of the samples containing 10% PWA is presented in Figure 11. With 4 h curing, there was less shrinkage than with shorter curing. The use of water in the geopolymerization reaction increases with curing time. The drying shrinkage of samples containing 10% OPA is presented in Figure 12. The samples cured for 2 and 4 h had

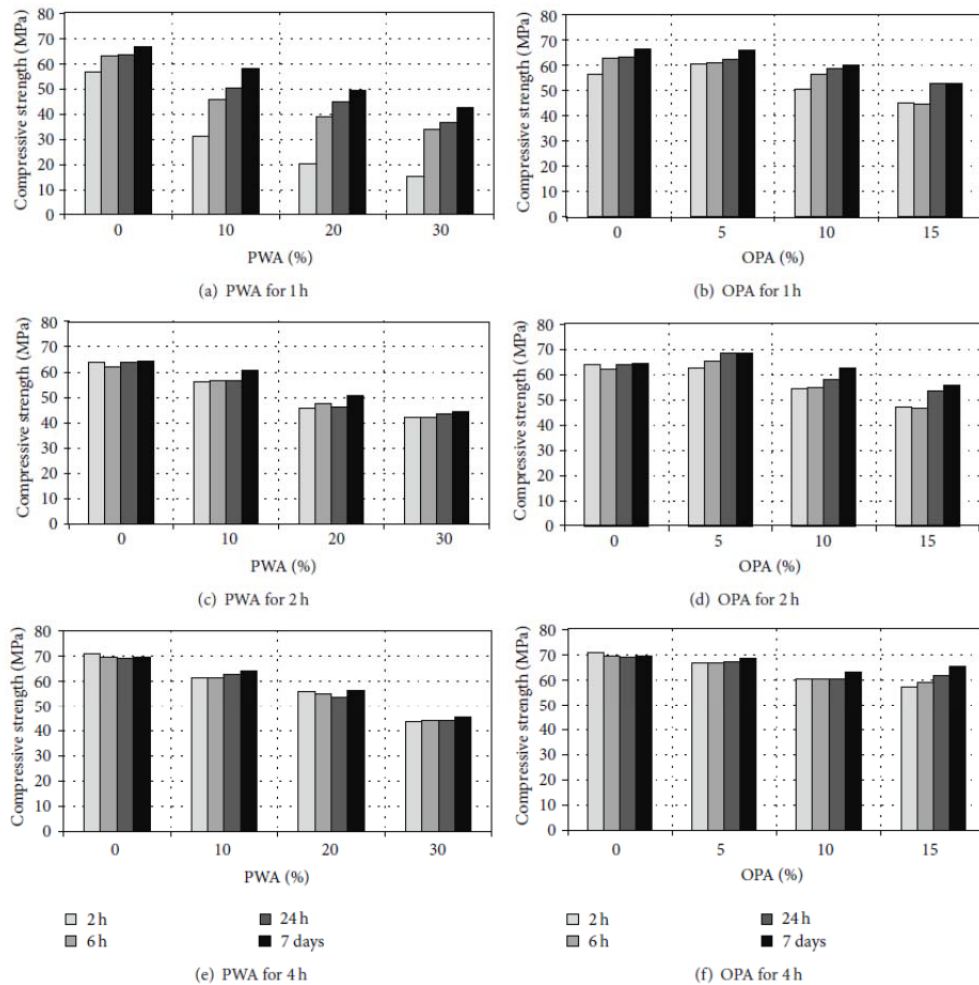


FIGURE 4: Compressive strengths for different mixtures and curing times.

similar drying shrinkage values at all ages, with the shrinkage continuing throughout the observed 30 weeks. For specimens cured for 1h, the drying shrinkage was much higher at all ages than with the longer cure times. Again, longer cure times left less water for evaporation, due to higher extent of geopolymerization reactions that used up water.

3.3. Drying Shrinkage and Weight Loss. Figures 13 and 14 show the relationship between drying shrinkage and weight loss, expressed as percentage of initial weight, for geopolymer mortars containing 10% PWA or 10% OPA. At the longer curing times, the weight loss is smaller and so is the shrinkage. This may be due to the higher extent of geopolymerization reaction, in comparison with shorter curing time. Likely, the weight loss is mostly from evaporation of water.

3.4. Drying Shrinkage and Compressive Strength. The relationship of drying shrinkage with compressive strength at 7 days is shown in Figure 15. The high compressive strength samples have a stable aluminosilicate polymer structure [24] from geopolymerization, resisting shrinkage. Also, this mechanism may contribute to the effects of curing time on shrinkage.

3.5. Bond Strength. The results on bond strength to Portland cement mortar are shown in Figure 16. The bond strength improved with heat curing time for all formulations, and the samples containing PWA or OPA had dramatically higher slant shear strengths than the control sample with only MK, for all heat curing times tested. Particle size effects may contribute to this, as the larger particles (samples with

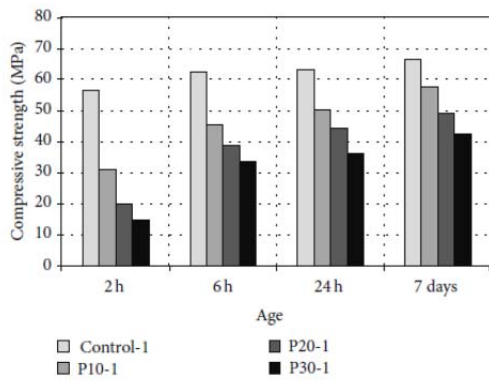


FIGURE 5: Compressive strengths of geopolymer mortars containing PWA, heat-cured at 80°C for 1 h.

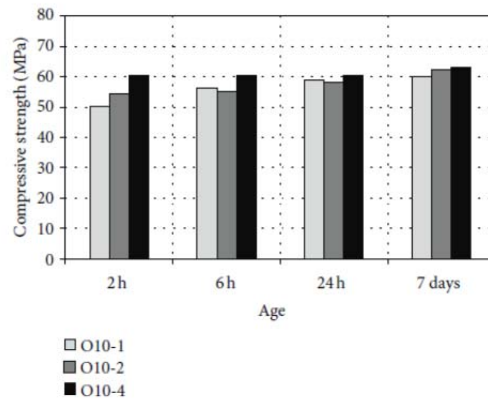


FIGURE 8: Compressive strength of geopolymer mortar containing 10% OPA.

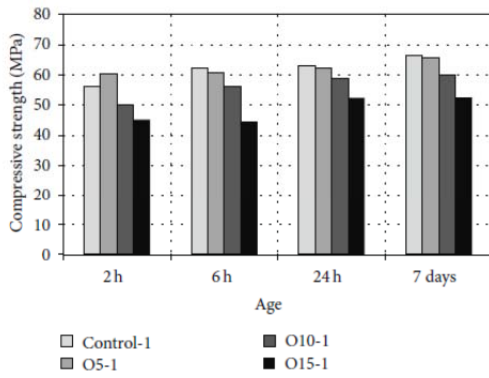


FIGURE 6: Compressive strengths of geopolymer mortars containing OPA, heat-cured at 80°C for 1 h.

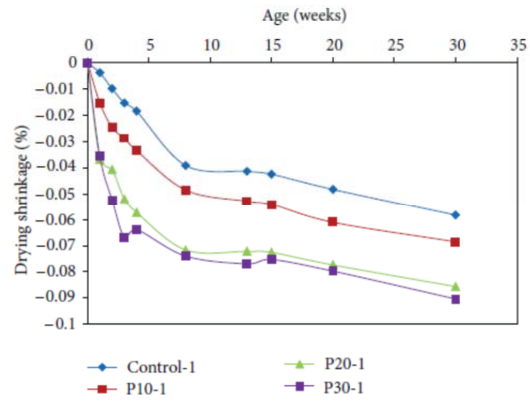


FIGURE 9: Drying shrinkages of geopolymer mortars containing PWA, heat-cured at 80°C for 1 h.

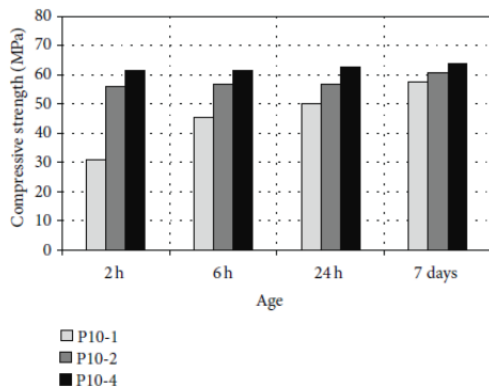


FIGURE 7: Compressive strength of geopolymer mortar containing 10% PWA.

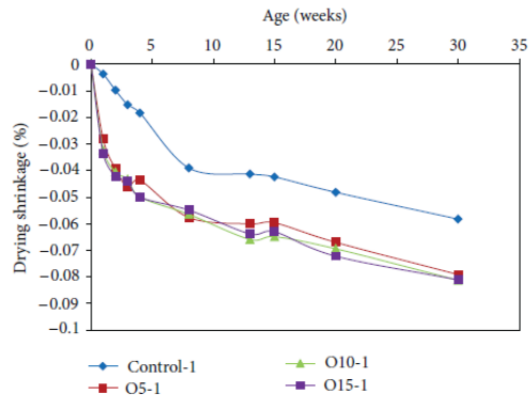


FIGURE 10: Drying shrinkages of geopolymer mortars containing OPA, heat-cured at 80°C for 1 h.

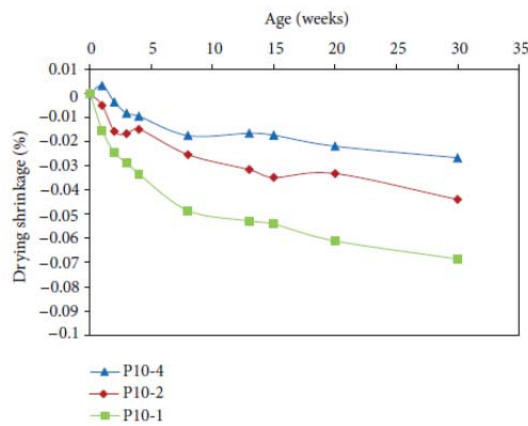


FIGURE 11: Drying shrinkage of geopolymer mortars containing 10% PWA.

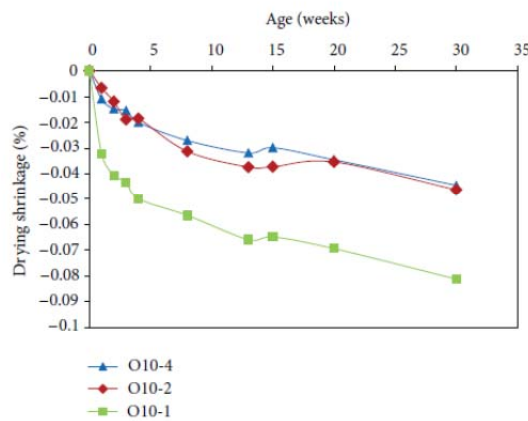


FIGURE 12: Drying shrinkage of geopolymer mortars containing 10% OPA.

PWA and OPA) have a comparatively low specific surface area. Then, the slurries containing PWA and OPA may flow better, improving the surface contact with the OPC samples. Another potential mechanism is that the fast setting control samples might harden before fully developing surface bonds with OPC. Finally, there is the possibility of actual chemical reaction effects.

4. Conclusions

Geopolymer mortars from metakaolin with PWA or OPA were synthesized and studied, with the following main conclusions.

- (i) OPA appears more advantageous than PWA, as a supplementary raw material in these geopolymers, due to overall better strength characteristics.

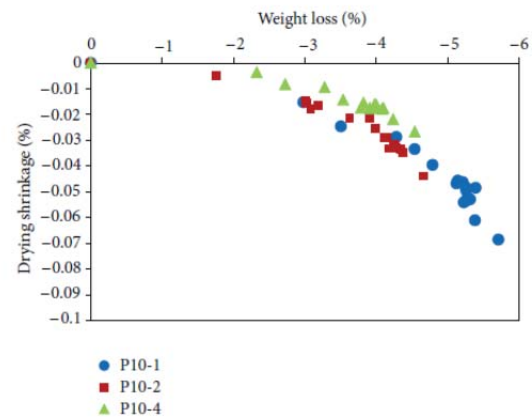


FIGURE 13: Relationship of weight loss on drying shrinkage with 10% PWA.

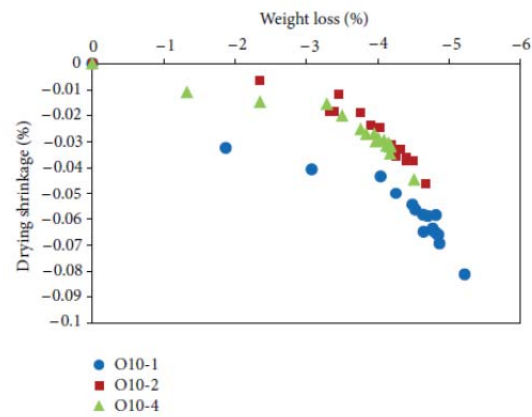


FIGURE 14: Relationship of weight loss on drying shrinkage with 10% OPA.

- (ii) Both OPA and PWA dramatically (see Figure 16) increased the bond strength to Portland cement mortar and may be necessary components in the geopolymers for use in concrete repair.
- (iii) Compressive strength of geopolymers can be improved by increased heat curing, here tested up to 4 h. However, with only 10% of OPA, heat curing at 80°C for 1 h already showed maximal strength, while with 10% PWA, longer cure times affect especially early strength development.
- (iv) Long heat curing times also decreased drying shrinkage, potentially due to the well-developed strength.
- (v) The longer heat curing times also used more water in the geopolymerization process, reducing the amount left to evaporate and detectable as weight loss.

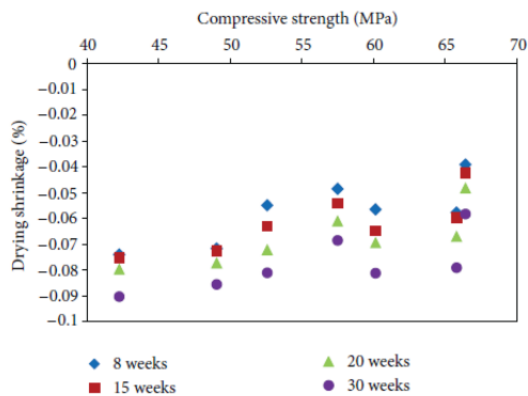


FIGURE 15: Relation between compressive strengths and drying shrinkage for samples heat-cured at 80°C for 1 h.

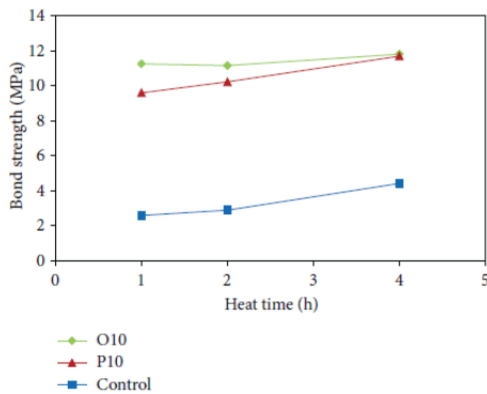


FIGURE 16: Bond strength to Portland cement mortar of select geopolymer samples, measured by compression test of slant shear.

The postcuring weight loss had a tight relationship to drying shrinkage.

Currently, geopolymer binders have not yet reached field applications. However, portable steam boilers may enable their practical use. Results from an ongoing field study of these geopolymers with high early strength will be the subject of a future publication, complementing the current laboratory study.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the financial support from the Office of the Higher Education Commission, and thesis research funding from Prince of Songkla University (PSU), Thailand, as well as the use of the facilities of the Department of Mining and Materials Engineering and Department of Civil Engineering, Prince of Songkla University. Dr. Seppo Karrila, from the Faculty of Science

and Technology, is also acknowledged for comments and suggestions, as is the copyediting service of the Research and Development Office of PSU.

References

- [1] S. M. Markey, D. P. Whitney, D. W. Fowler, S. I. Lee, A. K. Mukhopadhyay, and D. G. Zollinger, "Investigation of spall repair materials for concrete pavement," Tech. Rep. 0-5110-1, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 2006.
- [2] T. Tang and D. G. Zollinger, "Investigation of spall repair for concrete pavement," Tech. Rep. 2919-3, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 1997.
- [3] J.-P. Won, J.-M. Kim, S.-J. Lee, S.-W. Lee, and S.-K. Park, "Mix proportion of high-strength, roller-compacted, latex-modified rapid-set concrete for rapid road repair," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 4, pp. 1796–1800, 2011.
- [4] N. Buch, T. J. Van Dam, K. Peterson, and L. Sutter, "Evaluation of high-early strength PCC mixtures used in full depth repairs," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 3, pp. 162–174, 2008.
- [5] Q. Yang and X. Wu, "Factors influencing properties of phosphate cement-based binder for rapid repair of concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, no. 3, pp. 389–396, 1999.
- [6] Q. Yang, B. Zhu, S. Zhang, and X. Wu, "Properties and applications of magnesia-phosphate cement mortar for rapid repair of concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 11, pp. 1807–1813, 2000.
- [7] F. J. Silva, A. F. Mathias, and C. Thaumaturgo, *Evaluation of the Fracture Toughness in Poly (Sialate-Siloxo) Composite Matrix*, Institute geopolymer, Saint-Quentin, France, 1999.
- [8] P. Rovnaník, "Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 7, pp. 1176–1183, 2010.
- [9] Y. J. Zhang, S. Li, D. L. Xu et al., "A novel method for preparation of organic resins reinforced geopolymer composites," *Journal of Materials Science*, vol. 45, no. 5, pp. 1189–1192, 2010.
- [10] X. Ma and Q. Rao, "Mechanical properties of high-performance lightweight aggregate concrete with inorganic polymers cement based on multiple minerals under uniaxial loading," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2012, Article ID 453035, 5 pages, 2012.
- [11] ASTM C128, *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*, American Society for Testing and Materials, 1997.
- [12] ASTM 109/C109M, *Standard Test Method For Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (Using 2-in. Or [50-Mm] Cube Specimens)*, American Society for Testing and Materials, 1998.
- [13] ASTM C596, *Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement*, American Society for Testing and Materials, 1996.
- [14] ASTM C490, *Standard Practice For Use of Apparatus For the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*, American Society for Testing and Materials, 1996.
- [15] A. I. Abu-Tair, S. R. Rigden, and E. Burley, "Testing the bond between repair materials and concrete substrate," *ACI Materials Journal*, vol. 93, no. 6, pp. 553–558, 1996.
- [16] S. Li, D. G. Geissert, G. C. Frantz, and J. E. Stephens, "Freeze-thaw bond durability of rapid-setting concrete repair materials," *ACI Materials Journal*, vol. 96, no. 2, pp. 242–249, 1999.

Advances in Materials Science and Engineering

- [17] J. G. S. Van Jaarsveld, J. S. J. Van Deventer, and G. C. Lukey, "The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers," *Materials Letters*, vol. 57, no. 7, pp. 1272–1280, 2003.
- [18] F. Winnefeld, A. Leemann, M. Lucuk, P. Svoboda, and M. Neuroth, "Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 6, pp. 1086–1093, 2010.
- [19] J. Temuujin, A. van Riessen, and R. Williams, "Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 167, no. 1-3, pp. 82–88, 2009.
- [20] P. Chindapasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crentsil, and S. Hanjitsuwan, "Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems," *Journal of Materials Science*, pp. 1–8, 2012.
- [21] P. D. Silva, K. Sagoe-Crenstil, and V. Sirivivatnanon, "Kinetics of geopolymerization: role of Al_2O_3 and SiO_2 ," *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 4, pp. 512–518, 2007.
- [22] R. A. Fletcher, K. J. D. MacKenzie, C. L. Nicholson, and S. Shimada, "The composition range of aluminosilicate geopolymers," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 25, no. 9, pp. 1471–1477, 2005.
- [23] D. C. Atiş, C. Bilim, Ö. Çelik, and O. Karahan, "Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 1, pp. 548–555, 2009.
- [24] T. Bakharev, "Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1233–1246, 2005.

วารสารระดับนานาชาติในฐานข้อมูล ISI

Scientific World Journal

Performance Evaluation and Microstructure Characterization of Metakaolin-Based
Geopolymer Containing Oil Palm Ash

Research Article

Performance Evaluation and Microstructure Characterization of Metakaolin-Based Geopolymer Containing Oil Palm Ash

Abideng Hawa,¹ Danupon Tonnayopas,² and Woraphot Prachasaree¹

¹ Department of Civil Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90112, Thailand

² Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90112, Thailand

Correspondence should be addressed to Abideng Hawa; abideng.hawa@gmail.com

Received 12 August 2013; Accepted 16 September 2013

Academic Editors: V. Amigó and F. Pacheco Torgal

Copyright © 2013 Abideng Hawa et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This study reports on the microstructure, compressive strength, and drying shrinkage of metakaolin (MK) based geopolymers produced by partially replacing MK by oil palm ash (OPA). The OPA was used as raw material producing different molar ratios of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and CaO/SiO_2 . The geopolymer samples were cured at 80°C for 1, 2, or 4 hours and kept at ambient temperature until testing. The compressive strength was measured after 2, 6, and 24 hours and 7 and 28 days. The testing results revealed that the geopolymer with 5% OPA ($\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 = 2.88 : 1$) gave the highest compressive strength. Scanning electron microscopy (SEM) indicated that the 5% OPA sample had a dense-compact matrix and less unreacted raw materials which contributed to the higher compressive strength. In the X-ray diffraction (XRD) patterns, the change of the crystalline phase after heat curing for 4 hours was easily detectable compared to the samples subjected to a shorter period of heat curing.

1. Introduction

The geopolymers are interesting in the fields of materials science and materials engineering. The geopolymer process is a chemical reaction between aluminosilicate materials and alkaline solutions under high curing temperature conditions. Generally, raw materials are prepared with a geopolymer binder consisting of fly ash and metakaolin (MK) containing SiO_2 and Al_2O_3 which are the main chemical constituents. Geopolymers are binders that exhibit good physical and chemical properties and a wide range of potential applications [1]. However, several previous researches reported some of the limitations of geopolymer properties. Metakaolin based geopolymers show a relevant strength loss that makes them unsuitable for construction purposes [2]. There are efflorescence [3, 4] related problems with this materials, and recently, Turner and Collins [5] showed that sodium silicate “geopolymers” have almost the same carbon footprint as Portland cement.

Previous studies [6–8] have reported that different ratios of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ influence the properties of the geopolymer binders. Generally, the geopolymer binder has been prepared using fly ash and metakaolin, in which the ratio of

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ varied within a range of 2:1 and 4:1. The effect of high calcium fly ash contents between 2.79:1 and 4.79:1 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) on the setting time and compressive strength of geopolymers was investigated in Chindaprasirt et al. [8]. The result showed that a higher compressive strength was achieved within a range of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of 2.57:1 and 4.24:1. However, the current study focuses on $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and CaO/SiO_2 ratios.

van Jaarsveld et al. [9] used XRD and FT-IR techniques to characterize the fly ash obtained from different sources in order to gain a greater understanding of the effect of phase composition on the dissolution behavior, reactivity, and final physical and mechanical properties of fly ash-based geopolymers. The polymerization mechanism and the structure of the products were also investigated by Barbosa et al. [10] using XRD and FT-IR spectroscopy. A number of investigators [11, 12] have also studied the microstructure of geopolymers using SEM.

Oil palm ash (OPA) is a by-product of the use of palm kernels, palm fibers, and palm shells as biomass fuel in place of petroleum in electricity generation. Currently, OPA is disposed of in landfills, which has the potential to cause

TABLE 1: Chemical composition (wt.%) and physical property of MK and OPA.

Element	MK	OPA
SiO ₂	50.30	38.37
Al ₂ O ₃	41.02	1.48
CaO	0.33	13.84
Fe ₂ O ₃	1.05	3.01
K ₂ O	4.08	14.09
TiO ₂	1.50	0.21
MgO	—	3.00
Other	—	5.57
LOI	1.72	20.43
Specific surface area (m ² /g) BET	13.61	13.06
<i>d</i> ₁₀ (μm)	1.352	4.321
<i>d</i> ₅₀ (μm)	6.308	19.305
<i>d</i> ₉₀ (μm)	88.803	100.109

environmental problems for the industry and health risks for the public.

In the present study, geopolymers were prepared with OPA ratios of 0%, 5%, 10%, and 15% (hereafter referred to as Control, O5, O10, and O15, resp.), which produced differing ratios of SiO₂/Al₂O₃ and CaO/SiO. They were prepared as hot mixtures using sodium silicate and sodium hydroxide as activators before being heat cured in an oven at 80°C for 1, 2, or 4 hours. The study aimed to analyze the effect of these parameters on the compressive strength and drying shrinkage using SEM, XRD, and FT-IR techniques. Measurements were taken after 2, 6, and 24 hours and 7 and 28 days.

2. Experimental Section

2.1. Materials. The metakaolin (MK) used in this study was collected from Narathiwat province. It was calcined at 750°C for 2 hours and used as Si-Al cementitious material. The chemical composition of the MK was analyzed using X-ray fluorescence (XRF). The physical properties of the MK are listed in Table 1. Grinding the raw materials in a ball mill produced small particles. Figure 1 depicts the XRD pattern of the MK. The MK showed an apparent amorphous phase (between 20 and 35° 2θ) in its structure with peaks for microcline, quartz, and illite.

The OPA was obtained from a palm oil mill in Krabi province. It was sieved to remove any incompletely combusted fibers. The OPA was ground in a ball mill until the median particle size was approximately 19 μm. The chemical composition and physical property of the OPA are shown in Table 1. Figure 2 shows the X-ray diffractogram of the OPA, which demonstrates outstanding crystalline phase materials with obvious detectable quantities of crystalline quartz, calcite, and sylvite.

The activator used was a mixture of sodium hydroxide (NaOH) in flakes of 98% purity and sodium silicate (Na₂SiO₃). The sodium silicate solution had a composition by weight of 14.14% Na₂O, 27.67% SiO₂, and 56.28% H₂O.

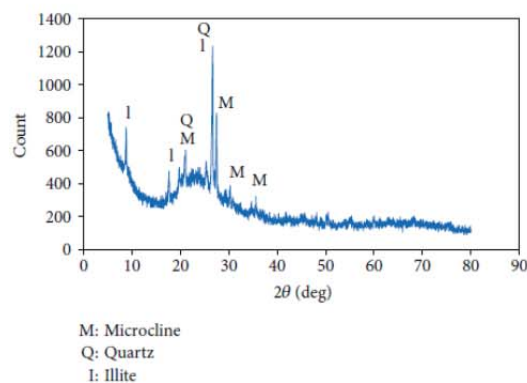


FIGURE 1: XRD pattern of MK.

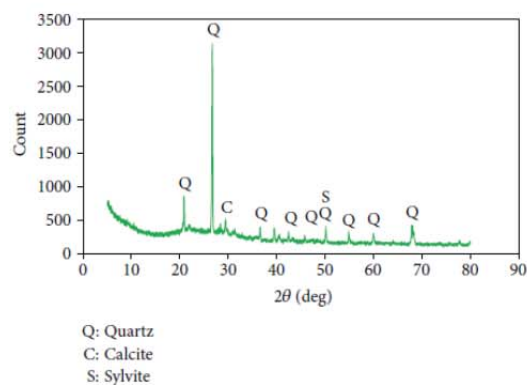


FIGURE 2: XRD pattern of OPA.

River sand was used as the fine aggregate component of the geopolymer mortars. The specific gravity of the river sand was 2.51, and the maximum size was 4.75 mm.

2.2. Mixture Proportion. The geopolymer mortars used in this study were prepared with MK, OPA, and the alkali activators sodium silicate and sodium hydroxide with a view to verify the viability of using geopolymer binders. All the samples contained a mass ratio of river sand : MK and OPA : alkaline activator : water of 3 : 1 : 0.83 : 0.45. The alkaline activator used was a mixture of sodium silicate and sodium hydroxide in a weight ratio of 2.5 : 1. The sodium silicate and sodium hydroxide were mixed in water and produced an exothermic temperature of 74 ± 2°C. Later, the river sand, MK, and OPA were added to the mixture which reduced the temperature to 48 ± 2°C. Samples of four different concentrations of OPA were prepared: 0% (Control), 5%, 10%, and 15%. The samples were quite sticky and fast setting and required some effort to be cast in acrylic molds. The samples of the four mixtures were then wrapped with a polyvinyl sheet to prevent any moisture loss and cured in an oven at 80°C for 1, 2, or 4

TABLE 2: Mix proportions of geopolymer samples.

Sample name	MK (by weight)	OPA (by weight)	CaO/SiO ₂ (molar ratio)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (molar ratio)	Heat curing (h)
Control-1	100	—	0.01	2.77	
O5-1	95	5	0.02	2.88	1
O10-1	90	10	0.03	3.01	
O15-1	85	15	0.04	3.15	
Control-2	100	—	0.01	2.77	
O5-2	95	5	0.02	2.88	2
O10-2	90	10	0.03	3.01	
O15-2	85	15	0.04	3.15	
Control-4	100	—	0.01	2.77	
O5-4	95	5	0.02	2.88	4
O10-4	90	10	0.03	3.01	
O15-4	85	15	0.04	3.15	

hours to produce all 12 different experimental conditions (as previously shown in Table 2), and after curing for 1, 2, or 4 hours, the samples were unwrapped, demolded, and allowed to further cure at an ambient temperature of $30 \pm 2^\circ\text{C}$ and $70 \pm 5\%$ relative humidity until the scheduled test date.

2.3. Test Procedure. After curing for 1, 2, or 4 hours at 80°C , the geopolymer mortars were removed from the acrylic molds and stored at ambient temperature. Compressive strength tests were conducted on cast specimens with dimensions of $50 \times 50 \times 50$ mm. The samples were tested in accordance with the relevant ASTM C109/C109M [13] at ages of 2, 6, and 24 hours and 7 and 28 days. Drying shrinkage tests were performed during a period of up to 30 weeks using a length comparator in accordance with the relevant ASTM C490 [14].

A JMS-5800 LV model scanning electron microscope (JEOL, Japan) was used to identify the microstructure of the geopolymer mortars. Small scraps of the samples were tested using scanning electron microscopy.

Powder XRD was conducted using an X'Pert MPD X-ray diffractometer (PHILIPS, Netherlands) at angles from 5° to 80° (2θ) using the clay and rock 0.4 program. The MK, OPA, and geopolymer paste were characterized directly. XRD was conducted to identify the dominant crystalline phases and to detect the positions of the peaks.

FT-IR was performed on the geopolymer samples on an EQUINOX 55 spectrometer (Bruker, Germany) using the KBr pellet technique in $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ range.

3. Results and Discussion

3.1. Compressive Strength

3.1.1. The Effect of the Ratio of SiO₂/Al₂O₃. The compressive strengths of the mortar after being cured at 80°C for 1, 2, or 4 hours are shown in Figures 3 and 4. It can be seen that for all the mixtures the compressive strength generally decreased with an increase in the proportion of SiO₂ (molar ratio) after 2 and 24 hours at ambient temperature (see Figures 3(a) and 3(b), resp.).

The development of the compressive strength of the Control, O5, O10, and O15 samples heat cured for 1, 2, or 4 hours is shown in Figures 3(a), 3(b), and 3(c), respectively. It was observed that the initial ratio of SiO₂/Al₂O₃ had a significant effect on the development of compressive strength in the geopolymer binder systems. It can be seen that after the shortest period of curing of 2 hours at ambient temperature (Figure 3(a)), the mixture with the highest Si content (O15) had the lowest compressive strength of all the combinations of Si content and period of heat curing, and increasing the period of heat curing while decreasing the Si content caused an increase in the measured compressive strength in all the samples.

Figure 3(a) illustrates the compressive strength measured after 2 hours at ambient temperature. It can be seen that the strength varied in the order Control > O5 > O10 > O15 (SiO₂/Al₂O₃ ratios 2.77, 2.88, 3.01, and 3.15, resp.).

A somewhat similar trend in strength development was observed after 24 hours (see Figure 3(b)). However, the compressive strengths of O10 and O15 were higher than the comparative values after 2 hours (see Figure 3(a)). This behavior was due to the average particle sizes (d_{50} : $6.31\ \mu\text{m}$ for MK against $19.31\ \mu\text{m}$ for OPA) being correlated to the specific surface area. The finer the particle size, the greater the surface area, which produces a more reactive material [9].

Figure 3(c) shows the variation in compressive strengths of the samples measured after 28 days. The most favorable SiO₂/Al₂O₃ molar ratio for strength development in the geopolymer samples was found in O5 (SiO₂/Al₂O₃ = 2.88), a trend similar to the findings of Chindaprasirt et al. [8] in respect of an increased alumina content (SiO₂/Al₂O₃ up to 2.87) of high calcium fly ash-based geopolymer systems. However, in the present study, the compressive strengths of the samples containing only MK (SiO₂/Al₂O₃ = 2.77) after 28 days were significantly higher for the samples cured for only 1 hour, which is consistent with the findings of Rovnanik [15].

The effect of the addition of OPA on compressive strength was slightly less for the control samples measured after 2 hours at ambient temperature, but beyond this age, the compressive strengths of the O5 samples were higher than those of the control samples after longer periods at ambient temperature. Therefore, in terms of compressive strength, the

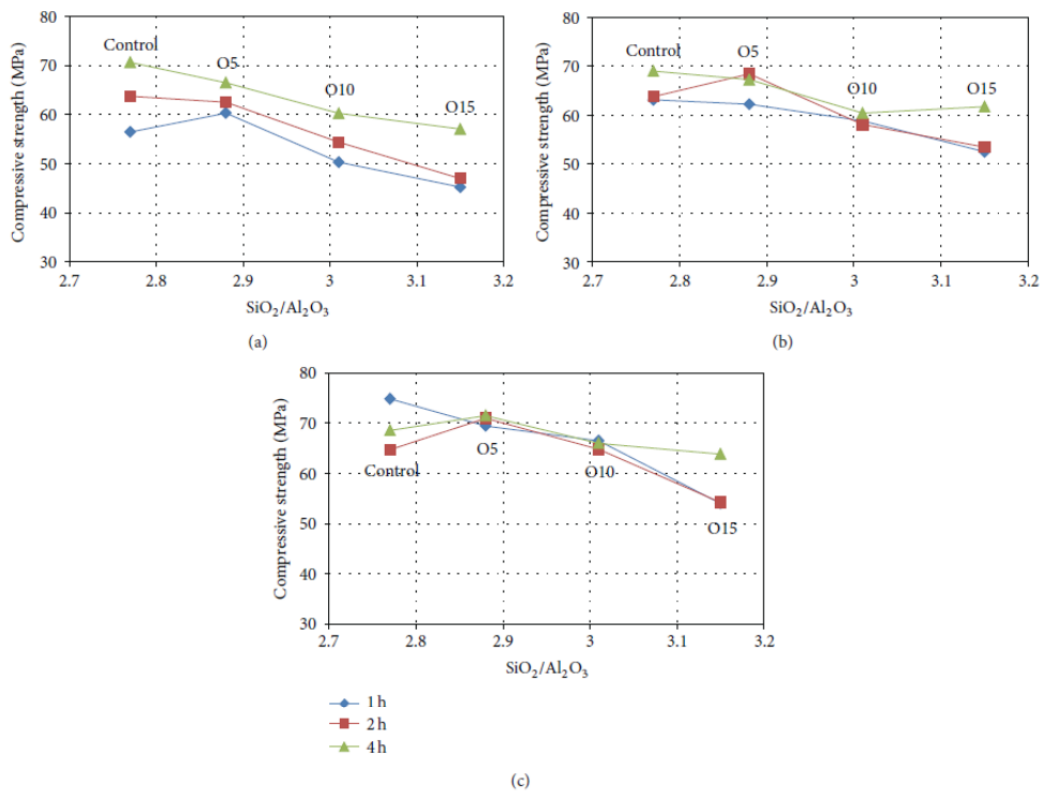


FIGURE 3: Compressive strength of geopolymer mortar with different $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and heat curing time measured after (a) 2 hours, (b) 24 hours, and (c) 28 days.

results suggest that the optimal OPA content is approximately 5%. It was also observed that the O5 samples continued to develop compressive strength to an age of 28 days. Because OPA has SiO_2 as its main chemical component, the SiO_2 -to- Al_2O_3 ratio of the geopolymer product is improved by the addition of a small amount of OPA. However, adding larger amounts of OPA beyond the optimal amount decreases the compressive strength because the OPA also contains CaO. These results are consistent with those of previous studies [16] conducted on fly ash-based geopolymers.

3.1.2. The Effect of Heat Curing. The compressive strengths of the geopolymer mortars as a function of heat curing and the amount of OPA as a replacement for MK are illustrated in Figure 3. For all the mixtures, longer heat curing was found to accelerate the development of compressive strength after 2 hours at ambient temperature more than a shorter period of heat curing. Longer heat curing may accelerate the degree of geopolymerization because of the formation of mineral phases. However, as Figure 3 shows, the compressive strengths of the control samples containing only MK after 28 days at ambient temperature were significantly higher for the samples cured for only 1 hour, which is consistent with

the findings of Rovnaník [15]. However, for the O5 and O10 samples cured for 1, 2, or 4 hours containing 5% and 10% OPA, the compressive strength values at 24 hours and 28 days were similar with curing periods of 1, 2, or 4 hours (as shown in Figure 3), while the O15 samples containing 15% OPA, heat cured for 4 hours had the highest compressive strengths. The influence of heat curing on the compressive strengths of samples cured for 1 and 2 hours was nearly the same after all periods at ambient temperature, as illustrated in Figure 3.

3.2. Drying Shrinkage. The effect of the partial replacement of MK with OPA on the drying shrinkage of the geopolymer mortars is presented in Figures 5 and 6. The overall result indicated that the drying shrinkage was very low. The drying shrinkages for different proportions of OPA are illustrated in Figure 5. A comparison of the measurements of the control samples heat cured for 2 hours (Control-2) shows that the drying shrinkage values decreased over time. In addition, the decrease in drying shrinkage was inversely proportional to the increase in the OPA content. This lower drying shrinkage is due to the lower fineness of the geopolymer mortar with higher OPA content. This is similar to the trend of drying shrinkage reduction reported in Chareera [17]. It

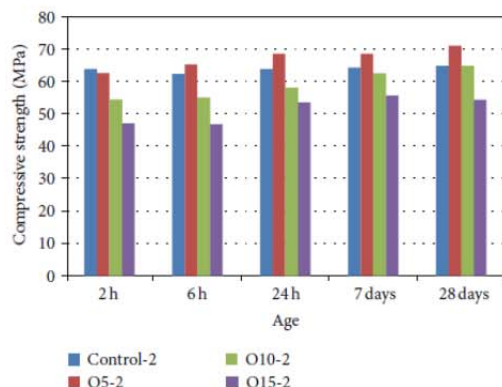


FIGURE 4: Compressive strength of geopolymer mortar heat cured for 2 hours.

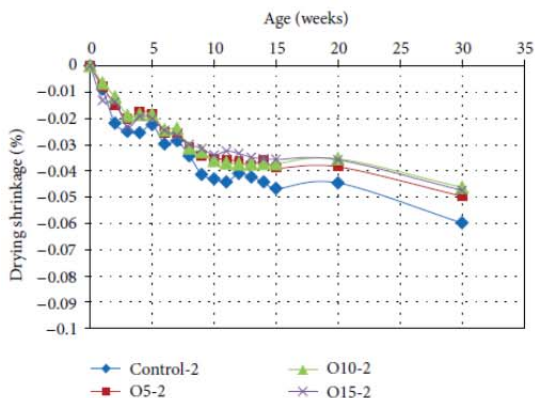


FIGURE 5: Drying shrinkage of geopolymer mortars containing OPA, heat cured for 2 hours.

has previously been confirmed that geopolymers with fine-sized calcined kaolin particles produce high shrinkage [18]. This phenomenon is due to fine particles having a larger geopolymerization reaction surface area, and if they are packed inadequately into a slurry system, they will produce high shrinkage.

The drying shrinkage of geopolymer mortar containing OPA cured for 1, 2, or 4 hours was similar, producing decreased drying shrinkage with longer curing time at elevated temperature. For example, the O5 sample cured for 2 and 4 hours had similar shrinkage values at all ages, with drying shrinkage decreasing up to an age of 8 weeks, as shown in Figure 6. Thereafter, the drying shrinkage values decreased slowly. However, the drying shrinkage values in the first 8 weeks for the samples cured for 4 hours were less than those of the samples cured for 2 hours. On the other hand, for the geopolymer mortar cured for 1 hour, the drying shrinkage values were much higher at all ages than those for the samples cured for 2 or 4 hours. This was because longer curing times at

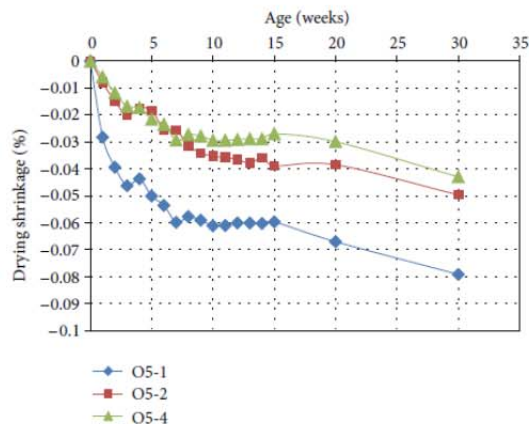


FIGURE 6: Drying shrinkage of geopolymer mortar containing 5% OPA.

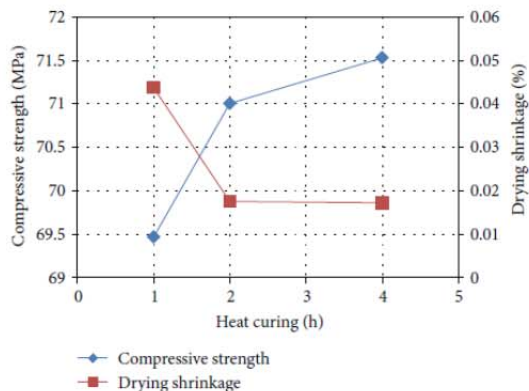


FIGURE 7: Effect of heat curing on compressive strength and drying shrinkage of samples with 5% OPA at 28 days.

elevated temperature result in a loss of water due to treatment heating during geopolymerization.

The effect of heat curing on compressive strength and drying shrinkage is depicted in Figure 7. It is evident that while the compressive strength increases with greater periods of heat curing, the drying shrinkage decreases especially between periods of 1 and 2 hours. The optimum period of heat curing is 2 hours which produces geopolymers with the lowest drying shrinkage and reasonably high strength.

3.3. Microstructure Characterization

3.3.1. Scanning Electron Microscope (SEM). The microstructure of the MK-based geopolymers with different OPA contents was observed by SEM, and the results are shown in Figure 8. The comparison of the SEM pictures of the sample matrices revealed that some raw materials, which had not reacted, were partially coated with flakes that formed on the

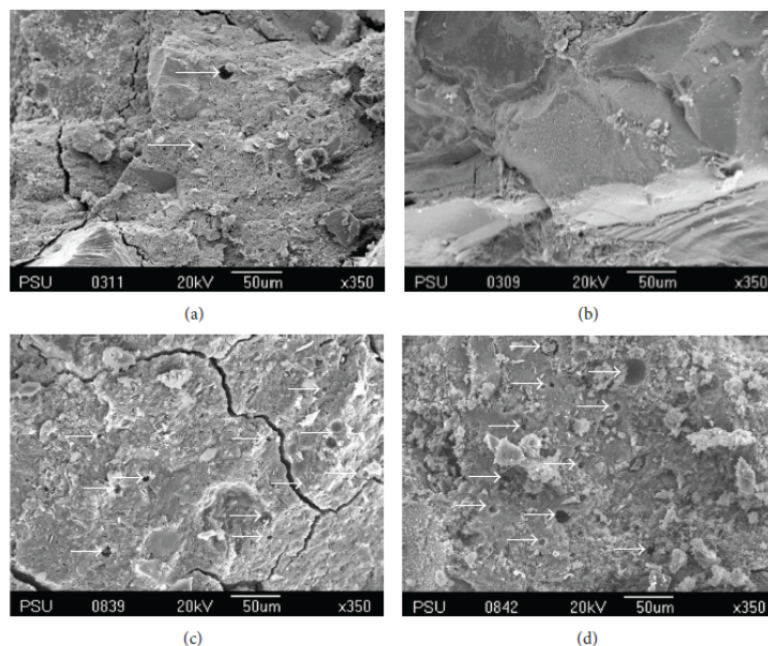


FIGURE 8: SEM micrograph of geopolymer mortar; (a) Control-2, (b) O5-2, (c) O10-2, and (d) O15-2.

crust of the samples. It was notable that the Control-2, O10-2, and O15-2 matrices were not homogeneous and contained small pores. The O15-2 sample in particular had many flakes and the largest pores (see Figure 8(d)), whereas in the O5-2 matrix, a lower proportion of unreacted raw materials was detected in the samples (see Figure 8(b)). It was also found that the O5-2 samples had higher homogeneity and the lowest number of pores in comparison to the other samples with the least unreacted MK and OPA from the alkaline activator. This sample also produced the highest compressive strength of 70 MPa after a period of 28 days. This suggests that the dissolution of the aluminosilicate in the geopolymerization process in the O5-2 sample produced the highest compressive strength. The pores in the geopolymer matrices which lead to the lower compressive strength are shown in Figures 8(a), 8(b), and 8(c) by arrows.

As the heat curing was increased from 1 to 4 hours, the microstructure of the MK-based geopolymer containing OPA demonstrated different proportions of unreacted raw materials as can be seen in Figures 9(a) and 9(b). It was observed that the O15-1 and O15-2 samples were covered in flakes of unreacted raw materials that had formed on their crust and they also contained many pores in the matrix as illustrated in the figures. by arrows. Nevertheless, in the O15-4 sample, (Figure 9(c)) it was observed that the matrix was homogeneous with a dense-compact microstructure and a lower proportion of unreacted raw materials. This is consistent with the finding of higher compressive strength in Figure 3(c).

3.3.2. X-Ray Diffraction (XRD). The results of the XRD of the MK-based geopolymers containing 5, 10, and 15% OPA, heat cured for 2 hours are shown in Figure 10. The full mixture showed a characteristic high background between 15° and $35^\circ 2\theta$ with a decrease in the crystalline peaks associated with the initial materials. The samples had a similar diffraction pattern and did not demonstrate any significant change in the degree to which they were amorphous and crystalline from the control sample. The peaks of quartz, microcline, and illite from the MK and of quartz, calcite, and sylvite from the OPA were observed to have almost disappeared, indicating a degree of geopolymerization. However, the peak of the quartz content was noted to be around $27^\circ 2\theta$ due to remaining prominent quartz in both MK and OPA.

Figure 11 shows the XRD patterns for sample O5 with various heat curing at 1, 2, and 4 hours. The three samples had a similar pattern being mostly amorphous with some crystalline peaks. The XRD pattern for the 4-hour sample shows that the apparent quartz content was detected most obviously at approximately 21° , 27° , 50° , and $60^\circ 2\theta$ compared to the samples heat cured for 1 and 2 hours. This indicates that crystalline phases were detected in the geopolymer samples and that heat curing at 4 hours produced the highest amount of crystallinity and had a higher compressive strength. Álvarez-Ayuso et al. [19] reported that fly ash-based geopolymers with increased crystallinity exhibited increased compressive strength. It has also been found that fly ash-based geopolymer with 12 M NaOH showed the highest compressive strength, and XRD results showed that the intensity

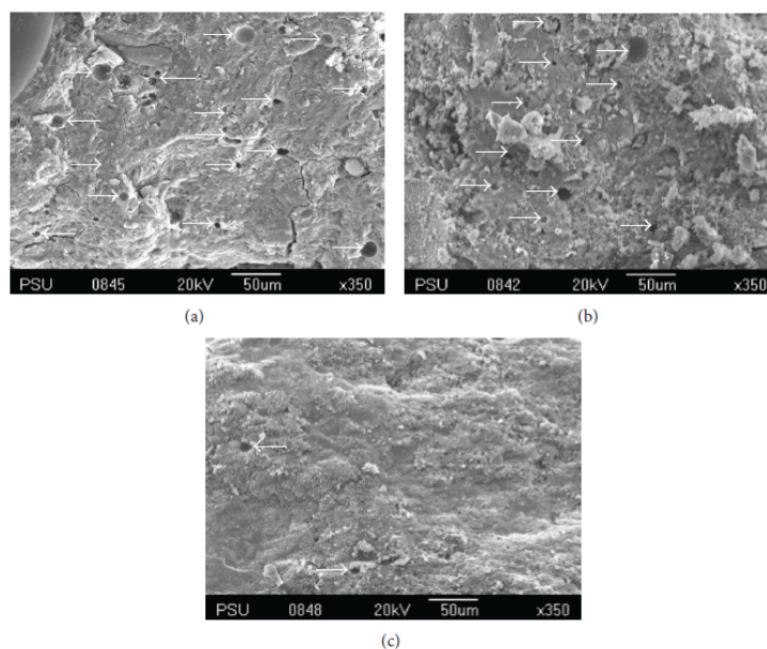
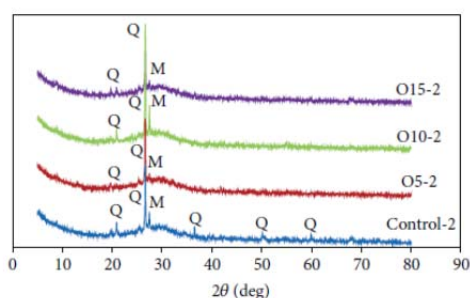
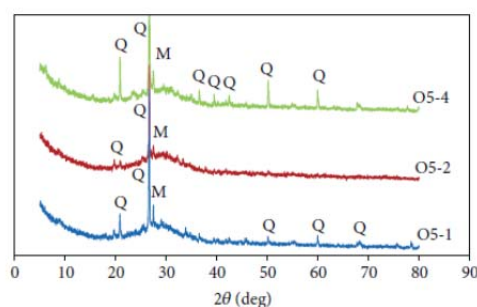


FIGURE 9: SEM micrograph of geopolymer mortar; (a) O15-1, (b) O15-2, and (c) O15-4.



Q: Quartz
M: Microcline

FIGURE 10: XRD patterns of geopolymers containing OPA, heat cured for 2 hours.



Q: Quartz
M: Microcline

FIGURE 11: XRD pattern of geopolymer containing 5% OPA.

of the crystallinity was easily detectable and contributed to the highest compressive strength [20].

3.3.3. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)*. Figure 12 shows the FT-IR spectra for the Control-2, O5-2, O10-2, and O15-2 samples with those of MK and OPA for purposes of comparison. The MK spectrum contains wide bands at approximately 1083 and 464 cm^{-1} , reflecting the Si-O vibrations. These major bands are observed at frequencies near to these reported in the literature for this compound [9, 21]. There is also a band at 810 cm^{-1} corresponding to

Al-O. For the OPA spectra, the stretching of the Si-O groups alternately bound to the Al-O bonds produces a signal at 1030 cm^{-1} and a band around 789 cm^{-1} indicative of the Al-O or Si-O-Al groups. These major bands have also been reported in the literature [22].

The FT-IR spectra of the Control-2 sample (see Figure 12) indicate major bands at approximately 3453, 1659, 1408, 1000, 723, 589, and 446 cm^{-1} . Those at 3453 and 1659 cm^{-1} are formed by the O-H stretching vibration and the H-O-H bending vibration, respectively, and these have been previously noted in hydroxyl groups [9, 23]. The main

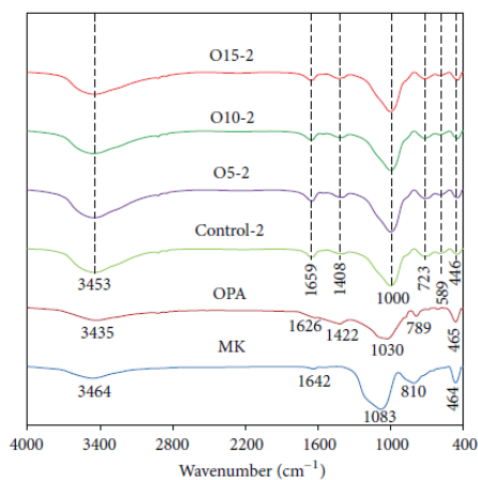


FIGURE 12: FT-IR spectra of raw materials and the geopolymer samples heat cured for 2 hours.

binder system vibration band at approximately 1000 cm^{-1} is attributable to the asymmetric stretching mode of the Si–O–Al bond in the reaction products, and this vibration band has also been found in previous research [24]. The main bands in the geopolymers are only a little different from those in the FT-IR spectra of the MK between 450 and 1200 cm^{-1} . It has been previously reported that some raw material is retained in the geopolymerization products [25]. The results of the present study suggest that the composition of the aluminosilicate was formed by the geopolymerization of the MK and/or the OPA and the alkaline activator produces slightly different FT-IR patterns. The effect of the OPA ratio on the nanostructure as shown by the FT-IR spectra in Figure 12 is rather limited. The trend of the FT-IR spectra in previous research has been similarly adopted [26] where it has been reported that difference in the w/b ratio in the gel nanostructure of the fly ash based geopolymer as displayed by the FT-IR spectra is rather limited.

It was observed that the main binder system vibration band occurred at approximately 1000 cm^{-1} which can be attributed to the asymmetric stretching mode of the Si–O–Al bond, as shown in Figure 13. However, the compressive strength of the geopolymer mortars produces a trend of lower transmittance (high absorption), which reflects the higher strength of the geopolymer as detected in the FT-IR test.

4. Conclusions

The effect of the partial replacement of MK by OPA, different periods of heat curing on the microstructure, and compressive strength of a MK-based geopolymer were investigated, and the following conclusions may be deduced.

- (a) The O5 sample ($\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3 = 2.88:1$) produced the highest compressive strength. The MK-based

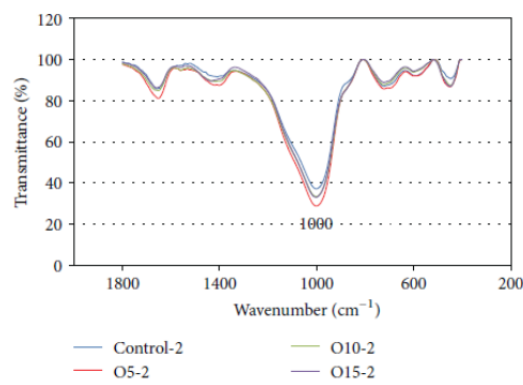


FIGURE 13: FT-IR spectra of the geopolymer samples.

geopolymer, heat cured for 4 hours, had the highest compressive strength of all. The XRD results showed that the intensity of the crystalline phase after heat curing for 4 hours was easily detectable and contributed to the higher compressive strength more than the samples heat cured for 1 and 2 hours.

- (b) The CaO content ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0.04$) was hostile in the geopolymer produced, especially in relation to the early strength measurement after 2 hours at ambient temperature and heat curing for 1 and 2 hours. However, heat curing for 4 hours produced higher strength.
- (c) The alkali activation of MK with sodium silicate and sodium hydroxide solutions produced materials with high early compressive strength, when prepared in a hot mixture.
- (d) The addition of OPA, from 5% to 15%, had the effect of decreasing the drying shrinkage of the geopolymer mortars.
- (e) Long heat curing times also decreased drying shrinkage, probably due to the well-developed strength.

The increased compressive strength was attributable to the structure of the geopolymer samples which had a dense-compact matrix and contained less unreacted raw materials. Further, a higher reaction of Si–Al in the geopolymerization process produced aluminosilicate, and in addition, the preparation of the geopolymers in a hot mixture in this study may have also contributed to the compressive strength. However, different MKs from other locations may need different ratios and particle sizes to achieve high compressive strength.

Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Acknowledgments

This work was financially supported by the Office of the Higher Education Commission and the Thesis Research Funding from the Prince of Songkla University (PSU), Thailand. The authors acknowledge the use of the facilities of the Department of Mining and Materials Engineering and Department of Civil Engineering, PSU. Mr. Micheal Currie, from the AUA Language Center at Songkhla, is also acknowledged for editing the paper, as is the copyediting service of the Research and Development Office of PSU.

References

- [1] S.-G. Hu, J. Wu, W. Yang, Y.-J. He, F.-Z. Wang, and Q.-J. Ding, "Preparation and properties of geopolymer-lightweight aggregate refractory concrete," *Journal of Central South University of Technology*, vol. 16, no. 6, pp. 914–918, 2009.
- [2] R. Lloyd, "Accelerated ageing of geopolymers," in *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, Provis and Van Deventer, Eds., pp. 139–166, CRC Press, 2009.
- [3] F. Skavara, V. Smilauer, P. Hlavacek, L. Kopecky, and Z. Cilova, "A weak alkali bond in (K,K)-A-S-H Gels: evidence from leaching and modeling," *Ceramics-Silikaty*, vol. 56, no. 4, pp. 374–382, 2012.
- [4] F. Pacheco-Torgal, Z. Abdollahnejad, A. F. Camões, M. Jamshidi, and Y. Ding, "Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue?" *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 400–405, 2012.
- [5] L. K. Turner and F. G. Collins, "Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 43, pp. 125–130, 2013.
- [6] P. D. Silva, K. Sagoe-Crenstil, and V. Sirivivatnanon, "Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂," *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 4, pp. 512–518, 2007.
- [7] P. De Silva and K. Sagoe-Crenstil, "Medium-term phase stability of Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O geopolymer systems," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no. 6, pp. 870–876, 2008.
- [8] P. Chindaprasirt, P. D. Silva, K. Sagoe-Crenstil, and S. Hanjitsuwan, "Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems," *Journal of Materials Science*, vol. 47, no. 12, pp. 4876–4883, 2012.
- [9] J. G. S. van Jaarsveld, J. S. J. van Deventer, and G. C. Lukey, "The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers," *Materials Letters*, vol. 57, no. 7, pp. 1272–1280, 2003.
- [10] V. F. F. Barbosa, K. J. D. Mackenzie, and C. Thaumaturgo, "Synthesis and characterization of sodium polysialate inorganic polymer based on alumina and silica," in *Proceedings of the Geopolymer International Conference (Geopolymer '99)*, pp. 65–77, 1999.
- [11] F. J. Silva, A. F. Mathias, and C. Thaumaturgo, "Evaluation of the fracture toughness in poly(sialate-siloxo) composite matrix," in *Proceedings of the Geopolymer International Conference (Geopolymer '99)*, pp. 97–106, 1999.
- [12] Z.-H. Zhang, X. Yao, H.-J. Zhu, S.-D. Hua, and Y. Chen, "Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer," *Journal of Central South University of Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 49–52, 2009.
- [13] ASTM 109/C109M, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (Using 2-in. Or [50-Mm] Cube Specimens)*, American Society for Testing and Materials, 1998.
- [14] ASTM C490, *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*, American Society for Testing and Materials, 1996.
- [15] P. Rovnaník, "Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 7, pp. 1176–1183, 2010.
- [16] J. Temuujin, A. van Riessen, and R. Williams, "Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 167, no. 1–3, pp. 82–88, 2009.
- [17] T. Chareera, *A study of compressive strength and durability of Mae Moh fly ash geopolymer [Ph.D. thesis]*, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, 2008.
- [18] Z. Zuhua, Y. Xiao, Z. Huajun, and C. Yue, "Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer," *Applied Clay Science*, vol. 43, no. 2, pp. 218–223, 2009.
- [19] E. Álvarez-Ayuso, X. Querol, F. Plana et al., "Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrices synthesised from coal (co-)combustion fly ashes," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154, no. 1–3, pp. 175–183, 2008.
- [20] A. M. M. Al Bakri, H. Kamarudin, M. Bnhussian, A. R. Rafiza, and Y. Zarina, "Effect of Na₂SiO₃/NaOH ratios and NaOH molarities on compressive strength of fly ash-based geopolymer," *ACI Materials Journal*, vol. 109, no. 48, pp. 503–508, 2012.
- [21] Y. Zhang, W. Sun, and Z. Li, "Infrared spectroscopy study of structural nature of geopolymeric products," *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, vol. 23, no. 4, pp. 522–527, 2008.
- [22] C. Y. Yin, S. A. S. A. Kadir, Y. P. Lim, S. N. Syed-Arifin, and Z. Zamzuri, "An investigation into physicochemical characteristics of ash produced from combustion of oil palm biomass waste in a boiler," *Fuel Processing Technology*, vol. 89, no. 7, pp. 693–696, 2008.
- [23] R. L. Frost and A. M. Vassallo, "The dehydroxylation of the kaolinite clay minerals using infrared emission spectroscopy," *Clays and Clay Minerals*, vol. 44, no. 5, pp. 635–651, 1996.
- [24] M. L. Granizo, M. T. Blanco-Varela, and S. Martínez-Ramírez, "Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties," *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 9, pp. 2934–2943, 2007.
- [25] H. Wang, H. Li, and F. Yan, "Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer," *Colloids and Surfaces A*, vol. 268, no. 1–3, pp. 1–6, 2005.
- [26] I. Ismail, S. A. Bernal, J. L. Provis, S. Hamdan, and J. S. J. van Deventer, "Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure," *Materials and Structure*, vol. 46, no. 3, pp. 361–373, 2013.

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

2nd International Conference on Advanced Materials Engineering and
Technology (ICAMET 2013), 28-29 November 2013, Bandung, Indonesia.

Effect of Parawood Ash on Drying Shrinkage, Compressive Strength and
Microstructural Characterization of Metakaolin-based Geopolymer Mortar

Key Engineering Materials Vols. 594-595 (2014) pp 411-415
Online available since 2013/Dec/05 at www.scientific.net
 © (2014) Trans Tech Publications, Switzerland
 doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.594-595.411

Effect of Parawood Ash on Drying Shrinkage, Compressive Strength and Microstructural Characterization of Metakaolin-based Geopolymer Mortar

Danupon Tonnyapas^{1,a}, Abideng Hawa^{2,b}, Woraphot Prachasaree^{3,c},
 and Pichai Taneerananon^{4,d}

¹Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

^{2,3,4}Department of Civil Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand 90110

^adanupon.t@psu.ac.th, ^babideng.hawa@gmail.com, ^cpworaphot@eng.psu.ac.th,
^dpichai.t@psu.ac.th

Keywords: Metakaolin, Parawood ash, Geopolymer mortar, Microstructure, Compressive strength.

Abstract. Drying shrinkage, compressive strength and microstructural analysis of metakaolin based geopolymers partial replacement with Parawood ash was investigated. It was involved different $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and CaO/SiO_2 ratios. Characterization of geopolymer mortar was determined on drying shrinkage, compressive strength, mineral phases and microstructure was analysed by X-ray diffraction and scanning electron microscopy techniques. Test result of highest compressive strength was about 71 MPa at 6-h (4-h in oven at 80°C and 2-h ambient temperature). Voids-cement ratio is the most effect on the unconfined compressive strength of this metakaolin geopolymer mortar.

Introduction

Geopolymer process is chemical reaction between aluminosilicate materials and alkaline solutions under high curing temperature conditions. Generally, raw materials were prepared of geopolymer binder by fly ash and metakaolin that was had SiO_2 and Al_2O_3 main chemical composition. Moreover, geopolymer could be produced from other waste materials such as rice husk ash [1,2,3], sludge [4].

Geopolymer had advantages than ordinary Portland cement, such as high strength, better resistance of sulfuric and sulfate solutions [5,6], and high early strength [7]. PWA is a by-product of burnt Parawood lumber as well as a by-product of the furniture industry. Parawood is often used as an energy combustion material for biomass power plants, latex glove factories and sea-food factories. In Thailand, many biomass power plants consume Parawood, including a thermal biomass power plant station and most latex glove factories in southern Thailand. Steam is generated by the combustion of Parawood, it is approximately 25% ash is collected at the bottom of the boiler (bottom Parawood ash), and the remaining 75% is blown out as fly ash. However, few appropriate landfill sites disposed resulting in serious environmental problems.

Effects of several $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios on the properties of geopolymer were investigated [8,9,10]. Basically, geopolymer binder was prepared by fly ash and metakaolin (MK), theirs $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ varied in range of 2-4. In case of high calcium fly ash [11] was investigated the effect of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios with 2.57-4.79 on the setting time and compressive strength of geopolymer. It resulted of higher compressive strength achieved was in the range of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of 2.57-4.22. This work deals with the subject of MK based geopolymer partial replacement by PWA with main composition of CaO, is used as an aluminosilicate source in the production of geopolymer binder.

Experimental Programme

Materials Used. MK was collected from a kaolin mine in Narathiwat province, southern Thailand, it was calcined at 750°C for 2 h and raw Parawood ash (PWA) derived from a biomass electrical plant were used as raw materials mix to alkali activated binders. The particle size distribution of MK and PWA are less than 45 μm about 82% and 71%, respectively. Major chemical composition of MK and

Advanced Materials Engineering and Technology II

PWA composed of 50.30% SiO₂, 41.02% Al₂O₃, 1.05% Fe₂O₃, 1.50% TiO₂, 0.33% CaO, and 4.08% K₂O and 2.57% SiO₂, 0.53% Al₂O₃, 0.56% Fe₂O₃, 41.19% CaO, 4.53% MgO, and 16.11% K₂O, respectively. Furthermore, sodium silicate (14.14% Na₂O, 27.67% SiO₂, and 56.28% H₂O) and sodium hydroxide (98% purity) were used as the alkali solution in this study.

Mix Proportion. The geopolymer mortars were mixed MK and PWA, and alkali activator. The alkali activator prepared with sodium silicate and sodium hydroxide to verify the viability of using geopolymer binders (Table 1). All mortar samples in the cubic shape of 50×50×50 mm displayed the mass ratio of normal sand/raw materials (MK and PWA)/ activator/water was used 3/1/0.83/0.45. The activator was mixed sodium silicate to sodium hydroxide in a weight ratio of 2.5:1.

Table 1 Elaborated mixture of geopolymer samples.

Sample Designation	MK	PWA	CaO/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
MK-2.77 or control	100	-	0.01	2.77
MK-2.85	90	10	0.08	2.85
MK-2.95	80	20	0.16	2.95
MK-3.09	70	30	0.26	3.09

The first step of mortar samples preparing were mixed among MK, PWA, and normal sand. The second step poured sodium hydroxide and water into sodium silicate and measuring geopolymerization temperature raised 74±2°C. Later, it was mixed aggregates and alkaline activators that were obtained exothermic temperature decreased at 48±2°C. They were wrapped with polyvinyl sheet to prevent moisture loss. Twelve formulates were cured in an oven at 80°C constant throughout for 1-, 2-, and 4-h and then cured in the ambient temperature about 30±2°C and 70±5% relative humidity (RH) throughout this study.

Test Procedure. The compressive strength of geopolymer mortars were tested using a digital compression testing machine, according to ASTM 109/C109M. The drying shrinkage test was prepared with prismatic specimens of 25×25×285 mm in accordance with the ASTM C596-96. The geopolymer mortars were prepared 80°C curing 2-h in an oven. Demolded specimens were measured in a period of 1 to 35 weeks. Mineral phases was analysed in geopolymer via SEM (JMS-5800 LV). XRD of geopolymer binder paste was also analysed using the X'Pert MPD X-ray diffractometer at a scanning from 5 to 85 (2θ) by clay and rock-0.4 program.

Results and Discussion

Drying Shrinkage. The results of the drying shrinkage tests on the geopolymer mortars were presented in Fig.1. The overall result indicated that the drying shrinkage was very low. The partial replacement of PWA and heat curing effect the drying shrinkage of MK-based geopolymer were studied. The drying shrinkages for different partial replacement of PWA are depicted in the Fig.1 (a). A comparison of the MK-2.77-2 mixture exhibited that the specimens decreased drying shrinkage values while increasing the PWA. The lower drying shrinkage of geopolymer mortars containing PWA corresponds to filler of PWA, it has increase fineness. Similarly, the trend of drying shrinkage decreasing has been also reported in the previous works [12]. It was confirmed that the geopolymer from fine particle size of calcined kaolin would give high shrinkage [13]. It phenomenon is that fine particle has quite large wetting surface area and if packed inadequately into slurry system will give high shrinkage.

The drying shrinkage of geopolymer mortar containing PWA cured for 1, 2 and 4-h. All samples exhibited similar behavior in terms of longer curing at an elevated temperature decreasing the drying shrinkage. The samples MK-2.95 cured for 2 and 4-h had similar shrinkage values at all ages, with drying shrinkage decreasing up to an age of 8-week, as shown in Fig.1 (b). Thereafter, the drying shrinkage values decreased slowly. However, the drying shrinkage values in the first 8 weeks of sample cured for 4-h were less than those of sample cured for 2-h. For geopolymer mortar cured for

Key Engineering Materials Vols. 594-595

1-h, the drying shrinkage values were much higher at all ages than sample cured for 2-h and 4-h. This regarding because a longer curing time at an elevated temperature produced in the loss of water from the heat to geopolymerization.

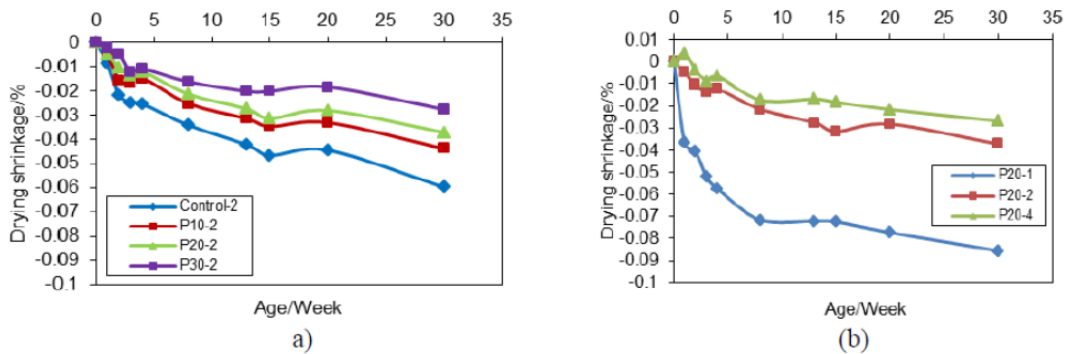


Fig. 1 Drying shrinkage of geopolymer cured at ambient temperature based on (a) partial replacement of PWA and (b) different heat curing conditions

Compressive Strength. Compressive strength values of geopolymer mortars with different $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios and various curing duration in an electrical oven and ambient temperature are depicted in Fig. 2. The compressive strength is gradually decreased according ingredients with increasing PWA proportion and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio lower than 2.77, while CaO/SiO_2 ratio is higher (Table 1). Furthermore, compressive strength of geopolymer can not be improved with higher $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and CaO/SiO_2 ratios. Nevertheless, the high compressive strength of geopolymer mortar was obtained for $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio in the range of 3.4-3.8 [8]. It should be noted that $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio not only parameter considered. This condition suggests that influence of CaO interruption in systems then was decreased of compressive strength. The several available literatures fly ash based geopolymer [14,15,16] are mostly similar to the trend of this study. The effect of the PWA adding and heat curing environment on the early compressive strength of geopolymer. It can be found PWA was not improved the early compressive strength of samples (Fig. 2 a). Especially, specimens cured in electrical oven for 1-h, owing to volume of CaO increasing was engendered aluminosilicate network formation due to geopolymerization occurred slowly. However, all ingredients of curing at 1-h indicated capacity to increase the compressive strength 28-day at ambient temperature in geopolymer mortars (Fig. 2 b).

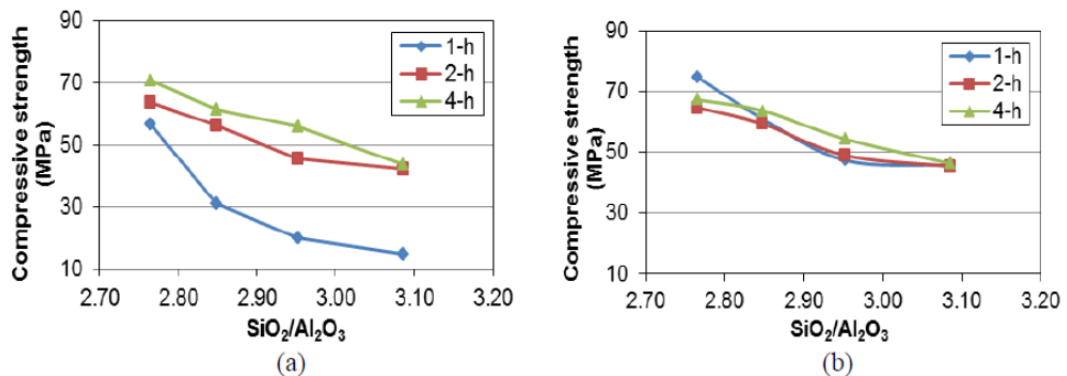


Fig. 2 Compressive strength development of geopolymer mortars cured under ambient temperature for (a) 2-h and (b) 28-day

The geopolymer preparation by PWA and alkaline solution was investigated by means of SEM. The micrographs analysis of mortar samples with different $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and CaO/SiO_2 ratio were carried out 2.77-2.95 and 0.01-0.16, curing time at 80°C for 2-h. MK-295-2 mortar samples (Fig. 3c and d) had not dense-compact microstructure characterized as geopolymer binder, in amorphous matrix. Comparison MK-277-2 specimens only, this trend was composed the compressive strength.

Mineral Phases. XRD patterns of MK-2.77 and MK-2.95 specimens at different heating curing periods and ambient temperature 28-day were illustrated in Fig. 3. Geopolymer was an aluminosilicate mineral addition with crystallised compounds was quartz (SiO_2) microcline (KAlSi_3O_8) and calcite (CaCO_3), it is identified as the main mineral phase. MK-2.77-1 showed broad hump at 21° , 26° , 36° , 42° and 50° 2θ and 27° 2θ of quartz and microcline, respectively. When MK-2.77-1 reacted with CaO from PWA (MK-2.95-1), peak of XRD pattern changed, demonstrating the evolution of the calcite mineral in broad hump at 29° 2θ . However, when increased curing period at 4-h broad hump of quartz inconspicuous excluding at 26° 2θ . In four geopolymer samples, amorphous materials are the most important fraction after high temperature reaction. The evident broad hump in the $25\text{-}35^\circ$ 2θ range was observed. This means amorphous in metakaolin based geopolymer after chemical activation process at high temperature.

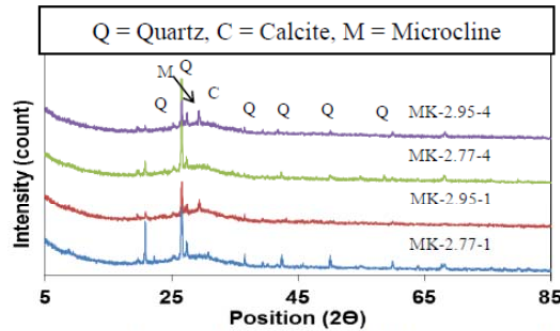


Fig. 3 X-ray diffractograms of geopolymer paste in different formulations and curing times

Microstructural Characterization. Metakaolin based geopolymer mortar analysing via SEM was illustrated in SEM microphotograph of MK-2.77-2 (Fig. 4 a). It was observed that a homogeneous matrix with less proportion of unreacted raw materials of mixture in the samples. On the other hand, MK-2.95-2 specimen (Fig. 4 b) revealed some residual raw materials were abundant covered with flakes on surface in MK-2.95-2 specimen as well as displayed heterogeneous with some porous matrix. This increase was due to impregnation and a creation a lot of pores and different size, in comparison to composites in MK-2.77-2 that was lead to drop compressive strength.

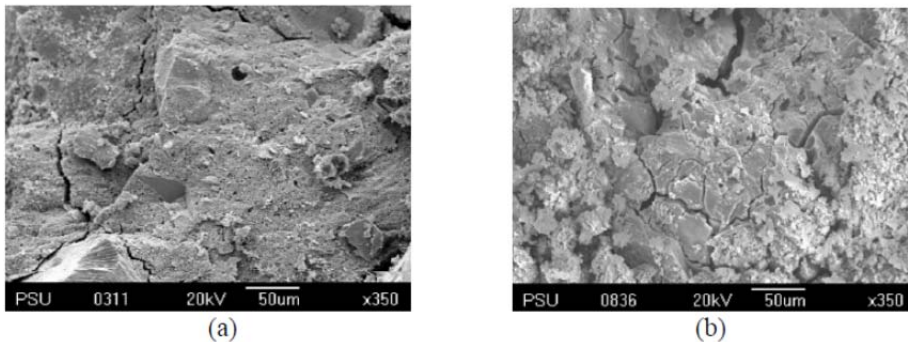


Fig. 4 SEM photomicrograph of geopolymer mortars 80°C curing ed 80°C curing for 1 d in an oven magnified 350 of specimens (a) MK-2.77-2 and (b) MK-2.95-2.

Key Engineering Materials Vols. 594-595

Summary

Effect of parawood ash on drying shrinkage, compressive strength and microstructural characterization of metakaolin-based geopolymer mortar can be drawn below:

The CaO has an important impact on compressive strength and microstructure, it was results that the sample with not dense-compact matrix and more unreacted MK containing PWA contributed the lower compressive strength. Sample MK-2.77-1 showed a high compressive strength of up to 74.87 MPa on the 28-day. In XRD patterns, showed that the clarity of crystalline phase was highly detected, it was high compressive strength. The addition of PWA, from 10-30%, has an effect in decreasing of drying shrinkage of geopolymer mortars. A long heat curing can be improve the compressive strength and decreased the drying shrinkage. For drying shrinkage, sample heat curing for 2 and 4-h had nearby shrinkage.

The sample with dense-compact matrix and less unreacted MK had maximum compressive strength. Higher reactions of the Si-Al geopolymerization in this study are novel process of alumino-silicate to achieve high compressive strength development in early setting strength (2-h at ambient temperature) and low drying shrinkage.

Acknowledgements

This work was financially supported by the Higher Education Research Promotion, Office of the Higher Education Commission and and thesis research funding from Prince of Songkla University, Thailand.

References

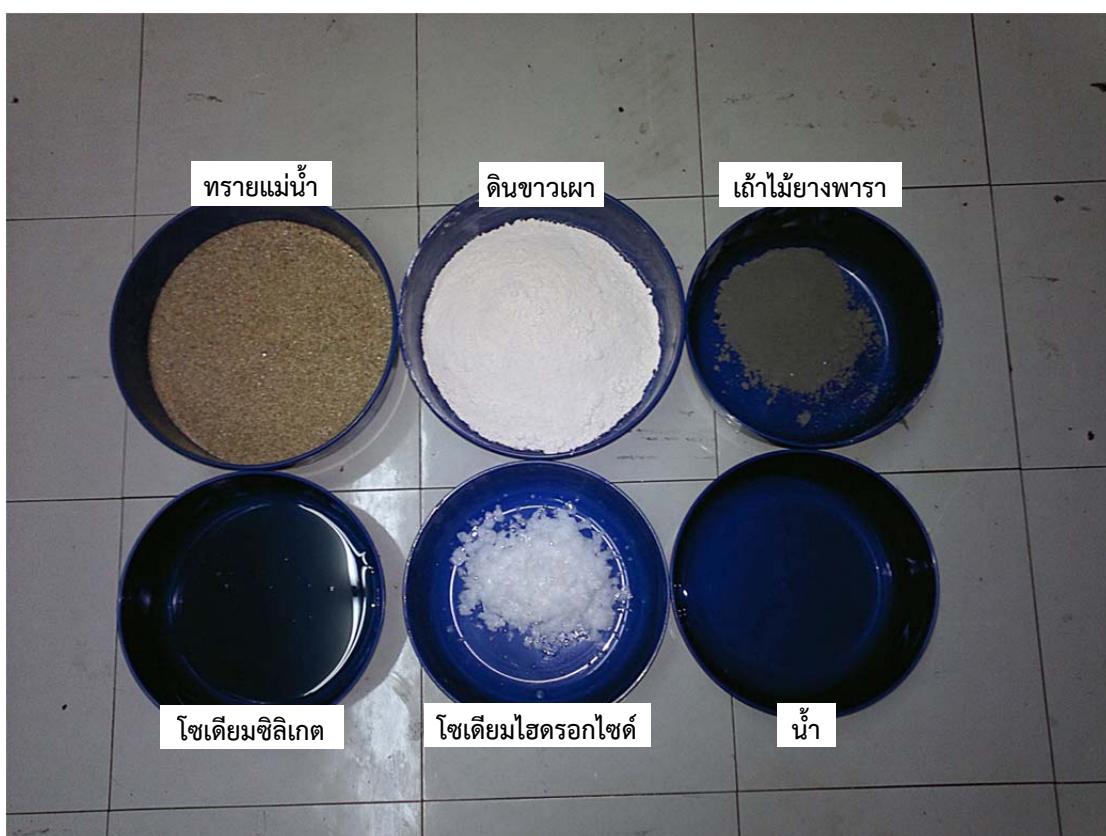
- [1] S. Songpiriyakij, T. Kubprasit, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt: *Construct Build Mater*: Vol. 24 (2010), pp. 236-240.
- [2] A Nazari, A. Bagheri and S. Riahi: *Mater Sci. Eng. A*. Vol. 528 (2011), pp. 7395-7401.
- [3] S. Riahi and A.Nazari: *Ceram. Inter*. Vol. 38 (2012), pp. 4467-4476.
- [4] J.H. Chen, J.S.Huang and Y.W. Chang: *Cement Concr. Com*. Vol. 33 (2011), pp. 602-610.
- [5] T. Bakharev: *Cem. Concr. Res*. Vol. 35 (2005), pp. 658-670.
- [6] V. Sata, A. Sathonsaowaphak and P. Chindaprasirt: *Cem. Concr. Comp*. Vol. 34 (2012), pp. 700-708.
- [7] F.J. Silva, A.F. Mathias and C. Thaumaturgo: *Geopolymer 1999 Conference*, June 30 to July 2, 1999, Institute Geopolymer, Saint-Quentin, France, pp. 97-106.
- [8] P.D. Silva, K. Sagoe-Crenstil and V. Sirivivatnanon: *Cem. Concr. Res*. Vol. 37 (2007), pp. 512-518.
- [9] P.D. Silva and K. Sagoe-Crenstil: *Cem. Concr. Res*. Vol. 38 (2008), pp. 870-878.
- [10] S. Songpiriyakij, T. Kubprasit, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt: *Construct. Build. Mater*. Vol. 24 (2010), pp. 236-240.
- [11] P. Chindaprasirt, P.D. Silva, K. Sagoe-Crenstil and S. Hanjitsuwan: *J. Mater. Sci*. Vol. 47 (2012), pp. 4876-4883.
- [12] T. Chareera A thesis of Doctor of Philosophy in Civil Engineering. Khon Kaen Univerity, 2008.
- [13] Zuhua Z, Y. Xiao, Z. Huajun, C. Yue: *Applied Clay Science*. Vol. 43(2) (2009), pp. 218-223.
- [14] F. Winnefeld, A. Leemann, M. Lucuk, P. Svoboda and M. Neuroth: *Constr. Build. Mater*. Vol. 24 (2010), 1086-1093.
- [15] J. Temuujin, A.V. Riessen and R.J. Williams, *Hazard. Mater*. Vol. 167 (2009), pp. 82-88.
- [16] E. Alvarez-Ayuso, X. Querol, F. Plan, A. Alastuey, N. Moreno, M. Izquierdo, O. Font, T. Moreno, S. Diez, E. Vazquez and M. Barra: *J. Hazard. Mater*. Vol. 154 (2008), pp. 175-183.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ให้อุณหภูมิสูงก่อนนำเข้าตู้อบ

การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนผสมทรายต่อวัสดุตั้งต้น (ดินขาวเผา เถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน) เท่ากับ 3 เตรียมวัสดุต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ดัง**ภาพที่ ก-1** เริ่มด้วยการผสมดินขาวกับเถ้าไม้ยางพารา (กรณีแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพารา) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำทรายเข้ามาผสมเป็นอีกเวลา 5 นาที และขั้นที่สองเป็นการผสมสารละลายตัวกระตุ้น เริ่มด้วยการนำโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปผสมกับโซเดียมซิลิเกตคนให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมน้ำเข้าไปแล้วทำการคนอีกครั้งหนึ่งและวัดอุณหภูมิ แล้วนำไปผสมกับทราย ดินขาวและเถ้าไม้ยางพาราที่เตรียมไว้ตอนแรกดัง**ภาพที่ ก-2** ผสมกันเป็นเวลา 5 นาที จนส่วนผสมที่ได้เข้ากันดีพร้อมทั้งวัดอุณหภูมิ (เป็นการผสมด้วยมือทุกขั้นตอน) แล้วจึงนำจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมแล้วมาเทลงในแบบหล่อขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบกำลังอัดและขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบการหดตัวแบบแห้งและการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต



ภาพที่ ก-1 การเตรียมส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์



ภาพที่ ก-2 การผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

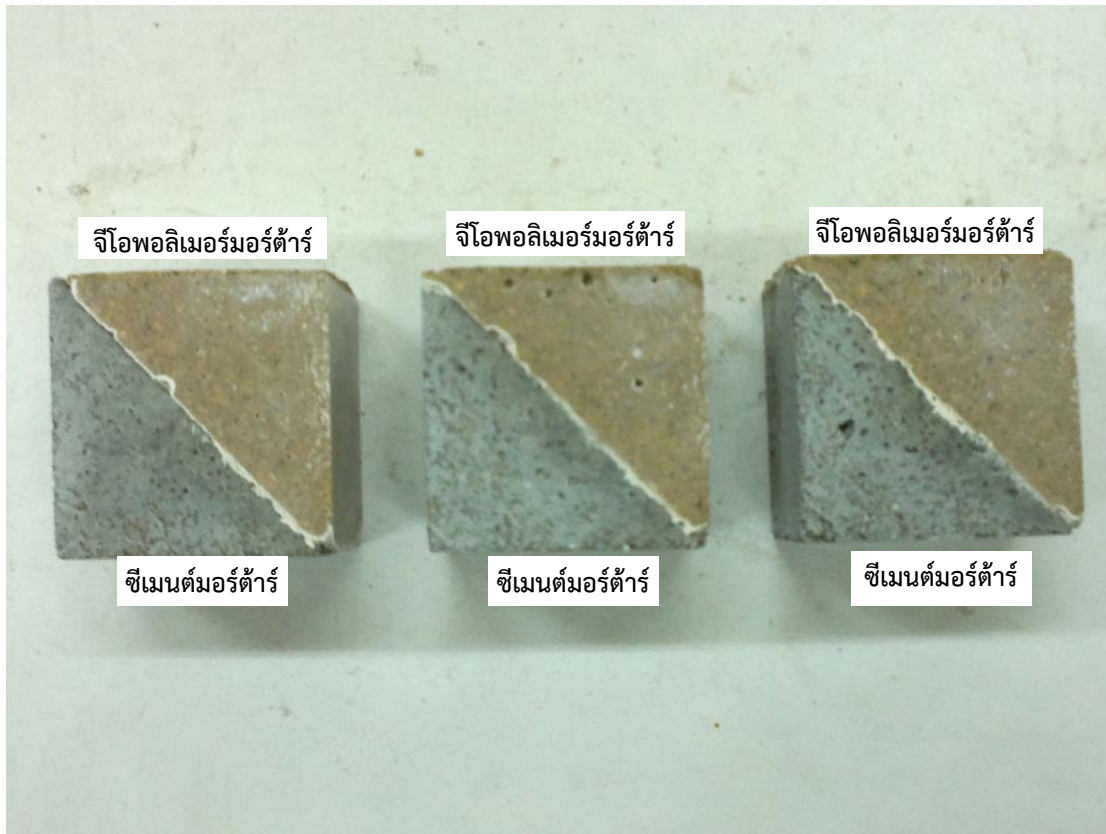
ภาคผนวก ข

การทดสอบกำลังยึดหน่วงระหว่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์กับปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

การทดสอบการยึดหน่วงระหว่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์กับปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ด้วยวิธีแรงเฉือนอัด (Slant Shear Test) โดยใช้ก้อนตัวอย่างขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร เริ่มต้นด้วยการหล่อก้อนปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ครั้งหนึ่งเอียงเป็น 45 องศา ดังภาพที่ ข-1 โดยบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำก้อนตัวอย่างปูนซีเมนต์มอร์ตาร์เข้าไปในแบบหล่ออีกครั้ง แล้วเทจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เตรียมไว้ลงในแบบหล่ออีกครั้งหนึ่งดังภาพที่ ข-2 ทำการหุ้มแบบหล่อด้วยพลาสติกไว้นิล แล้วนำไปบ่มร้อนในตู้อบเป็นเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก นำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบแรงเฉือนอัด



ภาพที่ ข-1 การหล่อก้อนตัวอย่างปูนซีเมนต์มอร์ตาร์



ภาพที่ ข-2 ลักษณะการยึดหน่วงของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์กับปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

ภาคผนวก ค

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ ค-1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

Control-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
หลังแกะแบบทันที (Q)				เวลาทดสอบ (T)				Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.66	50.64	52.48	50.66	50.64	52.48	269.4	269.4	155.52	58.52	56.46	2.001	2.001	2.004
	2	50.72	50.52	52.30	50.72	50.52	52.30	269.1	269.1	156.33	59.17		2.008	2.008	
	3	50.59	50.54	52.28	50.59	50.54	52.28	267.6	267.6	146.47	55.43		2.002	2.002	
6 ชม.	1	50.81	50.80	52.20	50.81	50.80	52.20	272.5	270.0	171.89	64.82	62.52	2.022	2.004	2.006
	2	50.86	50.74	52.17	50.86	50.74	52.17	273.2	270.4	178.78	67.54		2.029	2.008	
	3	50.83	50.49	52.83	50.83	50.49	52.83	274.6	271.9	163.69	61.37		2.025	2.005	
24 ชม.	1	50.78	50.14	52.47	50.73	50.18	52.40	266.9	262.9	168.79	64.19	63.14	1.998	1.971	1.965
	2	50.72	50.01	52.13	50.68	50.04	52.18	263.6	259.7	167.43	64.12		1.994	1.963	
	3	50.91	50.76	52.14	50.84	50.72	52.19	268.1	263.8	161.71	61.09		1.990	1.960	
7 วัน	1	51.01	50.86	52.13	50.99	50.86	52.08	277.2	269.6	174.44	65.86	66.42	2.050	1.996	1.974
	2	50.94	50.76	51.92	50.94	50.74	51.90	271.9	264.4	177.89	67.55		2.025	1.971	
	3	50.92	50.90	52.00	50.92	50.85	51.94	272.5	263.1	173.96	65.87		2.022	1.956	
28 วัน	1	50.86	50.15	51.77	50.83	50.13	51.61	267.3	255.1	202.11	78.12	74.87	2.024	1.940	1.935
	2	50.84	50.14	51.98	50.79	50.06	51.88	268.2	255.9	190.84	73.48		2.024	1.940	
	3	50.98	50.75	52.42	50.81	50.69	52.20	271.8	258.8	193.19	73.01		2.004	1.925	

Q = วัดทันทีหลังแกะแบบ T = วัดเมื่อครบอายุทดสอบ

ตารางที่ ค-2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.82	50.74	52.53	50.82	50.74	52.53	273.8	273.8	81.34	30.52	30.82	2.021	2.021	2.042
	2	50.95	50.85	52.17	50.95	50.85	52.17	275.6	275.6	82.84	31.23		2.039	2.039	
	3	50.92	50.79	51.97	50.92	50.79	51.97	277.6	277.6	81.06	30.71		2.065	2.065	
6 ชม.	1	50.74	50.82	52.46	50.74	50.82	52.46	273.5	271.7	120.65	45.25	45.29	2.022	1.991	2.020
	2	50.85	50.68	52.58	50.85	50.68	52.58	272.6	270.4	118.42	44.44		2.012	2.031	
	3	50.92	50.64	52.54	50.92	50.64	52.54	274.6	272.5	122.86	46.18		2.027	2.013	
24 ชม.	1	50.96	50.66	52.41	50.96	50.68	52.43	274.3	269.6	129.33	48.67	50.05	2.027	1.930	2.012
	2	50.82	49.55	51.95	50.78	49.47	51.91	268.1	264.8	131.27	51.12		2.049	1.976	
	3	50.93	50.74	52.25	50.76	50.71	52.38	275.4	271.4	133.80	50.37		2.040	1.939	
7 วัน	1	50.71	50.71	52.71	50.73	50.70	52.71	270.6	261.7	154.62	57.86	57.49	1.996	1.907	1.948
	2	50.68	50.47	52.39	50.76	50.44	52.29	271.7	264.5	156.18	59.21		2.028	1.932	
	3	51.00	50.72	52.52	50.95	50.64	52.53	271.6	262.8	147.38	55.40		1.999	1.908	
28 วัน	1	50.71	49.56	52.03	50.86	49.68	52.00	263.3	250.5	158.38	61.31	60.97	2.014	1.991	1.916
	2	51.70	50.66	51.89	51.70	50.66	51.81	274.6	262.2	153.46	58.47		2.021	2.031	
	3	50.67	45.30	52.17	50.77	49.39	52.05	261.7	249.0	162.30	63.13		2.185	2.013	

ตารางที่ ค-3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P20-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.68	50.23	51.61	50.68	50.23	51.61	271.3	271.3	51.72	19.95	19.86	2.065	2.065	2.060
	2	50.68	50.20	51.48	50.68	50.20	51.48	267.9	267.9	50.34	19.48		2.045	2.045	
	3	50.72	50.07	51.63	50.72	50.07	51.63	271.4	271.4	52.11	20.16		2.070	2.070	
6 ชม.	1	50.95	50.73	51.91	50.95	50.73	51.91	275.4	273.6	99.65	37.84	38.58	2.053	2.039	2.034
	2	50.96	49.97	51.87	50.96	49.97	51.87	270.8	269.2	97.75	37.71		2.050	2.038	
	3	50.92	50.39	52.24	50.92	50.39	52.24	273.2	271.4	105.75	40.17		2.038	2.025	
24 ชม.	1	51.16	50.89	51.60	50.18	50.77	51.59	276.7	274.4	119.16	45.38	44.45	2.060	2.043	2.047
	2	50.92	50.55	52.40	50.91	50.53	51.39	276.9	274.4	113.08	42.69		2.053	2.034	
	3	50.96	50.82	51.83	50.93	50.78	51.74	279.2	277.2	119.28	45.28		2.080	2.065	
7 วัน	1	50.59	50.55	52.23	50.55	50.49	52.40	268.0	261.4	127.12	48.05	49.05	2.006	1.955	1.972
	2	50.61	50.20	52.43	50.51	50.07	52.33	268.8	262.8	127.84	48.79		2.018	1.986	
	3	50.71	50.52	52.07	50.67	50.43	52.04	268.8	262.6	132.01	50.30		2.015	1.975	
28 วัน	1	50.64	50.34	52.42	50.79	50.50	52.40	267.9	256.0	120.24	45.44	47.34	2.005	1.905	1.915
	2	50.75	50.30	51.82	50.80	50.38	51.78	265.6	254.6	117.97	45.22		2.008	1.921	
	3	50.69	50.66	52.30	50.82	50.71	52.29	270.3	258.7	136.16	51.35		2.013	1.920	

ตารางที่ ค-4 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P30-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P30-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.94	50.93	51.29	50.94	50.93	51.29	277.1	277.1	40.25	15.41	14.78	2.082	2.082	2.067
	2	51.03	49.99	52.25	51.03	49.99	52.25	273.0	273.0	39.79	15.23		2.048	2.048	
	3	51.08	50.51	51.89	51.08	50.51	51.89	277.2	277.2	35.89	13.69		2.071	2.071	
6 ชม.	1	50.90	50.56	51.75	50.90	50.56	51.75	273.0	272.0	90.86	34.73	33.60	2.050	2.042	2.047
	2	50.91	50.67	51.86	50.91	50.67	51.86	274.6	273.9	83.66	31.84		2.053	2.047	
	3	50.92	50.44	52.05	50.92	50.44	52.05	275.0	274.1	89.92	34.25		2.057	2.050	
24 ชม.	1	50.78	50.35	51.99	50.76	50.33	51.92	274.2	273.3	96.69	37.00	36.03	2.063	2.060	2.058
	2	50.74	50.40	52.07	50.74	50.46	52.04	274.7	273.7	92.19	35.11		2.063	2.054	
	3	50.70	50.41	52.01	50.69	50.34	52.06	274.5	273.4	94.32	35.99		2.065	2.058	
7 วัน	1	50.72	50.58	51.98	50.69	50.50	51.98	273.9	270.1	110.65	42.15	42.24	2.054	2.030	2.035
	2	50.65	50.48	52.23	50.59	50.45	52.21	273.5	270.1	107.01	40.63		2.048	2.027	
	3	50.68	50.21	51.29	50.59	50.17	51.22	269.9	266.1	112.91	43.94		2.068	2.047	
28 วัน	1	50.79	50.45	51.99	50.79	50.40	51.73	275.0	266.7	123.36	47.32	45.65	2.064	2.014	2.012
	2	50.86	50.75	51.58	50.81	50.76	51.31	274.6	267.0	117.99	45.30		2.063	2.018	
	3	50.75	50.47	52.02	50.78	50.44	51.86	274.6	266.1	116.00	44.35		2.061	2.003	

ตารางที่ ค-5 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O5-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

O5-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
หลังแกะแบบทันที (Q)				เวลาทดสอบ (T)				Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.82	50.61	52.07	50.82	50.61	52.07	271.8	271.8	155.70	59.08	60.33	2.030	2.030	2.024
	2	50.91	50.78	52.27	50.91	50.78	52.27	274.1	274.1	163.48	61.59		2.028	2.028	
	3	50.89	50.72	52.21	50.89	50.72	52.21	271.4	271.4	159.69	60.30		2.014	2.014	
6 ชม.	1	50.78	50.78	51.94	50.78	50.78	51.94	272.3	271.1	156.62	59.38	60.81	2.033	2.024	2.019
	2	50.92	50.86	51.88	50.92	50.86	51.88	271.9	270.7	158.15	59.94		2.024	2.015	
	3	50.78	50.68	52.34	50.78	50.68	52.34	273.1	271.7	167.42	63.12		2.027	2.017	
24 ชม.	1	50.55	50.69	52.04	51.00	50.71	52.03	272.8	269.2	161.58	61.25	60.97	2.046	2.001	2.000
	2	50.56	50.69	52.14	51.05	51.02	51.66	273.5	269.8	165.57	62.65		2.047	2.005	
	3	50.83	50.48	52.08	51.03	50.69	52.02	272.6	268.2	155.17	59.02		2.040	1.993	
7 วัน	1	50.98	50.82	52.10	50.98	50.78	52.07	274.7	263.9	165.30	62.52	65.81	2.035	1.958	1.956
	2	50.79	50.57	51.93	50.78	50.55	51.89	272.2	261.8	166.54	63.49		2.041	1.965	
	3	50.79	50.39	51.99	50.78	50.35	51.99	269.8	258.5	186.95	71.42		2.028	1.945	
28 วัน	1	50.93	50.27	51.54	50.92	50.27	51.64	271.1	258.5	189.13	72.86	69.47	2.054	1.956	1.968
	2	50.93	50.25	51.72	50.94	50.16	51.62	270.0	257.6	171.05	66.06		2.040	1.953	
	3	50.88	50.83	51.98	50.86	50.83	51.08	276.6	263.5	180.42	69.49		2.058	1.995	

ตารางที่ ค-6 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

O10-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.92	50.85	51.28	50.92	50.85	51.28	273.6	273.6	123.47	47.35	50.30	2.061	2.061	2.053
	2	50.96	50.69	52.17	50.96	50.69	52.17	275.0	275.0	137.17	51.87		2.041	2.041	
	3	50.81	50.48	51.03	50.81	50.48	51.03	269.3	269.3	133.11	51.67		2.058	2.058	
6 ชม.	1	51.00	50.82	51.89	51.00	50.82	51.89	276.7	274.8	143.29	54.34	56.23	2.057	2.043	2.049
	2	50.86	49.48	52.17	50.86	49.48	52.17	270.7	269.0	149.87	58.06		2.062	2.049	
	3	50.94	50.70	51.95	50.94	50.70	51.95	277.5	275.7	148.28	56.30		2.068	2.055	
24 ชม.	1	50.96	50.94	52.04	50.96	50.93	52.00	278.0	273.8	150.98	56.95	58.85	2.058	2.029	2.034
	2	51.06	49.98	51.35	51.01	49.97	51.33	271.7	267.9	154.98	60.39		2.073	2.048	
	3	51.14	50.46	51.82	51.14	50.39	51.82	274.6	270.7	154.83	59.21		2.054	2.027	
7 วัน	1	51.05	50.48	51.63	51.06	50.44	51.59	271.5	262.9	151.15	58.09	60.15	2.041	1.979	1.983
	2	51.05	51.05	51.96	51.08	51.02	51.88	276.7	269.3	158.68	59.95		2.043	1.992	
	3	51.03	50.76	51.83	51.02	50.62	51.83	273.3	264.8	163.79	62.43		2.036	1.978	
28 วัน	1	51.21	50.84	51.66	51.21	50.85	51.68	276.2	263.4	174.17	66.28	66.51	2.054	1.957	1.961
	2	51.05	50.75	51.85	51.05	50.75	51.70	275.3	263.4	170.49	64.98		2.049	1.966	
	3	50.88	50.44	52.11	50.88	50.44	52.14	274.6	262.3	179.52	68.26		2.053	1.960	

ตารางที่ ค-7 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O15-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

O15-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
หลังแกะแบบทันที (Q)				เวลาทดสอบ (T)				Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.99	50.87	51.54	50.99	50.87	51.54	269.4	269.4	124.68	47.55	45.20	2.015	2.015	2.011
	2	50.96	50.87	51.75	50.96	50.87	51.75	272.6	272.6	117.32	44.57		2.032	2.032	
	3	51.09	51.97	52.01	51.09	51.97	52.01	274.3	274.3	117.49	43.47		1.986	1.986	
6 ชม.	1	50.81	50.49	52.19	50.81	50.49	52.19	273.0	271.4	116.38	44.17	44.60	2.039	2.027	2.017
	2	50.86	50.85	52.07	50.86	50.85	52.07	274.0	272.6	116.78	44.11		2.035	2.024	
	3	50.93	50.67	52.56	50.93	50.67	52.56	272.9	271.3	121.24	45.52		2.012	2.000	
24 ชม.	1	50.75	50.50	52.02	50.71	50.49	52.05	272.3	267.6	138.07	52.54	52.50	2.042	2.008	2.017
	2	50.82	50.06	52.25	50.80	50.05	52.22	274.3	269.7	139.76	53.47		2.064	2.031	
	3	50.88	50.17	52.26	50.80	50.12	52.22	271.9	267.4	134.77	51.49		2.038	2.011	
7 วัน	1	51.17	50.33	51.71	51.12	50.08	51.78	271.5	262.5	136.46	52.62	52.58	2.039	1.980	1.957
	2	51.16	50.07	51.98	51.13	50.92	51.89	270.0	260.7	143.43	54.28		2.028	1.930	
	3	50.94	50.95	52.24	50.94	50.89	52.15	274.8	265.2	134.88	50.82		2.027	1.962	
28 วัน	1	51.20	50.89	52.19	51.18	50.87	52.18	273.6	261.7	141.40	53.27	54.00	2.012	1.926	1.922
	2	50.98	50.91	52.56	50.97	50.85	52.51	273.9	262.3	145.90	54.64		2.008	1.927	
	3	51.04	50.53	52.51	51.03	50.53	52.43	270.0	258.5	143.32	54.10		1.994	1.912	

ตารางที่ ค-8 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O5-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10O5-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.89	50.64	51.84	50.89	50.64	51.84	271.9	271.9	108.80	41.44	40.53	2.035	2.035	2.028
	2	50.88	50.66	51.96	50.88	50.66	51.96	271.3	271.3	98.99	37.61		2.026	2.026	
	3	50.93	50.47	52.36	50.93	50.47	52.36	272.3	272.3	112.44	42.55		2.023	2.023	
6 ชม.	1	50.99	50.58	51.12	50.99	50.58	51.12	275.7	273.9	108.12	41.82	41.43	2.091	2.077	2.063
	2	51.02	50.99	51.57	51.02	50.99	51.57	278.2	276.7	103.70	39.44		2.074	2.062	
	3	50.95	50.61	51.51	50.95	50.61	51.51	274.2	272.2	112.20	43.04		2.064	2.049	
24 ชม.	1	51.04	50.86	51.16	51.02	50.85	51.13	274.2	270.9	121.15	46.56	48.00	2.065	2.042	2.044
	2	51.10	50.07	51.52	51.09	50.01	51.51	272.2	269.4	131.04	50.80		2.065	2.047	
	3	51.16	50.46	51.19	51.14	50.38	51.02	272.5	268.6	120.47	46.64		2.062	2.043	
7 วัน	1	50.95	51.05	51.83	50.90	51.03	51.73	275.9	265.2	146.11	55.35	59.96	2.047	1.974	1.981
	2	51.03	50.97	51.20	50.99	50.90	51.19	274.3	264.5	159.19	61.10		2.060	1.991	
	3	50.93	50.82	51.50	50.90	50.78	51.42	273.2	263.1	165.62	63.43		2.050	1.980	
28 วัน	1	50.96	50.45	51.60	51.03	50.47	51.56	272.2	259.5	142.35	54.70	56.34	2.052	1.954	1.966
	2	50.96	50.42	51.68	50.98	50.39	51.65	274.8	262.6	146.57	56.32		2.069	1.979	
	3	50.94	50.46	51.76	50.97	50.42	51.72	273.4	261.3	151.28	58.01		2.055	1.966	

ตารางที่ ค-9 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10O10-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
หลังแกะแบบทันที (Q)				เวลาทดสอบ (T)				Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.54	50.49	52.18	50.54	50.49	52.18	269.3	269.3	85.44	32.43	32.73	2.023	2.023	2.014
	2	50.84	50.88	52.21	50.84	50.88	52.21	271.6	271.6	88.29	33.24		2.011	2.011	
	3	50.67	50.66	52.38	50.67	50.66	52.38	270.2	270.2	86.32	32.53		2.010	2.010	
6 ชม.	1	50.89	50.24	52.14	50.89	50.24	52.14	268.1	266.4	97.40	37.18	36.16	2.011	1.998	1.993
	2	50.89	50.56	52.31	50.89	50.56	52.31	271.0	269.2	97.28	36.78		2.013	2.000	
	3	50.98	50.82	52.65	50.98	50.82	52.65	272.8	270.3	92.36	34.52		2.000	1.982	
24 ชม.	1	50.98	50.91	52.20	50.93	50.87	52.20	274.7	271.6	116.46	43.86	43.83	2.005	2.008	2.008
	2	51.01	49.50	52.27	50.99	49.49	52.03	267.6	265.1	111.83	43.43		2.009	2.019	
	3	51.00	50.82	52.49	50.99	50.79	52.32	273.8	270.5	117.48	44.21		1.988	1.996	
7 วัน	1	50.85	50.66	51.81	50.80	50.63	51.78	270.4	261.3	118.25	45.11	45.20	1.958	1.962	1.963
	2	50.87	50.23	52.44	50.80	50.23	52.42	271.9	263.0	118.63	45.05		1.963	1.966	
	3	50.90	50.53	52.23	50.89	50.53	52.21	273.0	263.2	119.85	45.43		1.959	1.960	
28 วัน	1	51.13	50.97	52.37	51.13	51.11	52.33	277.0	265.4	125.90	47.07	47.60	1.945	1.941	1.944
	2	51.29	50.03	51.89	51.23	50.06	51.84	270.8	259.5	124.03	47.79		1.949	1.952	
	3	51.23	50.35	52.03	51.22	50.35	52.08	272.5	260.6	125.72	47.94		1.942	1.940	

ตารางที่ ค-10 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O15-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10O15-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง	กำลังอัด	กำลังอัดเฉลี่ย	ความหนาแน่น	ความหนาแน่น	ความหนาแน่นเฉลี่ย
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
หลังแกะแบบทันที (Q)				เวลาทดสอบ (T)				Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.97	50.45	51.63	50.97	50.45	51.63	274.7	274.7	71.90	27.60	28.20	2.069	2.069	2.070
	2	51.00	50.66	51.44	51.00	50.66	51.44	274.1	274.1	69.18	26.55		2.062	2.062	
	3	51.00	50.39	51.42	51.00	50.39	51.42	274.6	274.6	78.92	30.46		2.078	2.078	
6 ชม.	1	50.87	50.48	51.44	50.87	50.48	51.44	274.3	273.8	90.32	34.78	32.71	2.077	2.073	2.073
	2	50.86	50.47	51.43	50.86	50.47	51.43	275.8	275.2	84.21	32.44		2.089	2.085	
	3	50.96	50.84	51.54	50.96	50.84	51.54	276.3	275.4	80.97	30.90		2.069	2.062	
24 ชม.	1	50.93	50.41	51.98	50.93	50.45	51.97	274.9	272.6	107.42	41.00	41.08	2.060	2.041	2.035
	2	50.97	50.28	51.73	50.95	50.29	51.72	272.0	269.6	109.80	42.21		2.052	2.034	
	3	50.93	50.71	51.64	50.90	50.64	51.69	273.1	270.4	104.81	40.02		2.048	2.029	
7 วัน	1	50.91	50.46	51.56	50.88	50.36	51.45	269.2	261.0	112.79	43.53	41.84	2.032	1.980	1.966
	2	50.96	50.87	52.03	50.92	50.86	52.07	271.8	263.9	106.06	40.05		2.015	1.957	
	3	51.04	50.71	51.42	50.95	50.37	51.35	266.7	258.5	108.47	41.94		2.004	1.962	
28 วัน	1	50.94	50.48	51.93	50.92	50.41	51.88	271.0	260.6	128.20	49.02	48.69	2.029	1.957	1.964
	2	50.91	50.84	51.72	50.83	50.83	51.61	271.0	261.0	127.52	48.61		2.024	1.957	
	3	50.85	50.44	51.79	50.84	50.37	51.71	272.2	262.0	126.15	48.43		2.049	1.979	

ตารางที่ ค-11 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P2005-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P2005-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
หลังแกะแบบทันที (Q)				เวลาทดสอบ (T)				Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.89	50.49	51.83	50.89	50.49	51.83	276.7	276.7	76.03	29.05	28.24	2.078	2.078	2.070
	2	50.94	50.69	51.88	50.94	50.69	51.88	276.7	276.7	67.35	25.61		2.066	2.066	
	3	51.04	50.46	52.25	51.04	50.46	52.25	278.0	278.0	79.24	30.05		2.066	2.066	
6 ชม.	1	51.02	50.80	52.08	51.02	50.80	52.08	282.4	281.3	89.62	33.87	32.34	2.092	2.084	2.078
	2	51.00	49.49	52.31	51.00	49.49	52.31	275.0	273.8	81.64	31.54		2.083	2.074	
	3	50.86	50.86	52.47	50.86	50.86	52.47	282.9	281.8	84.32	31.60		2.084	2.076	
24 ชม.	1	50.65	50.28	52.26	50.63	50.25	52.24	276.3	274.1	110.34	41.99	42.36	2.076	2.062	2.052
	2	50.82	50.27	52.22	50.80	50.24	52.19	277.1	274.8	112.84	42.99		2.077	2.063	
	3	50.85	50.25	51.98	50.83	50.79	51.95	274.8	272.3	109.96	42.10		2.069	2.030	
7 วัน	1	50.85	50.27	51.53	50.83	50.24	51.51	274.6	268.5	122.26	47.20	48.04	2.085	2.041	2.048
	2	50.83	50.05	52.43	50.82	50.05	51.47	274.8	269.0	124.41	47.41		2.060	2.055	
	3	50.85	50.25	51.23	50.84	50.24	51.22	274.1	267.9	127.48	49.52		2.094	2.048	
28 วัน	1	51.07	50.54	52.23	51.05	50.54	52.22	278.6	270.6	120.07	45.49	45.68	2.067	2.008	2.008
	2	51.02	50.97	51.73	51.00	50.97	51.70	276.6	268.9	122.01	46.27		2.056	2.001	
	3	51.27	50.98	51.58	51.19	50.94	51.57	278.9	271.0	119.07	45.28		2.069	2.015	

ตารางที่ ค-12 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P20O10-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.71	50.65	51.77	50.71	50.65	51.77	275.5	275.5	41.63	15.88	15.07	2.072	2.072	2.065
	2	50.83	49.46	52.12	50.83	49.46	52.12	269.7	269.7	37.25	14.45		2.058	2.058	
	3	50.90	50.86	51.32	50.90	50.86	51.32	274.2	274.2	38.82	14.87		2.064	2.064	
6 ชม.	1	50.80	50.55	51.96	50.80	50.55	51.96	274.2	273.3	70.16	26.71	25.41	2.055	2.048	2.063
	2	50.71	50.08	51.81	50.71	50.08	51.81	273.5	272.7	62.02	23.90		2.079	2.073	
	3	50.68	50.58	51.96	50.68	50.58	51.96	276.5	275.5	67.36	25.63		2.076	2.068	
24 ชม.	1	51.12	50.60	51.54	51.11	50.60	51.53	273.3	271.7	100.16	38.41	36.96	2.050	2.039	2.038
	2	51.04	50.02	51.79	51.04	50.02	51.77	271.7	270.1	91.19	35.20		2.055	2.044	
	3	51.16	50.96	51.77	51.14	50.96	51.75	275.7	274.1	98.32	37.27		2.043	2.032	
7 วัน	1	50.79	50.26	51.64	50.79	50.22	51.53	273.9	269.8	108.22	41.70	41.85	2.078	2.053	2.046
	2	50.80	50.08	51.79	50.77	50.05	51.75	272.9	268.9	107.78	41.56		2.071	2.045	
	3	50.76	50.24	51.68	50.75	50.23	51.67	272.8	268.8	109.84	42.30		2.070	2.041	
28 วัน	1	50.87	50.77	51.91	50.90	50.67	51.85	277.9	270.1	117.88	44.73	46.21	2.073	2.020	2.024
	2	50.83	50.47	51.94	50.79	50.36	51.81	276.0	268.9	120.81	46.09		2.071	2.029	
	3	50.76	50.35	51.72	50.75	50.28	51.66	274.2	266.7	124.52	47.82		2.074	2.023	

ตารางที่ ค-13 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O15-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P20O15-1															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	51.12	50.91	51.57	51.12	50.91	51.57	273.6	273.6	36.02	13.72	13.69	2.039	2.039	2.059
	2	51.01	50.92	51.43	51.01	50.92	51.43	274.2	274.2	33.76	12.89		2.053	2.053	
	3	51.09	50.42	51.31	51.09	50.42	51.31	275.8	275.8	37.41	14.46		2.087	2.087	
6 ชม.	1	50.81	50.47	51.79	50.81	50.47	51.79	275.4	274.9	50.60	19.36	19.94	2.074	2.070	2.069
	2	50.88	50.59	51.68	50.88	50.59	51.68	275.6	275.1	50.28	19.23		2.072	2.068	
	3	50.91	50.42	51.63	50.91	50.42	51.63	274.6	274.2	55.25	21.22		2.072	2.069	
24 ชม.	1	51.26	50.44	51.48	51.22	50.43	51.48	271.9	270.8	73.65	28.36	28.95	2.043	2.036	2.029
	2	50.94	50.88	51.93	50.89	50.82	51.90	274.3	273.1	75.75	28.67		2.038	2.035	
	3	50.83	50.45	51.77	50.80	50.43	51.78	268.6	267.3	77.84	29.80		2.023	2.015	
7 วัน	1	51.10	50.88	52.15	51.01	50.88	52.15	279.4	276.0	92.91	35.02	35.78	2.061	2.039	2.043
	2	50.92	50.82	51.68	50.81	50.76	51.66	276.6	273.1	91.61	34.88		2.068	2.050	
	3	50.85	50.84	51.67	50.86	50.81	51.60	275.4	272.0	98.35	37.44		2.062	2.040	
28 วัน	1	50.99	50.95	52.18	50.96	50.85	52.16	279.4	273.0	114.60	43.11	43.22	2.061	2.020	2.034
	2	50.93	50.70	51.44	50.91	50.46	51.29	274.1	268.7	109.60	42.02		2.064	2.039	
	3	50.86	50.45	51.72	50.81	50.42	51.72	276.2	270.7	116.18	44.53		2.081	2.043	

ตารางที่ ค-14 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

Control-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง	กำลังอัด	กำลังอัดเฉลี่ย	ความหนาแน่น	ความหนาแน่น	ความหนาแน่นเฉลี่ย
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	51.03	50.72	51.82	51.03	50.72	51.82	273.1	273.1	172.72	65.72	63.75	2.036	2.036	2.028
	2	50.66	50.80	52.12	50.66	50.80	52.12	270.6	270.6	165.99	62.69		2.017	2.017	
	3	51.01	50.87	52.24	51.01	50.87	52.24	275.2	275.2	166.99	62.84		2.030	2.030	
6 ชม.	1	50.92	50.91	51.61	50.92	50.91	51.61	273.7	272.5	163.20	62.11	62.26	2.046	2.037	2.023
	2	50.94	50.65	51.61	50.94	50.65	51.61	271.5	270.4	167.97	64.26		2.039	2.031	
	3	50.89	50.66	52.17	50.89	50.66	52.17	270.2	269.4	159.66	60.41		2.009	2.003	
24 ชม.	1	50.20	50.64	52.04	50.24	50.69	52.10	264.3	261.3	154.75	58.60	63.80	1.998	1.969	1.968
	2	50.94	50.55	52.03	50.96	50.59	52.11	268.8	259.9	167.49	63.53		2.006	1.935	
	3	50.87	50.57	52.26	50.88	50.59	52.34	273.5	269.6	183.40	69.26		2.034	2.001	
7 วัน	1	50.60	50.16	52.07	50.65	50.22	52.12	263.2	255.5	163.32	62.40	64.20	1.992	1.927	1.925
	2	50.60	50.42	52.20	50.66	50.50	52.19	264.4	256.8	172.98	65.63		1.985	1.923	
	3	50.62	50.53	52.22	50.60	50.50	52.18	265.5	257.8	170.12	64.56		1.988	1.933	
28 วัน	1	50.69	50.36	52.26	50.79	50.40	52.24	266.0	255.3	167.07	63.45	64.73	1.994	1.909	1.922
	2	50.70	50.43	52.10	50.73	50.50	52.04	267.9	257.3	178.51	67.93		2.011	1.930	
	3	50.74	50.66	52.58	50.76	50.59	52.58	270.9	260.1	167.05	62.80		2.004	1.926	

ตารางที่ ค-15 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
หลังแกะแบบทันที (Q)				เวลาทดสอบ (T)				Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.88	50.76	51.42	50.88	50.76	51.42	268.5	268.5	146.96	56.30	56.03	2.022	2.022	2.010
	2	50.73	50.74	52.01	50.73	50.74	52.01	267.9	267.9	154.69	58.62		2.001	2.001	
	3	50.54	50.71	51.86	50.54	50.71	51.86	266.8	266.8	139.83	53.17		2.007	2.007	
6 ชม.	1	50.68	50.73	51.83	50.68	50.73	51.83	269.2	268.4	147.54	56.11	56.84	2.020	2.014	2.009
	2	50.74	50.88	51.92	50.74	50.88	51.92	270.4	269.7	152.18	57.61		2.017	2.012	
	3	50.66	50.82	52.04	50.66	50.82	52.04	268.9	268.1	150.23	56.80		2.007	2.001	
24 ชม.	1	50.88	50.78	52.12	50.84	50.73	52.15	271.9	268.2	145.45	54.98	56.55	2.019	1.994	1.991
	2	50.99	50.73	52.36	50.93	50.68	52.38	273.3	269.8	164.91	62.12		2.018	1.996	
	3	50.83	50.80	51.80	50.8	50.74	51.86	268.9	265.0	152.93	58.12		2.010	1.982	
7 วัน	1	50.60	50.71	52.05	50.61	50.72	52.07	267.7	258.9	154.68	58.57	60.73	2.004	1.937	1.946
	2	51.01	50.69	51.57	51.04	50.75	51.62	269.4	261.2	159.60	60.92		2.020	1.953	
	3	51.21	50.7	51.35	51.29	50.72	51.36	268.7	260.3	163.31	62.69		2.015	1.948	
28 วัน	1	51.70	50.61	52.20	51.81	50.82	52.15	276.6	263.2	155.84	58.80	59.33	2.025	1.917	1.913
	2	50.52	50.75	52.43	50.70	50.88	52.43	271.6	258.2	155.38	58.25		2.020	1.909	
	3	50.72	49.21	51.66	50.84	49.5	51.62	261.3	248.5	155.74	60.95		2.027	1.913	

ตารางที่ ค-16 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P20-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.70	50.62	51.95	50.70	50.62	51.95	266.4	266.4	111.73	42.49	45.50	1.998	1.998	2.000
	2	50.69	50.28	52.11	50.69	50.28	52.11	267.0	267.0	123.80	47.25		2.010	2.010	
	3	50.76	50.54	52.02	50.76	50.54	52.02	265.7	265.7	122.94	46.76		1.991	1.991	
6 ชม.	1	50.94	50.47	52.03	50.94	50.47	52.03	271.9	269.8	120.69	45.96	47.60	2.033	2.017	2.021
	2	50.91	50.31	51.56	50.91	50.31	51.56	271.4	269.4	128.20	49.42		2.055	2.040	
	3	50.88	50.79	52.36	50.88	50.79	52.36	274.1	271.6	126.13	47.43		2.026	2.007	
24 ชม.	1	50.55	50.69	51.21	50.50	50.59	51.24	263.4	260.4	124.78	48.14	46.34	2.007	1.989	1.975
	2	50.89	50.68	51.99	50.87	50.65	52.05	268.6	265.8	119.69	45.40		2.003	1.982	
	3	50.77	50.48	52.33	50.75	50.45	52.77	267.0	263.9	121.07	45.48		1.991	1.953	
7 วัน	1	50.91	50.89	51.82	50.88	50.88	51.84	275.0	270.8	135.21	51.26	50.72	2.048	2.018	2.015
	2	50.95	49.55	51.75	50.92	49.52	51.66	268.0	264.2	128.76	50.33		2.051	2.028	
	3	50.99	50.79	51.95	50.97	50.76	51.92	273.6	268.4	133.23	50.55		2.034	1.998	
28 วัน	1	50.93	50.55	52.48	50.9	50.78	52.46	273.5	264.2	133.57	50.14	48.97	2.024	1.948	1.956
	2	51.03	51.01	51.58	51.13	51.01	51.57	274.4	265.1	125.72	47.79		2.044	1.971	
	3	50.88	50.57	51.75	50.97	50.74	51.85	271.2	261.3	118.76	45.14		2.037	1.949	

ตารางที่ ค-17 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P30-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P30-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
หลังแกะแบบทันที (Q)				เวลาทดสอบ (T)				Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.82	50.52	51.46	50.82	50.52	51.46	269.4	269.4	110.72	42.59	41.94	2.039	2.039	2.037
	2	51.08	50.72	51.55	51.08	50.72	51.55	271.7	271.7	105.38	40.30		2.034	2.034	
	3	51.22	50.92	51.66	51.22	50.92	51.66	274.5	274.5	112.89	42.92		2.037	2.037	
6 ชม.	1	50.54	50.68	52.44	50.54	50.68	52.44	273.4	272.8	111.54	41.97	42.01	2.035	2.031	2.033
	2	50.67	50.74	51.94	50.67	50.74	51.94	272.6	272.0	111.44	42.29		2.041	2.037	
	3	50.43	50.82	51.76	50.43	50.82	51.76	270.4	269.5	109.86	41.76		2.038	2.032	
24 ชม.	1	50.85	50.48	52.15	50.80	50.48	52.04	273.3	272.3	114.40	43.55	43.33	2.042	2.040	2.040
	2	51.68	50.65	51.94	51.66	50.64	51.93	278.9	277.4	111.85	42.53		2.051	2.042	
	3	50.71	49.27	51.97	50.76	49.27	51.86	266.0	264.1	112.22	43.92		2.049	2.036	
7 วัน	1	50.92	50.82	51.83	50.95	50.80	51.59	273.4	270.7	113.53	43.32	44.40	2.038	2.027	2.022
	2	50.82	49.60	51.64	50.84	49.52	51.60	266.9	264.1	114.02	44.62		2.050	2.033	
	3	50.99	50.73	51.70	50.99	50.77	51.68	273.1	268.3	118.78	45.27		2.042	2.005	
28 วัน	1	50.95	50.53	51.94	50.98	50.58	51.90	272.1	265.9	118.72	45.22	45.36	2.035	1.987	1.982
	2	50.97	50.95	52.06	51.01	50.95	51.93	275.3	268.9	121.36	45.87		2.036	1.992	
	3	50.96	50.56	52.47	50.98	50.7	52.28	273.4	265.7	119.21	44.97		2.022	1.966	

ตารางที่ ค-18 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O5-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

O5-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.89	50.88	52.08	50.89	50.88	52.08	271.3	271.3	142.58	53.81	62.53	2.012	2.012	2.017
	2	50.99	50.04	52.54	50.99	50.04	52.54	269.6	269.6	165.94	63.12		2.011	2.011	
	3	51.03	50.40	52.26	51.03	50.40	52.26	272.5	272.5	163.15	61.94		2.027	2.027	
6 ชม.	1	50.95	50.53	52.10	50.95	50.53	52.10	271.8	270.6	175.11	66.52	65.20	2.026	2.017	2.029
	2	50.96	50.52	51.75	50.96	50.52	51.75	273.5	272.2	167.65	64.13		2.053	2.043	
	3	51.05	50.83	51.90	51.05	50.83	51.90	274.4	273.1	171.37	64.96		2.038	2.028	
24 ชม.	1	51.19	50.94	52.24	51.19	50.93	52.25	277.0	275.8	175.20	65.84	68.45	2.033	2.025	2.019
	2	51.00	50.98	52.32	51.00	50.95	52.29	275.0	273.5	186.63	70.05		2.022	2.013	
	3	51.01	50.45	52.48	51.01	50.42	52.46	274.2	272.5	183.76	69.47		2.030	2.020	
7 วัน	1	50.82	50.62	51.94	50.82	50.60	51.92	270.0	264.2	175.71	66.88	68.49	2.021	1.979	1.976
	2	50.89	50.86	51.98	50.86	50.81	51.97	272.2	266.1	180.84	68.48		2.023	1.981	
	3	50.97	50.65	52.02	50.91	50.64	52.00	271.2	263.8	184.59	70.10		2.019	1.968	
28 วัน	1	50.84	50.61	52.01	50.80	50.64	51.90	269.5	257.8	185.60	70.62	71.00	2.014	1.931	1.942
	2	50.88	50.42	51.73	50.84	50.38	51.71	269.6	258.2	190.08	72.96		2.032	1.949	
	3	50.92	50.60	52.13	50.89	50.50	52.17	272.5	260.9	182.92	69.43		2.029	1.946	

ตารางที่ ค-19 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

O10-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.81	50.56	52.70	50.81	50.56	52.70	265.8	265.8	148.66	55.79	54.38	1.963	1.963	1.968
	2	51.13	50.77	52.88	51.13	50.77	52.88	269.1	269.1	142.21	52.97		1.960	1.960	
	3	50.69	50.53	52.83	50.69	50.53	52.83	268.0	268.0	157.52	59.01		1.981	1.981	
6 ชม.	1	50.98	50.63	52.89	50.98	50.63	52.89	269.5	268.1	145.78	54.44	55.01	1.974	1.964	1.985
	2	50.85	50.46	52.27	50.85	50.46	52.27	268.9	267.4	147.62	55.97		2.005	1.994	
	3	50.99	50.28	52.00	50.99	50.28	52.00	267.5	266.1	142.83	54.63		2.007	1.996	
24 ชม.	1	50.81	50.24	51.74	50.74	50.21	51.89	262.8	260.7	151.33	58.08	55.52	1.990	1.972	1.971
	2	50.74	50.51	51.89	50.76	50.67	51.86	265.6	263.9	141.01	53.66		1.997	1.978	
	3	50.82	50.49	52.00	50.82	50.4	51.93	263.7	261.2	143.48	54.82		1.976	1.964	
7 วัน	1	50.78	50.76	52.21	50.82	50.65	52.23	270.3	262.2	157.19	59.42	62.44	2.009	1.950	1.951
	2	50.81	50.58	51.71	50.78	50.57	52.03	268.7	262.0	169.10	64.27		2.022	1.961	
	3	50.80	50.39	52.59	50.77	50.48	52.30	268.2	260.1	167.98	63.63		1.992	1.940	
28 วัน	1	50.97	50.58	52.00	50.90	50.54	51.94	272.2	260.9	182.09	69.37	64.79	2.030	1.953	1.946
	2	50.97	50.92	52.33	50.93	50.92	52.40	275.9	265.0	160.53	60.16		2.031	1.950	
	3	50.80	50.56	52.82	50.80	50.51	52.87	274.1	262.7	173.14	64.84		2.020	1.936	

ตารางที่ ค-20 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

O15-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	51.16	51.00	51.87	51.16	51.00	51.87	275.1	275.1	125.94	47.61	46.96	2.033	2.033	2.023
	2	51.00	50.93	52.11	51.00	50.93	52.11	273.3	273.3	124.61	46.95		2.019	2.019	
	3	51.12	50.54	52.15	51.12	50.54	52.15	271.9	271.9	122.09	46.32		2.018	2.018	
6 ชม.	1	50.94	50.58	53.36	50.94	50.58	53.36	270.5	268.7	126.95	47.04	46.79	1.967	1.954	1.955
	2	51.04	50.89	52.97	51.04	50.89	52.97	271.7	269.8	125.17	46.43		1.975	1.961	
	3	51.22	50.88	53.21	51.22	50.88	53.21	272.5	270.4	126.97	46.90		1.965	1.950	
24 ชม.	1	51.01	50.41	53.07	50.96	50.41	53.11	268.4	265.7	131.84	49.24	53.46	1.967	1.947	1.960
	2	51.00	50.94	52.16	51.02	50.93	52.13	269.2	266.8	148.99	56.12		1.987	1.970	
	3	51.21	50.89	52.1	51.17	50.88	52.11	269.2	266.5	145.88	55.02		1.983	1.964	
7 วัน	1	51.01	51.00	51.85	50.99	50.98	51.72	269.8	262.7	153.58	58.25	55.59	2.000	1.954	1.947
	2	51.11	51.01	51.69	51.06	51.02	51.95	269.2	262.8	138.29	52.18		1.998	1.942	
	3	51.05	50.69	51.98	50.92	50.66	51.86	269.3	260.1	148.03	56.34		2.002	1.944	
28 วัน	1	50.94	50.58	52.66	50.88	50.63	52.6	267.9	256.0	146.12	54.87	54.22	1.974	1.889	1.891
	2	50.75	50.28	52.31	50.8	50.27	52.25	264.5	253.2	143.88	54.78		1.982	1.898	
	3	50.76	50.75	52.56	50.77	50.71	52.5	267.0	254.8	141.16	53.02		1.972	1.885	

ตารางที่ ค-21 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O5-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10O5-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.93	50.9	51.27	50.93	50.9	51.27	268.7	268.7	148.72	56.99	53.88	2.022	2.022	2.017
	2	50.96	50.9	52.04	50.96	50.9	52.04	270.9	270.9	138.51	52.29		2.007	2.007	
	3	51.14	50.85	51.89	51.14	50.85	51.89	272.9	272.9	138.16	52.36		2.022	2.022	
6 ชม.	1	50.45	50.93	51.96	50.45	50.93	51.96	271.2	269.5	148.46	56.10	54.98	2.031	2.019	2.019
	2	50.80	50.87	52.12	50.80	50.87	52.12	272.4	270.8	144.24	54.40		2.022	2.011	
	3	50.68	50.49	51.84	50.68	50.49	51.84	270.6	268.9	142.51	54.45		2.040	2.027	
24 ชม.	1	51.00	50.96	51.22	50.98	50.96	51.18	272.2	269.9	157.06	60.22	58.79	2.045	2.030	2.021
	2	50.96	50.76	51.54	50.97	50.76	51.45	270.3	268.2	149.39	57.20		2.027	2.015	
	3	50.94	50.52	51.82	50.91	50.53	51.82	271.7	269.1	154.37	58.95		2.037	2.019	
7 วัน	1	51.06	50.88	51.60	50.94	50.75	51.60	270.6	262.6	157.76	60.24	59.44	2.019	1.969	1.986
	2	51.02	50.07	51.42	51.01	50.00	51.41	268.9	261.4	141.61	55.09		2.047	1.994	
	3	50.97	50.36	51.81	50.96	50.28	51.73	272.5	264.5	163.79	62.97		2.049	1.996	
28 วัน	1	50.75	50.07	52.05	50.91	50.10	51.98	270.3	258.3	151.58	58.21	56.77	2.044	1.948	1.942
	2	51.36	50.83	51.61	51.41	50.94	51.52	274.4	262.2	145.65	55.50		2.037	1.943	
	3	50.84	50.79	51.09	50.95	50.92	50.99	267.6	255.8	147.00	56.62		2.028	1.934	

ตารางที่ ค-22 กำลังอัดของจีโอฟอลิเมออร์มอร์ตาร์ P10O10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10O10-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง	กำลังอัด	กำลังอัดเฉลี่ย	ความหนาแน่น	ความหนาแน่น	ความหนาแน่นเฉลี่ย
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	51.29	50.98	52.69	51.29	50.98	52.69	273.9	273.9	120.73	44.95	45.64	1.988	1.988	1.983
	2	51.05	50.86	52.73	51.05	50.86	52.73	271.5	271.5	116.62	43.48		1.983	1.983	
	3	50.98	50.49	52.94	50.98	50.49	52.94	269.7	269.7	129.58	48.48		1.979	1.979	
6 ชม.	1	50.94	50.96	52.76	50.94	50.96	52.76	269.4	268.6	120.34	44.76	45.61	1.967	1.961	1.986
	2	50.89	50.82	52.48	50.89	50.82	52.48	270.4	269.5	119.98	44.99		1.992	1.986	
	3	51.05	50.75	52.12	51.05	50.75	52.12	272.1	271.4	124.54	47.08		2.015	2.010	
24 ชม.	1	50.97	50.94	52.71	50.96	50.89	52.66	270.6	269.4	118.26	44.13	47.99	1.977	1.973	1.979
	2	50.99	50.73	52.03	51.00	50.53	51.97	267.8	267.2	132.50	50.46		1.990	1.995	
	3	50.89	50.90	52.29	50.92	50.96	52.29	269.2	267.3	131.63	49.40		1.987	1.970	
7 วัน	1	50.90	49.62	52.58	50.88	49.63	52.67	265.9	260.0	125.60	48.05	49.27	2.002	1.955	1.947
	2	51.76	50.95	52.33	51.76	50.87	52.38	274.8	269.4	130.59	49.01		1.991	1.953	
	3	50.93	49.60	52.82	50.94	49.60	52.84	264.2	257.9	133.02	50.75		1.980	1.932	
28 วัน	1	51.04	51.03	52.62	51.02	50.96	52.63	277.0	267.7	128.09	47.76	47.00	2.021	1.956	1.961
	2	51.24	50.42	52.43	51.17	50.48	52.43	272.1	262.6	124.79	47.15		2.009	1.939	
	3	50.80	50.55	52.07	50.80	50.72	51.98	275.7	266.1	121.54	46.10		2.062	1.987	

ตารางที่ ค-23 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10O15-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง	กำลังอัด	กำลังอัดเฉลี่ย	ความหนาแน่น	ความหนาแน่น	ความหนาแน่น
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
หลังแกะแบบทันที (Q)				เวลาทดสอบ (T)				Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.88	50.84	51.56	50.88	50.84	51.56	275.1	275.1	120.24	45.87	46.65	2.063	2.063	2.065
	2	50.91	50.54	51.87	50.91	50.54	51.87	276.9	276.9	123.98	47.29		2.075	2.075	
	3	50.89	50.43	51.98	50.89	50.43	51.98	274.6	274.6	122.67	46.80		2.058	2.058	
6 ชม.	1	50.86	50.64	51.45	50.86	50.64	51.45	272.7	271.8	120.56	46.27	46.84	2.058	2.051	2.046
	2	50.88	50.68	51.72	50.88	50.68	51.72	273.4	272.6	124.62	47.54		2.050	2.044	
	3	50.92	50.73	51.68	50.92	50.73	51.68	273.6	272.8	122.48	46.72		2.049	2.043	
24 ชม.	1	50.93	50.61	51.89	50.90	50.60	51.85	276.0	273.6	123.91	47.23	47.70	2.064	2.049	2.052
	2	50.98	50.88	51.95	50.96	50.91	51.90	279.2	276.6	121.81	46.10		2.072	2.054	
	3	50.89	50.62	51.78	50.83	50.42	51.75	274.7	272.1	129.85	49.77		2.059	2.052	
7 วัน	1	51.21	50.99	51.94	51.17	50.92	51.85	273.8	264.0	118.84	45.01	45.72	2.019	1.954	1.955
	2	51.12	51.04	51.72	51.03	50.95	51.60	271.1	262.4	117.82	44.82		2.009	1.956	
	3	51.10	50.49	51.66	51.08	50.46	51.60	268.2	260.1	123.26	47.34		2.012	1.956	
28 วัน	1	50.81	50.35	51.87	50.81	50.25	51.80	267.9	256.2	125.35	48.157	45.50	2.019	1.937	1.936
	2	50.82	50.50	51.45	50.81	50.53	51.37	266.6	255.1	117.52	45.274		2.019	1.934	
	3	50.80	50.74	51.76	50.81	50.75	51.72	269.5	258.2	113.03	43.062		2.020	1.936	

ตารางที่ ค-24 กำลังอัดของจีโอฟอลิเมอร์มอร์ตาร์ P2005-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P2005-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)	(kN)			หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	
หลังแกะแบบทันที (Q)				เวลาทดสอบ (T)				Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.84	50.88	51.76	50.84	50.88	51.76	272.4	272.4	112.46	42.70	41.74	2.035	2.035	2.031
	2	50.93	50.96	51.94	50.93	50.96	51.94	273.5	273.5	110.12	41.60		2.029	2.029	
	3	51.02	50.98	52.02	51.02	50.98	52.02	274.6	274.6	108.54	40.93		2.030	2.030	
6 ชม.	1	50.96	50.93	51.66	50.96	50.93	51.66	273.2	271.8	113.57	43.17	42.02	2.038	2.027	2.027
	2	51.01	50.84	51.71	51.01	50.84	51.71	273.6	271.6	108.85	41.40		2.040	2.025	
	3	51.18	50.96	51.90	51.18	50.96	51.90	276.7	274.7	109.74	41.49		2.044	2.029	
24 ชม.	1	50.91	50.56	51.70	50.97	50.51	51.68	272.5	270.1	111.63	42.76	42.94	2.030	2.030	2.033
	2	51.05	51.02	52.08	51.02	50.99	52.02	276.6	274.3	112.04	42.24		2.022	2.027	
	3	50.91	50.59	51.66	50.82	50.54	51.58	273.6	270.7	114.20	43.81		2.035	2.043	
7 วัน	1	51.20	50.99	51.94	51.20	50.93	51.95	278.5	273.5	120.24	45.45	44.66	2.017	2.019	2.017
	2	51.01	50.85	52.10	51.00	50.84	52.08	277.0	272.9	113.78	42.97		2.019	2.021	
	3	50.99	50.53	51.81	50.97	50.50	51.80	274.2	268.1	119.22	45.58		2.008	2.011	
28 วัน	1	50.94	50.54	52.23	50.97	50.59	52.18	275.1	265.7	117.32	44.44	43.09	2.046	1.975	1.978
	2	50.94	50.64	51.93	50.97	50.72	51.90	274.3	265.1	107.01	40.65		2.048	1.976	
	3	50.99	50.53	51.03	50.99	50.52	51.89	274.7	265.3	115.84	44.19		2.089	1.985	

ตารางที่ ค-25 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P20O10-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง	กำลังอัด	กำลังอัดเฉลี่ย	ความหนาแน่น	ความหนาแน่น	ความหนาแน่นเฉลี่ย
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.86	50.25	51.45	50.86	50.25	51.45	272.2	272.2	100.97	39.05	39.05	2.070	2.070	2.056
	2	50.86	50.54	51.96	50.86	50.54	51.96	275.1	275.1	99.12	37.74		2.060	2.060	
	3	51.05	50.82	52.06	51.05	50.82	52.06	275.4	275.4	106.77	40.36		2.039	2.039	
6 ชม.	1	50.87	50.84	51.78	50.87	50.84	51.78	273.2	270.8	100.89	38.32	39.11	2.040	2.022	2.037
	2	50.78	50.86	50.98	50.78	50.86	50.98	271.7	270.6	101.40	39.11		2.064	2.055	
	3	50.89	50.78	51.67	50.89	50.78	51.67	273.4	271.4	104.65	39.88		2.048	2.033	
24 ชม.	1	51.07	51.02	52.10	51.01	50.96	51.99	273.9	271.4	98.96	37.35	39.48	1.999	2.008	1.998
	2	51.10	51.08	52.07	51.09	51.07	52.07	274.5	272.1	107.20	40.31		2.002	2.003	
	3	51.00	50.72	51.81	51.02	51.72	51.81	273.8	271.2	109.30	40.79		2.024	1.984	
7 วัน	1	51.00	50.47	52.02	50.99	50.47	51.99	273.1	267.2	115.61	44.06	42.10	1.996	1.997	2.002
	2	50.93	50.90	52.10	50.91	50.85	52.1	274.7	271.0	110.75	41.80		2.007	2.009	
	3	50.86	50.57	52.23	50.86	50.54	52.23	273.4	268.6	106.77	40.45		1.999	2.001	
28 วัน	1	50.82	50.68	51.55	50.79	50.63	51.44	270.9	264.3	110.53	42.44	42.50	1.991	1.998	1.984
	2	50.80	50.32	52.15	50.82	50.28	52.22	269.2	263.2	111.01	42.28		1.974	1.973	
	3	50.89	50.54	52.28	50.87	50.53	52.27	272.6	266.4	112.99	42.78		1.981	1.983	

ตารางที่ ค-26 กำลังอัดของจีโอฟอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P20O15-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)
หลังแกะแบบทันที (Q)				เวลาทดสอบ (T)				Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.87	50.86	51.98	50.87	50.86	51.98	273.1	273.1	86.97	32.90	34.41	2.031	2.031	2.038
	2	51.02	49.50	52.15	51.02	49.50	52.15	266.9	266.9	88.98	34.47		2.027	2.027	
	3	50.96	50.87	51.51	50.96	50.87	51.51	274.8	274.8	93.94	35.85		2.058	2.058	
6 ชม.	1	50.98	50.87	51.34	50.98	50.87	51.34	271.7	270.9	92.94	35.59	34.85	2.041	2.035	2.012
	2	50.78	51.24	52.23	50.78	51.24	52.23	272.3	271.4	92.54	34.58		2.004	1.997	
	3	50.88	50.84	51.86	50.88	50.84	51.86	269.8	268.9	90.68	34.39		2.011	2.004	
24 ชม.	1	51.04	50.83	51.27	51.02	50.83	51.26	270.4	268.8	92.47	35.49	35.62	2.021	2.022	2.005
	2	51.07	50.85	51.88	51.06	50.84	51.85	270.1	268.7	93.88	35.61		1.994	1.996	
	3	50.90	50.75	51.87	50.89	50.74	51.84	269.1	267.4	94.09	35.77		1.996	1.998	
7 วัน	1	50.87	50.54	51.16	50.85	50.51	51.22	272.2	266.6	92.70	35.83	34.83	2.027	2.027	2.011
	2	50.96	50.67	52.12	50.93	50.66	52.11	272.1	267.4	87.49	33.14		1.987	1.989	
	3	50.99	50.40	51.53	50.97	50.37	51.51	272.0	266.7	92.14	35.51		2.014	2.017	
28 วัน	1	50.87	50.56	51.82	50.87	50.51	51.79	270.6	264.4	102.47	39.17	38.05	1.984	1.987	1.994
	2	50.85	50.84	51.80	50.83	50.76	51.78	272.0	265.9	99.25	37.76		1.986	1.990	
	3	50.77	50.43	51.13	50.73	50.44	51.06	268.5	262.0	95.82	37.20		2.001	2.005	

ตารางที่ ค-27 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

Control-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง	กำลังอัด	กำลังอัด	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น	หนาแน่น	หนาแน่น
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.90	50.68	51.98	50.90	50.68	51.98	278.3	278.3	184.05	69.87	70.66	2.075	2.075	2.084
	2	50.91	50.39	51.19	50.91	50.39	51.19	274.7	274.7	188.22	72.97		2.092	2.092	
	3	50.90	50.61	51.63	50.90	50.61	51.63	277.2	277.2	180.70	69.15		2.084	2.084	
6 ชม.	1	50.88	50.52	51.75	50.88	50.52	51.75	276.4	275.3	184.62	70.62	69.38	2.078	2.070	2.064
	2	50.84	50.15	52.20	50.84	50.15	52.20	275.4	274.6	180.40	68.91		2.069	2.063	
	3	50.90	50.52	51.64	50.90	50.52	51.64	274.9	273.6	178.98	68.60		2.070	2.060	
24 ชม.	1	50.86	50.57	51.49	50.85	50.53	51.42	276.4	271.9	179.76	69.18	69.02	2.087	2.058	2.057
	2	50.86	50.29	51.51	50.85	50.30	51.48	275.3	271.8	182.75	70.57		2.090	2.064	
	3	50.81	50.61	51.80	50.81	50.62	51.77	277.3	272.7	176.35	67.29		2.082	2.048	
7 วัน	1	50.97	50.65	52.24	50.94	50.62	52.18	280.3	275.0	184.42	69.82	69.59	2.078	2.044	2.047
	2	51.10	50.92	51.44	50.97	50.90	51.35	278.7	274.7	184.98	70.77		2.082	2.062	
	3	50.90	50.63	51.73	50.87	50.59	51.72	275.5	270.8	178.42	68.19		2.067	2.035	
28 วัน	1	51.30	50.91	51.77	51.23	50.90	51.72	278.1	268.8	180.62	68.61	67.30	2.057	1.993	1.998
	2	50.96	50.83	52.03	50.95	50.85	52.05	278.9	269.7	176.14	66.55		2.069	2.000	
	3	51.00	50.68	51.95	50.99	50.63	51.88	277.4	268.1	175.34	66.75		2.066	2.002	

ตารางที่ ค-28 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	51.08	50.94	52.20	51.08	50.94	52.20	281.9	281.9	159.09	59.83	61.30	2.075	2.075	2.076
	2	51.16	50.95	51.83	51.16	50.95	51.83	279.8	279.8	160.47	60.77		2.071	2.071	
	3	50.93	50.83	51.87	50.93	50.83	51.87	279.5	279.5	166.93	63.31		2.081	2.081	
6 ชม.	1	50.84	50.82	51.64	50.84	50.82	51.64	275.7	274.6	160.28	61.07	61.46	2.066	2.058	2.061
	2	50.88	50.58	51.72	50.88	50.58	51.72	274.8	273.6	158.98	60.77		2.065	2.056	
	3	50.87	50.49	51.42	50.87	50.49	51.42	274.5	273.2	162.32	62.52		2.078	2.069	
24 ชม.	1	51.00	50.56	51.29	50.98	50.40	51.26	273.1	270.1	157.75	61.06	62.69	2.065	2.051	2.057
	2	50.96	50.53	51.28	50.93	50.48	51.28	273.2	270.7	161.42	62.36		2.069	2.053	
	3	50.87	50.64	51.47	50.86	50.53	51.46	276.2	273.2	168.13	64.66		2.083	2.066	
7 วัน	1	50.94	50.89	51.84	50.93	50.81	51.69	278.7	271.0	168.06	63.99	63.91	2.074	2.026	2.019
	2	50.86	50.53	51.92	50.79	50.53	51.86	276.8	269.2	164.23	62.67		2.074	2.023	
	3	50.84	50.42	51.72	50.84	50.42	51.70	274.1	266.1	169.63	65.07		2.067	2.008	
28 วัน	1	50.80	50.52	52.13	50.82	50.36	52.23	278.4	267.9	168.86	64.20	63.64	2.081	2.004	2.005
	2	50.81	50.05	52.28	50.82	50.15	52.24	277.0	267.3	166.23	63.45		2.083	2.008	
	3	50.78	50.23	51.88	50.87	50.42	51.86	276.1	266.4	165.42	63.26		2.086	2.003	

ตารางที่ ค-29 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P20-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.97	50.45	51.63	50.97	50.45	51.63	274.7	274.7	71.90	27.60	28.20	2.069	2.069	2.070
	2	51.00	50.66	51.44	51.00	50.66	51.44	274.1	274.1	69.18	26.55		2.062	2.062	
	3	51.00	50.39	51.42	51.00	50.39	51.42	274.6	274.6	78.92	30.46		2.078	2.078	
6 ชม.	1	50.87	50.48	51.44	50.87	50.48	51.44	274.3	273.8	90.32	34.78	32.71	2.077	2.073	2.073
	2	50.86	50.47	51.43	50.86	50.47	51.43	275.8	275.2	84.21	32.44		2.089	2.085	
	3	50.96	50.84	51.54	50.96	50.84	51.54	276.3	275.4	80.97	30.90		2.069	2.062	
24 ชม.	1	50.93	50.41	51.98	50.93	50.45	51.97	274.9	272.6	107.42	41.00	41.08	2.060	2.041	2.035
	2	50.97	50.28	51.73	50.95	50.29	51.72	272.0	269.6	109.80	42.21		2.052	2.034	
	3	50.93	50.71	51.64	50.90	50.64	51.69	273.1	270.4	104.81	40.02		2.048	2.029	
7 วัน	1	50.91	50.46	51.56	50.88	50.36	51.45	269.2	261.0	112.79	43.53	41.84	2.032	1.980	1.966
	2	50.96	50.87	52.03	50.92	50.86	52.07	271.8	263.9	106.06	40.05		2.015	1.957	
	3	51.04	50.71	51.42	50.95	50.37	51.35	266.7	258.5	108.47	41.94		2.004	1.962	
28 วัน	1	50.94	50.48	51.93	50.92	50.41	51.88	271.0	260.6	128.20	49.02	48.69	2.029	1.957	1.964
	2	50.91	50.84	51.72	50.83	50.83	51.61	271.0	261.0	127.52	48.61		2.024	1.957	
	3	50.85	50.44	51.79	50.84	50.37	51.71	272.2	262.0	126.15	48.43		2.049	1.979	

ตารางที่ ค-30 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P30-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P30-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.89	50.67	51.96	50.89	50.67	51.96	278.5	278.5	120.57	45.80	43.62	2.079	2.079	2.078
	2	50.89	50.09	52.06	50.89	50.09	52.06	275.8	275.8	110.64	42.43		2.078	2.078	
	3	50.95	50.32	51.86	50.95	50.32	51.86	276.1	276.1	111.30	42.65		2.077	2.077	
6 ชม.	1	50.86	50.52	51.86	50.86	50.52	51.86	276.0	275.2	112.43	42.91	43.91	2.071	2.065	2.064
	2	50.88	50.15	52.15	50.88	50.15	52.15	275.2	274.6	115.08	44.00		2.068	2.064	
	3	50.92	50.54	51.64	50.92	50.54	51.64	274.8	274.1	116.98	44.82		2.068	2.063	
24 ชม.	1	50.91	50.32	51.78	50.87	50.33	51.77	276.2	274.5	115.77	44.43	44.21	2.082	2.071	2.063
	2	50.88	50.52	51.72	50.88	50.52	51.71	275.6	273.9	117.10	44.82		2.073	2.061	
	3	51.09	50.88	51.55	51.07	50.83	51.53	277.2	275.3	113.64	43.39		2.069	2.058	
7 วัน	1	50.93	50.55	51.61	50.89	50.57	51.53	276.0	273.8	118.65	45.53	45.60	2.077	2.065	2.065
	2	50.79	50.76	51.12	50.93	50.74	51.08	274.1	272.6	114.02	43.99		2.080	2.065	
	3	50.97	50.47	51.74	50.96	50.44	51.74	276.2	274.5	123.37	47.27		2.075	2.064	
28 วัน	1	51.03	50.94	51.96	51.02	50.92	51.92	282.2	277.6	124.58	47.12	46.28	2.089	2.058	2.055
	2	51.12	51.00	51.46	51.02	50.94	51.46	279.2	275.0	122.42	46.70		2.081	2.056	
	3	51.02	50.70	52.02	51.00	50.69	51.98	280.1	275.5	118.58	45.00		2.082	2.050	

ตารางที่ ค-31 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O5-4 ปรมิอนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

O5-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.90	50.63	52.44	50.90	50.63	52.44	273.5	273.5	175.03	65.92	66.51	2.024	2.024	2.043
	2	50.94	50.51	52.15	50.94	50.51	52.15	275.5	275.5	179.67	68.21		2.053	2.053	
	3	50.99	50.85	52.26	50.99	50.85	52.26	278.1	278.1	173.81	65.41		2.052	2.052	
6 ชม.	1	50.87	50.74	52.28	50.87	50.74	52.28	275.4	274.3	175.54	66.17	66.61	2.041	2.033	2.039
	2	50.93	50.82	52.13	50.93	50.82	52.13	276.2	275.2	172.87	65.25		2.047	2.040	
	3	50.88	50.28	51.98	50.88	50.28	51.98	273.5	272.0	178.76	68.40		2.057	2.045	
24 ชม.	1	50.82	50.70	52.09	50.80	50.64	52.07	274.8	273.1	182.14	69.08	67.26	2.047	2.039	2.036
	2	50.75	50.18	52.27	50.74	50.18	52.25	272.1	270.6	175.24	66.84		2.044	2.034	
	3	50.73	50.72	51.83	50.71	50.72	51.83	272.4	271.1	173.13	65.86		2.043	2.034	
7 วัน	1	50.86	50.65	52.35	50.85	50.50	52.34	275.3	268.2	183.27	69.34	68.43	2.041	1.995	2.015
	2	51.00	50.80	52.60	50.96	50.80	50.58	277.0	270.2	178.36	69.42		2.033	2.064	
	3	51.33	50.90	52.33	51.33	50.88	52.31	278.0	271.3	177.09	66.54		2.033	1.986	
28 วัน	1	51.17	51.03	52.40	51.11	51.00	52.39	279.2	269.7	190.23	71.20	71.53	2.041	1.975	1.982
	2	50.96	50.78	51.89	50.95	50.76	51.88	274.7	265.5	189.04	71.78		2.046	1.979	
	3	50.94	50.55	51.84	50.90	50.46	51.82	274.3	265.0	187.24	71.61		2.055	1.991	

ตารางที่ ค-32 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

O10-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	51.43	50.86	52.24	51.43	50.86	52.24	278.5	278.5	154.56	58.17	60.26	2.038	2.038	2.048
	2	50.84	49.33	52.35	50.84	49.33	52.35	269.2	269.2	156.94	60.77		2.050	2.050	
	3	50.79	50.81	52.37	50.79	50.81	52.37	277.8	277.8	164.52	61.83		2.056	2.056	
6 ชม.	1	50.97	50.53	52.22	50.97	50.53	52.22	275.3	274.4	156.25	59.22	60.39	2.047	2.040	2.038
	2	51.03	50.48	52.36	51.03	50.48	52.36	276.0	274.8	158.86	60.10		2.046	2.037	
	3	50.94	50.52	52.02	50.94	50.52	52.02	274.2	272.8	162.54	61.85		2.048	2.038	
24 ชม.	1	51.05	50.51	52.14	50.95	50.49	52.05	274.2	272.3	155.93	59.33	60.44	2.039	2.034	2.027
	2	50.98	50.94	51.98	50.91	50.90	51.97	275.0	273.4	153.52	58.04		2.037	2.030	
	3	50.85	50.50	52.38	50.84	50.45	52.36	273.1	271.1	168.94	63.95		2.030	2.019	
7 วัน	1	51.06	50.56	51.39	51.04	50.54	51.36	272.5	265.3	162.36	62.55	61.74	2.054	2.002	1.994
	2	51.02	49.98	52.35	50.91	49.96	52.36	272.8	265.9	156.04	59.65		2.044	1.997	
	3	51.45	50.90	51.95	51.45	50.90	51.94	277.0	269.8	166.64	63.03		2.036	1.984	
28 วัน	1	50.81	50.61	52.12	50.79	50.53	52.10	275.1	264.0	169.11	64.24	66.00	2.053	1.974	1.982
	2	50.96	50.33	52.20	50.83	50.25	52.20	274.2	265.0	169.50	64.62		2.048	1.988	
	3	50.85	50.66	52.41	50.85	50.64	52.40	277.1	267.8	183.50	69.15		2.052	1.985	

ตารางที่ ค-33 กำลังอัดของซีโอฟอติเมอร์มอร์ตาร์ O15-4 ปรมิอนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

O15-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.80	50.56	52.37	50.80	50.56	52.37	278.5	278.5	151.59	57.25	57.05	2.070	2.070	2.075
	2	50.85	50.59	51.50	50.85	50.59	51.50	274.9	274.9	141.16	54.18		2.075	2.075	
	3	50.88	50.45	51.66	50.88	50.45	51.66	275.8	275.8	155.63	59.71		2.080	2.080	
6 ชม.	1	51.02	50.38	51.46	51.02	50.38	51.46	275.3	274.5	156.23	60.26	58.81	2.081	2.075	2.064
	2	50.84	50.62	51.72	50.84	50.62	51.72	274.4	272.8	153.48	58.62		2.062	2.050	
	3	50.92	50.32	52.13	50.92	50.32	52.13	277.6	276.2	150.98	57.56		2.078	2.068	
24 ชม.	1	51.13	50.78	52.04	51.05	50.76	51.96	279.0	276.3	162.86	61.75	61.75	2.065	2.052	2.052
	2	51.07	50.82	52.28	51.07	50.71	52.21	279.4	276.9	166.80	63.00		2.059	2.048	
	3	50.83	50.71	52.28	50.82	50.69	52.24	279.4	276.7	160.20	60.50		2.073	2.056	
7 วัน	1	50.80	50.58	52.07	50.77	50.28	52.10	278.2	271.3	171.47	65.46	66.45	2.079	2.040	2.040
	2	50.75	50.07	52.28	50.72	50.03	52.24	276.9	270.0	177.34	67.85		2.084	2.037	
	3	50.76	50.21	52.00	50.73	50.19	51.96	277.5	270.4	172.21	66.03		2.094	2.044	
28 วัน	1	50.96	50.82	51.52	50.91	50.83	51.51	277.8	269.0	138.77	53.00	63.86	2.082	2.018	2.015
	2	50.82	50.55	52.14	50.79	50.52	52.08	277.6	269.6	168.08	63.88		2.072	2.017	
	3	50.80	50.42	52.19	50.80	50.41	52.19	276.9	268.4	167.96	63.84		2.071	2.008	

ตารางที่ ค-34 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O5-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10O5-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.81	50.78	51.54	50.81	50.78	51.54	272.5	272.5	137.68	52.61	53.63	2.049	2.049	2.052
	2	51.04	49.46	51.83	51.04	49.46	51.83	267.5	267.5	140.67	54.87		2.044	2.044	
	3	51.32	50.81	51.69	51.32	50.81	51.69	278.1	278.1	140.27	53.41		2.063	2.063	
6 ชม.	1	50.66	50.85	51.80	50.66	50.85	51.80	273.4	272.6	147.67	56.06	55.65	2.049	2.043	2.040
	2	51.02	50.46	51.84	51.02	50.46	51.84	274.6	273.8	145.21	55.51		2.058	2.052	
	3	50.85	50.68	52.21	50.85	50.68	52.21	273.8	272.6	146.53	55.38		2.035	2.026	
24 ชม.	1	51.16	50.95	52.03	51.16	50.94	52.02	278.5	275.8	148.57	56.07	56.11	2.054	2.034	2.047
	2	51.14	50.11	51.85	51.05	49.94	51.81	273.3	271.1	142.79	55.19		2.057	2.052	
	3	51.13	50.55	51.79	51.04	50.45	51.73	276.2	273.6	148.99	57.09		2.063	2.054	
7 วัน	1	51.00	50.48	51.70	50.99	50.46	51.67	275.3	267.0	145.88	55.95	57.33	2.068	2.008	2.011
	2	51.11	50.40	51.94	51.01	50.28	51.91	275.1	267.7	157.01	60.16		2.056	2.011	
	3	50.98	50.73	51.55	50.97	50.72	51.53	275.9	268.3	146.02	55.87		2.069	2.014	
28 วัน	1	50.84	50.59	51.48	50.90	50.52	51.47	274.4	265.0	119.72	46.04	58.12	2.072	2.0022	2.003
	2	50.90	50.85	51.73	50.89	50.86	51.69	276.4	267.2	155.97	59.33		2.064	1.9972	
	3	51.01	50.71	51.67	51.01	50.56	51.64	276.5	267.5	148.59	56.91		2.069	2.0085	

ตารางที่ ค-35 กำลังอัดของซีโอฟอติเมอร์มอร์ตาร์ P10O10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10O10-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.94	50.90	51.44	50.94	50.90	51.44	276.6	276.6	125.29	47.85	49.36	2.074	2.074	2.087
	2	51.06	49.29	51.34	51.06	49.29	51.34	274.1	274.1	128.57	50.81		2.121	2.121	
	3	50.82	50.86	51.16	50.82	50.86	51.16	273.3	273.3	128.57	49.41		2.067	2.067	
6 ชม.	1	50.94	50.52	51.54	50.94	50.52	51.54	275.3	274.5	128.86	49.49	49.65	2.076	2.070	2.072
	2	50.88	50.87	51.52	50.88	50.87	51.52	274.4	272.8	128.56	49.05		2.058	2.046	
	3	50.80	50.48	51.24	50.80	50.48	51.24	277.6	276.2	130.42	50.42		2.113	2.102	
24 ชม.	1	51.41	50.90	51.32	51.39	50.84	51.30	277.5	276.4	130.62	50.08	48.90	2.066	2.062	2.052
	2	51.10	49.29	51.49	50.97	49.28	51.47	267.6	266.4	121.01	47.71		2.063	2.061	
	3	50.94	50.86	51.85	50.93	50.86	51.84	274.0	273.0	118.79	45.05		2.040	2.033	
7 วัน	1	50.96	50.54	51.55	50.94	50.52	51.54	274.3	268.5	129.88	49.88	48.53	2.066	2.024	2.039
	2	51.05	50.89	51.53	50.88	50.87	51.52	277.3	272.5	123.67	47.19		2.071	2.044	
	3	50.84	50.49	51.32	50.80	50.48	51.24	274.0	269.2	146.15	56.50		2.080	2.049	
28 วัน	1	51.04	50.60	51.63	51.03	50.58	51.50	277.0	269.5	130.31	50.03	52.41	2.077	2.027	2.024
	2	51.03	50.00	51.55	51.01	49.99	51.47	274.1	267.0	135.31	52.59		2.084	2.034	
	3	51.02	51.37	51.60	51.01	51.36	51.59	279.4	271.9	144.75	54.63		2.066	2.012	

ตารางที่ ค-36 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O15-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P10O15-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	51.44	50.97	51.72	51.44	50.97	51.72	271.9	271.9	114.19	43.32	45.28	2.005	2.005	2.027
	2	51.02	50.00	51.74	51.02	50.00	51.74	269.1	269.1	121.12	46.82		2.039	2.039	
	3	51.05	50.48	52.05	51.05	50.48	52.05	273.2	273.2	120.06	45.69		2.037	2.037	
6 ชม.	1	50.66	50.85	51.82	50.66	50.85	51.82	272.4	271.6	121.54	46.12	46.28	2.041	2.035	2.025
	2	51.02	50.58	51.82	51.02	50.58	51.82	271.6	270.8	122.42	46.71		2.031	2.025	
	3	50.87	50.88	52.21	50.87	50.88	52.21	273.6	272.5	122.24	46.02		2.025	2.017	
24 ชม.	1	50.83	50.59	51.70	50.81	50.53	51.69	271.5	268.2	120.17	46.01	47.31	2.042	2.021	2.010
	2	50.94	50.30	52.15	50.93	50.29	52.14	270.8	267.7	127.23	48.52		2.027	2.005	
	3	50.92	50.67	51.94	50.88	50.64	51.93	271.6	268.1	124.63	47.39		2.027	2.004	
7 วัน	1	50.91	50.61	52.30	50.88	50.59	52.28	275.6	270.6	126.65	47.89	50.01	2.045	2.011	2.013
	2	50.87	50.20	51.85	50.86	50.14	51.84	272.2	268.1	133.87	51.50		2.056	2.028	
	3	50.80	50.74	52.40	50.77	50.69	52.38	275.1	269.7	134.48	50.65		2.037	2.001	
28 วัน	1	51.11	50.97	52.19	51.10	50.95	52.16	279.5	272.4	146.90	55.28	54.37	2.056	2.006	1.997
	2	51.07	50.77	52.30	51.04	50.74	52.26	274.3	268.1	139.72	52.69		2.023	1.981	
	3	51.02	50.61	51.94	50.95	50.51	51.92	275.5	267.9	144.64	55.15		2.054	2.005	

ตารางที่ ค-37 กำลังอัดของซีโอฟอพลิเมอร์มอร์ตาร์ P2005-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P2005-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	51.04	50.61	51.40	51.04	50.61	51.40	275.8	275.8	121.06	46.54	45.22	2.077	2.077	2.079
	2	51.00	50.23	51.02	51.00	50.23	51.02	271.9	271.9	113.42	44.26		2.080	2.080	
	3	50.97	50.70	51.10	50.97	50.70	51.10	274.6	274.6	116.26	44.87		2.079	2.079	
6 ชม.	1	50.94	50.55	51.33	50.94	50.55	51.33	275.4	274.3	122.64	47.27	46.84	2.084	2.075	2.078
	2	50.96	50.57	51.20	50.96	50.57	51.20	275.6	275.3	121.68	47.00		2.089	2.086	
	3	51.09	50.60	51.40	51.09	50.60	51.40	276.4	275.3	120.29	46.25		2.080	2.072	
24 ชม.	1	50.97	50.57	51.22	50.94	50.52	51.11	275.6	275.2	121.15	46.92	48.39	2.088	2.092	2.089
	2	50.97	50.60	51.32	50.97	50.58	51.29	275.3	274.8	125.35	48.32		2.080	2.078	
	3	51.10	50.98	51.19	51.07	50.83	51.18	278.8	278.5	129.87	49.92		2.091	2.096	
7 วัน	1	51.11	50.61	51.44	51.09	50.53	51.36	276.5	273.5	128.56	49.54	47.94	2.078	2.063	2.072
	2	51.06	51.06	51.44	51.06	50.96	51.43	280.8	278.5	121.27	46.27		2.094	2.081	
	3	51.33	51.08	51.21	51.28	51.06	51.18	280.2	277.8	125.48	48.02		2.087	2.073	
28 วัน	1	51.01	50.50	51.11	50.99	50.49	51.06	274.4	268.4	130.30	50.54	49.87	2.084	2.042	2.040
	2	51.18	51.08	51.23	51.10	51.09	51.14	279.3	273.2	130.90	50.10		2.085	2.046	
	3	51.12	50.77	51.12	51.05	50.70	51.06	274.9	268.6	126.77	48.97		2.072	2.032	

ตารางที่ ค-38 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P20O10-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	51.07	50.42	51.13	51.07	50.42	51.13	272.4	272.4	100.73	39.07	37.60	2.069	2.069	2.060
	2	51.08	50.53	51.69	51.08	50.53	51.69	273.6	273.6	91.73	35.12		2.051	2.051	
	3	50.95	50.64	51.34	50.95	50.64	51.34	272.9	272.9	100.37	38.61		2.060	2.060	
6 ชม.	1	50.96	50.56	51.02	50.96	50.56	51.02	272.4	271.3	102.47	39.72	39.22	2.072	2.064	2.066
	2	50.89	50.60	51.11	50.89	50.60	51.11	274.4	273.2	101.89	39.40		2.085	2.076	
	3	51.12	50.91	51.33	51.12	50.91	51.33	276.2	275.0	100.67	38.52		2.068	2.059	
24 ชม.	1	50.98	50.52	51.01	50.85	50.47	50.98	272.1	272.0	109.53	42.57	40.11	2.070	2.079	2.082
	2	50.91	50.59	51.12	50.87	50.52	51.12	274.5	274.5	105.02	40.66		2.085	2.089	
	3	51.17	50.80	51.61	51.06	50.74	51.58	277.5	277.5	97.08	37.09		2.068	2.077	
7 วัน	1	51.03	50.88	51.26	51.01	50.86	51.24	277.6	274.8	105.97	40.66	41.30	2.065	2.067	2.063
	2	51.14	50.93	51.30	51.11	50.87	51.16	276.3	273.8	109.39	42.03		2.049	2.058	
	3	50.95	50.81	51.36	50.94	50.77	51.27	276.3	273.5	107.22	41.19		2.057	2.063	
28 วัน	1	50.85	50.57	51.26	50.79	50.55	51.23	274.1	269.8	114.16	44.08	45.70	2.047	2.051	2.065
	2	50.83	50.18	51.40	50.77	50.11	51.32	274.6	270.9	121.53	47.26		2.066	2.075	
	3	50.92	50.41	51.68	50.78	50.24	51.52	276.0	271.9	118.42	45.75		2.050	2.069	

ตารางที่ ค-39 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O15-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

P20O15-4															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	51.04	50.72	51.51	51.04	50.72	51.51	271.2	271.2	97.67	37.38	37.04	2.034	2.034	2.031
	2	51.09	51.05	51.14	51.09	51.05	51.14	270.4	270.4	96.77	37.07		2.027	2.027	
	3	51.08	50.96	51.43	51.08	50.96	51.43	271.9	271.9	96.13	36.68		2.031	2.031	
6 ชม.	1	51.03	50.75	51.54	51.03	50.75	51.54	272.2	271.1	98.65	37.72	37.35	2.039	2.031	2.031
	2	51.05	50.82	51.85	51.05	50.82	51.85	275.4	274.0	98.42	37.35		2.047	2.037	
	3	50.98	50.68	51.68	50.98	50.68	51.68	271.4	270.2	96.87	36.99		2.033	2.024	
24 ชม.	1	50.95	50.63	51.54	50.91	50.59	51.59	269.4	267.5	101.88	39.04	39.16	2.012	2.013	2.028
	2	51.16	50.94	51.49	51.13	50.92	51.48	275.5	273.6	102.55	39.12		2.039	2.041	
	3	50.96	50.70	51.54	50.95	50.66	51.50	271.6	269.6	102.62	39.33		2.025	2.028	
7 วัน	1	51.05	50.57	51.35	50.96	50.53	51.33	273.8	269.3	111.84	43.12	41.63	2.031	2.037	2.029
	2	51.07	50.95	52.35	51.02	50.93	52.05	278.6	273.9	105.58	39.83		2.011	2.025	
	3	51.27	50.92	51.81	51.25	50.91	51.80	278.8	273.5	110.64	41.95		2.022	2.024	
28 วัน	1	50.86	50.86	51.83	50.89	50.85	51.83	275.2	271.4	118.47	44.95	44.17	2.024	2.024	2.011
	2	50.94	50.61	51.89	50.92	50.50	51.89	272.3	268.9	114.69	43.77		2.010	2.015	
	3	50.92	50.55	51.71	50.93	50.49	51.63	269.5	264.7	114.16	43.79		1.989	1.994	

ตารางที่ ค-40 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-0.5 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

Control-0.5															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.84	50.66	52.26	50.84	50.66	52.26	275.0	275.0	100.11	37.81	38.63	2.043	2.043	2.036
	2	50.81	49.52	52.29	50.81	49.52	52.29	267.3	267.3	84.90	32.79		2.032	2.032	
	3	50.84	50.72	52.48	50.84	50.72	52.48	275.1	275.1	104.98	39.44		2.033	2.033	
6 ชม.	1	50.77	50.53	51.42	50.77	50.53	51.42	276.8	274.7	145.98	56.18	53.86	2.098	2.082	2.082
	2	50.90	50.82	51.60	50.90	50.82	51.60	279.5	277.9	133.83	51.04		2.094	2.082	
	3	50.97	50.60	52.10	50.97	50.60	52.10	281.5	279.7	143.30	54.36		2.095	2.082	
24 ชม.	1	50.90	50.60	51.84	50.88	50.57	51.81	276.7	273.2	160.22	61.08	62.04	2.072	2.049	2.060
	2	50.96	50.90	52.16	50.95	50.89	52.07	281.1	277.6	166.72	62.80		2.078	2.056	
	3	50.89	50.55	51.94	50.85	50.53	51.94	280.2	276.7	163.43	62.25		2.097	2.073	
7 วัน	1	50.87	50.60	52.26	50.79	50.59	52.15	273.6	266.4	170.08	64.47	64.14	2.034	1.988	1.992
	2	51.04	50.78	52.94	50.97	50.70	52.88	279.5	272.2	164.46	61.34		2.037	1.992	
	3	50.80	50.79	52.59	50.80	50.71	52.43	277.2	269.6	177.13	66.62		2.043	1.996	
28 วัน	1	50.89	50.57	52.16	50.88	50.52	52.15	278.8	267.5	164.42	62.41	61.77	2.077	1.996	2.000
	2	50.96	50.90	52.25	50.93	50.89	52.21	282.2	270.7	157.09	59.12		2.082	2.000	
	3	51.21	50.94	51.80	51.16	50.91	51.76	281.2	270.1	168.09	63.79		2.081	2.004	

ตารางที่ ค-41 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O5-0.5 ป่นร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

O5-0.5															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ	ความ	ความ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น (g/cm ³)	หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	51.44	51.18	50.38	51.44	51.18	50.38	278.3	278.3	113.25	43.92	47.13	2.098	2.098	2.102
	2	51.17	49.94	51.43	51.17	49.94	51.43	275.9	275.9	127.34	49.58		2.099	2.099	
	3	51.13	50.60	51.14	51.13	50.60	51.14	279.0	279.0	123.96	47.90		2.109	2.109	
6 ชม.	1	50.93	50.56	51.67	50.93	50.56	51.67	278.2	277.2	142.87	54.69	54.09	2.091	2.083	2.082
	2	50.92	50.92	51.31	50.92	50.92	51.31	279.5	278.5	139.46	53.38		2.101	2.093	
	3	50.85	50.51	51.97	50.85	50.51	51.97	277.2	276.1	142.28	54.20		2.077	2.068	
24 ชม.	1	51.36	50.87	50.91	51.41	50.81	50.87	280.8	276.9	157.07	60.65	59.80	2.111	2.082	2.090
	2	51.01	49.28	50.85	51.04	49.31	50.76	270.6	267.5	150.58	60.09		2.117	2.093	
	3	50.91	50.83	50.96	50.88	50.83	50.96	280.6	276.5	151.92	58.65		2.128	2.097	
7 วัน	1	50.72	50.60	52.25	50.67	50.60	52.24	279.4	272.6	157.58	59.61	67.30	2.084	2.035	2.051
	2	50.79	49.15	51.98	50.75	49.13	51.90	272.9	266.7	171.52	67.27		2.103	2.061	
	3	51.22	50.73	51.60	51.02	50.68	51.50	280.9	273.9	195.81	75.02		2.095	2.057	
28 วัน	1	50.88	50.49	51.80	50.82	50.46	51.77	275.6	263.9	181.10	69.33	67.01	2.071	1.988	1.997
	2	50.89	50.80	51.89	50.80	50.77	51.83	278.4	267.0	176.13	66.93		2.075	1.997	
	3	50.74	50.40	51.70	50.74	50.31	51.67	276.0	264.4	168.41	64.79		2.088	2.005	

ตารางที่ ค-42 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-2** บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

Control-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.76	50.75	51.04	50.76	50.75	51.04	274.5	274.5	163.58	63.15	62.71	2.088	2.088	2.092
	2	50.89	49.40	51.26	50.89	49.40	51.26	268.4	268.4	156.16	61.67		2.083	2.083	
	3	50.72	50.40	51.13	50.72	50.40	51.13	275.2	275.2	163.16	63.32		2.106	2.106	
6 ชม.	1	50.64	50.62	51.24	50.64	50.62	51.24	274.2	273.5	164.28	63.34	63.84	2.088	2.082	2.052
	2	50.78	50.34	51.68	50.78	50.34	51.68	271.4	270.5	168.67	64.83		2.054	2.048	
	3	50.88	50.79	51.85	50.88	50.79	51.85	272.5	271.6	166.83	63.35		2.034	2.027	
24 ชม.	1	51.21	50.88	52.04	51.23	50.88	52.04	279.8	275.4	173.46	65.51	65.19	2.064	2.030	2.038
	2	50.96	49.94	51.62	50.96	49.89	51.57	271.7	267.4	173.35	67.38		2.068	2.039	
	3	51.00	50.48	51.59	50.98	50.48	51.49	276.0	270.9	162.94	62.69		2.078	2.044	
7 วัน	1	50.95	50.90	51.40	50.94	50.76	51.36	272.6	262.9	181.22	69.51	67.43	2.045	1.980	1.981
	2	50.89	50.88	52.17	50.89	50.87	52.17	276.1	266.4	159.05	59.93		2.044	1.973	
	3	51.11	50.83	51.16	51.11	50.83	51.16	275.0	264.8	169.94	65.35		2.069	1.992	
28 วัน	1	50.82	50.65	51.48	50.88	50.67	51.62	272.6	257.5	173.31	66.26	67.51	2.057	1.935	1.942
	2	50.83	50.63	51.78	50.83	50.64	51.72	273.8	259.2	176.02	67.21		2.055	1.947	
	3	50.91	50.35	51.53	50.98	50.40	51.54	272.6	257.6	179.38	69.06		2.064	1.945	

** Water to Metakaolin = 0.55

ตารางที่ ค-43 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-2** ปรมีร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

Control-2															
อายุ	ตัวอย่าง	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก	น้ำหนัก	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด เฉลี่ย (MPa)	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น	ความ หนาแน่น
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)				(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
		หลังแกะแบบทันที (Q)			เวลาทดสอบ (T)			Q	T			Q	T		
2 ชม.	1	50.97	50.38	51.14	50.97	50.38	51.14	271.4	271.4	123.56	47.96	48.40	2.067	2.067	2.061
	2	50.98	50.42	51.55	50.98	50.42	51.55	273.5	273.5	122.13	46.99		2.064	2.064	
	3	50.85	50.51	51.74	50.85	50.51	51.74	272.9	272.9	131.32	50.25		2.054	2.054	
6 ชม.	1	50.68	50.82	51.63	50.68	50.82	51.63	273.1	271.8	127.42	48.56	48.95	2.054	2.044	2.038
	2	50.75	50.44	51.68	50.75	50.44	51.68	271.3	270.9	126.86	48.67		2.051	2.048	
	3	50.81	50.42	51.62	50.81	50.42	51.62	268.8	267.5	129.12	49.61		2.033	2.023	
24 ชม.	1	50.97	50.92	52.07	50.95	50.92	52.07	276.8	270.0	128.48	48.46	50.39	2.048	1.999	2.004
	2	51.04	50.93	51.34	51.04	50.89	51.32	272.5	266.9	136.57	52.29		2.042	2.002	
	3	51.00	50.72	51.16	50.98	50.67	51.11	273.1	265.4	130.59	50.43		2.064	2.010	
7 วัน	1	50.87	50.86	51.70	50.85	50.83	51.69	274.1	259.8	131.95	50.22	51.20	2.049	1.945	1.934
	2	50.80	50.49	51.74	50.79	50.48	51.65	271.7	257.9	132.95	50.99		2.047	1.948	
	3	50.86	50.39	51.74	50.86	50.38	51.72	268.1	253.3	136.48	52.38		2.022	1.911	
28 วัน	1	50.78	50.39	51.50	50.84	50.29	51.67	270.7	252.3	155.16	59.71	60.18	2.054	1.910	1.905
	2	50.80	50.18	52.01	50.83	50.20	52.08	270.1	252.2	125.28	47.92		2.037	1.898	
	3	50.77	50.20	51.94	50.80	50.25	52.02	271.8	253.1	158.53	60.65		2.053	1.906	

** Water to Metakaolin = 0.65

ภาคผนวก ง

การหัดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ ง-1 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 247.57 mm				L2 = 247.37 mm				L3 = 249.49 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	1.139	0	377.9	0	0.936	0	388.1	0	3.062	0	394.4	0	0	0	29.0	68
1	1.138	-0.00040	365.9	-3.18	0.929	-0.00283	376.1	-3.09	3.050	-0.00481	381.9	-3.17	-0.00382	-3.15	26.4	75
2	1.132	-0.00283	365.0	-3.41	0.913	-0.00930	374.9	-3.40	3.036	-0.01042	380.8	-3.45	-0.00986	-3.42	30.4	68
3	1.110	-0.01171	363.1	-3.92	0.898	-0.01536	372.4	-4.05	3.015	-0.01884	378.3	-4.08	-0.01530	-4.01	28.3	70
4	1.100	-0.01575	362.8	-4.00	0.888	-0.01940	371.6	-4.25	3.012	-0.02004	377.4	-4.31	-0.01840	-4.19	28.8	71
5	1.088	-0.02060	362.0	-4.21	0.872	-0.02587	370.6	-4.51	2.991	-0.02846	376.5	-4.54	-0.02498	-4.42	30.2	63
6	1.073	-0.02666	361.6	-4.31	0.854	-0.03315	370.6	-4.51	2.970	-0.03687	376.1	-4.64	-0.03223	-4.49	30.4	68
7	1.063	-0.03070	361.3	-4.39	0.838	-0.03962	370.0	-4.66	2.963	-0.03968	375.6	-4.77	-0.03667	-4.61	30.6	67
8	1.051	-0.03555	361.5	-4.34	0.837	-0.04002	370.1	-4.64	2.958	-0.04168	375.7	-4.74	-0.03908	-4.57	29.0	70
9	1.048	-0.03676	361.6	-4.31	0.849	-0.03517	370.5	-4.53	2.966	-0.03848	376.0	-4.67	-0.03680	-4.50	30.4	66
10	1.043	-0.03878	361.6	-4.31	0.846	-0.03638	370.2	-4.61	2.959	-0.04128	376.0	-4.67	-0.03881	-4.53	30.3	65
11	1.038	-0.04080	361.4	-4.37	0.838	-0.03962	370.2	-4.61	2.952	-0.04409	375.6	-4.77	-0.04150	-4.58	29.5	66
12	1.038	-0.04080	361.4	-4.37	0.838	-0.03962	370.2	-4.61	2.950	-0.04489	375.6	-4.77	-0.04177	-4.58	29.9	69
13	1.042	-0.03918	361.5	-4.34	0.838	-0.03962	370.1	-4.64	2.949	-0.04529	375.7	-4.74	-0.04136	-4.57	30.0	69
14	1.038	-0.04080	361.5	-4.34	0.838	-0.03962	370.1	-4.64	2.949	-0.04529	375.7	-4.74	-0.04190	-4.57	30.0	68
15	1.033	-0.04282	361.5	-4.34	0.838	-0.03962	370.2	-4.61	2.950	-0.04489	375.9	-4.69	-0.04244	-4.55	30.1	69
20	1.028	-0.04484	361.3	-4.39	0.815	-0.04892	369.9	-4.69	2.935	-0.05090	375.4	-4.82	-0.04822	-4.63	30.8	65
30	1.000	-0.05615	360.4	-4.63	0.792	-0.05821	369.1	-4.90	2.911	-0.06052	374.9	-4.94	-0.05829	-4.82	30.5	66

ตารางที่ ง-2 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.82 mm				L2 = 249.33 mm				L3 = 248.86 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.385	0	395.9	0	2.904	0	383.2	0	2.427	0	382.2	0	0	0	29.3	64
1	4.385	0	384.0	-3.01	2.873	-0.01243	372.2	-2.87	2.382	-0.01808	370.5	-3.06	-0.01526	-2.98	27.2	74
2	4.349	-0.01435	382.0	-3.51	2.835	-0.02767	370.2	-3.39	2.348	-0.03175	368.4	-3.61	-0.02459	-3.50	30.9	68
3	4.345	-0.01595	379.0	-4.27	2.822	-0.03289	367.1	-4.20	2.334	-0.03737	365.5	-4.37	-0.02874	-4.28	28.0	71
4	4.333	-0.02073	378.0	-4.52	2.808	-0.03850	366.1	-4.46	2.325	-0.04099	364.5	-4.63	-0.03341	-4.54	28.6	75
5	4.323	-0.02472	377.1	-4.75	2.790	-0.04572	365.0	-4.75	2.307	-0.04822	363.6	-4.87	-0.03955	-4.79	28.9	67
6	4.307	-0.03110	375.6	-5.13	2.776	-0.05134	363.5	-5.14	2.291	-0.05465	362.5	-5.15	-0.04570	-5.14	31.1	63
7	4.306	-0.03150	375.3	-5.20	2.772	-0.05294	363.4	-5.17	2.292	-0.05425	362.1	-5.26	-0.04623	-5.21	29.7	67
8	4.299	-0.03429	374.8	-5.33	2.772	-0.05294	362.7	-5.35	2.282	-0.05827	361.2	-5.49	-0.04850	-5.39	30.5	67
9	4.308	-0.03070	375.9	-5.05	2.775	-0.05174	363.7	-5.09	2.283	-0.05786	362.2	-5.23	-0.04677	-5.12	30.4	66
10	4.304	-0.03229	375.3	-5.20	2.772	-0.05294	363.2	-5.22	2.279	-0.05947	361.8	-5.34	-0.04824	-5.25	30.4	66
11	4.299	-0.03429	375.2	-5.23	2.768	-0.05455	363.2	-5.22	2.278	-0.05987	361.8	-5.34	-0.04957	-5.26	29.9	68
12	4.289	-0.03828	375.0	-5.28	2.761	-0.05735	363.0	-5.27	2.270	-0.06309	361.6	-5.39	-0.05291	-5.31	29.8	68
13	4.297	-0.03509	375.3	-5.20	2.762	-0.05695	363.2	-5.22	2.262	-0.06630	361.6	-5.39	-0.05278	-5.27	30.0	69
14	4.296	-0.03548	375.2	-5.23	2.762	-0.05695	363.2	-5.22	2.259	-0.06751	361.7	-5.36	-0.05331	-5.27	30.0	68
15	4.295	-0.03588	375.3	-5.20	2.762	-0.05695	363.4	-5.17	2.254	-0.06952	361.9	-5.31	-0.05412	-5.23	31.2	66
20	4.278	-0.04266	374.7	-5.35	2.751	-0.06136	362.8	-5.32	2.230	-0.07916	361.3	-5.47	-0.06106	-5.38	30.9	65
30	4.262	-0.04904	373.4	-5.68	2.726	-0.07139	361.6	-5.64	2.215	-0.08519	360.0	-5.81	-0.06854	-5.71	31.1	66

ตารางที่ ง-3 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.32 mm				L2 = 249.32 mm				L3 = 249.72 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.894	0	391.5	0	2.886	0	389.0	0	3.293	0	385.1	0	0	0	29.4	62
1	5.838	-0.02219	385.1	-1.63	2.798	-0.03530	382.5	-1.67	3.161	-0.05286	377.8	-1.90	-0.03678	-1.73	28.3	73
2	5.810	-0.03329	382.6	-2.27	2.766	-0.04813	380.0	-2.31	3.139	-0.06167	376.0	-2.36	-0.04071	-2.32	28.8	75
3	5.783	-0.04399	377.7	-3.52	2.737	-0.05976	375.2	-3.55	3.103	-0.07608	371.6	-3.51	-0.05188	-3.53	29.9	62
4	5.788	-0.04201	377.5	-3.58	2.742	-0.05776	374.9	-3.62	3.113	-0.07208	371.3	-3.58	-0.05728	-3.59	30.0	68
5	5.765	-0.05112	375.2	-4.16	2.724	-0.06498	372.8	-4.16	3.094	-0.07969	369.2	-4.13	-0.06526	-4.15	29.6	68
6	5.754	-0.05548	373.7	-4.55	2.703	-0.07340	371.1	-4.60	3.071	-0.08890	367.5	-4.57	-0.07259	-4.57	30.0	69
7	5.758	-0.05390	373.5	-4.60	2.709	-0.07099	371.0	-4.63	3.074	-0.08770	367.5	-4.57	-0.07086	-4.60	29.8	68
8	5.755	-0.05509	373.5	-4.60	2.708	-0.07140	371.0	-4.63	3.072	-0.08850	367.4	-4.60	-0.07166	-4.61	29.0	73
9	5.755	-0.05509	373.0	-4.73	2.708	-0.07140	371.0	-4.63	3.070	-0.08930	367.2	-4.65	-0.07193	-4.67	29.8	70
10	5.755	-0.05509	372.8	-4.78	2.709	-0.07099	370.3	-4.81	3.067	-0.09050	366.8	-4.75	-0.07219	-4.78	31.0	65
11	5.755	-0.05509	372.8	-4.78	2.708	-0.07140	370.3	-4.81	3.067	-0.09050	366.8	-4.75	-0.07233	-4.78	30.2	67
12	5.755	-0.05509	372.7	-4.80	2.709	-0.07099	370.2	-4.83	3.067	-0.09050	366.7	-4.78	-0.07219	-4.80	29.9	69
13	5.756	-0.05469	372.8	-4.78	2.708	-0.07140	370.2	-4.83	3.067	-0.09050	366.7	-4.78	-0.07220	-4.80	31.1	65
14	5.756	-0.05469	372.8	-4.78	2.705	-0.07260	370.2	-4.83	3.067	-0.09050	366.6	-4.80	-0.07260	-4.80	30.0	68
15	5.757	-0.05430	372.6	-4.83	2.704	-0.07300	370.2	-4.83	3.067	-0.09050	366.6	-4.80	-0.07260	-4.82	31.2	66
20	5.735	-0.06301	371.5	-5.11	2.693	-0.07741	369.1	-5.12	3.064	-0.09170	365.4	-5.12	-0.07738	-5.11	29.0	69
30	5.715	-0.07094	370.0	-5.49	2.675	-0.08463	367.8	-5.45	3.040	-0.10131	364.1	-5.45	-0.08563	-5.46	29.7	67

ตารางที่ ง-4 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P30-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 251.64 mm				L2 = 250.95 mm				L3 = 249.87 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.205	0	400.1	0	4.520	0	385.4	0	3.441	0	389.4	0	0	0	29.8	69
1	5.090	-0.04570	396.9	-0.80	4.430	-0.03586	382.5	-0.75	3.378	-0.02521	386.5	-0.74	-0.03559	-0.77	27.7	78
2	5.045	-0.06358	395.3	-1.20	4.385	-0.05380	380.6	-1.25	3.342	-0.03962	384.8	-1.18	-0.05233	-1.21	29.0	72
3	5.010	-0.07749	389.4	-2.67	4.350	-0.06774	375.6	-2.54	3.302	-0.05563	379.5	-2.54	-0.06695	-2.59	28.0	69
4	5.017	-0.07471	388.8	-2.82	4.359	-0.06416	374.7	-2.78	3.309	-0.05283	378.7	-2.75	-0.06390	-2.78	28.3	71
5	5.007	-0.07869	387.0	-3.27	4.340	-0.07173	373.0	-3.22	3.294	-0.05883	376.9	-3.21	-0.06975	-3.23	28.9	70
6	4.991	-0.08504	384.8	-3.82	4.326	-0.07731	370.8	-3.79	3.278	-0.06523	374.6	-3.80	-0.07586	-3.80	30.6	65
7	4.985	-0.08743	384.3	-3.95	4.329	-0.07611	370.2	-3.94	3.278	-0.06523	374.3	-3.88	-0.07626	-3.92	29.8	69
8	4.998	-0.08226	384.1	-4.00	4.331	-0.07531	370.2	-3.94	3.280	-0.06443	374.1	-3.93	-0.07400	-3.96	29.4	70
9	4.994	-0.08385	384.0	-4.02	4.328	-0.07651	370.0	-4.00	3.277	-0.06563	373.8	-4.01	-0.07533	-4.01	29.5	69
10	4.989	-0.08584	383.7	-4.10	4.323	-0.07850	369.7	-4.07	3.268	-0.06924	373.4	-4.11	-0.07786	-4.09	31.0	65
11	4.986	-0.08703	383.5	-4.15	4.320	-0.07970	369.4	-4.15	3.268	-0.06924	373.1	-4.19	-0.07865	-4.16	30.0	68
12	4.985	-0.08743	382.6	-4.37	4.320	-0.07970	368.6	-4.36	3.270	-0.06844	372.7	-4.29	-0.07852	-4.34	30.6	67
13	4.990	-0.08544	382.9	-4.30	4.325	-0.07770	368.9	-4.28	3.272	-0.06763	372.9	-4.24	-0.07693	-4.27	31.1	65
14	4.990	-0.08544	382.9	-4.30	4.326	-0.07731	368.9	-4.28	3.272	-0.06763	372.9	-4.24	-0.07679	-4.27	30.0	68
15	4.995	-0.08345	383.1	-4.25	4.329	-0.07611	369.0	-4.26	3.275	-0.06643	373.1	-4.19	-0.07533	-4.23	29.8	70
20	4.995	-0.08345	381.8	-4.57	4.313	-0.08249	367.7	-4.59	3.258	-0.07324	371.8	-4.52	-0.07973	-4.56	29.4	68
30	4.95	-0.10134	379.1	-5.25	4.294	-0.09006	364.9	-5.32	3.242	-0.07964	369.2	-5.19	-0.09035	-5.25	29.8	67

ตารางที่ ง-5 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O5-1 ปรมีร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.21 mm				L2 = 251.13 mm				L3 = 250.42 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.783	0	396.9	0	4.698	0	386.5	0	3.987	0	398.9	0	0	0	28.4	73
1	2.716	-0.02688	386.0	-2.75	4.642	-0.02230	376.8	-2.51	3.898	-0.03554	388.3	-2.66	-0.02824	-2.64	30.0	71
2	2.695	-0.03531	381.9	-3.78	4.626	-0.02867	372.7	-3.57	3.878	-0.04353	384.1	-3.71	-0.03942	-3.69	30.2	68
3	2.677	-0.04253	377.6	-4.86	4.612	-0.03425	368.3	-4.71	3.862	-0.04992	379.5	-4.86	-0.04623	-4.81	29.6	70
4	2.678	-0.04213	377.2	-4.96	4.605	-0.03703	368.0	-4.79	3.857	-0.05191	379.0	-4.99	-0.04369	-4.91	29.1	69
5	2.657	-0.05056	376.5	-5.14	4.592	-0.04221	367.1	-5.02	3.843	-0.05750	378.2	-5.19	-0.05009	-5.12	29.4	69
6	2.643	-0.05618	375.6	-5.37	4.583	-0.04579	366.4	-5.20	3.840	-0.05870	377.6	-5.34	-0.05356	-5.30	29.1	69
7	2.632	-0.06059	374.7	-5.59	4.570	-0.05097	365.6	-5.41	3.817	-0.06789	376.5	-5.62	-0.05982	-5.54	31.0	65
8	2.638	-0.05818	375.0	-5.52	4.572	-0.05017	365.7	-5.38	3.825	-0.06469	376.9	-5.52	-0.05768	-5.47	29.9	68
9	2.634	-0.05979	375.0	-5.52	4.568	-0.05177	365.6	-5.41	3.823	-0.06549	376.9	-5.52	-0.05902	-5.48	30.0	68
10	2.627	-0.06260	375.0	-5.52	4.562	-0.05416	365.3	-5.49	3.820	-0.06669	377.0	-5.49	-0.06115	-5.50	30.3	65
11	2.627	-0.06260	375.0	-5.52	4.563	-0.05376	365.2	-5.51	3.820	-0.06669	377.0	-5.49	-0.06101	-5.51	30.1	67
12	2.627	-0.06260	375.2	-5.47	4.568	-0.05177	365.8	-5.36	3.822	-0.06589	376.9	-5.52	-0.06008	-5.45	30.6	67
13	2.629	-0.06179	375.4	-5.42	4.567	-0.05216	366.0	-5.30	3.821	-0.06629	377.0	-5.49	-0.06008	-5.40	31.2	65
14	2.629	-0.06179	375.4	-5.42	4.567	-0.05216	366.0	-5.30	3.820	-0.06669	377.0	-5.49	-0.06022	-5.40	30.2	68
15	2.630	-0.06139	375.6	-5.37	4.572	-0.05017	366.3	-5.23	3.818	-0.06749	377.8	-5.29	-0.05968	-5.29	30.5	69
20	2.612	-0.06862	375.2	-5.47	4.551	-0.05854	365.7	-5.38	3.802	-0.07388	376.8	-5.54	-0.06701	-5.46	30.5	68
30	2.58	-0.08146	374.1	-5.74	4.519	-0.07128	364.8	-5.61	3.775	-0.08466	376	-5.74	-0.07913	-5.70	30.0	65

ตารางที่ ง-6 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.39 mm				L2 = 252.58 mm				L3 = 249.37 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	1.959	0	378.4	0	6.147	0	389.4	0	2.938	0	395.1	0	0	0	27.6	75
1	1.880	-0.03180	372.4	-1.59	6.056	-0.03603	382.4	-1.80	2.865	-0.02927	386.3	-2.23	-0.03237	-1.87	29.1	70
2	1.855	-0.04187	367.7	-2.83	6.037	-0.04355	377.4	-3.08	2.847	-0.03649	382.0	-3.32	-0.04064	-3.07	30.2	67
3	1.854	-0.04227	363.8	-3.86	6.030	-0.04632	373.7	-4.03	2.835	-0.04130	378.4	-4.23	-0.04330	-4.04	29.5	69
4	1.838	-0.04871	363.0	-4.07	6.013	-0.05305	372.9	-4.24	2.818	-0.04812	377.5	-4.45	-0.04996	-4.25	29.0	69
5	1.831	-0.05153	362.2	-4.28	6.001	-0.05780	372.1	-4.44	2.803	-0.05414	376.4	-4.73	-0.05449	-4.49	29.8	66
6	1.818	-0.05677	361.2	-4.55	5.992	-0.06137	371.1	-4.70	2.792	-0.05855	375.9	-4.86	-0.05889	-4.70	29.8	68
7	1.810	-0.05999	360.6	-4.70	5.996	-0.05978	370.7	-4.80	2.799	-0.05574	375.6	-4.94	-0.05850	-4.81	30.8	68
8	1.817	-0.05717	361.8	-4.39	5.998	-0.05899	371.9	-4.49	2.805	-0.05333	376.5	-4.71	-0.05650	-4.53	29.8	70
9	1.811	-0.05958	361.3	-4.52	5.997	-0.05939	371.5	-4.60	2.798	-0.05614	376.2	-4.78	-0.05837	-4.63	30.4	68
10	1.797	-0.06522	360.8	-4.65	5.982	-0.06533	370.9	-4.75	2.787	-0.06055	375.7	-4.91	-0.06370	-4.77	30.6	66
11	1.798	-0.06482	360.6	-4.70	5.977	-0.06731	370.9	-4.75	2.784	-0.06176	375.8	-4.88	-0.06463	-4.78	29.6	68
12	1.794	-0.06643	360.5	-4.73	5.976	-0.06770	370.8	-4.78	2.784	-0.06176	375.6	-4.94	-0.06530	-4.81	30.1	67
13	1.792	-0.06723	360.5	-4.73	5.975	-0.06810	370.7	-4.80	2.782	-0.06256	375.4	-4.99	-0.06596	-4.84	30.3	69
14	1.792	-0.06723	360.5	-4.73	5.976	-0.06770	370.6	-4.83	2.780	-0.06336	375.4	-4.99	-0.06610	-4.85	30.2	68
15	1.798	-0.06482	361.3	-4.52	5.981	-0.06572	371.3	-4.65	2.778	-0.06416	376.3	-4.76	-0.06490	-4.64	30.8	69
20	1.786	-0.06965	360.4	-4.76	5.969	-0.07047	370.5	-4.85	2.768	-0.06817	375.4	-4.99	-0.06943	-4.87	31.0	66
30	1.757	-0.08132	358.8	-5.18	5.93	-0.08591	369.4	-5.14	2.747	-0.07659	374	-5.34	-0.08128	-5.22	30.3	65

ตารางที่ ง-7 การหัดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O15-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.42 mm				L2 = 251.98 mm				L3 = 250.37 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หัดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หัดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หัดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หัดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.988	0	382.6	0	5.550	0	395.4	0	3.938	0	378.5	0	0	0	28.1	79
1	2.892	-0.03849	375.6	-1.83	5.450	-0.03969	387.9	-1.90	3.880	-0.02317	370.0	-2.25	-0.03378	-1.99	28.9	75
2	2.874	-0.04571	370.9	-3.06	5.426	-0.04921	382.8	-3.19	3.859	-0.03155	365.5	-3.43	-0.04216	-3.23	29.8	62
3	2.870	-0.04731	368.4	-3.71	5.420	-0.05159	379.7	-3.97	3.856	-0.03275	362.8	-4.15	-0.04388	-3.94	27.6	73
4	2.854	-0.05373	366.5	-4.21	5.407	-0.05675	378.3	-4.32	3.839	-0.03954	362.1	-4.33	-0.05001	-4.29	29.3	68
5	2.842	-0.05854	365.9	-4.36	5.405	-0.05754	377.3	-4.58	3.824	-0.04553	360.7	-4.70	-0.05387	-4.55	29.1	67
6	2.832	-0.06255	365.0	-4.60	5.385	-0.06548	376.3	-4.83	3.813	-0.04993	359.7	-4.97	-0.05932	-4.80	30.3	68
7	2.823	-0.06615	364.6	-4.70	5.382	-0.06667	376.0	-4.91	3.810	-0.05112	359.3	-5.07	-0.06132	-4.89	30.4	69
8	2.845	-0.05733	365.3	-4.52	5.395	-0.06151	377.0	-4.65	3.823	-0.04593	360.1	-4.86	-0.05493	-4.68	31.0	66
9	2.832	-0.06255	365.0	-4.60	5.382	-0.06667	376.6	-4.75	3.816	-0.04873	360.0	-4.89	-0.05932	-4.75	29.9	69
10	2.813	-0.07016	364.4	-4.76	5.377	-0.06866	375.9	-4.93	3.802	-0.05432	359.2	-5.10	-0.06438	-4.93	31.4	66
11	2.821	-0.06696	364.1	-4.84	5.379	-0.06786	375.9	-4.93	3.802	-0.05432	359.1	-5.13	-0.06305	-4.96	30.2	69
12	2.820	-0.06736	364.1	-4.84	5.378	-0.06826	375.7	-4.98	3.800	-0.05512	359.1	-5.13	-0.06358	-4.98	30.0	68
13	2.818	-0.06816	364.3	-4.78	5.378	-0.06826	375.6	-5.01	3.800	-0.05512	359.1	-5.13	-0.06385	-4.97	30.4	69
14	2.818	-0.06816	364.5	-4.73	5.377	-0.06866	375.8	-4.96	3.800	-0.05512	359.2	-5.10	-0.06398	-4.93	30.3	68
15	2.818	-0.06816	365.3	-4.52	5.377	-0.06866	376.6	-4.75	3.807	-0.05232	360.3	-4.81	-0.06305	-4.69	30.4	69
20	2.798	-0.07618	364.1	-4.84	5.353	-0.07818	375.5	-5.03	3.782	-0.06231	358.9	-5.18	-0.07222	-5.02	31.5	65
30	2.778	-0.08420	362.8	-5.18	5.325	-0.08929	374.3	-5.34	3.763	-0.06990	357.7	-5.50	-0.08113	-5.34	29.8	67

ตารางที่ ง-8 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O5-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.71 mm				L2 = 250.83 mm				L3 = 248.47 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.281	0	385.4	0	4.400	0	383.9	0	2.043	0	380.1	0	0	0	28.5	73
1	2.217	-0.02573	378.7	-1.74	4.336	-0.02552	377.5	-1.67	1.994	-0.01972	373.1	-1.84	-0.02366	-1.75	28.5	79
2	2.205	-0.03056	374.3	-2.88	4.310	-0.03588	372.9	-2.87	1.997	-0.01851	368.8	-2.97	-0.02832	-2.91	28.8	69
3	2.204	-0.03096	372.2	-3.43	4.312	-0.03508	370.7	-3.44	1.980	-0.02535	366.6	-3.55	-0.03047	-3.47	29.1	70
4	2.183	-0.03940	370.6	-3.84	4.290	-0.04385	369.3	-3.80	1.962	-0.03260	365.3	-3.89	-0.03862	-3.85	30.4	63
5	2.172	-0.04383	369.4	-4.15	4.273	-0.05063	368.2	-4.09	1.950	-0.03743	364.1	-4.21	-0.04396	-4.15	30.6	59
6	2.168	-0.04543	368.4	-4.41	4.277	-0.04904	367.1	-4.38	1.933	-0.04427	363.1	-4.47	-0.04625	-4.42	30.7	67
7	2.166	-0.04624	368.2	-4.46	4.266	-0.05342	366.9	-4.43	1.932	-0.04467	363.1	-4.47	-0.04811	-4.45	29.2	69
8	2.178	-0.04141	368.7	-4.33	4.272	-0.05103	367.1	-4.38	1.940	-0.04145	363.3	-4.42	-0.04463	-4.38	30.5	65
9	2.163	-0.04744	368.4	-4.41	4.273	-0.05063	366.9	-4.43	1.938	-0.04226	363.0	-4.50	-0.04678	-4.45	30.3	65
10	2.162	-0.04785	368.2	-4.46	4.268	-0.05263	366.9	-4.43	1.932	-0.04467	363.0	-4.50	-0.04838	-4.46	29.4	68
11	2.160	-0.04865	368.1	-4.49	4.266	-0.05342	366.7	-4.48	1.930	-0.04548	363.0	-4.50	-0.04918	-4.49	30.0	68
12	2.159	-0.04905	368.0	-4.51	4.264	-0.05422	366.5	-4.53	1.930	-0.04548	362.8	-4.55	-0.04958	-4.53	30.3	68
13	2.159	-0.04905	368.0	-4.51	4.263	-0.05462	366.4	-4.56	1.928	-0.04628	362.6	-4.60	-0.04998	-4.56	30.7	68
14	2.160	-0.04865	368.2	-4.46	4.263	-0.05462	366.5	-4.53	1.930	-0.04548	362.6	-4.60	-0.04958	-4.53	30.2	68
15	2.166	-0.04624	368.6	-4.36	4.262	-0.05502	367.4	-4.30	1.933	-0.04427	363.4	-4.39	-0.04851	-4.35	30.6	68
20	2.151	-0.05227	367.8	-4.57	4.25	-0.05980	366.2	-4.61	1.923	-0.04829	362.5	-4.63	-0.05346	-4.60	30.7	67
30	2.132	-0.05991	366	-5.03	4.228	-0.06857	364.6	-5.03	1.895	-0.05956	360.4	-5.18	-0.06268	-5.08	30.2	66

ตารางที่ ง-9 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.15 mm				L2 = 251.63 mm				L3 = 251.19 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	1.717	0	384.6	0	5.202	0	388.8	0	4.763	0	392.8	0	0	0	28.1	79
1	1.595	-0.04916	378.1	-1.69	5.102	-0.03974	381.7	-1.83	4.692	-0.02827	384.8	-2.04	-0.03906	-1.85	30.9	68
2	1.594	-0.04957	372.2	-3.22	5.095	-0.04252	376.3	-3.22	4.682	-0.03225	379.7	-3.34	-0.04145	-3.26	28.0	70
3	1.596	-0.04876	370.3	-3.72	5.104	-0.03895	374.3	-3.73	4.688	-0.02986	377.8	-3.82	-0.03931	-3.76	29.0	70
4	1.571	-0.05884	368.8	-4.11	5.068	-0.05325	372.9	-4.09	4.659	-0.04140	376.3	-4.20	-0.05116	-4.13	28.7	68
5	1.553	-0.06609	367.5	-4.45	5.066	-0.05405	371.5	-4.45	4.648	-0.04578	374.9	-4.56	-0.05531	-4.48	31.0	66
6	1.551	-0.06690	366.8	-4.63	5.064	-0.05484	370.9	-4.60	4.646	-0.04658	374.0	-4.79	-0.05611	-4.67	29.6	67
7	1.550	-0.06730	366.6	-4.68	5.067	-0.05365	370.5	-4.71	4.643	-0.04777	373.7	-4.86	-0.05624	-4.75	29.6	68
8	1.554	-0.06569	367.0	-4.58	5.073	-0.05127	370.9	-4.60	4.650	-0.04499	374.3	-4.71	-0.05398	-4.63	30.5	65
9	1.552	-0.06649	366.5	-4.71	5.064	-0.05484	370.6	-4.68	4.644	-0.04737	373.8	-4.84	-0.05624	-4.74	30.7	64
10	1.547	-0.06851	366.3	-4.76	5.061	-0.05603	370.5	-4.71	4.642	-0.04817	373.7	-4.86	-0.05757	-4.78	29.5	68
11	1.545	-0.06931	366.2	-4.78	5.060	-0.05643	370.3	-4.76	4.640	-0.04897	373.4	-4.94	-0.05824	-4.83	30.2	67
12	1.545	-0.06931	366.2	-4.78	5.060	-0.05643	370.1	-4.81	4.640	-0.04897	373.5	-4.91	-0.05824	-4.84	30.8	67
13	1.543	-0.07012	366.0	-4.84	5.057	-0.05762	369.9	-4.86	4.632	-0.05215	373.2	-4.99	-0.05996	-4.90	30.8	67
14	1.543	-0.07012	366.0	-4.84	5.057	-0.05762	370.1	-4.81	4.633	-0.05175	373.4	-4.94	-0.05983	-4.86	30.2	68
15	1.545	-0.06931	366.5	-4.71	5.057	-0.05762	370.5	-4.71	4.638	-0.04976	373.8	-4.84	-0.05890	-4.75	30.8	67
20	1.534	-0.07375	365.7	-4.91	5.046	-0.06200	369.4	-4.99	4.632	-0.05215	372.4	-5.19	-0.06263	-5.03	31.0	66
30	1.507	-0.08463	364	-5.36	5.029	-0.06875	367.7	-5.43	4.6	-0.06489	370.5	-5.68	-0.07276	-5.49	29.9	67

ตารางที่ ง-10 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O15-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.56 mm				L2 = 249.67 mm				L3 = 251.99 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.128	0	409.3	0	3.236	0	384.8	0	5.555	0	392.5	0	0	0	27.2	77
1	3.991	-0.05468	403.1	-1.51	3.090	-0.05848	379.0	-1.51	5.471	-0.03334	385.9	-1.68	-0.04883	-1.57	29.0	73
2	3.973	-0.06186	396.7	-3.08	3.066	-0.06809	372.9	-3.09	5.457	-0.03889	379.4	-3.34	-0.05628	-3.17	30.2	61
3	3.974	-0.06146	395.6	-3.35	3.072	-0.06569	372.1	-3.30	5.450	-0.04167	378.8	-3.49	-0.05627	-3.38	30.4	67
4	3.959	-0.06745	393.2	-3.93	3.053	-0.07330	369.6	-3.95	5.428	-0.05040	376.8	-4.00	-0.06372	-3.96	30.0	66
5	3.946	-0.07264	391.3	-4.40	3.040	-0.07850	368.3	-4.29	5.418	-0.05437	375.4	-4.36	-0.06850	-4.35	30.1	69
6	3.945	-0.07304	391.2	-4.42	3.040	-0.07850	368.0	-4.37	5.420	-0.05357	375.3	-4.38	-0.06837	-4.39	30.0	67
7	3.947	-0.07224	391.0	-4.47	3.033	-0.08131	368.2	-4.31	5.418	-0.05437	375.5	-4.33	-0.06931	-4.37	29.8	70
8	3.961	-0.06665	391.6	-4.32	3.045	-0.07650	368.7	-4.18	5.428	-0.05040	376.2	-4.15	-0.06452	-4.22	30.4	68
9	3.936	-0.07663	389.6	-4.81	3.028	-0.08331	367.2	-4.57	5.412	-0.05675	375.0	-4.46	-0.07223	-4.62	30.1	67
10	3.936	-0.07663	389.6	-4.81	3.027	-0.08371	367.2	-4.57	5.412	-0.05675	375.0	-4.46	-0.07236	-4.62	29.9	69
11	3.938	-0.07583	389.7	-4.79	3.026	-0.08411	367.3	-4.55	5.410	-0.05754	375.1	-4.43	-0.07250	-4.59	30.3	68
12	3.937	-0.07623	389.6	-4.81	3.025	-0.08451	367.3	-4.55	5.410	-0.05754	374.9	-4.48	-0.07276	-4.61	30.8	67
13	3.934	-0.07743	389.5	-4.84	3.023	-0.08531	366.9	-4.65	5.406	-0.05913	374.6	-4.56	-0.07396	-4.68	30.8	67
14	3.935	-0.07703	389.5	-4.84	3.023	-0.08531	366.8	-4.68	5.406	-0.05913	374.8	-4.51	-0.07382	-4.67	30.2	68
15	3.939	-0.07543	389.7	-4.79	3.024	-0.08491	367.7	-4.44	5.410	-0.05754	375.6	-4.31	-0.07263	-4.51	31.3	64
20	3.924	-0.08142	388.6	-5.06	3.021	-0.08612	366.7	-4.70	5.405	-0.05953	374.3	-4.64	-0.07569	-4.80	30.2	68
30	3.899	-0.09140	386.2	-5.64	2.994	-0.09693	364.7	-5.22	5.381	-0.06905	372.5	-5.10	-0.08579	-5.32	30.2	67

ตารางที่ ง-11 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P2005-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.64 mm				L2 = 250.13 mm				L3 = 251.87 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.208	0	397.5	0	3.699	0	383.4	0	5.444	0	392.0	0	0	0	29.6	73
1	4.142	-0.02633	392.2	-1.33	3.617	-0.03278	378.7	-1.23	5.321	-0.04883	387.6	-1.12	-0.03598	-1.23	29.5	71
2	4.117	-0.03631	385.0	-3.14	3.586	-0.04518	372.0	-2.97	5.300	-0.05717	381.0	-2.81	-0.04622	-2.97	28.3	67
3	4.119	-0.03551	384.9	-3.17	3.594	-0.04198	371.6	-3.08	5.294	-0.05955	380.7	-2.88	-0.04568	-3.04	28.0	72
4	4.103	-0.04189	382.6	-3.75	3.575	-0.04957	369.3	-3.68	5.285	-0.06313	378.4	-3.47	-0.05153	-3.63	29.4	68
5	4.093	-0.04588	381.0	-4.15	3.565	-0.05357	367.8	-4.07	5.282	-0.06432	376.9	-3.85	-0.05459	-4.02	29.6	69
6	4.086	-0.04868	380.6	-4.25	3.555	-0.05757	367.2	-4.23	5.272	-0.06829	376.0	-4.08	-0.05818	-4.19	30.0	67
7	4.089	-0.04748	380.7	-4.23	3.556	-0.05717	367.7	-4.09	5.277	-0.06630	376.3	-4.01	-0.05698	-4.11	30.0	68
8	4.086	-0.04868	380.3	-4.33	3.551	-0.05917	367.5	-4.15	5.270	-0.06908	376.0	-4.08	-0.05898	-4.19	29.8	69
9	4.083	-0.04987	380.0	-4.40	3.548	-0.06037	366.4	-4.43	5.265	-0.07107	375.2	-4.29	-0.06044	-4.37	30.1	67
10	4.083	-0.04987	380.0	-4.40	3.546	-0.06117	366.4	-4.43	5.265	-0.07107	375.2	-4.29	-0.06070	-4.37	30.2	67
11	4.081	-0.05067	380.0	-4.40	3.542	-0.06277	366.3	-4.46	5.262	-0.07226	374.9	-4.36	-0.06190	-4.41	30.6	66
12	4.080	-0.05107	379.9	-4.43	3.542	-0.06277	366.3	-4.46	5.263	-0.07186	374.7	-4.41	-0.06190	-4.43	31.2	64
13	4.073	-0.05386	379.6	-4.50	3.542	-0.06277	366.0	-4.54	5.262	-0.07226	374.5	-4.46	-0.06296	-4.50	30.8	69
14	4.074	-0.05346	379.6	-4.50	3.543	-0.06237	366.2	-4.49	5.262	-0.07226	374.7	-4.41	-0.06270	-4.47	30.2	68
15	4.088	-0.04788	380.5	-4.28	3.548	-0.06037	367.1	-4.25	5.267	-0.07027	375.3	-4.26	-0.05951	-4.26	31.3	64
20	4.070	-0.05506	379.3	-4.58	3.532	-0.06677	365.9	-4.56	5.253	-0.07583	374.1	-4.57	-0.06589	-4.57	30.8	67
30	4.048	-0.06384	377.3	-5.08	3.526	-0.06916	364.1	-5.03	5.23	-0.08496	372	-5.10	-0.07265	-5.07	29.9	67

ตารางที่ ง-12 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 247.99 mm				L2 = 252.40 mm				L3 = 248.98 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	1.559	0	397.5	0	5.967	0	394.5	0	2.551	0	398.3	0	0	0	29.0	77
1	1.405	-0.06210	392.7	-1.21	5.825	-0.05626	390.0	-1.14	2.460	-0.03655	392.9	-1.36	-0.05164	-1.23	30.3	68
2	1.401	-0.06371	386.3	-2.82	5.814	-0.06062	384.0	-2.66	2.454	-0.03896	386.7	-2.91	-0.05443	-2.80	30.0	67
3	1.393	-0.06694	385.9	-2.92	5.808	-0.06300	383.4	-2.81	2.435	-0.04659	386.4	-2.99	-0.05884	-2.91	29.5	67
4	1.390	-0.06815	384.3	-3.32	5.803	-0.06498	381.9	-3.19	2.426	-0.05020	385.2	-3.29	-0.06111	-3.27	29.2	70
5	1.382	-0.07137	382.5	-3.77	5.802	-0.06537	380.9	-3.45	2.418	-0.05342	384.1	-3.57	-0.06339	-3.60	29.5	68
6	1.380	-0.07218	381.0	-4.15	5.799	-0.06656	379.7	-3.75	2.418	-0.05342	383.2	-3.79	-0.06405	-3.90	30.0	65
7	1.388	-0.06895	380.5	-4.28	5.801	-0.06577	379.2	-3.88	2.421	-0.05221	382.9	-3.87	-0.06231	-4.01	30.0	67
8	1.380	-0.07218	380.1	-4.38	5.795	-0.06815	378.8	-3.98	2.416	-0.05422	382.4	-3.99	-0.06485	-4.12	29.9	69
9	1.373	-0.07500	379.4	-4.55	5.792	-0.06934	378.4	-4.08	2.405	-0.05864	382.5	-3.97	-0.06766	-4.20	30.2	66
10	1.373	-0.07500	379.2	-4.60	5.792	-0.06934	378.4	-4.08	2.405	-0.05864	382.4	-3.99	-0.06766	-4.23	29.9	69
11	1.371	-0.07581	379.0	-4.65	5.790	-0.07013	378.3	-4.11	2.402	-0.05984	382.3	-4.02	-0.06859	-4.26	30.1	67
12	1.370	-0.07621	378.5	-4.78	5.788	-0.07092	378.2	-4.13	2.410	-0.05663	382.5	-3.97	-0.06792	-4.29	31.1	64
13	1.368	-0.07702	378.2	-4.86	5.791	-0.06973	377.9	-4.21	2.409	-0.05703	382.2	-4.04	-0.06793	-4.37	30.8	69
14	1.368	-0.07702	378.3	-4.83	5.792	-0.06934	378.1	-4.16	2.407	-0.05784	382.3	-4.02	-0.06806	-4.33	30.3	68
15	1.366	-0.07783	378.5	-4.78	5.792	-0.06934	378.7	-4.01	2.407	-0.05784	382.9	-3.87	-0.06833	-4.22	31.5	64
20	1.350	-0.08428	375.4	-5.56	5.778	-0.07488	376.9	-4.46	2.398	-0.06145	381.6	-4.19	-0.07354	-4.74	30.8	65
30	1.338	-0.08912	373.2	-6.11	5.754	-0.08439	375.2	-4.89	2.388	-0.06547	379.4	-4.75	-0.07966	-5.25	30.2	66

ตารางที่ ง-13 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20C15-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.75 mm				L2 = 249.98 mm				L3 = 249.04 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.318	0	375.9	0	3.547	0	390.7	0	2.609	0	400.3	0	0	0	29.8	70
1	2.173	-0.05829	371.3	-1.22	3.379	-0.06721	386.0	-1.20	2.498	-0.04457	394.3	-1.50	-0.05669	-1.31	30.4	64
2	2.178	-0.05628	367.2	-2.31	3.388	-0.06361	381.9	-2.25	2.507	-0.04096	390.3	-2.50	-0.05362	-2.35	28.2	74
3	2.158	-0.06432	366.1	-2.61	3.373	-0.06961	380.5	-2.61	2.500	-0.04377	389.1	-2.80	-0.05923	-2.67	28.8	71
4	2.152	-0.06673	364.5	-3.03	3.358	-0.07561	378.5	-3.12	2.475	-0.05381	387.5	-3.20	-0.06538	-3.12	30.0	64
5	2.135	-0.07357	362.7	-3.51	3.342	-0.08201	376.6	-3.61	2.461	-0.05943	386.2	-3.52	-0.07167	-3.55	29.7	68
6	2.129	-0.07598	362.1	-3.67	3.353	-0.07761	375.0	-4.02	2.448	-0.06465	385.1	-3.80	-0.07275	-3.83	30.7	68
7	2.135	-0.07357	363.4	-3.33	3.363	-0.07361	376.7	-3.58	2.455	-0.06184	387.4	-3.22	-0.06967	-3.38	31.3	64
8	2.141	-0.07116	362.7	-3.51	3.348	-0.07961	375.9	-3.79	2.462	-0.05903	386.4	-3.47	-0.06993	-3.59	30.5	67
9	2.138	-0.07236	361.8	-3.75	3.345	-0.08081	374.6	-4.12	2.461	-0.05943	385.8	-3.62	-0.07087	-3.83	30.3	66
10	2.135	-0.07357	361.6	-3.80	3.343	-0.08161	374.5	-4.15	2.461	-0.05943	385.8	-3.62	-0.07153	-3.86	30.1	67
11	2.132	-0.07477	361.3	-3.88	3.343	-0.08161	373.9	-4.30	2.460	-0.05983	385.3	-3.75	-0.07207	-3.98	30.1	67
12	2.129	-0.07598	361.0	-3.96	3.341	-0.08241	373.5	-4.40	2.460	-0.05983	384.7	-3.90	-0.07274	-4.09	30.6	69
13	2.132	-0.07477	361.2	-3.91	3.348	-0.07961	373.6	-4.38	2.459	-0.06023	385.1	-3.80	-0.07154	-4.03	30.9	69
14	2.133	-0.07437	361.2	-3.91	3.344	-0.08121	373.7	-4.35	2.460	-0.05983	385.2	-3.77	-0.07180	-4.01	30.4	68
15	2.136	-0.07317	361.6	-3.80	3.342	-0.08201	374.0	-4.27	2.467	-0.05702	385.7	-3.65	-0.07073	-3.91	31.5	64
20	2.123	-0.07839	360.2	-4.18	3.340	-0.08281	371.3	-4.97	2.456	-0.06144	384.1	-4.05	-0.07421	-4.40	30.8	65
30	2.116	-0.08121	358.3	-4.68	3.324	-0.08921	369.2	-5.50	2.437	-0.06907	382.2	-4.52	-0.07983	-4.90	30.3	66

ตารางที่ ง-14 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.25 mm				L2 = 249.78 mm				L3 = 249.06 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	3.815	0	376.9	0	3.350	0	391.0	0	2.628	0	384.5	0	0	0	28.9	73
1	3.789	-0.01039	368.6	-2.20	3.329	-0.00841	381.9	-2.33	2.608	-0.00803	374.7	-2.55	-0.00894	-2.36	27.6	78
2	3.768	-0.01878	364.3	-3.34	3.282	-0.02722	377.4	-3.48	2.579	-0.01967	370.7	-3.59	-0.02189	-3.47	29.3	70
3	3.760	-0.02198	363.2	-3.63	3.280	-0.02802	376.1	-3.81	2.566	-0.02489	369.5	-3.90	-0.02497	-3.78	28.7	69
4	3.762	-0.02118	363.2	-3.63	3.282	-0.02722	376.2	-3.79	2.558	-0.02811	369.6	-3.88	-0.02550	-3.77	26.1	72
5	3.772	-0.01718	363.2	-3.63	3.295	-0.02202	376.2	-3.79	2.558	-0.02811	369.6	-3.88	-0.02244	-3.77	30.4	69
6	3.750	-0.02597	362.1	-3.93	3.267	-0.03323	375.0	-4.09	2.553	-0.03011	368.5	-4.16	-0.02977	-4.06	29.1	65
7	3.755	-0.02398	362.5	-3.82	3.274	-0.03043	375.3	-4.02	2.550	-0.03132	368.8	-4.08	-0.02857	-3.97	27.8	76
8	3.738	-0.03077	361.3	-4.14	3.259	-0.03643	374.8	-4.14	2.539	-0.03573	368.3	-4.21	-0.03431	-4.17	30.0	64
9	3.722	-0.03716	361.6	-4.06	3.247	-0.04124	374.4	-4.25	2.514	-0.04577	368.0	-4.29	-0.04139	-4.20	31.0	68
10	3.716	-0.03956	361.3	-4.14	3.236	-0.04564	374.1	-4.32	2.518	-0.04417	367.7	-4.37	-0.04312	-4.28	30.6	67
11	3.714	-0.04036	361.5	-4.09	3.237	-0.04524	374.2	-4.30	2.511	-0.04698	367.8	-4.34	-0.04419	-4.24	28.9	71
12	3.725	-0.03596	361.6	-4.06	3.241	-0.04364	374.6	-4.19	2.520	-0.04336	368.0	-4.29	-0.04099	-4.18	29.6	70
13	3.724	-0.03636	361.6	-4.06	3.242	-0.04324	374.6	-4.19	2.510	-0.04738	368.0	-4.29	-0.04233	-4.18	29.5	68
14	3.718	-0.03876	361.2	-4.17	3.236	-0.04564	374.1	-4.32	2.508	-0.04818	367.7	-4.37	-0.04419	-4.29	29.6	66
15	3.716	-0.03956	361.2	-4.17	3.228	-0.04884	374.1	-4.32	2.499	-0.05180	367.7	-4.37	-0.04673	-4.29	30.0	66
20	3.717	-0.03916	361.8	-4.01	3.234	-0.04644	374.7	-4.17	2.508	-0.04818	368.1	-4.27	-0.04459	-4.15	30.8	67
30	3.672	-0.05714	360.3	-4.40	3.205	-0.05805	373.3	-4.53	2.468	-0.06424	366.9	-4.58	-0.05981	-4.50	29.8	67

ตารางที่ ง-15 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.48 mm				L2 = 251.89 mm				L3 = 251.15 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.049	0	384.3	0	5.460	0	383.0	0	4.718	0	374.1	0	0	0.00	27.0	77
1	4.038	-0.00439	376.2	-2.11	5.449	-0.00437	376.9	-1.59	4.702	-0.00637	368.2	-1.58	-0.00504	-1.76	27.9	77
2	4.011	-0.01517	371.3	-3.38	5.421	-0.01548	371.7	-2.95	4.676	-0.01672	363.8	-2.75	-0.01579	-3.03	30.1	62
3	4.011	-0.01517	371.1	-3.43	5.418	-0.01667	370.8	-3.19	4.672	-0.01832	363.1	-2.94	-0.01672	-3.19	28.1	69
4	4.013	-0.01437	372.0	-3.20	5.424	-0.01429	371.3	-3.05	4.678	-0.01593	363.7	-2.78	-0.01486	-3.01	28.4	75
5	4.008	-0.01637	371.6	-3.30	5.418	-0.01667	371.2	-3.08	4.666	-0.02070	363.4	-2.86	-0.01792	-3.08	30.6	69
6	3.995	-0.02156	369.4	-3.88	5.408	-0.02064	369.1	-3.63	4.664	-0.02150	361.5	-3.37	-0.02123	-3.62	27.6	70
7	3.997	-0.02076	368.5	-4.11	5.410	-0.01985	367.9	-3.94	4.660	-0.02309	360.4	-3.66	-0.02123	-3.91	28.5	72
8	3.983	-0.02635	368.3	-4.16	5.398	-0.02461	367.5	-4.05	4.655	-0.02508	360.0	-3.77	-0.02535	-3.99	28.2	69
9	3.977	-0.02874	367.7	-4.32	5.392	-0.02700	367.1	-4.15	4.638	-0.03185	359.6	-3.88	-0.02920	-4.12	28.6	67
10	3.968	-0.03234	367.1	-4.48	5.386	-0.02938	366.6	-4.28	4.634	-0.03345	359.1	-4.01	-0.03172	-4.26	29.1	68
11	3.962	-0.03473	366.7	-4.58	5.382	-0.03097	366.3	-4.36	4.632	-0.03424	358.8	-4.09	-0.03331	-4.34	30.2	68
12	3.976	-0.02914	367.8	-4.29	5.394	-0.02620	367.0	-4.18	4.639	-0.03146	359.3	-3.96	-0.02893	-4.14	29.9	69
13	3.968	-0.03234	367.2	-4.45	5.389	-0.02819	366.6	-4.28	4.632	-0.03424	359.1	-4.01	-0.03159	-4.25	30.4	64
14	3.964	-0.03393	367.2	-4.45	5.384	-0.03017	366.5	-4.31	4.631	-0.03464	358.8	-4.09	-0.03292	-4.28	29.5	66
15	3.958	-0.03633	366.8	-4.55	5.380	-0.03176	366.0	-4.44	4.627	-0.03623	358.6	-4.14	-0.03477	-4.38	30.1	65
20	3.963	-0.03433	367.8	-4.29	5.382	-0.03097	366.7	-4.26	4.632	-0.03424	359.2	-3.98	-0.03318	-4.18	30.5	69
30	3.942	-0.04272	365.7	-4.84	5.355	-0.04168	364.9	-4.73	4.599	-0.04738	357.5	-4.44	-0.04393	-4.67	29.9	67

ตารางที่ ง-16 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.43 mm				L2 = 249.59 mm				L3 = 252.38 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	6.003	0	375.6	0	3.162	0	394.5	0	5.948	0	391.3	0	0	0.00	26.6	80
1	5.995	-0.00317	371.5	-1.09	3.145	-0.00681	390.0	-1.14	5.928	-0.00792	387.0	-1.10	-0.00499	-1.11	28.1	77
2	5.986	-0.00673	367.4	-2.18	3.127	-0.01402	385.7	-2.23	5.911	-0.01466	382.9	-2.15	-0.01038	-2.19	27.9	76
3	5.970	-0.01307	366.5	-2.42	3.127	-0.01402	384.6	-2.51	5.900	-0.01902	381.9	-2.40	-0.01355	-2.44	28.7	69
4	5.975	-0.01109	367.1	-2.26	3.128	-0.01362	385.4	-2.31	5.918	-0.01189	383.1	-2.10	-0.01220	-2.22	28.7	74
5	5.977	-0.01030	367.1	-2.26	3.136	-0.01042	385.1	-2.38	5.915	-0.01308	383.1	-2.10	-0.01036	-2.25	30.7	68
6	5.961	-0.01664	364.9	-2.85	3.122	-0.01603	382.9	-2.94	5.894	-0.02140	380.9	-2.66	-0.01802	-2.82	27.8	71
7	5.962	-0.01624	364.1	-3.06	3.123	-0.01563	382.1	-3.14	5.900	-0.01902	380.4	-2.79	-0.01696	-3.00	28.2	76
8	5.954	-0.01941	363.3	-3.27	3.112	-0.02003	381.1	-3.40	5.885	-0.02496	379.3	-3.07	-0.02147	-3.25	28.4	69
9	5.944	-0.02337	362.2	-3.57	3.108	-0.02164	380.0	-3.68	5.878	-0.02774	378.3	-3.32	-0.02425	-3.52	28.6	67
10	5.936	-0.02654	361.5	-3.75	3.102	-0.02404	379.4	-3.83	5.873	-0.02972	377.8	-3.45	-0.02677	-3.68	29.3	68
11	5.935	-0.02694	361.2	-3.83	3.098	-0.02564	379.0	-3.93	5.865	-0.03289	377.2	-3.60	-0.02849	-3.79	30.3	67
12	5.943	-0.02377	362.0	-3.62	3.112	-0.02003	379.8	-3.73	5.873	-0.02972	378.1	-3.37	-0.02451	-3.57	30.0	68
13	5.935	-0.02694	361.4	-3.78	3.107	-0.02204	379.2	-3.88	5.863	-0.03368	377.7	-3.48	-0.02755	-3.71	30.4	64
14	5.930	-0.02892	361.2	-3.83	3.102	-0.02404	379.0	-3.93	5.861	-0.03447	377.5	-3.53	-0.02914	-3.76	30.0	68
15	5.924	-0.03130	360.8	-3.94	3.093	-0.02765	378.7	-4.01	5.858	-0.03566	377.0	-3.65	-0.03153	-3.87	30.1	65
20	5.937	-0.02615	361.2	-3.83	3.103	-0.02364	379.2	-3.88	5.860	-0.03487	377.7	-3.48	-0.02822	-3.73	30.5	69
30	5.912	-0.03605	359	-4.42	3.079	-0.03325	376.8	-4.49	5.841	-0.04240	375.3	-4.09	-0.03723	-4.33	29.9	67

ตารางที่ ง-17 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P30-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.70 mm				L2 = 249.70 mm				L3 = 250.59 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.268	0	381.3	0	3.273	0	395.7	0	4.161	0	旺孛	0	0	0	26.5	80
1	4.262	-0.00239	380.1	-0.31	3.265	-0.00320	393.9	-0.45	4.157	-0.00160	399.2	-0.25	-0.00240	-0.34	28.8	77
2	4.258	-0.00399	377.2	-1.08	3.257	-0.00641	390.9	-1.21	4.148	-0.00519	395.6	-1.15	-0.00519	-1.15	28.9	71
3	4.241	-0.01077	375.3	-1.57	3.240	-0.01322	388.8	-1.74	4.128	-0.01317	393.3	-1.72	-0.01238	-1.68	30.1	64
4	4.248	-0.00798	375.5	-1.52	3.240	-0.01322	389.1	-1.67	4.131	-0.01197	393.8	-1.60	-0.01106	-1.60	28.3	73
5	4.255	-0.00519	376.1	-1.36	3.251	-0.00881	390.1	-1.42	4.153	-0.00319	394.4	-1.45	-0.00573	-1.41	29.4	70
6	4.248	-0.00798	373.9	-1.94	3.225	-0.01922	387.3	-2.12	4.125	-0.01437	391.6	-2.15	-0.01386	-2.07	28.0	69
7	4.245	-0.00917	374.4	-1.81	3.237	-0.01442	388.0	-1.95	4.137	-0.00958	392.3	-1.97	-0.01106	-1.91	29.8	70
8	4.242	-0.01037	372.8	-2.23	3.215	-0.02323	386.3	-2.38	4.122	-0.01556	390.5	-2.42	-0.01639	-2.34	28.1	71
9	4.234	-0.01356	371.8	-2.49	3.210	-0.02523	385.2	-2.65	4.117	-0.01756	389.0	-2.80	-0.01878	-2.65	28.9	68
10	4.232	-0.01436	371.2	-2.65	3.208	-0.02603	384.4	-2.86	4.112	-0.01955	388.5	-2.92	-0.01998	-2.81	29.4	70
11	4.237	-0.01237	370.7	-2.78	3.212	-0.02443	384.2	-2.91	4.112	-0.01955	388.1	-3.02	-0.01878	-2.90	29.4	74
12	4.234	-0.01356	370.5	-2.83	3.206	-0.02683	384.0	-2.96	4.113	-0.01915	387.9	-3.07	-0.01985	-2.95	29.5	68
13	4.231	-0.01476	370.1	-2.94	3.202	-0.02843	383.8	-3.01	4.117	-0.01756	387.5	-3.17	-0.02025	-3.04	30.6	66
14	4.233	-0.01396	370.5	-2.83	3.205	-0.02723	383.7	-3.03	4.122	-0.01556	388.4	-2.95	-0.01892	-2.94	30.9	66
15	4.228	-0.01596	369.7	-3.04	3.203	-0.02803	383.2	-3.16	4.119	-0.01676	387.1	-3.27	-0.02025	-3.16	30.2	64
20	4.233	-0.01396	370.2	-2.91	3.208	-0.02603	383.7	-3.03	4.122	-0.01556	387.8	-3.10	-0.01852	-3.01	31.0	64
30	4.207	-0.02433	366.6	-3.86	3.187	-0.03444	380.2	-3.92	4.100	-0.02434	383.9	-4.07	-0.02771	-3.95	30.7	65

ตารางที่ ง-18 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O5-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.21 mm				L2 = 252.02 mm				L3 = 249.65 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.784	0	387.2	0	5.588	0	405.6	0	3.216	0	395.7	0	0	0	27.2	78
1	5.759	-0.00991	377.4	-2.53	5.562	-0.01032	396.7	-2.19	3.201	-0.00601	387.4	-2.10	-0.00796	-2.27	27.3	74
2	5.740	-0.01745	373.6	-3.51	5.584	-0.00159	392.2	-3.30	3.185	-0.01242	383.1	-3.18	-0.01493	-3.33	28.4	75
3	5.731	-0.02101	372.7	-3.74	5.572	-0.00635	391.1	-3.57	3.168	-0.01923	382.0	-3.46	-0.02012	-3.59	28.0	71
4	5.737	-0.01863	374.4	-3.31	5.578	-0.00397	392.9	-3.13	3.175	-0.01642	383.6	-3.06	-0.01753	-3.16	27.3	75
5	5.734	-0.01982	374.0	-3.41	5.583	-0.00198	392.2	-3.30	3.174	-0.01682	382.9	-3.23	-0.01832	-3.32	29.4	70
6	5.722	-0.02458	372.1	-3.90	5.575	-0.00516	390.3	-3.77	3.150	-0.02644	380.9	-3.74	-0.02551	-3.80	29.2	62
7	5.722	-0.02458	372.5	-3.80	5.574	-0.00556	390.7	-3.67	3.149	-0.02684	381.4	-3.61	-0.02571	-3.69	29.8	70
8	5.707	-0.03053	371.7	-4.00	5.568	-0.00794	389.6	-3.94	3.136	-0.03205	380.6	-3.82	-0.03129	-3.92	28.2	71
9	5.698	-0.03410	371.2	-4.13	5.550	-0.01508	389.2	-4.04	3.131	-0.03405	379.9	-3.99	-0.03407	-4.06	29.0	67
10	5.695	-0.03529	370.8	-4.24	5.553	-0.01389	389.1	-4.07	3.128	-0.03525	379.7	-4.04	-0.03527	-4.12	29.5	70
11	5.696	-0.03489	371.0	-4.18	5.558	-0.01190	389.0	-4.09	3.125	-0.03645	379.9	-3.99	-0.03567	-4.09	29.5	74
12	5.692	-0.03648	371.0	-4.18	5.550	-0.01508	389.0	-4.09	3.125	-0.03645	379.9	-3.99	-0.03646	-4.09	29.3	69
13	5.687	-0.03846	370.9	-4.21	5.548	-0.01587	388.8	-4.14	3.123	-0.03725	379.6	-4.07	-0.03786	-4.14	30.6	66
14	5.692	-0.03648	371.1	-4.16	5.543	-0.01786	389.1	-4.07	3.128	-0.03525	379.9	-3.99	-0.03586	-4.07	30.9	66
15	5.685	-0.03925	371.0	-4.18	5.536	-0.02063	388.9	-4.12	3.120	-0.03845	379.7	-4.04	-0.03885	-4.11	30.9	64
20	5.685	-0.03925	371.5	-4.05	5.535	-0.02103	389.4	-3.99	3.122	-0.03765	379.3	-4.14	-0.03845	-4.06	31.0	64
30	5.658	-0.04996	370.1	-4.42	5.522	-0.02619	388.0	-4.34	3.093	-0.04927	378.8	-4.27	-0.04961	-4.34	30.9	65

ตารางที่ ง-19 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.43 mm				L2 = 253.01 mm				L3 = 250.87 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.002	0	391.7	0	6.578	0	397.2	0	4.441	0	379	0	0	0	27.1	73
1	3.992	-0.00399	381.8	-2.53	6.562	-0.00632	387.9	-2.34	4.417	-0.00957	370.8	-2.16	-0.00663	-2.34	27.2	74
2	3.976	-0.01038	377.2	-3.70	6.553	-0.00988	383.3	-3.50	4.402	-0.01555	367.0	-3.17	-0.01194	-3.46	28.5	75
3	3.960	-0.01677	375.9	-4.03	6.533	-0.01779	381.9	-3.85	4.385	-0.02232	366.2	-3.38	-0.01896	-3.75	28.1	71
4	3.961	-0.01637	377.8	-3.55	6.532	-0.01818	384.0	-3.32	4.388	-0.02113	367.3	-3.09	-0.01856	-3.32	27.5	77
5	3.958	-0.01757	377.3	-3.68	6.531	-0.01858	383.4	-3.47	4.392	-0.01953	367.5	-3.03	-0.01856	-3.39	29.6	70
6	3.943	-0.02356	374.7	-4.34	6.514	-0.02530	381.0	-4.08	4.380	-0.02432	365.1	-3.67	-0.02439	-4.03	29.4	64
7	3.945	-0.02276	375.3	-4.19	6.514	-0.02530	381.5	-3.95	4.382	-0.02352	365.5	-3.56	-0.02386	-3.90	29.9	70
8	3.926	-0.03035	374.1	-4.49	6.494	-0.03320	380.3	-4.25	4.365	-0.03029	364.6	-3.80	-0.03128	-4.18	28.3	71
9	3.919	-0.03314	373.4	-4.67	6.490	-0.03478	380.0	-4.33	4.365	-0.03029	364.0	-3.96	-0.03274	-4.32	29.1	66
10	3.912	-0.03594	373.3	-4.70	6.482	-0.03794	379.5	-4.46	4.355	-0.03428	363.7	-4.04	-0.03605	-4.40	29.6	69
11	3.905	-0.03873	373.3	-4.70	6.485	-0.03676	379.6	-4.43	4.352	-0.03548	363.6	-4.06	-0.03699	-4.40	29.5	74
12	3.905	-0.03873	373.3	-4.70	6.484	-0.03715	379.5	-4.46	4.350	-0.03627	363.7	-4.04	-0.03739	-4.40	29.8	70
13	3.905	-0.03873	373.1	-4.75	6.484	-0.03715	379.5	-4.46	4.350	-0.03627	363.8	-4.01	-0.03739	-4.41	30.4	67
14	3.905	-0.03873	373.4	-4.67	6.485	-0.03676	379.4	-4.48	4.350	-0.03627	363.6	-4.06	-0.03725	-4.41	30.0	69
15	3.902	-0.03993	372.9	-4.80	6.488	-0.03557	379.2	-4.53	4.350	-0.03627	363.3	-4.14	-0.03726	-4.49	30.5	64
20	3.908	-0.03754	373.8	-4.57	6.488	-0.03557	380.1	-4.31	4.358	-0.03308	364.3	-3.88	-0.03540	-4.25	31.0	64
30	3.889	-0.04512	372.1	-5.00	6.458	-0.04743	378.4	-4.73	4.325	-0.04624	362.7	-4.30	-0.04626	-4.68	31.0	64

ตารางที่ ง-20 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.97 mm				L2 = 250.52 mm				L3 = 249.53 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.536	0	387.1	0	4.088	0	371.6	0	3.097	0	388.7	0	0	0	27.7	77
1	2.506	-0.01205	377.9	-2.38	4.058	-0.01198	363.7	-2.13	3.058	-0.01563	379.7	-2.32	-0.01322	-2.27	29.3	69
2	2.505	-0.01245	376.8	-2.66	4.052	-0.01437	362.2	-2.53	3.061	-0.01443	378.0	-2.75	-0.01375	-2.65	28.0	74
3	2.480	-0.02249	373.1	-3.62	4.022	-0.02635	358.6	-3.50	3.045	-0.02084	374.1	-3.76	-0.02323	-3.62	28.6	72
4	2.488	-0.01928	375.0	-3.13	4.035	-0.02116	360.6	-2.96	3.054	-0.01723	376.2	-3.22	-0.01922	-3.10	29.1	75
5	2.490	-0.01848	374.2	-3.33	4.027	-0.02435	359.4	-3.28	3.053	-0.01763	375.2	-3.47	-0.02015	-3.36	29.8	70
6	2.471	-0.02611	371.5	-4.03	4.027	-0.02435	357.2	-3.88	3.039	-0.02324	372.8	-4.09	-0.02457	-4.00	29.4	69
7	2.474	-0.02490	372.2	-3.85	4.020	-0.02714	357.7	-3.74	3.028	-0.02765	373.2	-3.99	-0.02657	-3.86	28.7	71
8	2.464	-0.02892	371.2	-4.11	4.008	-0.03193	356.9	-3.96	3.025	-0.02885	372.5	-4.17	-0.02990	-4.08	29.1	70
9	2.469	-0.02691	370.8	-4.21	4.003	-0.03393	356.2	-4.14	3.013	-0.03366	371.8	-4.35	-0.03150	-4.23	29.5	68
10	2.451	-0.03414	370.2	-4.37	4.001	-0.03473	356.1	-4.17	3.015	-0.03286	371.6	-4.40	-0.03391	-4.31	29.4	70
11	2.458	-0.03133	370.1	-4.39	4.002	-0.03433	356.1	-4.17	3.018	-0.03166	371.8	-4.35	-0.03244	-4.30	30.7	66
12	2.455	-0.03253	370.1	-4.39	4.001	-0.03473	356.1	-4.17	3.015	-0.03286	371.7	-4.37	-0.03337	-4.31	30.2	68
13	2.453	-0.03334	370.5	-4.29	3.992	-0.03832	356.0	-4.20	3.015	-0.03286	371.6	-4.40	-0.03484	-4.30	30.3	67
14	2.454	-0.03294	370.4	-4.31	3.990	-0.03912	356.0	-4.20	3.012	-0.03406	371.5	-4.43	-0.03537	-4.31	30.0	68
15	2.454	-0.03294	370.2	-4.37	3.989	-0.03952	355.9	-4.22	3.011	-0.03447	371.3	-4.48	-0.03564	-4.36	30.5	67
20	2.452	-0.03374	370.7	-4.24	3.990	-0.03912	356.6	-4.04	3.011	-0.03447	372.0	-4.30	-0.03577	-4.19	30.7	68
30	2.42	-0.04659	369.5	-4.55	3.962	-0.05030	355.0	-4.47	2.984	-0.04529	370.5	-4.68	-0.04739	-4.57	30.4	67

ตารางที่ ง-21 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P1005-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.49 mm				L2 = 251.89 mm				L3 = 251.72 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	3.064	0	403.4	0	5.456	0	395.6	0	5.288	0	393.1	0	0	0	27.7	77
1	3.017	-0.01884	394.5	-2.21	5.407	-0.01945	386.9	-2.20	5.243	-0.01788	385.7	-1.88	-0.01872	-2.10	29.5	68
2	3.012	-0.02084	392.9	-2.60	5.412	-0.01747	385.9	-2.45	5.242	-0.01827	384.9	-2.09	-0.01886	-2.38	28.0	79
3	3.005	-0.02365	388.4	-3.72	5.392	-0.02541	381.3	-3.61	5.232	-0.02225	380.8	-3.13	-0.02377	-3.49	28.7	72
4	3.008	-0.02245	390.3	-3.25	5.402	-0.02144	383.5	-3.06	5.256	-0.01271	383.0	-2.57	-0.01887	-2.96	29.5	74
5	2.998	-0.02645	389.1	-3.54	5.409	-0.01866	382.5	-3.31	5.242	-0.01827	381.9	-2.85	-0.02113	-3.24	30.0	69
6	2.981	-0.03327	386.3	-4.24	5.394	-0.02461	379.5	-4.07	5.223	-0.02582	379.1	-3.56	-0.02790	-3.96	29.4	69
7	2.992	-0.02886	386.8	-4.12	5.381	-0.02978	379.9	-3.97	5.221	-0.02662	379.4	-3.49	-0.02842	-3.86	28.9	71
8	2.982	-0.03287	385.9	-4.34	5.368	-0.03494	379.1	-4.17	5.198	-0.03575	378.7	-3.66	-0.03452	-4.06	29.0	70
9	2.964	-0.04008	384.9	-4.59	5.362	-0.03732	378.4	-4.35	5.212	-0.03019	377.9	-3.87	-0.03586	-4.27	29.5	68
10	2.964	-0.04008	384.7	-4.64	5.354	-0.04049	377.8	-4.50	5.208	-0.03178	377.6	-3.94	-0.03745	-4.36	29.4	70
11	2.958	-0.04249	384.9	-4.59	5.358	-0.03891	378.1	-4.42	5.207	-0.03218	377.6	-3.94	-0.03786	-4.32	30.6	66
12	2.955	-0.04369	384.8	-4.61	5.348	-0.04288	378.0	-4.45	5.201	-0.03456	377.7	-3.92	-0.04038	-4.33	29.8	67
13	2.948	-0.04649	384.6	-4.66	5.339	-0.04645	377.7	-4.52	5.201	-0.03456	377.5	-3.97	-0.04250	-4.38	31.2	68
14	2.948	-0.04649	384.6	-4.66	5.338	-0.04685	377.6	-4.55	5.202	-0.03417	377.4	-3.99	-0.04250	-4.40	30.2	67
15	2.948	-0.04649	384.6	-4.66	5.338	-0.04685	377.5	-4.58	5.202	-0.03417	377.3	-4.02	-0.04250	-4.42	30.6	67
20	2.950	-0.04569	384.8	-4.61	5.338	-0.04685	378.1	-4.42	5.193	-0.03774	377.7	-3.92	-0.04343	-4.32	30.5	68
30	2.929	-0.05411	382.9	-5.08	5.313	-0.05677	376.4	-4.85	5.169	-0.04728	376	-4.35	-0.05272	-4.76	30.7	67

ตารางที่ ง-22 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.87 mm				L2 = 249.40 mm				L3 = 247.95 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	3.439	0	377.4	0	2.973	0	393.2	0	1.524	0	396.6	0	0	0	29.0	68
1	3.412	-0.01081	370.0	-1.96	2.951	-0.00882	385.7	-1.91	1.466	-0.02339	388.1	-2.14	-0.01434	-2.00	29.7	68
2	3.412	-0.01081	370.0	-1.96	2.949	-0.00962	385.3	-2.01	1.479	-0.01815	387.7	-2.24	-0.01286	-2.07	28.0	74
3	3.410	-0.01161	366.5	-2.89	2.925	-0.01925	381.6	-2.95	1.454	-0.02823	383.9	-3.20	-0.01969	-3.01	29.0	70
4	3.410	-0.01161	368.4	-2.38	2.929	-0.01764	383.7	-2.42	1.467	-0.02299	386.0	-2.67	-0.01741	-2.49	31.0	68
5	3.407	-0.01281	367.2	-2.70	2.920	-0.02125	382.5	-2.72	1.462	-0.02500	384.9	-2.95	-0.01969	-2.79	29.9	70
6	3.393	-0.01841	365.3	-3.21	2.909	-0.02566	380.5	-3.23	1.450	-0.02984	382.9	-3.45	-0.02464	-3.30	27.8	76
7	3.389	-0.02001	365.3	-3.21	2.892	-0.03248	380.3	-3.28	1.443	-0.03267	382.8	-3.48	-0.02839	-3.32	29.4	66
8	3.372	-0.02681	364.0	-3.55	2.882	-0.03649	379.1	-3.59	1.439	-0.03428	381.8	-3.73	-0.03253	-3.62	28.9	70
9	3.358	-0.03242	363.1	-3.79	2.874	-0.03969	377.9	-3.89	1.428	-0.03872	380.7	-4.01	-0.03694	-3.90	29.6	68
10	3.353	-0.03442	362.6	-3.92	2.870	-0.04130	377.6	-3.97	1.423	-0.04073	380.1	-4.16	-0.03882	-4.02	30.5	69
11	3.370	-0.02761	363.7	-3.63	2.868	-0.04210	378.7	-3.69	1.434	-0.03630	381.0	-3.93	-0.03534	-3.75	29.7	70
12	3.360	-0.03162	363.5	-3.68	2.878	-0.03809	378.4	-3.76	1.432	-0.03710	381.2	-3.88	-0.03560	-3.78	30.5	67
13	3.352	-0.03482	362.7	-3.90	2.862	-0.04451	377.5	-3.99	1.422	-0.04114	380.1	-4.16	-0.04015	-4.02	31.2	68
14	3.352	-0.03482	362.6	-3.92	2.863	-0.04411	377.5	-3.99	1.422	-0.04114	380.1	-4.16	-0.04002	-4.02	30.2	67
15	3.353	-0.03442	362.6	-3.92	2.864	-0.04370	377.6	-3.97	1.422	-0.04114	380.3	-4.11	-0.03975	-4.00	29.8	70
20	3.361	-0.03122	363.4	-3.71	2.878	-0.03809	378.1	-3.84	1.422	-0.04114	380.8	-3.98	-0.03681	-3.84	30.7	69
30	3.338	-0.04042	361.1	-4.32	2.852	-0.04852	376.2	-4.32	1.397	-0.05122	378.6	-4.54	-0.04672	-4.39	29.9	67

ตารางที่ ง-23 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.80 mm				L2 = 249.20 mm				L3 = 249.78 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.367	0	376.0	0	2.765	0	393.8	0	3.351	0	386.3	0	0	0	27.8	76
1	4.343	-0.00957	370.0	-1.60	2.737	-0.01124	386.5	-1.85	3.322	-0.01161	378.7	-1.97	-0.01081	-1.81	28.0	71
2	4.345	-0.00877	369.7	-1.68	2.728	-0.01485	386.1	-1.96	3.324	-0.01081	378.2	-2.10	-0.01181	-1.91	30.0	69
3	4.337	-0.01196	366.6	-2.50	2.697	-0.02729	382.8	-2.79	3.304	-0.01882	375.2	-2.87	-0.01539	-2.72	29.0	70
4	4.343	-0.00957	368.8	-1.91	2.721	-0.01766	385.2	-2.18	3.306	-0.01802	377.6	-2.25	-0.01508	-2.12	31.1	68
5	4.332	-0.01396	367.8	-2.18	2.717	-0.01926	383.9	-2.51	3.307	-0.01762	376.3	-2.59	-0.01694	-2.43	30.0	68
6	4.324	-0.01715	366.1	-2.63	2.703	-0.02488	382.0	-3.00	3.308	-0.01722	374.4	-3.08	-0.01975	-2.90	28.0	75
7	4.312	-0.02193	365.9	-2.69	2.688	-0.03090	381.9	-3.02	3.293	-0.02322	374.4	-3.08	-0.02535	-2.93	29.4	66
8	4.307	-0.02392	364.7	-3.01	2.682	-0.03331	380.4	-3.40	3.288	-0.02522	372.9	-3.47	-0.02748	-3.29	29.0	69
9	4.301	-0.02632	363.5	-3.32	2.672	-0.03732	379.6	-3.61	3.267	-0.03363	371.8	-3.75	-0.03242	-3.56	29.6	68
10	4.298	-0.02751	363.3	-3.38	2.667	-0.03933	378.8	-3.81	3.272	-0.03163	371.5	-3.83	-0.03282	-3.67	30.6	68
11	4.300	-0.02671	364.1	-3.16	2.684	-0.03250	379.9	-3.53	3.280	-0.02842	372.4	-3.60	-0.02921	-3.43	29.7	70
12	4.312	-0.02193	364.1	-3.16	2.680	-0.03411	379.7	-3.58	3.270	-0.03243	372.5	-3.57	-0.02949	-3.44	30.5	67
13	4.297	-0.02791	363.3	-3.38	2.666	-0.03973	378.8	-3.81	3.264	-0.03483	371.3	-3.88	-0.03416	-3.69	31.2	68
14	4.297	-0.02791	363.2	-3.40	2.666	-0.03973	378.6	-3.86	3.264	-0.03483	371.3	-3.88	-0.03416	-3.72	30.2	68
15	4.298	-0.02751	363.1	-3.43	2.669	-0.03852	378.8	-3.81	3.262	-0.03563	371.5	-3.83	-0.03389	-3.69	29.8	71
20	4.296	-0.02831	363.9	-3.22	2.672	-0.03732	379.6	-3.61	3.268	-0.03323	372.2	-3.65	-0.03295	-3.49	30.7	69
30	4.275	-0.03668	361.4	-3.88	2.65	-0.04615	376.9	-4.29	3.242	-0.04364	369.5	-4.35	-0.04216	-4.17	30.3	68

ตารางที่ ง-24 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P2005-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.38 mm				L2 = 248.34 mm				L3 = 249.50 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	1.945	0	394.4	0	1.911	0	393.4	0	3.065	0	368.7	0	0	0	28.5	72
1	1.900	-0.01812	387.9	-1.65	1.858	-0.02134	387.2	-1.58	3.026	-0.01563	363.1	-1.52	-0.01836	-1.58	30.0	66
2	1.899	-0.01852	386.9	-1.90	1.874	-0.01490	386.2	-1.83	3.031	-0.01363	362.4	-1.71	-0.01568	-1.81	29.0	70
3	1.895	-0.02013	385.0	-2.38	1.868	-0.01731	384.6	-2.24	3.020	-0.01804	360.9	-2.12	-0.01849	-2.25	27.2	74
4	1.898	-0.01892	386.8	-1.93	1.871	-0.01611	386.2	-1.83	3.027	-0.01523	362.4	-1.71	-0.01675	-1.82	30.0	68
5	1.890	-0.02214	385.0	-2.38	1.848	-0.02537	384.1	-2.36	3.012	-0.02124	360.6	-2.20	-0.02292	-2.31	28.8	69
6	1.882	-0.02536	383.6	-2.74	1.850	-0.02456	382.9	-2.67	3.025	-0.01603	359.5	-2.50	-0.02199	-2.63	27.1	78
7	1.872	-0.02939	383.2	-2.84	1.837	-0.02980	382.3	-2.82	3.002	-0.02525	359.0	-2.63	-0.02815	-2.76	28.1	72
8	1.872	-0.02939	381.6	-3.25	1.818	-0.03745	380.9	-3.18	2.992	-0.02926	357.8	-2.96	-0.03203	-3.13	28.7	69
9	1.854	-0.03664	380.4	-3.55	1.808	-0.04148	379.7	-3.48	2.982	-0.03327	357.0	-3.17	-0.03713	-3.40	30.1	68
10	1.853	-0.03704	380.0	-3.65	1.809	-0.04107	379.5	-3.53	2.982	-0.03327	356.6	-3.28	-0.03713	-3.49	29.8	67
11	1.863	-0.03301	380.8	-3.45	1.817	-0.03785	380.2	-3.36	2.992	-0.02926	357.3	-3.09	-0.03337	-3.30	30.5	69
12	1.860	-0.03422	380.9	-3.42	1.811	-0.04027	380.3	-3.33	2.991	-0.02966	357.3	-3.09	-0.03472	-3.28	30.6	68
13	1.859	-0.03463	379.8	-3.70	1.809	-0.04107	379.1	-3.63	2.973	-0.03687	356.3	-3.36	-0.03752	-3.57	31.0	67
14	1.855	-0.03624	379.8	-3.70	1.809	-0.04107	379.1	-3.63	2.973	-0.03687	356.3	-3.36	-0.03806	-3.57	30.2	69
15	1.853	-0.03704	379.7	-3.73	1.807	-0.04188	379.3	-3.58	2.974	-0.03647	356.3	-3.36	-0.03846	-3.56	29.7	70
20	1.855	-0.03624	380.0	-3.65	1.811	-0.04027	379.3	-3.58	2.977	-0.03527	356.3	-3.36	-0.03726	-3.53	30.9	69
30	1.837	-0.04348	376.9	-4.44	1.787	-0.04993	376.5	-4.30	2.955	-0.04409	353.7	-4.07	-0.04583	-4.27	30.6	68

ตารางที่ ง-25 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20C10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 251.50 mm				L2 = 249.63 mm				L3 = 251.14 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.068	0	400.3	0	3.196	0	390.9	0	4.705	0	380.0	0	0	0	27.9	76
1	5.036	-0.01272	395.4	-1.22	3.150	-0.01843	385.9	-1.28	4.673	-0.01274	374.9	-1.34	-0.01463	-1.28	28.7	72
2	5.036	-0.01272	394.1	-1.55	3.148	-0.01923	384.5	-1.64	4.672	-0.01314	373.8	-1.63	-0.01503	-1.61	28.0	71
3	5.042	-0.01034	393.2	-1.77	3.151	-0.01803	383.5	-1.89	4.670	-0.01394	373.0	-1.84	-0.01410	-1.84	28.0	79
4	5.040	-0.01113	395.0	-1.32	3.155	-0.01642	385.3	-1.43	4.675	-0.01195	374.7	-1.39	-0.01317	-1.38	30.0	67
5	5.033	-0.01392	392.8	-1.87	3.144	-0.02083	383.3	-1.94	4.670	-0.01394	372.7	-1.92	-0.01623	-1.91	29.0	68
6	5.030	-0.01511	391.6	-2.17	3.129	-0.02684	382.3	-2.20	4.664	-0.01633	371.6	-2.21	-0.01943	-2.19	27.3	74
7	5.014	-0.02147	391.2	-2.27	3.106	-0.03605	381.7	-2.35	4.647	-0.02310	371.2	-2.32	-0.02687	-2.31	28.0	73
8	5.002	-0.02624	390.0	-2.57	3.096	-0.04006	380.4	-2.69	4.635	-0.02787	369.9	-2.66	-0.03139	-2.64	28.6	70
9	4.987	-0.03221	388.7	-2.90	3.093	-0.04126	379.1	-3.02	4.619	-0.03424	368.8	-2.95	-0.03590	-2.95	30.2	68
10	4.987	-0.03221	388.4	-2.97	3.096	-0.04006	378.6	-3.15	4.621	-0.03345	368.4	-3.05	-0.03524	-3.06	29.8	66
11	5.007	-0.02425	389.2	-2.77	3.091	-0.04206	379.6	-2.89	4.631	-0.02947	369.1	-2.87	-0.03193	-2.84	30.6	69
12	4.998	-0.02783	389.3	-2.75	3.096	-0.04006	379.4	-2.94	4.630	-0.02986	368.7	-2.97	-0.03259	-2.89	30.7	65
13	4.987	-0.03221	388.2	-3.02	3.089	-0.04286	378.5	-3.17	4.625	-0.03186	368.0	-3.16	-0.03564	-3.12	31.0	67
14	4.988	-0.03181	388.2	-3.02	3.090	-0.04246	378.5	-3.17	4.626	-0.03146	368.0	-3.16	-0.03524	-3.12	30.2	69
15	4.990	-0.03101	388.0	-3.07	3.092	-0.04166	378.4	-3.20	4.627	-0.03106	367.9	-3.18	-0.03458	-3.15	29.7	70
20	4.993	-0.02982	388.5	-2.95	3.102	-0.03766	378.8	-3.10	4.636	-0.02748	368.3	-3.08	-0.03165	-3.04	30.9	70
30	4.968	-0.03976	384.8	-3.87	3.076	-0.04807	375.3	-3.99	4.612	-0.03703	365.0	-3.95	-0.04162	-3.94	30.2	67

ตารางที่ ง-26 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 251.58 mm				L2 = 249.97 mm				L3 = 251.78 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.148	0	402.9	0	3.535	0	397.9	0	5.351	0	398.5	0	0	0	28.0	75
1	5.011	-0.05446	398.5	-1.09	3.499	-0.01440	392.9	-1.26	5.317	-0.01350	391.8	-1.68	-0.01395	-1.34	28.7	72
2	5.023	-0.04969	397.5	-1.34	3.495	-0.01600	392.0	-1.48	5.322	-0.01152	391.3	-1.81	-0.01376	-1.54	28.0	71
3	4.998	-0.05962	396.6	-1.56	3.503	-0.01280	391.2	-1.68	5.332	-0.00755	391.4	-1.78	-0.01017	-1.68	28.0	75
4	5.003	-0.05764	398.2	-1.17	3.509	-0.01040	392.5	-1.36	5.328	-0.00913	392.6	-1.48	-0.00977	-1.33	28.7	73
5	5.002	-0.05803	396.6	-1.56	3.496	-0.01560	391.0	-1.73	5.320	-0.01231	390.7	-1.96	-0.01396	-1.75	29.0	68
6	4.989	-0.06320	395.4	-1.86	3.494	-0.01640	389.5	-2.11	5.318	-0.01311	389.5	-2.26	-0.01475	-2.08	27.4	74
7	4.990	-0.06280	394.8	-2.01	3.477	-0.02320	389.0	-2.24	5.301	-0.01986	388.8	-2.43	-0.02153	-2.23	28.0	72
8	4.971	-0.07036	393.7	-2.28	3.458	-0.03080	387.8	-2.54	5.287	-0.02542	387.8	-2.69	-0.02811	-2.50	28.7	69
9	4.951	-0.07831	392.2	-2.66	3.448	-0.03480	386.6	-2.84	5.278	-0.02899	386.4	-3.04	-0.03190	-2.84	30.3	68
10	4.954	-0.07711	392.0	-2.71	3.451	-0.03360	386.0	-2.99	5.273	-0.03098	385.9	-3.16	-0.03229	-2.95	29.9	66
11	4.960	-0.07473	392.6	-2.56	3.462	-0.02920	386.9	-2.76	5.289	-0.02462	386.9	-2.91	-0.02691	-2.74	30.6	69
12	4.959	-0.07513	392.4	-2.61	3.457	-0.03120	386.6	-2.84	5.285	-0.02621	386.5	-3.01	-0.02871	-2.82	30.7	65
13	4.951	-0.07831	391.6	-2.80	3.450	-0.03400	385.7	-3.07	5.270	-0.03217	385.5	-3.26	-0.03309	-3.04	31.0	67
14	4.951	-0.07831	391.6	-2.80	3.452	-0.03320	385.7	-3.07	5.275	-0.03018	385.4	-3.29	-0.03169	-3.05	30.4	67
15	4.950	-0.07870	391.5	-2.83	3.450	-0.03400	385.7	-3.07	5.271	-0.03177	385.5	-3.26	-0.03289	-3.05	29.7	70
20	4.953	-0.07751	392.2	-2.66	3.454	-0.03240	386.2	-2.94	5.281	-0.02780	386.2	-3.09	-0.03010	-2.89	30.9	69
30	4.94	-0.08268	387.3	-3.87	3.434	-0.04041	381.5	-4.12	5.258	-0.03694	381.5	-4.27	-0.03867	-4.09	29.8	68

ตารางที่ ง-27 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-4 ปรมีร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.39 mm				L2 = 252.46 mm				L3 = 247.91 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.955	0	379.2	0	6.030	0	390.6	0	1.482	0	385.1	0	0	0	30.4	60
1	2.968	0.00521	369.2	-2.64	6.045	0.00594	381.2	-2.41	1.486	0.00161	376.2	-2.31	0.00426	-2.45	28.6	72
2	2.958	0.00120	368.4	-2.85	6.028	-0.00079	380.4	-2.61	1.479	-0.00121	375.3	-2.54	-0.00027	-2.67	30.9	67
3	2.945	-0.00401	366.9	-3.24	6.018	-0.00475	378.6	-3.07	1.469	-0.00524	373.3	-3.06	-0.00467	-3.13	28.7	70
4	2.946	-0.00361	366.2	-3.43	6.016	-0.00555	377.6	-3.33	1.467	-0.00605	372.5	-3.27	-0.00507	-3.34	29.0	70
5	2.922	-0.01323	365.5	-3.61	5.984	-0.01822	376.8	-3.53	1.451	-0.01250	371.8	-3.45	-0.01465	-3.53	30.3	64
6	2.911	-0.01764	365.2	-3.69	5.960	-0.02773	376.6	-3.58	1.435	-0.01896	371.3	-3.58	-0.02144	-3.62	30.5	65
7	2.900	-0.02205	364.6	-3.85	5.959	-0.02812	376.0	-3.74	1.418	-0.02582	370.9	-3.69	-0.02533	-3.76	30.6	67
8	2.901	-0.02165	364.7	-3.82	5.953	-0.03050	376.1	-3.71	1.416	-0.02662	371.0	-3.66	-0.02626	-3.73	29.1	70
9	2.912	-0.01724	364.5	-3.88	5.949	-0.03208	376.4	-3.64	1.425	-0.02299	371.3	-3.58	-0.02411	-3.70	30.9	66
10	2.905	-0.02005	364.9	-3.77	5.949	-0.03208	376.3	-3.66	1.422	-0.02420	371.2	-3.61	-0.02545	-3.68	30.4	65
11	2.898	-0.02286	364.6	-3.85	5.944	-0.03406	376.0	-3.74	1.422	-0.02420	370.8	-3.71	-0.02704	-3.77	29.5	66
12	2.897	-0.02326	364.5	-3.88	5.946	-0.03327	376.0	-3.74	1.420	-0.02501	370.8	-3.71	-0.02718	-3.78	29.9	69
13	2.899	-0.02246	364.7	-3.82	5.950	-0.03169	375.9	-3.76	1.419	-0.02541	370.9	-3.69	-0.02652	-3.76	29.9	70
14	2.899	-0.02246	364.7	-3.82	5.947	-0.03288	375.8	-3.79	1.420	-0.02501	370.9	-3.69	-0.02678	-3.77	30.0	68
15	2.899	-0.02246	364.9	-3.77	5.942	-0.03486	376.0	-3.74	1.422	-0.02420	371.0	-3.66	-0.02717	-3.72	30.1	69
20	2.888	-0.02687	364.3	-3.93	5.93	-0.03961	375.7	-3.81	1.401	-0.03267	370.6	-3.77	-0.03305	-3.84	30.7	68
30	2.858	-0.03890	363.6	-4.11	5.922	-0.04278	374.9	-4.02	1.38	-0.04114	369.7	-4.00	-0.04094	-4.04	30.6	67

ตารางที่ ง-28 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 251.25 mm				L2 = 248.99 mm				L3 = 249.63 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.815	0	386.2	0	2.563	0	384.7	0	3.198	0	385.7	0	0	0.00	30.5	61
1	4.826	0.00438	377.9	-2.15	2.572	0.00361	377.2	-1.95	3.202	0.00160	377.6	-2.10	0.00320	-2.07	27.4	72
2	4.808	-0.00279	376.9	-2.41	2.547	-0.00643	376.1	-2.24	3.194	-0.00160	376.7	-2.33	-0.00360	-2.33	30.1	69
3	4.795	-0.00796	374.0	-3.16	2.537	-0.01044	373.2	-2.99	3.182	-0.00641	377.9	-2.02	-0.00827	-2.72	28.0	70
4	4.794	-0.00836	373.3	-3.34	2.535	-0.01125	372.2	-3.25	3.176	-0.00881	373.2	-3.24	-0.00947	-3.28	28.5	76
5	4.777	-0.01512	372.1	-3.65	2.520	-0.01727	371.3	-3.48	3.172	-0.01042	372.3	-3.47	-0.01427	-3.54	28.9	67
6	4.772	-0.01711	371.3	-3.86	2.512	-0.02048	370.2	-3.77	3.162	-0.01442	371.3	-3.73	-0.01734	-3.79	31.1	63
7	4.773	-0.01672	370.7	-4.01	2.516	-0.01888	369.8	-3.87	3.156	-0.01683	370.9	-3.84	-0.01747	-3.91	29.8	66
8	4.777	-0.01512	370.0	-4.19	2.518	-0.01807	369.0	-4.08	3.150	-0.01923	370.2	-4.02	-0.01748	-4.10	30.6	67
9	4.782	-0.01313	371.1	-3.91	2.530	-0.01325	370.1	-3.80	3.148	-0.02003	371.2	-3.76	-0.01547	-3.82	31.0	63
10	4.781	-0.01353	370.6	-4.04	2.528	-0.01406	369.4	-3.98	3.147	-0.02043	370.6	-3.91	-0.01601	-3.98	30.3	64
11	4.779	-0.01433	370.5	-4.07	2.527	-0.01446	369.4	-3.98	3.147	-0.02043	370.5	-3.94	-0.01641	-3.99	30.4	69
12	4.773	-0.01672	370.0	-4.19	2.523	-0.01606	369.1	-4.06	3.146	-0.02083	370.3	-3.99	-0.01787	-4.08	29.9	68
13	4.778	-0.01473	370.5	-4.07	2.532	-0.01245	369.3	-4.00	3.142	-0.02243	370.5	-3.94	-0.01654	-4.00	30.1	69
14	4.778	-0.01473	370.5	-4.07	2.532	-0.01245	369.5	-3.95	3.140	-0.02323	370.5	-3.94	-0.01680	-3.99	30.0	68
15	4.778	-0.01473	370.5	-4.07	2.532	-0.01245	369.6	-3.93	3.136	-0.02484	370.7	-3.89	-0.01734	-3.96	31.1	66
20	4.764	-0.02030	369.2	-4.40	2.518	-0.01807	368.6	-4.19	3.130	-0.02724	369.8	-4.12	-0.02187	-4.24	30.8	67
30	4.752	-0.02508	368.0	-4.71	2.502	-0.02450	367.5	-4.47	3.122	-0.03045	368.6	-4.43	-0.02667	-4.54	30.2	67

ตารางที่ ง-29 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.86 mm				L2 = 249.64 mm				L3 = 249.19 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.429	0	395.0	0	3.205	0	394.5	0	2.755	0	377.9	0	0	0	30.6	69
1	4.431	0.00080	391.7	-0.84	3.212	0.00280	390.6	-0.99	2.775	0.00803	373.7	-1.11	0.00388	-0.98	28.3	70
2	4.419	-0.00399	390.1	-1.24	3.197	-0.00320	389.3	-1.32	2.758	0.00120	372.2	-1.51	-0.00360	-1.36	29.7	72
3	4.403	-0.01036	385.7	-2.35	3.188	-0.00681	384.7	-2.48	2.742	-0.00522	368.0	-2.62	-0.00859	-2.49	30.0	61
4	4.408	-0.00837	385.7	-2.35	3.185	-0.00801	384.6	-2.51	2.748	-0.00281	368.1	-2.59	-0.00640	-2.49	30.2	68
5	4.395	-0.01355	383.5	-2.91	3.167	-0.01522	382.4	-3.07	2.734	-0.00843	366.2	-3.10	-0.01240	-3.02	29.7	68
6	4.377	-0.02073	382.2	-3.24	3.155	-0.02003	381.2	-3.37	2.724	-0.01244	365.2	-3.36	-0.01773	-3.32	30.0	69
7	4.378	-0.02033	381.8	-3.34	3.155	-0.02003	381.0	-3.42	2.728	-0.01084	365.1	-3.39	-0.01706	-3.38	29.8	68
8	4.377	-0.02073	382.0	-3.29	3.154	-0.02043	381.1	-3.40	2.728	-0.01084	365.6	-3.25	-0.01733	-3.31	29.1	72
9	4.378	-0.02033	382.0	-3.29	3.155	-0.02003	381.3	-3.35	2.726	-0.01164	365.5	-3.28	-0.01733	-3.31	30.0	66
10	4.373	-0.02232	381.4	-3.44	3.150	-0.02203	380.4	-3.57	2.722	-0.01324	364.6	-3.52	-0.01920	-3.51	31.2	64
11	4.374	-0.02192	381.4	-3.44	3.150	-0.02203	380.3	-3.60	2.722	-0.01324	364.5	-3.55	-0.01907	-3.53	30.4	67
12	4.373	-0.02232	381.3	-3.47	3.153	-0.02083	380.5	-3.55	2.722	-0.01324	364.6	-3.52	-0.01880	-3.51	29.9	68
13	4.379	-0.01993	381.4	-3.44	3.160	-0.01803	380.5	-3.55	2.723	-0.01284	364.9	-3.44	-0.01693	-3.48	31.2	65
14	4.376	-0.02113	381.4	-3.44	3.160	-0.01803	380.4	-3.57	2.720	-0.01405	364.9	-3.44	-0.01773	-3.49	30.0	68
15	4.375	-0.02153	381.4	-3.44	3.158	-0.01883	380.4	-3.57	2.719	-0.01445	365.2	-3.36	-0.01827	-3.46	31.3	65
20	4.362	-0.02671	379.7	-3.87	3.148	-0.02283	378.5	-4.06	2.717	-0.01525	363.4	-3.84	-0.02160	-3.92	29.1	69
30	4.353	-0.03030	378.1	-4.28	3.132	-0.02924	377.1	-4.41	2.703	-0.02087	361.9	-4.23	-0.02680	-4.31	30.2	68

ตารางที่ ง-30 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P30-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.21 mm				L2 = 249.41 mm				L3 = 252.82 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.784	0	391.2	0	2.978	0	376.6	0	6.378	0	387.0	0	0	0	30.3	65
1	2.818	0.01364	389.7	-0.38	3.020	0.01684	375.4	-0.32	6.425	0.01859	386.8	-0.05	0.01636	-0.25	29.6	72
2	2.795	0.00441	388.4	-0.72	2.991	0.00521	374.5	-0.56	6.400	0.00870	386.0	-0.26	0.00611	-0.51	30.0	69
3	2.768	-0.00642	382.5	-2.22	2.967	-0.00441	369.1	-1.99	6.359	-0.00752	380.9	-1.58	-0.00612	-1.93	28.0	69
4	2.770	-0.00562	382.6	-2.20	2.960	-0.00722	369.0	-2.02	6.369	-0.00356	380.6	-1.65	-0.00546	-1.96	28.4	71
5	2.748	-0.01445	381.2	-2.56	2.950	-0.01123	367.4	-2.44	6.352	-0.01028	378.9	-2.09	-0.01199	-2.36	29.0	69
6	2.733	-0.02046	379.4	-3.02	2.932	-0.01844	365.3	-3.00	6.343	-0.01384	376.9	-2.61	-0.01758	-2.88	30.7	65
7	2.741	-0.01725	379.6	-2.97	2.938	-0.01604	365.3	-3.00	6.341	-0.01464	376.9	-2.61	-0.01598	-2.86	29.8	69
8	2.743	-0.01645	379.7	-2.94	2.935	-0.01724	365.3	-3.00	6.343	-0.01384	376.9	-2.61	-0.01585	-2.85	29.3	71
9	2.740	-0.01766	379.5	-2.99	2.937	-0.01644	365.1	-3.05	6.341	-0.01464	376.6	-2.69	-0.01624	-2.91	29.8	70
10	2.737	-0.01886	379.1	-3.09	2.937	-0.01644	364.9	-3.11	6.339	-0.01543	376.3	-2.76	-0.01691	-2.99	31.2	64
11	2.735	-0.01966	379.0	-3.12	2.937	-0.01644	364.6	-3.19	6.338	-0.01582	376.0	-2.84	-0.01731	-3.05	30.0	69
12	2.735	-0.01966	378.7	-3.20	2.937	-0.01644	364.2	-3.29	6.340	-0.01503	375.7	-2.92	-0.01704	-3.14	30.4	67
13	2.733	-0.02046	379.0	-3.12	2.938	-0.01604	364.4	-3.24	6.347	-0.01226	376.0	-2.84	-0.01625	-3.07	31.0	66
14	2.734	-0.02006	379.0	-3.12	2.940	-0.01524	364.5	-3.21	6.349	-0.01147	376.1	-2.82	-0.01559	-3.05	30.0	68
15	2.738	-0.01846	379.4	-3.02	2.946	-0.01283	364.8	-3.13	6.351	-0.01068	376.4	-2.74	-0.01399	-2.96	29.8	70
20	2.726	-0.02327	377.7	-3.45	2.940	-0.01524	363.3	-3.53	6.331	-0.01859	374.9	-3.13	-0.01903	-3.37	29.6	68
30	2.715	-0.02769	375.4	-4.04	2.918	-0.02406	361.0	-4.14	6.317	-0.02413	372.6	-3.72	-0.02529	-3.97	30.1	65

ตารางที่ ง-31 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O5-4 ปรมีรอนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.45 mm				L2 = 248.94 mm				L3 = 248.23 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	6.019	0	383.2	0	2.510	0	377.2	0	1.797	0	384.2	0	0	0	28.6	73
1	6.008	-0.00436	376.9	-1.64	2.498	-0.00482	371.5	-1.51	1.776	-0.00846	377.9	-1.64	-0.00588	-1.60	30.0	71
2	5.994	-0.00990	373.7	-2.48	2.480	-0.01205	368.1	-2.41	1.763	-0.01370	374.9	-2.42	-0.01180	-2.44	30.2	68
3	5.982	-0.01466	369.9	-3.47	2.478	-0.01285	363.9	-3.53	1.750	-0.01893	370.6	-3.54	-0.01680	-3.51	29.7	70
4	5.978	-0.01624	369.7	-3.52	2.479	-0.01245	363.5	-3.63	1.740	-0.02296	370.3	-3.62	-0.01722	-3.59	29.1	69
5	5.969	-0.01981	369.1	-3.68	2.46	-0.02009	362.3	-3.95	1.735	-0.02498	369.3	-3.88	-0.02162	-3.84	29.5	69
6	5.958	-0.02416	368.4	-3.86	2.461	-0.01968	361.9	-4.06	1.731	-0.02659	368.5	-4.09	-0.02348	-4.00	29.2	69
7	5.944	-0.02971	367.5	-4.10	2.447	-0.02531	360.9	-4.32	1.715	-0.03303	367.7	-4.29	-0.02935	-4.24	31.0	65
8	5.950	-0.02733	367.8	-4.02	2.450	-0.02410	361.1	-4.27	1.722	-0.03021	368.0	-4.22	-0.02722	-4.17	29.8	68
9	5.948	-0.02812	367.7	-4.04	2.450	-0.02410	361.1	-4.27	1.720	-0.03102	368.0	-4.22	-0.02775	-4.18	30.0	67
10	5.948	-0.02812	367.9	-3.99	2.440	-0.02812	361.1	-4.27	1.718	-0.03183	367.8	-4.27	-0.02936	-4.18	30.3	66
11	5.948	-0.02812	367.7	-4.04	2.440	-0.02812	361.2	-4.24	1.718	-0.03183	367.7	-4.29	-0.02936	-4.19	29.9	69
12	5.949	-0.02773	367.7	-4.04	2.441	-0.02772	361.0	-4.29	1.718	-0.03183	367.7	-4.29	-0.02909	-4.21	30.4	67
13	5.952	-0.02654	367.8	-4.02	2.438	-0.02892	361.1	-4.27	1.720	-0.03102	367.8	-4.27	-0.02883	-4.19	31.1	66
14	5.952	-0.02654	367.7	-4.04	2.438	-0.02892	361.1	-4.27	1.720	-0.03102	367.9	-4.24	-0.02883	-4.19	30.2	68
15	5.958	-0.02416	368.2	-3.91	2.443	-0.02691	361.4	-4.19	1.723	-0.02981	368.3	-4.14	-0.02696	-4.08	30.6	69
20	5.942	-0.03050	367.4	-4.12	2.441	-0.02772	360.8	-4.35	1.719	-0.03142	367.7	-4.29	-0.02988	-4.26	30.0	68
30	5.908	-0.04397	366.3	-4.41	2.407	-0.04138	359.7	-4.64	1.689	-0.04351	366.5	-4.61	-0.04295	-4.55	30.2	67

ตารางที่ ง-32 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.70 mm				L2 = 250.63 mm				L3 = 248.78 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.270	0	384.3	0	4.198	0	393.4	0	2.348	0	383.9	0	0	0	29.0	70
1	4.238	-0.01276	378.9	-1.41	4.175	-0.00918	388.0	-1.37	2.332	-0.00643	379.3	-1.20	-0.01097	-1.33	30.3	70
2	4.227	-0.01715	375.2	-2.37	4.167	-0.01237	383.7	-2.47	2.318	-0.01206	375.4	-2.21	-0.01476	-2.35	30.3	67
3	4.224	-0.01835	371.5	-3.33	4.165	-0.01317	379.9	-3.43	2.311	-0.01487	372.0	-3.10	-0.01546	-3.29	29.6	68
4	4.212	-0.02314	370.7	-3.54	4.152	-0.01835	379.0	-3.66	2.302	-0.01849	371.2	-3.31	-0.01999	-3.50	29.0	69
5	4.200	-0.02792	369.6	-3.83	4.138	-0.02394	378.0	-3.91	2.289	-0.02372	370.3	-3.54	-0.02519	-3.76	29.8	66
6	4.189	-0.03231	368.8	-4.03	4.132	-0.02633	376.9	-4.19	2.279	-0.02774	369.3	-3.80	-0.02879	-4.01	29.8	68
7	4.186	-0.03351	368.4	-4.14	4.128	-0.02793	376.6	-4.27	2.281	-0.02693	369.1	-3.86	-0.02946	-4.09	30.8	68
8	4.192	-0.03111	369.4	-3.88	4.133	-0.02593	377.6	-4.02	2.288	-0.02412	370.0	-3.62	-0.02706	-3.84	30.0	69
9	4.198	-0.02872	368.8	-4.03	4.135	-0.02514	377.2	-4.12	2.280	-0.02733	369.7	-3.70	-0.02706	-3.95	30.3	68
10	4.182	-0.03510	368.4	-4.14	4.125	-0.02913	376.5	-4.30	2.272	-0.03055	368.8	-3.93	-0.03159	-4.12	30.6	65
11	4.190	-0.03191	368.0	-4.24	4.126	-0.02873	376.7	-4.25	2.270	-0.03135	368.7	-3.96	-0.03066	-4.15	29.7	67
12	4.188	-0.03271	368.0	-4.24	4.124	-0.02953	376.4	-4.32	2.270	-0.03135	368.7	-3.96	-0.03120	-4.17	30.2	69
13	4.187	-0.03311	368.2	-4.19	4.122	-0.03032	376.2	-4.37	2.268	-0.03216	368.7	-3.96	-0.03186	-4.17	30.4	69
14	4.190	-0.03191	368.8	-4.03	4.128	-0.02793	377.0	-4.17	2.274	-0.02975	369.6	-3.72	-0.02986	-3.98	30.9	69
15	4.190	-0.03191	368.8	-4.03	4.128	-0.02793	377.0	-4.17	2.274	-0.02975	369.6	-3.72	-0.02986	-3.98	30.9	69
20	4.177	-0.03710	368.0	-4.24	4.122	-0.03032	376.4	-4.32	2.258	-0.03618	368.7	-3.96	-0.03453	-4.17	31.1	66
30	4.152	-0.04707	366.7	-4.58	4.088	-0.04389	375.0	-4.68	2.242	-0.04261	367.5	-4.27	-0.04452	-4.51	30.8	67

ตารางที่ ง-33 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O15-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.77 mm				L2 = 248.48 mm				L3 = 252.07 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	3.338	0	387.2	0	2.045	0	372.7	0	5.635	0	380.2	0	0	0	27.7	75
1	3.316	-0.00881	383.1	-1.06	2.016	-0.01167	369.0	-0.99	5.608	-0.01071	375.5	-1.24	-0.01040	-1.10	28.9	75
2	3.300	-0.01521	379.3	-2.04	2.008	-0.01489	365.2	-2.01	5.587	-0.01904	371.5	-2.29	-0.01638	-2.11	29.9	62
3	3.305	-0.01321	376.3	-2.82	2.008	-0.01489	362.3	-2.79	5.593	-0.01666	369.0	-2.95	-0.01492	-2.85	27.6	75
4	3.293	-0.01802	375.3	-3.07	2.004	-0.01650	361.1	-3.11	5.573	-0.02460	368.0	-3.21	-0.01970	-3.13	29.3	68
5	3.277	-0.02442	374.3	-3.33	1.988	-0.02294	360.0	-3.41	5.572	-0.02499	366.8	-3.52	-0.02412	-3.42	29.2	66
6	3.270	-0.02723	373.2	-3.62	1.980	-0.02616	359.1	-3.65	5.555	-0.03174	365.8	-3.79	-0.02837	-3.68	30.3	68
7	3.266	-0.02883	372.9	-3.69	1.975	-0.02817	358.7	-3.76	5.558	-0.03055	365.3	-3.92	-0.02918	-3.79	30.4	69
8	3.272	-0.02642	373.6	-3.51	1.980	-0.02616	359.3	-3.60	5.560	-0.02975	366.1	-3.71	-0.02745	-3.61	31.0	66
9	3.277	-0.02442	373.5	-3.54	1.979	-0.02656	359.3	-3.60	5.558	-0.03055	365.9	-3.76	-0.02718	-3.63	30.0	69
10	3.263	-0.03003	372.8	-3.72	1.968	-0.03099	358.4	-3.84	5.551	-0.03332	365.2	-3.95	-0.03145	-3.83	31.4	67
11	3.261	-0.03083	372.3	-3.85	1.972	-0.02938	358.4	-3.84	5.549	-0.03412	365.0	-4.00	-0.03144	-3.89	30.3	69
12	3.261	-0.03083	372.4	-3.82	1.970	-0.03018	358.4	-3.84	5.548	-0.03451	365.0	-4.00	-0.03184	-3.89	29.9	69
13	3.263	-0.03003	372.7	-3.74	1.970	-0.03018	358.3	-3.86	5.548	-0.03451	365.0	-4.00	-0.03158	-3.87	30.4	69
14	3.264	-0.02963	372.8	-3.72	1.970	-0.03018	358.5	-3.81	5.550	-0.03372	365.2	-3.95	-0.03118	-3.82	30.1	68
15	3.271	-0.02682	373.8	-3.46	1.972	-0.02938	359.4	-3.57	5.560	-0.02975	366.2	-3.68	-0.02865	-3.57	30.5	69
20	3.257	-0.03243	372.5	-3.80	1.959	-0.03461	358.3	-3.86	5.546	-0.03531	364.9	-4.02	-0.03412	-3.89	31.4	65
30	3.238	-0.04004	371	-4.18	1.937	-0.04347	356.7	-4.29	5.515	-0.04761	363.3	-4.45	-0.04370	-4.31	30.8	66

ตารางที่ ง-34 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O5-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 251.03 mm				L2 = 252.25 mm				L3 = 249.99 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.604	0	392.4	0	5.823	0	386.1	0	3.558	0	389.2	0	0	0	28.0	72
1	4.572	-0.01275	388.4	-1.02	5.800	-0.00912	381.9	-1.09	3.518	-0.01600	383.8	-1.39	-0.01093	-1.16	28.3	72
2	4.576	-0.01115	384.4	-2.04	5.786	-0.01467	378.2	-2.05	3.507	-0.02040	379.6	-2.47	-0.01541	-2.18	28.8	68
3	4.568	-0.01434	382.6	-2.50	5.784	-0.01546	376.1	-2.59	3.507	-0.02040	378.2	-2.83	-0.01673	-2.64	29.2	70
4	4.551	-0.02111	381.0	-2.91	5.771	-0.02061	374.4	-3.03	3.488	-0.02800	376.7	-3.21	-0.02324	-3.05	30.4	63
5	4.551	-0.02111	379.6	-3.26	5.763	-0.02379	373.4	-3.29	3.483	-0.03000	375.1	-3.62	-0.02497	-3.39	30.7	68
6	4.549	-0.02191	378.7	-3.49	5.752	-0.02815	372.2	-3.60	3.477	-0.03240	374.3	-3.83	-0.02749	-3.64	30.6	67
7	4.548	-0.02231	378.5	-3.54	5.754	-0.02735	372.3	-3.57	3.482	-0.03040	374.4	-3.80	-0.02669	-3.64	29.3	69
8	4.547	-0.02271	378.7	-3.49	5.755	-0.02696	372.3	-3.57	3.482	-0.03040	374.4	-3.80	-0.02669	-3.62	29.7	68
9	4.540	-0.02549	378.6	-3.52	5.754	-0.02735	372.4	-3.55	3.480	-0.03120	374.4	-3.80	-0.02802	-3.62	30.3	65
10	4.534	-0.02788	378.3	-3.59	5.755	-0.02696	372.1	-3.63	3.480	-0.03120	374.1	-3.88	-0.02868	-3.70	29.4	66
11	4.534	-0.02788	378.3	-3.59	5.753	-0.02775	372.0	-3.65	3.480	-0.03120	374.1	-3.88	-0.02895	-3.71	30.1	67
12	4.535	-0.02749	378.4	-3.57	5.752	-0.02815	372.1	-3.63	3.479	-0.03160	374.1	-3.88	-0.02908	-3.69	30.2	67
13	4.537	-0.02669	378.4	-3.57	5.751	-0.02854	372.0	-3.65	3.479	-0.03160	374.1	-3.88	-0.02894	-3.70	30.1	69
14	4.537	-0.02669	378.4	-3.57	5.752	-0.02815	372.0	-3.65	3.480	-0.03120	374.1	-3.88	-0.02868	-3.70	30.2	68
15	4.543	-0.02430	378.8	-3.47	5.755	-0.02696	372.3	-3.57	3.480	-0.03120	374.4	-3.80	-0.02749	-3.61	30.7	68
20	4.529	-0.02988	377.8	-3.72	5.742	-0.03211	371.7	-3.73	3.468	-0.03600	373.8	-3.96	-0.03266	-3.80	30.8	67
30	4.5	-0.04143	375.3	-4.36	5.721	-0.04044	369.4	-4.33	3.443	-0.04600	371	-4.68	-0.04262	-4.45	30.2	67

ตารางที่ ง-35 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.79 mm				L2 = 249.63 mm				L3 = 249.42 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	3.364	0	371.5	0	3.196	0	376.5	0	2.993	0	386.8	0	0	0	28.0	71
1	3.331	-0.01321	367.6	-1.05	3.178	-0.00721	372.7	-1.01	2.963	-0.01203	381.9	-1.27	-0.01082	-1.11	30.3	69
2	3.332	-0.01281	362.5	-2.42	3.169	-0.01082	367.5	-2.39	2.950	-0.01724	377.1	-2.51	-0.01362	-2.44	28.0	70
3	3.331	-0.01321	361.0	-2.83	3.171	-0.01001	365.8	-2.84	2.953	-0.01604	375.3	-2.97	-0.01462	-2.88	29.0	70
4	3.312	-0.02082	360.0	-3.10	3.152	-0.01763	364.4	-3.21	2.936	-0.02285	373.7	-3.39	-0.02043	-3.23	28.8	68
5	3.308	-0.02242	358.8	-3.42	3.145	-0.02043	363.2	-3.53	2.930	-0.02526	372.3	-3.75	-0.02270	-3.57	31.1	65
6	3.303	-0.02442	358.3	-3.55	3.135	-0.02444	362.4	-3.75	2.932	-0.02446	371.6	-3.93	-0.02444	-3.74	29.7	67
7	3.303	-0.02442	358.1	-3.61	3.133	-0.02524	362.2	-3.80	2.926	-0.02686	371.3	-4.01	-0.02551	-3.80	29.6	68
8	3.304	-0.02402	358.1	-3.61	3.133	-0.02524	362.3	-3.77	2.926	-0.02686	371.3	-4.01	-0.02537	-3.80	29.6	67
9	3.307	-0.02282	358.2	-3.58	3.135	-0.02444	362.4	-3.75	2.927	-0.02646	371.4	-3.98	-0.02457	-3.77	30.8	64
10	3.311	-0.02122	358.1	-3.61	3.133	-0.02524	362.2	-3.80	2.929	-0.02566	371.2	-4.03	-0.02404	-3.81	29.4	67
11	3.310	-0.02162	358.1	-3.61	3.133	-0.02524	362.2	-3.80	2.927	-0.02646	371.1	-4.06	-0.02444	-3.82	30.2	68
12	3.307	-0.02282	358.2	-3.58	3.131	-0.02604	362.1	-3.82	2.927	-0.02646	371.2	-4.03	-0.02511	-3.81	31.0	66
13	3.300	-0.02562	357.8	-3.69	3.128	-0.02724	361.8	-3.90	2.924	-0.02766	370.8	-4.14	-0.02684	-3.91	30.2	69
14	3.300	-0.02562	358.0	-3.63	3.128	-0.02724	361.9	-3.88	2.924	-0.02766	370.8	-4.14	-0.02684	-3.88	30.1	68
15	3.309	-0.02202	358.7	-3.45	3.131	-0.02604	362.6	-3.69	2.925	-0.02726	371.8	-3.88	-0.02511	-3.67	30.9	67
20	3.303	-0.02442	357.2	-3.85	3.125	-0.02844	361.6	-3.96	2.921	-0.02887	370.5	-4.21	-0.02724	-4.01	31.0	66
30	3.280	-0.03363	354.9	-4.47	3.100	-0.03846	359.4	-4.54	2.902	-0.03648	368	-4.86	-0.03619	-4.62	30.5	67

ตารางที่ ง-36 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O15-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.84 mm				L2 = 249.40 mm				L3 = 249.86 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.414	0	385.6	0	2.965	0	376.2	0	3.426	0	392.4	0	0	0	27.3	74
1	2.392	-0.00884	382.5	-0.80	2.938	-0.01083	372.9	-0.88	3.393	-0.01321	387.9	-1.15	-0.01096	-0.94	29.7	71
2	2.375	-0.01567	377.1	-2.20	2.923	-0.01684	367.7	-2.26	3.379	-0.01881	382.5	-2.52	-0.01626	-2.33	30.3	61
3	2.377	-0.01487	376.6	-2.33	2.924	-0.01644	367.2	-2.39	3.379	-0.01881	382.0	-2.65	-0.01684	-2.46	30.4	67
4	2.361	-0.02130	374.6	-2.85	2.907	-0.02326	365.2	-2.92	3.357	-0.02762	379.9	-3.19	-0.02406	-2.99	30.0	66
5	2.355	-0.02371	373.4	-3.16	2.903	-0.02486	363.7	-3.32	3.356	-0.02802	378.7	-3.49	-0.02553	-3.33	30.0	68
6	2.351	-0.02532	373.2	-3.22	2.896	-0.02767	363.4	-3.40	3.354	-0.02882	378.1	-3.64	-0.02727	-3.42	30.0	67
7	2.345	-0.02773	373.4	-3.16	2.895	-0.02807	363.7	-3.32	3.346	-0.03202	378.5	-3.54	-0.02927	-3.34	29.9	70
8	2.342	-0.02893	374.1	-2.98	2.901	-0.02566	364.3	-3.16	3.350	-0.03042	379.3	-3.34	-0.02834	-3.16	30.5	68
9	2.346	-0.02733	372.6	-3.37	2.898	-0.02687	363.1	-3.48	3.346	-0.03202	377.8	-3.72	-0.02874	-3.52	30.2	66
10	2.346	-0.02733	372.4	-3.42	2.897	-0.02727	363.2	-3.46	3.345	-0.03242	377.8	-3.72	-0.02900	-3.53	30.2	67
11	2.345	-0.02773	372.6	-3.37	2.899	-0.02646	363.1	-3.48	3.345	-0.03242	377.8	-3.72	-0.02887	-3.52	29.9	69
12	2.344	-0.02813	372.8	-3.32	2.900	-0.02606	363.1	-3.48	3.344	-0.03282	377.9	-3.70	-0.02900	-3.50	31.0	66
13	2.340	-0.02974	372.4	-3.42	2.898	-0.02687	362.6	-3.62	3.341	-0.03402	377.7	-3.75	-0.03021	-3.59	30.3	69
14	2.340	-0.02974	372.5	-3.40	2.898	-0.02687	362.7	-3.59	3.342	-0.03362	377.8	-3.72	-0.03007	-3.57	30.2	68
15	2.346	-0.02733	373.6	-3.11	2.901	-0.02566	363.8	-3.30	3.348	-0.03122	378.8	-3.47	-0.02807	-3.29	31.1	66
20	2.335	-0.03175	372.2	-3.48	2.889	-0.03047	362.5	-3.64	3.337	-0.03562	377.5	-3.80	-0.03261	-3.64	30.2	68
30	2.318	-0.03858	369.9	-4.07	2.874	-0.03649	360.1	-4.28	3.319	-0.04282	375.0	-4.43	-0.03930	-4.26	30.2	67

ตารางที่ ง-37 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P2005-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.18 mm				L2 = 251.51 mm				L3 = 248.41 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.754	0	378.4	0	5.084	0	403.6	0	1.979	0	384.9	0	0	0	26.9	75
1	2.736	-0.00722	374.9	-0.92	5.075	-0.00358	399.7	-0.97	1.966	-0.00523	381.2	-0.96	-0.00535	-0.95	30.3	69
2	2.714	-0.01605	368.6	-2.59	5.054	-0.01193	393.3	-2.55	1.952	-0.01087	375.2	-2.52	-0.01295	-2.55	28.4	67
3	2.715	-0.01565	368.6	-2.59	5.053	-0.01233	393.2	-2.58	1.950	-0.01167	375.2	-2.52	-0.01322	-2.56	28.2	71
4	2.703	-0.02047	366.5	-3.14	5.036	-0.01908	391.0	-3.12	1.935	-0.01771	373.2	-3.04	-0.01909	-3.10	29.5	68
5	2.696	-0.02328	365.3	-3.46	5.031	-0.02107	389.7	-3.44	1.928	-0.02053	372.1	-3.33	-0.02163	-3.41	29.7	69
6	2.697	-0.02287	364.6	-3.65	5.035	-0.01948	388.9	-3.64	1.923	-0.02254	371.3	-3.53	-0.02163	-3.61	30.0	66
7	2.699	-0.02207	365.0	-3.54	5.028	-0.02227	389.3	-3.54	1.920	-0.02375	371.6	-3.46	-0.02270	-3.51	30.0	68
8	2.698	-0.02247	365.1	-3.51	5.026	-0.02306	389.0	-3.62	1.920	-0.02375	371.2	-3.56	-0.02309	-3.56	30.0	69
9	2.696	-0.02328	364.1	-3.78	5.024	-0.02386	388.2	-3.82	1.923	-0.02254	370.9	-3.64	-0.02322	-3.74	30.2	66
10	2.696	-0.02328	364.2	-3.75	5.023	-0.02425	388.2	-3.82	1.922	-0.02295	370.5	-3.74	-0.02349	-3.77	30.0	69
11	2.698	-0.02247	364.0	-3.81	5.029	-0.02187	388.1	-3.84	1.921	-0.02335	370.7	-3.69	-0.02256	-3.78	30.6	67
12	2.700	-0.02167	364.2	-3.75	5.027	-0.02266	388.4	-3.77	1.926	-0.02134	371.2	-3.56	-0.02189	-3.69	30.5	69
13	2.695	-0.02368	363.7	-3.88	5.021	-0.02505	387.9	-3.89	1.922	-0.02295	370.7	-3.69	-0.02389	-3.82	30.2	70
14	2.695	-0.02368	363.8	-3.86	5.021	-0.02505	388.0	-3.87	1.923	-0.02254	370.8	-3.66	-0.02376	-3.80	30.3	68
15	2.696	-0.02328	364.8	-3.59	5.023	-0.02425	389.1	-3.59	1.930	-0.01973	371.7	-3.43	-0.02242	-3.54	31.1	66
20	2.688	-0.02649	363.3	-3.99	5.012	-0.02863	387.2	-4.06	1.923	-0.02254	370.3	-3.79	-0.02589	-3.95	30.8	67
30	2.677	-0.03090	360.9	-4.62	5.009	-0.02982	384.6	-4.71	1.906	-0.02939	367.9	-4.42	-0.03004	-4.58	29.8	68

ตารางที่ ง-38 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.77 mm				L2 = 250.62 mm				L3 = 250.56 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.336	0	378.5	0	4.193	0	382.8	0	4.126	0	402.9	0	0	0	30.1	71
1	2.295	-0.01648	376.5	-0.53	4.163	-0.01197	380.4	-0.63	4.091	-0.01397	399.5	-0.84	-0.01414	-0.67	30.4	67
2	2.290	-0.01849	371.1	-1.96	4.154	-0.01556	374.7	-2.12	4.078	-0.01916	393.7	-2.28	-0.01703	-2.12	30.0	66
3	2.284	-0.02090	370.9	-2.01	4.148	-0.01796	374.5	-2.17	4.072	-0.02155	393.3	-2.38	-0.02014	-2.19	29.6	66
4	2.281	-0.02211	369.2	-2.46	4.143	-0.01995	373.4	-2.46	4.069	-0.02275	392.3	-2.63	-0.02160	-2.51	29.3	69
5	2.264	-0.02894	368.8	-2.56	4.135	-0.02314	372.5	-2.69	4.059	-0.02674	391.0	-2.95	-0.02628	-2.74	29.6	68
6	2.262	-0.02975	368.1	-2.75	4.134	-0.02354	371.8	-2.87	4.057	-0.02754	390.3	-3.13	-0.02694	-2.92	30.1	65
7	2.262	-0.02975	367.8	-2.83	4.145	-0.01915	371.5	-2.95	4.057	-0.02754	390.1	-3.18	-0.02548	-2.99	30.0	67
8	2.260	-0.03055	367.8	-2.83	4.141	-0.02075	371.5	-2.95	4.053	-0.02914	390.0	-3.20	-0.02681	-2.99	30.0	68
9	2.258	-0.03135	367.8	-2.83	4.132	-0.02434	371.6	-2.93	4.050	-0.03033	389.7	-3.28	-0.02868	-3.01	30.3	66
10	2.258	-0.03135	367.7	-2.85	4.132	-0.02434	371.5	-2.95	4.051	-0.02993	389.6	-3.30	-0.02854	-3.04	29.9	68
11	2.262	-0.02975	367.7	-2.85	4.133	-0.02394	371.5	-2.95	4.058	-0.02714	389.8	-3.25	-0.02694	-3.02	30.6	67
12	2.262	-0.02975	368.0	-2.77	4.137	-0.02234	371.6	-2.93	4.056	-0.02794	389.9	-3.23	-0.02668	-2.98	30.5	68
13	2.262	-0.02975	367.4	-2.93	4.131	-0.02474	370.9	-3.11	4.057	-0.02754	389.3	-3.38	-0.02734	-3.14	30.3	70
14	2.263	-0.02934	367.5	-2.91	4.132	-0.02434	371.1	-3.06	4.057	-0.02754	389.4	-3.35	-0.02707	-3.10	30.0	68
15	2.266	-0.02814	368.4	-2.67	4.135	-0.02314	371.9	-2.85	4.057	-0.02754	390.3	-3.13	-0.02627	-2.88	30.4	67
20	2.264	-0.02894	366.8	-3.09	4.122	-0.02833	370.2	-3.29	4.049	-0.03073	388.6	-3.55	-0.02933	-3.31	30.6	67
30	2.257	-0.03176	363.8	-3.88	4.124	-0.02753	368.2	-3.81	4.048	-0.03113	385.7	-4.27	-0.03014	-3.99	30.4	65

ตารางที่ ง-39 การหดตัวแบบแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20C15-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.12 mm				L2 = 251.10 mm				L3 = 248.95 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				หดตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	หดตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.687	0	397.9	0	4.671	0	400.2	0	2.522	0	388.8	0	0	0	29.6	70
1	5.652	-0.01388	395.7	-0.55	4.640	-0.01235	397.4	-0.70	2.476	-0.01848	384.7	-1.05	-0.01541	-0.77	30.5	63
2	5.655	-0.01269	391.6	-1.58	4.640	-0.01235	393.2	-1.75	2.476	-0.01848	382.6	-1.59	-0.01541	-1.64	29.2	70
3	5.651	-0.01428	391.0	-1.73	4.623	-0.01912	392.5	-1.92	2.477	-0.01808	381.4	-1.90	-0.01860	-1.85	28.8	71
4	5.632	-0.02182	389.5	-2.11	4.613	-0.02310	391.0	-2.30	2.461	-0.02450	379.7	-2.34	-0.02314	-2.25	30.1	64
5	5.618	-0.02737	388.2	-2.44	4.597	-0.02947	389.5	-2.67	2.448	-0.02972	378.1	-2.75	-0.02885	-2.62	29.7	68
6	5.612	-0.02975	387.2	-2.69	4.590	-0.03226	388.5	-2.92	2.440	-0.03294	377.5	-2.91	-0.03165	-2.84	30.7	68
7	5.618	-0.02737	388.1	-2.46	4.597	-0.02947	389.2	-2.75	2.442	-0.03213	377.8	-2.83	-0.02966	-2.68	31.3	63
8	5.612	-0.02975	387.5	-2.61	4.591	-0.03186	389.1	-2.77	2.440	-0.03294	377.8	-2.83	-0.03152	-2.74	30.5	67
9	5.612	-0.02975	387.5	-2.61	4.590	-0.03226	389.0	-2.80	2.440	-0.03294	377.5	-2.91	-0.03165	-2.77	30.1	69
10	5.617	-0.02776	387.4	-2.64	4.588	-0.03305	388.7	-2.87	2.438	-0.03374	377.3	-2.96	-0.03152	-2.82	30.5	68
11	5.617	-0.02776	387.5	-2.61	4.590	-0.03226	388.7	-2.87	2.440	-0.03294	377.4	-2.93	-0.03099	-2.81	29.9	69
12	5.619	-0.02697	387.8	-2.54	4.590	-0.03226	388.9	-2.82	2.441	-0.03254	377.5	-2.91	-0.03059	-2.76	30.7	68
13	5.621	-0.02618	387.3	-2.66	4.592	-0.03146	388.5	-2.92	2.441	-0.03254	376.9	-3.06	-0.03006	-2.88	30.3	69
14	5.622	-0.02578	387.4	-2.64	4.593	-0.03106	388.5	-2.92	2.442	-0.03213	377.0	-3.03	-0.02966	-2.87	30.2	68
15	5.628	-0.02340	388.2	-2.44	4.596	-0.02987	389.5	-2.67	2.446	-0.03053	378.1	-2.75	-0.02793	-2.62	30.6	67
20	5.615	-0.02856	386.3	-2.92	4.583	-0.03505	387.3	-3.22	2.430	-0.03695	375.9	-3.32	-0.03352	-3.15	30.7	67
30	5.613	-0.02935	381.2	-4.20	4.577	-0.03744	382.2	-4.50	2.421	-0.04057	370.7	-4.66	-0.03579	-4.45	29.9	68

ภาคผนวก จ

การขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ทเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ตารางที่ จ-1 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.31 mm				L2 = 249.22 mm				L3 = 250.13 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.876	0	391.2	0	2.790	0	388.3	0	3.697	0	390.7	0	0	0	28.7	70
1	5.937	0.02418	396.3	1.30	2.863	0.02929	393.4	1.31	3.773	0.03038	396.2	1.41	0.02795	1.34	27.9	77
2	5.931	0.02180	396.5	1.35	2.853	0.02528	393.3	1.29	3.773	0.03038	396.1	1.38	0.02582	1.34	29.7	73
3	5.925	0.01942	396.4	1.33	2.857	0.02688	393.3	1.29	3.763	0.02639	395.9	1.33	0.02423	1.32	29.2	64
4	5.927	0.02021	396.3	1.30	2.853	0.02528	393.5	1.34	3.763	0.02639	396.2	1.41	0.02396	1.35	28.4	74
5	5.927	0.02021	396.5	1.35	2.849	0.02367	393.3	1.29	3.759	0.02479	396.1	1.38	0.02289	1.34	29.3	64
6	5.915	0.01546	396.2	1.28	2.843	0.02127	393.2	1.26	3.752	0.02199	395.7	1.28	0.01957	1.27	30.4	62
7	5.917	0.01625	396.6	1.38	2.849	0.02367	393.4	1.31	3.754	0.02279	395.9	1.33	0.02090	1.34	30.3	69
8	5.912	0.01427	396.3	1.30	2.838	0.01926	393.5	1.34	3.753	0.02239	396.1	1.38	0.01864	1.34	30.2	66
9	5.918	0.01665	396.9	1.46	2.835	0.01806	394.0	1.47	3.760	0.02519	396.7	1.54	0.01996	1.49	29.1	72
10	5.915	0.01546	397.6	1.64	2.830	0.01605	394.1	1.49	3.755	0.02319	396.7	1.54	0.01823	1.56	29.0	69
11	5.912	0.01427	397.6	1.64	2.830	0.01605	394.3	1.55	3.752	0.02199	396.7	1.54	0.01744	1.57	30.1	67
12	5.912	0.01427	397.7	1.66	2.830	0.01605	394.5	1.60	3.750	0.02119	396.9	1.59	0.01717	1.62	29.9	68
13	5.910	0.01348	397.8	1.69	2.830	0.01605	394.5	1.60	3.748	0.02039	397.0	1.61	0.01664	1.63	31.1	65
14	5.910	0.01348	397.8	1.69	2.830	0.01605	394.5	1.60	3.748	0.02039	397.0	1.61	0.01664	1.63	30.2	68
15	5.912	0.01427	397.8	1.69	2.830	0.01605	394.5	1.60	3.746	0.01959	397.0	1.61	0.01664	1.63	30.6	69
20	5.911	0.01387	397.4	1.58	2.825	0.01404	394.0	1.47	3.742	0.01799	396.5	1.48	0.01530	1.51	29.8	68
30	5.906	0.01189	398.2	1.79	2.812	0.00883	395.0	1.73	3.731	0.01359	397.4	1.71	0.01144	1.74	30.2	67

ตารางที่ จ-2 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.36 mm				L2 = 251.32 mm				L3 = 248.06 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.933	0	378.6	0	4.889	0	386.6	0	1.625	0	391.4	0	0	0	30.7	69
1	3.013	0.03208	380.0	0.37	4.972	0.03303	388.0	0.36	1.698	0.02943	392.7	0.33	0.03151	0.35	29.2	64
2	2.997	0.02567	379.6	0.26	4.959	0.02785	387.4	0.21	1.693	0.02741	392.6	0.31	0.02698	0.26	28.5	75
3	2.991	0.02326	379.5	0.24	4.952	0.02507	387.2	0.16	1.685	0.02419	392.3	0.23	0.02417	0.21	29.3	64
4	2.981	0.01925	379.6	0.26	4.948	0.02348	387.2	0.16	1.679	0.021769	392.2	0.20	0.02150	0.21	30.4	62
5	2.973	0.01604	379.7	0.29	4.944	0.02188	387.5	0.23	1.672	0.01895	392.3	0.23	0.01896	0.25	30.4	68
6	2.971	0.01524	379.6	0.26	4.942	0.02109	387.6	0.26	1.671	0.01854	392.4	0.26	0.01829	0.26	30.1	67
7	2.976	0.01724	379.8	0.32	4.948	0.02348	387.8	0.31	1.674	0.01975	392.6	0.31	0.02016	0.31	29.1	72
8	2.970	0.01484	379.6	0.26	4.941	0.02069	387.6	0.26	1.672	0.01895	392.7	0.33	0.01816	0.28	30.0	67
9	2.970	0.01484	379.8	0.32	4.940	0.02029	387.9	0.34	1.670	0.01814	392.9	0.38	0.01776	0.35	30.2	68
10	2.970	0.01484	380.0	0.37	4.940	0.02029	388.3	0.44	1.670	0.01814	393.3	0.49	0.01776	0.43	30.2	68
11	2.968	0.01404	380.4	0.48	4.940	0.02029	388.7	0.54	1.669	0.01774	393.7	0.59	0.01736	0.54	30.7	67
12	2.967	0.01363	380.8	0.58	4.938	0.01950	388.8	0.57	1.668	0.01733	394.0	0.66	0.01682	0.60	30.8	66
13	2.967	0.01363	381.5	0.77	4.939	0.01990	389.1	0.65	1.668	0.01733	394.2	0.72	0.01695	0.71	30.4	69
14	2.967	0.01363	381.3	0.71	4.936	0.01870	388.8	0.57	1.667	0.01693	394.0	0.66	0.01642	0.65	30.2	68
15	2.968	0.01404	380.9	0.61	4.932	0.01711	388.4	0.47	1.665	0.01613	393.5	0.54	0.01576	0.54	30.7	69
20	2.960	0.01083	380.6	0.53	4.923	0.01353	388.4	0.47	1.657	0.01290	393.3	0.49	0.01242	0.49	30.5	69
30	2.953	0.00802	381.6	0.79	4.923	0.01353	389.6	0.78	1.657	0.01290	394.4	0.77	0.01148	0.78	30.2	68

ตารางที่ จ-3 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.92 mm				L2 = 249.10 mm				L3 = 250.28 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.488	0	394.5	0	2.673	0	380.4	0	3.853	0	394.6	0	0	0	30.3	69
1	2.557	0.02772	396.5	0.51	2.732	0.02368	382.5	0.55	3.908	0.02198	396.6	0.51	0.02446	0.52	30.3	59
2	2.548	0.02410	396.7	0.56	2.725	0.02087	382.9	0.66	3.903	0.01998	397.2	0.66	0.02165	0.62	30.8	63
3	2.537	0.01969	397.3	0.71	2.719	0.01847	383.5	0.81	3.900	0.01878	397.6	0.76	0.01898	0.76	30.8	65
4	2.537	0.01969	397.9	0.86	2.718	0.01806	383.8	0.89	3.898	0.01798	398.2	0.91	0.01858	0.89	29.5	70
5	2.538	0.02009	398.1	0.91	2.712	0.01566	384.3	1.03	3.892	0.01558	398.5	0.99	0.01711	0.98	31.3	66
6	2.530	0.01687	398.7	1.06	2.705	0.01285	384.7	1.13	3.888	0.01398	399.0	1.12	0.01457	1.10	30.3	66
7	2.530	0.01687	398.4	0.99	2.707	0.01365	384.7	1.13	3.887	0.01358	399.1	1.14	0.01470	1.09	30.5	68
8	2.530	0.01687	398.6	1.04	2.707	0.01365	384.9	1.18	3.890	0.01478	399.5	1.24	0.01510	1.15	30.4	68
9	2.530	0.01687	399.1	1.17	2.707	0.01365	385.3	1.29	3.890	0.01478	399.4	1.22	0.01510	1.22	30.0	67
10	2.528	0.01607	399.2	1.19	2.705	0.01285	385.4	1.31	3.888	0.01398	399.5	1.24	0.01430	1.25	30.3	68
11	2.525	0.01486	399.4	1.24	2.702	0.01164	385.7	1.39	3.885	0.01279	399.8	1.32	0.01310	1.32	29.9	69
12	2.523	0.01406	399.6	1.29	2.700	0.01084	385.9	1.45	3.883	0.01199	400.0	1.37	0.01230	1.37	30.8	67
13	2.520	0.01286	400.1	1.42	2.698	0.01004	386.3	1.55	3.879	0.01039	400.3	1.44	0.01109	1.47	30.4	69
14	2.520	0.01286	400.0	1.39	2.698	0.01004	386.0	1.47	3.880	0.01079	400.1	1.39	0.01123	1.42	30.2	68
15	2.519	0.01245	399.4	1.24	2.698	0.01004	385.6	1.37	3.882	0.01159	399.8	1.32	0.01136	1.31	30.2	69
20	2.517	0.01165	399.7	1.32	2.695	0.00883	386.2	1.52	3.88	0.01079	399.8	1.32	0.01042	1.39	30.5	69
30	2.512	0.00964	400.6	1.55	2.69	0.00682	387.1	1.76	3.87	0.00679	400.3	1.44	0.00775	1.58	30.6	67

ตารางที่ จ-4 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.53 mm				L2 = 248.94 mm				L3 = 248.24 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.098	0	387.8	0	2.510	0	378.7	0	1.805	0	390.6	0	0	0	28.1	77
1	2.148	0.02012	392.6	1.24	2.567	0.02290	383.5	1.27	1.877	0.02900	395.7	1.31	0.02401	1.27	27.9	76
2	2.138	0.01609	392.3	1.16	2.558	0.01928	383.2	1.19	1.863	0.02336	395.7	1.31	0.01958	1.22	28.8	69
3	2.142	0.01770	392.9	1.32	2.562	0.02089	383.7	1.32	1.878	0.02941	396.2	1.43	0.02267	1.36	28.6	75
4	2.143	0.01811	392.7	1.26	2.565	0.02209	383.4	1.24	1.876	0.02860	395.9	1.36	0.02293	1.29	28.0	77
5	2.140	0.01690	392.8	1.29	2.567	0.02290	383.5	1.27	1.868	0.02538	395.8	1.33	0.02173	1.30	29.1	65
6	2.138	0.01609	392.8	1.29	2.560	0.02009	383.4	1.24	1.872	0.02699	396.0	1.38	0.02354	1.30	28.4	75
7	2.139	0.01650	392.6	1.24	2.558	0.01928	383.5	1.27	1.865	0.02417	395.9	1.36	0.01998	1.29	28.9	66
8	2.133	0.01408	392.6	1.24	2.555	0.01808	383.4	1.24	1.863	0.02336	395.7	1.31	0.01851	1.26	30.2	62
9	2.123	0.01006	392.6	1.24	2.550	0.01607	383.3	1.21	1.862	0.02296	395.9	1.36	0.01636	1.27	30.5	68
10	2.127	0.01167	392.9	1.32	2.553	0.01727	383.7	1.32	1.862	0.02296	395.9	1.36	0.01730	1.33	29.0	75
11	2.123	0.01006	392.9	1.32	2.548	0.01526	384.0	1.40	1.857	0.02095	396.0	1.38	0.01811	1.37	30.8	68
12	2.121	0.00925	392.6	1.24	2.546	0.01446	383.7	1.32	1.855	0.02014	396.0	1.38	0.01730	1.31	30.4	67
13	2.116	0.00724	392.5	1.21	2.542	0.01285	383.7	1.32	1.853	0.01934	395.4	1.23	0.01610	1.25	30.2	67
14	2.110	0.00483	392.5	1.21	2.542	0.01285	383.6	1.29	1.853	0.01934	395.5	1.25	0.01610	1.25	30.1	68
15	2.098	0.00000	392.5	1.21	2.541	0.01245	383.3	1.21	1.855	0.02014	395.7	1.31	0.01630	1.24	31.0	67
20	2.100	0.00080	391.6	0.98	2.530	0.00803	382.4	0.98	1.842	0.01491	394.7	1.05	0.01147	1.00	30.0	68
30	2.105	0.00282	392.5	1.21	2.522	0.00482	383.1	1.16	1.837	0.01289	395.3	1.20	0.00886	1.19	30.2	67

ตารางที่ จ-5 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.35 mm				L2 = 252.02 mm				L3 = 254.20 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.922	0	406.3	0	5.591	0	389.8	0	7.765	0	407.9	0	0	0	29.7	70
1	5.972	0.01981	407.5	0.30	5.648	0.02262	390.5	0.18	7.828	0.02478	408.5	0.15	0.02240	0.21	30.0	70
2	5.961	0.01545	406.3	0.00	5.645	0.02143	389.6	-0.05	7.812	0.01849	408.5	0.15	0.01846	0.03	30.1	60
3	5.972	0.01981	407.4	0.27	5.658	0.02659	390.7	0.23	7.826	0.02400	408.6	0.17	0.02347	0.22	27.2	77
4	5.964	0.01664	407.5	0.30	5.647	0.02222	390.6	0.21	7.819	0.02124	408.5	0.15	0.02004	0.22	29.7	73
5	5.970	0.01902	407.6	0.32	5.647	0.02222	390.6	0.21	7.817	0.02046	408.4	0.12	0.02057	0.22	29.0	68
6	5.965	0.01704	407.7	0.34	5.642	0.02024	390.7	0.23	7.817	0.02046	408.5	0.15	0.01924	0.24	28.4	71
7	5.960	0.01506	407.6	0.32	5.645	0.02143	390.7	0.23	7.817	0.02046	408.6	0.17	0.01898	0.24	29.3	69
8	5.958	0.01427	407.6	0.32	5.634	0.01706	390.8	0.26	7.811	0.01810	408.8	0.22	0.01647	0.27	30.0	68
9	5.958	0.01427	407.9	0.39	5.629	0.01508	390.8	0.26	7.809	0.01731	408.8	0.22	0.01555	0.29	30.0	69
10	5.957	0.01387	408.1	0.44	5.632	0.01627	390.9	0.28	7.809	0.01731	409.0	0.27	0.01582	0.33	29.5	74
11	5.952	0.01189	407.9	0.39	5.628	0.01468	391.2	0.36	7.806	0.01613	408.9	0.25	0.01423	0.33	30.9	68
12	5.949	0.01070	408.1	0.44	5.631	0.01587	390.9	0.28	7.802	0.01456	408.8	0.22	0.01371	0.32	30.5	67
13	5.949	0.01070	407.8	0.37	5.627	0.01428	390.6	0.21	7.802	0.01456	408.6	0.17	0.01318	0.25	30.4	66
14	5.945	0.00911	407.6	0.32	5.627	0.01428	390.6	0.21	7.802	0.01456	408.6	0.17	0.01265	0.23	30.4	67
15	5.944	0.00872	407.6	0.32	5.630	0.01547	390.8	0.26	7.804	0.01534	408.6	0.17	0.01318	0.25	31.0	66
20	5.939	0.00674	407.3	0.25	5.622	0.01230	390.5	0.18	7.792	0.01062	408.5	0.15	0.00989	0.19	30.3	67
30	5.931	0.00357	408.3	0.49	5.617	0.01032	391.6	0.46	7.788	0.00905	409.5	0.39	0.00764	0.45	30.2	66

ตารางที่ จ-6 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 251.64 mm				L2 = 250.15 mm				L3 = 251.10 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.205	0	410.5	0	3.722	0	399.3	0	4.668	0	407.8	0	0	0	28.3	77
1	5.278	0.02901	410.8	0.07	3.798	0.03038	399.7	0.10	4.742	0.02947	407.4	-0.10	0.02924	0.03	27.7	77
2	5.262	0.02265	409.8	-0.17	3.785	0.02518	398.8	-0.13	4.732	0.02549	406.4	-0.34	0.02444	-0.21	30.1	59
3	5.269	0.02543	410.6	0.02	3.786	0.02558	399.7	0.10	4.738	0.02788	407.3	-0.12	0.02630	0.00	29.7	70
4	5.263	0.02305	410.7	0.05	3.778	0.02239	399.7	0.10	4.735	0.02668	407.5	-0.07	0.02404	0.03	30.3	69
5	5.262	0.02265	410.9	0.10	3.774	0.02079	399.6	0.08	4.729	0.02429	407.3	-0.12	0.02258	0.02	30.0	59
6	5.256	0.02027	411.1	0.15	3.772	0.01999	400.1	0.20	4.724	0.02230	407.8	0.00	0.02085	0.12	30.1	65
7	5.249	0.01749	411.1	0.15	3.767	0.01799	400.2	0.23	4.719	0.02031	407.8	0.00	0.01860	0.12	30.4	66
8	5.251	0.01828	411.3	0.19	3.772	0.01999	400.2	0.23	4.717	0.01951	408.1	0.07	0.01926	0.16	29.6	69
9	5.251	0.01828	411.6	0.27	3.769	0.01879	400.4	0.28	4.713	0.01792	408.2	0.10	0.01833	0.21	31.5	65
10	5.246	0.01629	411.8	0.32	3.767	0.01799	400.7	0.35	4.712	0.01752	408.2	0.10	0.01727	0.26	30.3	67
11	5.248	0.01709	412.2	0.41	3.768	0.01839	401.0	0.43	4.712	0.01752	408.6	0.20	0.01767	0.35	30.4	68
12	5.242	0.01470	411.7	0.29	3.762	0.01599	400.6	0.33	4.704	0.01434	408.2	0.10	0.01501	0.24	30.5	67
13	5.243	0.01510	411.6	0.27	3.766	0.01759	400.6	0.33	4.702	0.01354	408.1	0.07	0.01541	0.22	30.5	66
14	5.243	0.01510	411.5	0.24	3.764	0.01679	400.5	0.30	4.701	0.01314	408.2	0.10	0.01501	0.21	30.2	68
15	5.242	0.01470	411.5	0.24	3.761	0.01559	400.6	0.33	4.701	0.01314	408.1	0.07	0.01448	0.21	31.0	67
20	5.233	0.01113	411.1	0.15	3.752	0.01199	400.0	0.18	4.692	0.00956	407.7	-0.02	0.01089	0.10	31.4	65
30	5.228	0.00914	412.9	0.58	3.752	0.01199	401.7	0.60	4.684	0.00637	409.1	0.32	0.00917	0.50	31.1	66

ตารางที่ จ-7 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P30-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.40 mm				L2 = 248.01 mm				L3 = 250.72 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	3.972	0	395.9	0	1.578	0	398.7	0	4.292	0	409.5	0	0	0	29.4	68
1	4.087	0.04593	393.4	-0.63	1.708	0.05242	395.6	-0.78	4.414	0.04866	406.0	-0.85	0.04900	-0.75	26.0	74
2	4.080	0.04313	393.2	-0.68	1.698	0.04839	395.3	-0.85	4.392	0.03988	405.7	-0.93	0.04380	-0.82	28.6	72
3	4.072	0.03994	393.4	-0.63	1.692	0.04597	395.7	-0.75	4.394	0.04068	406.2	-0.81	0.04219	-0.73	29.3	74
4	4.065	0.03714	393.7	-0.56	1.681	0.04153	395.9	-0.70	4.375	0.03310	406.3	-0.78	0.03726	-0.68	30.6	67
5	4.068	0.03834	393.8	-0.53	1.672	0.03790	396.2	-0.63	4.376	0.03350	406.6	-0.71	0.03658	-0.62	29.7	68
6	4.064	0.03674	394.2	-0.43	1.674	0.03871	396.3	-0.60	4.372	0.03191	406.6	-0.71	0.03579	-0.58	30.0	69
7	4.061	0.03554	394.6	-0.33	1.674	0.03871	396.9	-0.45	4.382	0.03590	407.0	-0.61	0.03672	-0.46	29.5	69
8	4.059	0.03474	394.4	-0.38	1.668	0.03629	396.8	-0.48	4.383	0.03630	407.2	-0.56	0.03578	-0.47	29.6	70
9	4.060	0.03514	394.3	-0.40	1.663	0.03427	396.5	-0.55	4.381	0.03550	407.0	-0.61	0.03497	-0.52	31.7	65
10	4.063	0.03634	395.3	-0.15	1.670	0.03710	397.3	-0.35	4.364	0.02872	407.6	-0.46	0.03405	-0.32	30.0	68
11	4.056	0.03355	395.6	-0.08	1.661	0.03347	397.8	-0.23	4.361	0.02752	407.7	-0.44	0.03151	-0.25	31.2	65
12	4.057	0.03395	395.6	-0.08	1.658	0.03226	397.7	-0.25	4.362	0.02792	407.5	-0.49	0.03137	-0.27	31.0	64
13	4.058	0.03434	395.8	-0.03	1.660	0.03306	398.0	-0.18	4.364	0.02872	407.9	-0.39	0.03204	-0.20	30.5	67
14	4.058	0.03434	395.3	-0.15	1.660	0.03306	398.0	-0.18	4.363	0.02832	407.4	-0.51	0.03191	-0.28	30.0	68
15	4.058	0.03434	394.9	-0.25	1.661	0.03347	396.9	-0.45	4.363	0.02832	406.4	-0.76	0.03204	-0.49	30.6	69
20	4.042	0.02796	393.8	-0.53	1.649	0.02863	395.8	-0.73	4.359	0.02672	405.3	-1.03	0.02777	-0.76	31.6	64
30	4.035	0.02516	395.1	-0.20	1.638	0.02419	396.5	-0.55	4.347	0.02194	406.1	-0.83	0.02376	-0.53	30.9	66

ตารางที่ จ-8 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O5-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.64 mm				L2 = 249.10 mm				L3 = 249.38 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	6.207	0	397.0	0	2.672	0	390.0	0	2.945	0	381.0	0	0	0	29.3	70
1	6.258	0.02019	401.3	1.08	2.741	0.02770	393.7	0.95	3.001	0.02246	384.6	0.94	0.02394	0.99	30.1	66
2	6.271	0.02533	402.0	1.26	2.751	0.03171	394.2	1.08	3.005	0.02406	385.3	1.13	0.02852	1.15	28.1	80
3	6.268	0.02415	402.2	1.31	2.753	0.03252	394.5	1.15	3.014	0.02767	385.4	1.15	0.02833	1.21	28.7	76
4	6.257	0.01979	402.2	1.31	2.738	0.02650	394.6	1.18	3.000	0.02206	385.7	1.23	0.02314	1.24	30.4	59
5	6.262	0.02177	402.8	1.46	2.738	0.02650	395.3	1.36	2.992	0.01885	386.0	1.31	0.02413	1.38	28.1	76
6	6.266	0.02335	402.8	1.46	2.733	0.02449	395.2	1.33	2.999	0.02165	386.1	1.34	0.02392	1.38	29.9	68
7	6.262	0.02177	403.0	1.51	2.737	0.02609	395.4	1.38	2.992	0.01885	386.5	1.44	0.02224	1.45	29.6	68
8	6.272	0.02573	403.2	1.56	2.733	0.02449	395.6	1.44	3.002	0.02286	386.5	1.44	0.02436	1.48	30.0	68
9	6.262	0.02177	403.5	1.64	2.729	0.02288	395.9	1.51	2.995	0.02005	386.6	1.47	0.02157	1.54	30.6	69
10	6.260	0.02098	404.0	1.76	2.730	0.02328	396.3	1.62	2.990	0.01805	387.1	1.60	0.02077	1.66	30.6	69
11	6.252	0.01781	404.1	1.79	2.726	0.02168	396.3	1.62	2.985	0.01604	387.1	1.60	0.01851	1.67	31.2	65
12	6.252	0.01781	404.4	1.86	2.730	0.02328	396.4	1.64	2.990	0.01805	386.9	1.55	0.01971	1.68	31.0	64
13	6.251	0.01742	404.7	1.94	2.733	0.02449	396.9	1.77	2.992	0.01885	387.3	1.65	0.02025	1.79	30.1	67
14	6.250	0.01702	404.4	1.86	2.730	0.02328	396.4	1.64	2.990	0.01805	387.0	1.57	0.01945	1.69	30.2	68
15	6.252	0.01781	404.0	1.76	2.726	0.02168	396.0	1.54	2.987	0.01684	387.0	1.57	0.01878	1.63	30.5	69
20	6.246	0.01544	404.2	1.81	2.721	0.01967	396.6	1.69	2.978	0.01323	387.1	1.60	0.01611	1.70	31.2	65
30	6.237	0.01187	405.9	2.24	2.717	0.01806	397.6	1.95	2.971	0.01043	388.2	1.89	0.01346	2.03	31.2	65

ตารางที่ จ-9 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.13 mm				L2 = 249.21 mm				L3 = 251.17 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.700	0	385.4	0.00	2.779	0	396.5	0.00	4.737	0	402.7	0	0	0	29.7	68
1	2.769	0.02770	389.4	1.04	2.845	0.02648	400.5	1.01	4.820	0.03305	406.2	0.87	0.02908	0.97	29.9	69
2	2.785	0.03412	389.7	1.12	2.842	0.02528	400.7	1.06	4.820	0.03305	406.2	0.87	0.03081	1.01	28.9	71
3	2.775	0.03010	390.0	1.19	2.841	0.02488	401.1	1.16	4.812	0.02986	407.1	1.09	0.02828	1.15	31.0	68
4	2.760	0.02408	390.4	1.30	2.840	0.02448	401.6	1.29	4.806	0.02747	407.4	1.17	0.02534	1.25	30.8	66
5	2.760	0.02408	391.0	1.45	2.838	0.02367	402.1	1.41	4.807	0.02787	407.9	1.29	0.02521	1.39	30.7	64
6	2.762	0.02489	391.1	1.48	2.837	0.02327	402.2	1.44	4.803	0.02628	407.9	1.29	0.02481	1.40	29.1	69
7	2.764	0.02569	391.6	1.61	2.835	0.02247	402.5	1.51	4.803	0.02628	408.4	1.42	0.02481	1.51	29.6	69
8	2.764	0.02569	391.3	1.53	2.836	0.02287	402.8	1.59	4.805	0.02707	408.5	1.44	0.02521	1.52	29.7	69
9	2.764	0.02569	391.5	1.58	2.838	0.02367	402.9	1.61	4.802	0.02588	408.6	1.47	0.02508	1.55	30.6	69
10	2.762	0.02489	392.6	1.87	2.832	0.02127	403.7	1.82	4.797	0.02389	409.4	1.66	0.02335	1.78	30.2	68
11	2.758	0.02328	392.6	1.87	2.832	0.02127	403.8	1.84	4.796	0.02349	409.3	1.64	0.02268	1.78	31.4	65
12	2.754	0.02168	392.2	1.76	2.833	0.02167	403.4	1.74	4.793	0.02230	408.9	1.54	0.02188	1.68	31.0	64
13	2.754	0.02168	392.4	1.82	2.834	0.02207	403.8	1.84	4.794	0.02269	409.2	1.61	0.02215	1.76	30.1	68
14	2.755	0.02208	392.4	1.82	2.834	0.02207	403.5	1.77	4.794	0.02269	409.0	1.56	0.02228	1.72	30.1	68
15	2.757	0.02288	392.5	1.84	2.835	0.02247	403.4	1.74	4.798	0.02429	408.9	1.54	0.02321	1.71	30.5	69
20	2.748	0.01927	392.9	1.95	2.829	0.02006	403.8	1.84	4.782	0.01792	409.4	1.66	0.01908	1.82	31.5	64
30	2.752	0.02087	393.8	2.18	2.82	0.01645	404.5	2.02	4.782	0.01792	410.1	1.84	0.01841	2.01	30.8	67

ตารางที่ จ-10 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.49 mm				L2 = 250.52 mm				L3 = 251.81 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.057	0	392.9	0	4.088	0	380.6	0	5.380	0	403.9	0	0	0	29.6	68
1	2.136	0.03179	395.6	0.69	4.155	0.02674	383.2	0.68	5.440	0.02383	406.3	0.59	0.02745	0.65	30.3	61
2	2.138	0.03260	395.9	0.76	4.162	0.02954	383.6	0.79	5.463	0.03296	406.7	0.69	0.03170	0.75	28.3	72
3	2.132	0.03018	396.5	0.92	4.152	0.02555	383.8	0.84	5.452	0.02859	407.1	0.79	0.02811	0.85	30.8	66
4	2.130	0.02938	397.2	1.09	4.150	0.02475	384.6	1.05	5.447	0.02661	407.6	0.92	0.02691	1.02	30.2	62
5	2.136	0.03179	397.8	1.25	4.153	0.02595	385.4	1.26	5.452	0.02859	408.4	1.11	0.02878	1.21	28.2	72
6	2.135	0.03139	398.1	1.32	4.150	0.02475	385.7	1.34	5.450	0.02780	408.6	1.16	0.02798	1.28	30.0	69
7	2.118	0.02455	398.7	1.48	4.145	0.02275	385.9	1.39	5.445	0.02581	409.2	1.31	0.02437	1.39	29.7	69
8	2.119	0.02495	399.2	1.60	4.142	0.02156	386.3	1.50	5.445	0.02581	409.7	1.44	0.02411	1.51	30.2	68
9	2.113	0.02254	399.7	1.73	4.141	0.02116	386.9	1.66	5.440	0.02383	410.2	1.56	0.02251	1.65	30.6	67
10	2.116	0.02374	400.3	1.88	4.146	0.02315	387.6	1.84	5.433	0.02105	410.9	1.73	0.02265	1.82	29.2	72
11	2.120	0.02535	400.0	1.81	4.143	0.02195	387.3	1.76	5.435	0.02184	410.4	1.61	0.02305	1.73	30.9	67
12	2.117	0.02415	400.7	1.99	4.144	0.02235	387.8	1.89	5.431	0.02025	411.2	1.81	0.02225	1.89	29.3	69
13	2.118	0.02455	400.7	1.99	4.142	0.02156	387.9	1.92	5.435	0.02184	411.1	1.78	0.02265	1.90	29.8	66
14	2.118	0.02455	400.5	1.93	4.140	0.02076	387.7	1.87	5.433	0.02105	411.0	1.76	0.02212	1.85	30.1	68
15	2.118	0.02455	400.3	1.88	4.139	0.02036	387.5	1.81	5.429	0.01946	410.7	1.68	0.02146	1.79	31.5	67
20	2.112	0.02213	400.8	2.01	4.134	0.01836	387.8	1.89	5.420	0.01588	411.0	1.76	0.01879	1.89	30.4	70
30	2.095	0.01529	401.7	2.24	4.122	0.01357	388.1	1.97	5.406	0.01033	411.4	1.86	0.01306	2.02	30.4	68

ตารางที่ จ-11 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P1005-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 251.06 mm				L2 = 248.43 mm				L3 = 251.28 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.628	0	404.3	0	2.004	0	389.0	0	4.850	0	394.5	0	0	0	29.1	71
1	4.696	0.02709	406.5	0.54	2.083	0.03180	390.6	0.41	4.928	0.03104	395.9	0.35	0.02944	0.44	28.8	70
2	4.703	0.02987	406.7	0.59	2.083	0.03180	390.9	0.49	4.918	0.02706	396.0	0.38	0.02958	0.49	26.5	78
3	4.693	0.02589	407.0	0.67	2.073	0.02777	391.3	0.59	4.917	0.02666	396.7	0.56	0.02678	0.61	29.5	70
4	4.695	0.02669	407.3	0.74	2.074	0.02818	391.5	0.64	4.914	0.02547	396.8	0.58	0.02678	0.66	30.0	68
5	4.693	0.02589	407.8	0.87	2.070	0.02657	391.8	0.72	4.912	0.02467	397.0	0.63	0.02571	0.74	28.4	72
6	4.689	0.02430	407.9	0.89	2.064	0.02415	392.2	0.82	4.902	0.02069	397.6	0.79	0.02305	0.83	30.0	69
7	4.686	0.02310	408.0	0.92	2.062	0.02335	392.3	0.85	4.908	0.02308	397.8	0.84	0.02318	0.87	29.7	69
8	4.682	0.02151	408.6	1.06	2.062	0.02335	393.0	1.03	4.900	0.01990	398.4	0.99	0.02158	1.03	30.2	68
9	4.681	0.02111	409.2	1.21	2.060	0.02254	393.4	1.13	4.898	0.01910	398.9	1.12	0.02092	1.15	30.5	67
10	4.685	0.02270	409.8	1.36	2.060	0.02254	394.2	1.34	4.898	0.01910	399.5	1.27	0.02145	1.32	29.2	71
11	4.683	0.02191	409.7	1.34	2.058	0.02174	394.0	1.29	4.897	0.01870	399.4	1.24	0.02078	1.29	30.9	67
12	4.684	0.02231	410.4	1.51	2.060	0.02254	394.7	1.47	4.902	0.02069	399.8	1.34	0.02185	1.44	29.3	69
13	4.682	0.02151	410.7	1.58	2.060	0.02254	394.9	1.52	4.900	0.01990	400.1	1.42	0.02132	1.51	29.8	66
14	4.680	0.02071	410.5	1.53	2.060	0.02254	394.7	1.47	4.900	0.01990	400.0	1.39	0.02105	1.46	30.2	68
15	4.678	0.01992	410.2	1.46	2.056	0.02093	394.2	1.34	4.902	0.02069	399.5	1.27	0.02051	1.35	31.5	67
20	4.675	0.01872	410.6	1.56	2.050	0.01852	395.0	1.54	4.902	0.02069	400.3	1.47	0.01931	1.52	30.6	70
30	4.660	0.01275	411.3	1.73	2.035	0.01248	395.4	1.65	4.878	0.01114	400.6	1.55	0.01212	1.64	30.3	67

ตารางที่ จ-12 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.38 mm				L2 = 250.47 mm				L3 = 249.64 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.952	0	391.6	0	4.042	0	381.8	0	3.213	0	385.4	0	0	0	30.1	62
1	3.028	0.03048	392.4	0.20	4.125	0.03314	382.5	0.18	3.285	0.02884	385.9	0.13	0.03181	0.17	30.0	61
2	3.035	0.03328	393.2	0.41	4.122	0.03194	383.2	0.37	3.286	0.02924	386.7	0.34	0.03149	0.37	28.0	77
3	3.033	0.03248	393.3	0.43	4.116	0.02954	383.3	0.39	3.275	0.02484	387.0	0.42	0.02895	0.41	28.0	76
4	3.025	0.02927	393.9	0.59	4.112	0.02795	384.0	0.58	3.270	0.02283	387.5	0.54	0.02668	0.57	29.3	64
5	3.024	0.02887	394.6	0.77	4.112	0.02795	384.7	0.76	3.260	0.01883	388.1	0.70	0.02522	0.74	28.5	74
6	3.018	0.02647	394.8	0.82	4.105	0.02515	384.9	0.81	3.268	0.02203	388.4	0.78	0.02455	0.80	29.2	64
7	3.015	0.02526	395.5	1.00	4.098	0.02236	385.6	1.00	3.267	0.02163	388.9	0.91	0.02308	0.97	30.4	61
8	3.012	0.02406	395.4	0.97	4.098	0.02236	385.6	1.00	3.265	0.02083	389.0	0.93	0.02242	0.97	30.6	68
9	3.012	0.02406	396.0	1.12	4.095	0.02116	386.3	1.18	3.262	0.01963	389.4	1.04	0.02162	1.11	30.0	68
10	3.017	0.02606	396.7	1.30	4.089	0.01876	386.7	1.28	3.258	0.01803	389.7	1.12	0.02095	1.23	29.2	71
11	3.013	0.02446	396.6	1.28	4.089	0.01876	386.8	1.31	3.258	0.01803	389.9	1.17	0.02042	1.25	30.0	67
12	3.017	0.02606	397.0	1.38	4.089	0.01876	387.2	1.41	3.257	0.01763	390.3	1.27	0.02082	1.35	29.3	69
13	3.011	0.02366	397.4	1.48	4.088	0.01837	387.2	1.41	3.259	0.01843	390.1	1.22	0.02015	1.37	29.8	66
14	3.011	0.02366	397.0	1.38	4.087	0.01797	387.0	1.36	3.257	0.01763	389.8	1.14	0.01975	1.29	30.1	68
15	3.011	0.02366	396.7	1.30	4.083	0.01637	386.5	1.23	3.257	0.01763	389.5	1.06	0.01922	1.20	31.5	67
20	3.000	0.01925	397.4	1.48	4.075	0.01318	387.1	1.39	3.253	0.01602	390.1	1.22	0.01615	1.36	30.8	70
30	2.988	0.01444	397.3	1.46	4.072	0.01198	386.8	1.31	3.240	0.01082	389.5	1.06	0.01241	1.28	30.3	67

ตารางที่ จ-13 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.32 mm				L2 = 251.67 mm				L3 = 250.00 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.888	0	383.8	0	5.244	0	396.6	0	3.568	0	384.0	0	0	0	28.5	73
1	2.956	0.02727	383.5	-0.08	5.327	0.03298	395.7	-0.23	3.656	0.03520	382.6	-0.36	0.03182	-0.22	30.3	60
2	2.960	0.02888	384.3	0.13	5.336	0.03656	396.5	-0.03	3.661	0.03720	383.5	-0.13	0.03421	-0.01	27.5	77
3	2.953	0.02607	384.7	0.23	5.322	0.03099	396.7	0.03	3.655	0.03480	383.8	-0.05	0.03062	0.07	29.9	73
4	2.956	0.02727	385.2	0.36	5.323	0.03139	397.4	0.20	3.648	0.03200	384.4	0.10	0.03022	0.22	29.0	68
5	2.960	0.02888	385.8	0.52	5.322	0.03099	397.9	0.33	3.647	0.03160	384.7	0.18	0.03049	0.34	28.4	71
6	2.953	0.02607	385.9	0.55	5.318	0.02940	398.1	0.38	3.644	0.03040	385.1	0.29	0.02862	0.40	29.6	68
7	2.949	0.02447	386.3	0.65	5.314	0.02781	398.2	0.40	3.635	0.02680	385.2	0.31	0.02636	0.46	29.9	70
8	2.950	0.02487	386.8	0.78	5.312	0.02702	398.7	0.53	3.636	0.02720	385.4	0.36	0.02636	0.56	30.1	69
9	2.945	0.02286	386.6	0.73	5.313	0.02742	399.2	0.66	3.633	0.02600	385.9	0.49	0.02543	0.63	30.4	67
10	2.940	0.02086	387.4	0.94	5.317	0.02901	399.3	0.68	3.628	0.02400	386.0	0.52	0.02462	0.71	30.9	65
11	2.945	0.02286	387.5	0.96	5.313	0.02742	399.5	0.73	3.632	0.02560	386.3	0.60	0.02529	0.76	30.8	66
12	2.945	0.02286	387.8	1.04	5.313	0.02742	399.8	0.81	3.630	0.02480	386.3	0.60	0.02503	0.82	30.2	68
13	2.948	0.02407	388.1	1.12	5.315	0.02821	400.0	0.86	3.628	0.02400	386.5	0.65	0.02543	0.88	30.7	66
14	2.948	0.02407	387.6	0.99	5.312	0.02702	399.3	0.68	3.626	0.02320	386.5	0.65	0.02476	0.77	30.1	68
15	2.948	0.02407	387.0	0.83	5.308	0.02543	398.8	0.55	3.624	0.02240	385.5	0.39	0.02397	0.59	31.5	66
20	2.935	0.01885	386.8	0.78	5.302	0.02305	398.8	0.55	3.621	0.02120	385.2	0.31	0.02103	0.55	30.6	69
30	2.927	0.01564	386.6	0.73	5.288	0.01748	398.6	0.50	3.602	0.01360	384.8	0.21	0.01558	0.48	30.5	67

ตารางที่ จ-14 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P2005-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.02 mm				L2 = 249.48 mm				L3 = 251.33 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	3.585	0	399.4	0	3.054	0	385.6	0	4.902	0	392.1	0	0	0	27.3	77
1	3.658	0.02920	398.5	-0.23	3.135	0.03247	384.4	-0.31	4.982	0.03183	390.7	-0.36	0.03083	-0.30	29.9	60
2	3.664	0.03160	399.0	-0.10	3.148	0.03768	384.8	-0.21	5.000	0.03899	391.3	-0.20	0.03609	-0.17	29.7	71
3	3.667	0.03280	399.1	-0.08	3.145	0.03648	385.1	-0.13	4.978	0.03024	391.6	-0.13	0.03317	-0.11	30.4	69
4	3.663	0.03120	399.0	-0.10	3.132	0.03126	385.3	-0.08	4.980	0.03103	391.8	-0.08	0.03117	-0.08	30.1	59
5	3.651	0.02640	400.0	0.15	3.132	0.03126	386.1	0.13	4.976	0.02944	392.3	0.05	0.02904	0.11	30.6	64
6	3.653	0.02720	400.4	0.25	3.126	0.02886	386.4	0.21	4.984	0.03263	392.9	0.20	0.02956	0.22	30.6	66
7	3.666	0.03240	400.9	0.38	3.125	0.02846	387.0	0.36	4.984	0.03263	393.2	0.28	0.03116	0.34	29.6	70
8	3.658	0.02920	401.2	0.45	3.119	0.02605	387.1	0.39	4.983	0.03223	393.8	0.43	0.02916	0.42	31.9	65
9	3.652	0.02680	401.6	0.55	3.118	0.02565	387.5	0.49	4.981	0.03143	393.8	0.43	0.02796	0.49	30.4	67
10	3.652	0.02680	401.8	0.60	3.117	0.02525	387.6	0.52	4.978	0.03024	394.2	0.54	0.02743	0.55	31.0	65
11	3.650	0.02600	402.2	0.70	3.122	0.02726	388.0	0.62	4.975	0.02905	394.6	0.64	0.02743	0.65	30.7	66
12	3.651	0.02640	402.3	0.73	3.120	0.02645	388.1	0.65	4.976	0.02944	394.7	0.66	0.02743	0.68	30.2	68
13	3.653	0.02720	402.7	0.83	3.118	0.02565	388.4	0.73	4.978	0.03024	394.9	0.71	0.02770	0.76	30.6	66
14	3.652	0.02680	402.3	0.73	3.115	0.02445	388.0	0.62	4.975	0.02905	394.8	0.69	0.02676	0.68	30.2	68
15	3.652	0.02680	401.6	0.55	3.112	0.02325	387.4	0.47	4.972	0.02785	394.8	0.69	0.02597	0.57	31.5	66
20	3.630	0.01800	400.7	0.33	3.105	0.02044	386.6	0.26	4.966	0.02546	393.2	0.28	0.02130	0.29	31.2	64
30	3.627	0.01680	401.2	0.45	3.102	0.01924	386.8	0.31	4.955	0.02109	393.4	0.33	0.01904	0.36	30.9	66

ตารางที่ จ-15 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.28 mm				L2 = 251.29 mm				L3 = 251.81 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.851	0	381.9	0	4.857	0	391.9	0	5.378	0	395.1	0	0	0	30.4	69
1	2.969	0.04734	380.8	-0.29	4.977	0.04775	390.5	-0.36	5.492	0.04527	393.5	-0.40	0.04679	-0.35	28.8	71
2	2.962	0.04453	381.1	-0.21	4.975	0.04696	390.6	-0.33	5.493	0.04567	393.7	-0.35	0.04572	-0.30	30.8	68
3	2.955	0.04172	381.6	-0.08	4.976	0.04736	391.2	-0.18	5.478	0.03971	394.2	-0.23	0.04293	-0.16	30.9	59
4	2.954	0.04132	382.0	0.03	4.969	0.04457	391.9	0.00	5.476	0.03892	394.7	-0.10	0.04160	-0.03	31.0	62
5	2.951	0.04012	382.7	0.21	4.968	0.04417	392.5	0.15	5.478	0.03971	395.5	0.10	0.04133	0.15	29.1	69
6	2.950	0.03971	383.2	0.34	4.967	0.04377	392.9	0.26	5.477	0.03932	395.9	0.20	0.04093	0.27	29.7	69
7	2.948	0.03891	383.4	0.39	4.963	0.04218	393.3	0.36	5.471	0.03693	396.4	0.33	0.03934	0.36	29.6	69
8	2.943	0.03691	383.8	0.50	4.964	0.04258	393.5	0.41	5.472	0.03733	396.6	0.38	0.03894	0.43	30.4	69
9	2.948	0.03891	384.2	0.60	4.962	0.04178	394.0	0.54	5.465	0.03455	396.9	0.46	0.03842	0.53	30.4	66
10	2.940	0.03570	384.3	0.63	4.958	0.04019	393.8	0.48	5.462	0.03336	396.7	0.40	0.03642	0.51	31.0	65
11	2.944	0.03731	384.2	0.60	4.959	0.04059	394.0	0.54	5.460	0.03256	396.7	0.40	0.03682	0.51	30.7	66
12	2.944	0.03731	384.4	0.65	4.958	0.04019	394.1	0.56	5.460	0.03256	396.9	0.46	0.03669	0.56	30.2	68
13	2.942	0.03650	384.6	0.71	4.961	0.04139	394.4	0.64	5.461	0.03296	397.4	0.58	0.03695	0.64	30.6	66
14	2.940	0.03570	384.4	0.65	4.957	0.03980	394.1	0.56	5.460	0.03256	397.1	0.51	0.03602	0.57	30.2	68
15	2.938	0.03490	384.0	0.55	4.952	0.03781	393.4	0.38	5.460	0.03256	396.5	0.35	0.03509	0.43	29.6	71
20	2.925	0.02969	383.2	0.34	4.942	0.03383	392.8	0.23	5.450	0.02859	395.7	0.15	0.03070	0.24	31.0	65
30	2.921	0.02808	383.6	0.45	4.93	0.02905	393.1	0.31	5.437	0.02343	396.0	0.23	0.02685	0.33	31.0	65

ตารางที่ จ-16 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.98 mm				L2 = 251.74 mm				L3 = 249.13 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.548	0	395.9	0	5.313	0	382.1	0	2.695	0	394.9	0	0	0	29.9	67
1	4.675	0.05060	393.7	-0.56	5.455	0.05641	379.9	-0.58	2.844	0.05981	392.2	-0.68	0.05561	-0.61	28.0	78
2	4.687	0.05538	394.1	-0.45	5.450	0.05442	380.3	-0.47	2.827	0.05299	392.5	-0.61	0.05426	-0.51	28.6	76
3	4.674	0.05020	394.4	-0.38	5.432	0.04727	380.8	-0.34	2.810	0.04616	393.1	-0.46	0.04788	-0.39	30.4	59
4	4.678	0.05180	395.1	-0.20	5.437	0.04926	381.6	-0.13	2.813	0.04737	393.5	-0.35	0.04947	-0.23	28.4	76
5	4.668	0.04781	395.3	-0.15	5.432	0.04727	380.6	-0.39	2.812	0.04696	392.2	-0.68	0.04735	-0.41	29.9	69
6	4.664	0.04622	396.0	0.03	5.431	0.04687	382.4	0.08	2.812	0.04696	394.2	-0.18	0.04669	-0.02	29.7	68
7	4.670	0.04861	396.4	0.13	5.425	0.04449	382.5	0.10	2.805	0.04415	394.5	-0.10	0.04575	0.04	30.2	68
8	4.663	0.04582	396.5	0.15	5.421	0.04290	382.9	0.21	2.806	0.04456	394.7	-0.05	0.04443	0.10	30.7	68
9	4.655	0.04263	396.7	0.20	5.418	0.04171	383.5	0.37	2.803	0.04335	395.1	0.05	0.04256	0.21	30.7	69
10	4.657	0.04343	397.7	0.45	5.419	0.04211	383.7	0.42	2.799	0.04175	395.5	0.15	0.04243	0.34	29.0	69
11	4.655	0.04263	397.7	0.45	5.418	0.04171	383.6	0.39	2.799	0.04175	395.4	0.13	0.04203	0.32	29.8	68
12	4.655	0.04263	397.6	0.43	5.414	0.04012	383.5	0.37	2.797	0.04094	395.1	0.05	0.04123	0.28	30.4	68
13	4.655	0.04263	397.6	0.43	5.415	0.04052	383.6	0.39	2.798	0.04134	395.4	0.13	0.04150	0.32	30.2	68
14	4.650	0.04064	397.3	0.35	5.413	0.03972	383.2	0.29	2.794	0.03974	395.0	0.03	0.04003	0.22	30.2	68
15	4.643	0.03785	397.0	0.28	5.412	0.03933	382.7	0.16	2.788	0.03733	394.2	-0.18	0.03817	0.09	29.8	71
20	4.642	0.03745	396.5	0.15	5.408	0.03774	382.2	0.03	2.788	0.03733	393.7	-0.30	0.03751	-0.04	30.0	69
30	4.625	0.03068	396.9	0.25	5.392	0.03138	382.9	0.21	2.773	0.03131	394.1	-0.20	0.03112	0.09	30.4	67

ตารางที่ จ-17 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.74 mm				L2 = 251.27 mm				L3 = 252.16 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.308	0	388.7	0	4.843	0	394.3	0	5.731	0	387.6	0	0	0	29.9	67
1	2.365	0.02292	394.1	1.39	4.912	0.02746	400.1	1.47	5.796	0.02578	393.5	1.52	0.02538	1.46	28.6	65
2	2.370	0.02493	394.4	1.47	4.912	0.02746	400.6	1.60	5.798	0.02657	394.0	1.65	0.02632	1.57	28.6	73
3	2.368	0.02412	394.7	1.54	4.908	0.02587	399.2	1.24	5.792	0.02419	394.0	1.65	0.02473	1.48	29.8	69
4	2.353	0.01809	394.2	1.41	4.905	0.02467	400.4	1.55	5.793	0.02459	393.6	1.55	0.02245	1.50	29.7	68
5	2.361	0.02131	394.2	1.41	4.908	0.02587	400.2	1.50	5.798	0.02657	393.7	1.57	0.02458	1.50	29.9	69
6	2.357	0.01970	394.1	1.39	4.912	0.02746	400.1	1.47	5.798	0.02657	393.5	1.52	0.02458	1.46	30.7	69
7	2.353	0.01809	394.2	1.41	4.908	0.02587	400.2	1.50	5.805	0.02935	393.7	1.57	0.02444	1.50	30.9	69
8	2.361	0.02131	394.6	1.52	4.908	0.02587	400.6	1.60	5.797	0.02617	393.7	1.57	0.02445	1.56	29.0	68
9	2.360	0.02091	394.6	1.52	4.910	0.02666	400.6	1.60	5.800	0.02736	393.7	1.57	0.02498	1.56	29.8	68
10	2.358	0.02010	394.7	1.54	4.910	0.02666	400.7	1.62	5.804	0.02895	393.9	1.63	0.02524	1.60	30.5	68
11	2.358	0.02010	394.7	1.54	4.908	0.02587	400.7	1.62	5.802	0.02816	393.9	1.63	0.02471	1.60	30.3	68
12	2.356	0.01930	394.7	1.54	4.908	0.02587	400.7	1.62	5.798	0.02657	393.9	1.63	0.02391	1.60	29.9	70
13	2.355	0.01890	394.8	1.57	4.905	0.02467	400.7	1.62	5.795	0.02538	393.9	1.63	0.02298	1.61	30.2	69
14	2.355	0.01890	394.8	1.57	4.903	0.02388	400.7	1.62	5.794	0.02498	393.9	1.63	0.02259	1.61	29.9	72
15	2.359	0.02050	394.7	1.54	4.903	0.02388	400.7	1.62	5.798	0.02657	393.9	1.63	0.02365	1.60	29.3	72
20	2.350	0.01689	394.4	1.47	4.900	0.02268	400.3	1.52	5.795	0.02538	393.4	1.50	0.02165	1.49	29.5	74
30	2.357	0.01970	395.2	1.67	4.901	0.02308	401.2	1.75	5.796	0.02578	394.2	1.70	0.02285	1.71	30.2	70

ตารางที่ จ-18 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.35 mm				L2 = 251.34 mm				L3 = 249.05 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.920	0	385.5	0	4.905	0	377.8	0	2.622	0	389.3	0	0	0	30.7	67
1	2.988	0.02727	388.4	0.75	4.968	0.02507	380.1	0.61	2.686	0.02570	391.8	0.64	0.02601	0.67	31.2	68
2	2.990	0.02807	388.1	0.67	4.971	0.02626	380.0	0.58	2.689	0.02690	391.4	0.54	0.02708	0.60	28.8	71
3	2.979	0.02366	387.7	0.57	4.962	0.02268	379.4	0.42	2.682	0.02409	390.8	0.39	0.02348	0.46	30.0	69
4	2.972	0.02085	387.8	0.60	4.958	0.02109	379.6	0.48	2.680	0.023288	391.2	0.49	0.02174	0.52	29.6	69
5	2.972	0.02085	388.1	0.67	4.956	0.02029	379.7	0.50	2.679	0.02289	391.2	0.49	0.02134	0.56	30.5	67
6	2.971	0.02045	388.0	0.65	4.953	0.01910	379.7	0.50	2.682	0.02409	391.2	0.49	0.02121	0.55	30.3	67
7	2.969	0.01965	388.4	0.75	4.964	0.02347	379.9	0.56	2.688	0.02650	391.5	0.57	0.02321	0.62	29.0	71
8	2.970	0.02005	388.4	0.75	4.961	0.02228	380.0	0.58	2.686	0.02570	391.4	0.54	0.02268	0.62	30.2	65
9	2.970	0.02005	388.5	0.78	4.963	0.02308	380.0	0.58	2.685	0.02530	391.5	0.57	0.02281	0.64	29.9	68
10	2.973	0.02126	388.6	0.80	4.964	0.02347	380.1	0.61	2.685	0.02530	391.6	0.59	0.02334	0.67	30.1	67
11	2.976	0.02246	388.8	0.86	4.961	0.02228	380.7	0.77	2.686	0.02570	391.9	0.67	0.02348	0.76	29.8	67
12	2.980	0.02406	389.1	0.93	4.962	0.02268	381.1	0.87	2.688	0.02650	392.4	0.80	0.02441	0.87	30.3	68
13	2.980	0.02406	389.4	1.01	4.961	0.02228	381.5	0.98	2.688	0.02650	392.8	0.90	0.02428	0.96	30.7	69
14	2.980	0.02406	389.3	0.99	4.960	0.02188	381.2	0.90	2.686	0.02570	392.6	0.85	0.02388	0.91	30.2	68
15	2.978	0.02326	389.0	0.91	4.959	0.02149	380.9	0.82	2.684	0.02489	392.5	0.82	0.02321	0.85	29.6	70
20	2.962	0.01684	388.8	0.86	4.952	0.01870	380.7	0.77	2.683	0.02449	392.2	0.74	0.02001	0.79	30.0	72
30	2.964	0.01765	390.1	1.19	4.951	0.01830	381.9	1.09	2.681	0.02369	393.4	1.05	0.01988	1.11	30.2	70

ตารางที่ จ-19 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.46 mm				L2 = 249.58 mm				L3 = 250.56 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.030	0	376.2	0	3.153	0	365.4	0	4.128	0	388.5	0	0	0	31.9	56
1	2.100	0.02817	380.0	1.01	3.222	0.02765	369.1	1.01	4.182	0.02155	392.5	1.03	0.02579	1.02	30.4	66
2	2.095	0.02616	380.3	1.09	3.218	0.02604	369.3	1.07	4.188	0.02395	392.8	1.11	0.02538	1.09	29.1	69
3	2.094	0.02576	380.2	1.06	3.213	0.02404	369.4	1.09	4.191	0.02514	392.8	1.11	0.02498	1.09	29.6	69
4	2.092	0.02495	381.0	1.28	3.208	0.02204	370.0	1.26	4.190	0.024745	393.5	1.29	0.02391	1.27	29.7	68
5	2.092	0.02495	381.0	1.28	3.205	0.02083	370.3	1.34	4.192	0.02554	393.9	1.39	0.02378	1.34	30.3	69
6	2.089	0.02375	381.8	1.49	3.204	0.02043	371.2	1.59	4.189	0.02435	394.4	1.52	0.02284	1.53	31.0	68
7	2.088	0.02334	382.1	1.57	3.206	0.02124	371.8	1.75	4.190	0.02474	395.0	1.67	0.02311	1.66	30.4	69
8	2.089	0.02375	382.5	1.67	3.208	0.02204	372.0	1.81	4.189	0.02435	395.4	1.78	0.02338	1.75	29.5	67
9	2.089	0.02375	382.5	1.67	3.208	0.02204	372.2	1.86	4.189	0.02435	395.6	1.83	0.02338	1.79	30.2	68
10	2.089	0.02375	382.5	1.67	3.206	0.02124	372.5	1.94	4.189	0.02435	395.8	1.88	0.02311	1.83	30.6	67
11	2.088	0.02334	383.1	1.83	3.206	0.02124	372.8	2.03	4.188	0.02395	396.3	2.01	0.02284	1.96	30.1	68
12	2.088	0.02334	383.5	1.94	3.204	0.02043	373.0	2.08	4.188	0.02395	396.6	2.08	0.02257	2.04	30.5	68
13	2.088	0.02334	384.2	2.13	3.203	0.02003	373.4	2.19	4.188	0.02395	396.9	2.16	0.02244	2.16	29.8	72
14	2.086	0.02254	384.3	2.15	3.202	0.01963	373.5	2.22	4.188	0.02395	397.0	2.19	0.02204	2.19	30.3	68
15	2.084	0.02173	384.6	2.23	3.199	0.01843	373.8	2.30	4.186	0.02315	397.3	2.27	0.02110	2.27	30.3	69
20	2.073	0.01731	385.0	2.34	3.193	0.01603	374.3	2.44	4.177	0.01956	397.8	2.39	0.01763	2.39	31.0	67
30	2.076	0.01851	387.2	2.92	3.192	0.01563	376.6	3.07	4.178	0.01996	400.0	2.96	0.01803	2.98	29.4	68

ภาคผนวก ฉ

การขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตารางที่ ฉ-1 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.14 mm				L2 = 250.34 mm				L3 = 251.98 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. %
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	1.708	0	381.0	0	3.905	0	396.2	0	5.545	0	386.7	0	0	0	28.9	71
1	1.767	0.02378	384.6	0.94	3.985	0.03196	401.4	1.31	5.625	0.03175	391.2	1.16	0.02916	1.14	30.7	69
2	1.763	0.02217	385.1	1.08	3.983	0.03116	401.8	1.41	5.618	0.02897	391.4	1.22	0.02743	1.23	29.2	64
3	1.761	0.02136	385.1	1.08	3.980	0.02996	401.8	1.41	5.616	0.02818	391.4	1.22	0.02650	1.23	29.4	68
4	1.758	0.02015	385.0	1.05	3.978	0.02916	402.0	1.46	5.613	0.02699	391.5	1.24	0.02543	1.25	29.3	68
5	1.755	0.01894	385.2	1.10	3.973	0.02716	402.0	1.46	5.616	0.02818	391.5	1.24	0.02476	1.27	29.6	69
6	1.751	0.01733	385.1	1.08	3.973	0.02716	401.9	1.44	5.615	0.02778	391.7	1.29	0.02409	1.27	29.8	68
7	1.757	0.01975	385.0	1.05	3.978	0.02916	401.8	1.41	5.615	0.02778	391.5	1.24	0.02556	1.23	30.3	69
8	1.746	0.01531	385.0	1.05	3.974	0.02756	401.9	1.44	5.610	0.02580	391.9	1.34	0.02289	1.28	30.7	69
9	1.742	0.01370	384.9	1.02	3.968	0.02517	401.6	1.36	5.601	0.02222	391.7	1.29	0.02036	1.23	29.8	64
10	1.740	0.01290	384.9	1.02	3.968	0.02517	401.6	1.36	5.602	0.02262	391.7	1.29	0.02023	1.23	30.3	66
11	1.738	0.01209	385.1	1.08	3.966	0.02437	401.6	1.36	5.602	0.02262	391.6	1.27	0.01969	1.24	30.1	67
12	1.733	0.01008	385.3	1.13	3.963	0.02317	401.7	1.39	5.600	0.02183	391.6	1.27	0.02250	1.26	29.9	69
13	1.730	0.00887	385.3	1.13	3.961	0.02237	401.8	1.41	5.599	0.02143	391.6	1.27	0.02190	1.27	31.1	64
14	1.730	0.00887	385.4	1.15	3.961	0.02237	401.8	1.41	5.598	0.02103	391.6	1.27	0.02170	1.28	30.2	68
15	1.731	0.00927	385.6	1.21	3.961	0.02237	402.0	1.46	5.602	0.02262	392.1	1.40	0.02250	1.36	31.0	66
20	1.727	0.00766	385.1	1.08	3.96	0.02197	401.5	1.34	5.594	0.01945	391.3	1.19	0.02071	1.20	30.5	68
30	1.726	0.00725	382.9	0.50	3.947	0.01678	398.9	0.68	5.598	0.02103	388.7	0.52	0.01891	0.57	30.2	68

ตารางที่ ฉ-2 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.12 mm				L2 = 249.33 mm				L3 = 248.73 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	3.686	0	399.8	0	2.896	0	384.4	0	2.296	0	374.1	0	0	0	29.9	68
1	3.752	0.02639	408.9	2.28	2.979	0.03329	393.7	2.42	2.371	0.03015	382.8	2.33	0.02994	2.34	29.2	64
2	3.748	0.02479	409.1	2.33	2.965	0.02767	394.0	2.50	2.364	0.02734	382.4	2.22	0.02660	2.35	28.5	74
3	3.740	0.02159	409.2	2.35	2.960	0.02567	394.1	2.52	2.357	0.02452	382.2	2.17	0.02393	2.35	29.3	64
4	3.732	0.01839	409.1	2.33	2.952	0.02246	394.2	2.55	2.350	0.02171	382.0	2.11	0.02085	2.33	30.4	62
5	3.732	0.01839	409.2	2.35	2.947	0.02046	394.2	2.55	2.341	0.01809	382.1	2.14	0.01898	2.35	30.5	68
6	3.728	0.01679	409.2	2.35	2.942	0.01845	394.2	2.55	2.338	0.01689	382.2	2.17	0.01738	2.36	30.2	67
7	3.735	0.01959	409.8	2.50	2.950	0.02166	394.7	2.68	2.338	0.01689	382.6	2.27	0.01938	2.48	29.1	71
8	3.727	0.01639	409.8	2.50	2.940	0.01765	394.8	2.71	2.333	0.01488	382.5	2.25	0.01631	2.48	30.0	67
9	3.726	0.01599	409.8	2.50	2.940	0.01765	394.8	2.71	2.330	0.01367	382.5	2.25	0.01577	2.48	30.2	68
10	3.724	0.01519	409.9	2.53	2.938	0.01685	394.9	2.73	2.330	0.01367	382.6	2.27	0.01524	2.51	30.6	67
11	3.722	0.01439	410.0	2.55	2.936	0.01604	394.8	2.71	2.329	0.01327	382.7	2.30	0.01457	2.52	30.2	68
12	3.721	0.01399	410.0	2.55	2.935	0.01564	394.8	2.71	2.328	0.01287	382.7	2.30	0.01417	2.52	30.0	69
13	3.719	0.01319	410.1	2.58	2.933	0.01484	394.8	2.71	2.328	0.01287	382.8	2.33	0.01363	2.54	30.2	71
14	3.718	0.01279	409.9	2.53	2.933	0.01484	394.6	2.65	2.327	0.01246	382.7	2.30	0.01337	2.49	30.2	68
15	3.717	0.01239	408.9	2.28	2.930	0.01364	394.0	2.50	2.327	0.01246	382.3	2.19	0.01283	2.32	30.7	69
20	3.705	0.00760	408.3	2.13	2.921	0.01003	393.3	2.32	2.317	0.00844	381.6	2.00	0.00869	2.15	30.4	69
30	3.698	0.00480	399.7	-0.03	2.911	0.00602	384.3	-0.03	2.312	0.00643	376.2	0.56	0.00575	0.17	30.2	68

ตารางที่ ฉ-3 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-1 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.55 mm				L2 = 250.54 mm				L3 = 249.08 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.121	0	384.2	0	4.112	0	398.5	0	2.651	0	374.3	0	0	0	30.3	69
1	4.195	0.02953	389.5	1.38	4.188	0.03033	403.4	1.23	2.727	0.03051	379.7	1.44	0.03013	1.35	30.3	59
2	4.185	0.02554	389.3	1.33	4.182	0.02794	403.9	1.36	2.705	0.02168	379.7	1.44	0.02505	1.38	30.8	63
3	4.175	0.02155	389.2	1.30	4.172	0.02395	403.8	1.33	2.703	0.02088	379.3	1.34	0.02213	1.32	30.9	65
4	4.173	0.02075	388.8	1.20	4.173	0.02435	403.2	1.18	2.703	0.020877	378.7	1.18	0.02199	1.18	29.5	70
5	4.174	0.02115	388.7	1.17	4.168	0.02235	403.5	1.25	2.701	0.02007	378.6	1.15	0.02119	1.19	31.3	65
6	4.166	0.01796	388.6	1.15	4.168	0.02235	403.6	1.28	2.702	0.02048	378.7	1.18	0.02026	1.20	30.3	66
7	4.165	0.01756	388.7	1.17	4.168	0.02235	403.5	1.25	2.703	0.02088	378.4	1.10	0.02026	1.17	30.5	67
8	4.166	0.01796	388.6	1.15	4.169	0.02275	403.6	1.28	2.703	0.02088	378.4	1.10	0.02053	1.17	30.4	68
9	4.166	0.01796	388.5	1.12	4.169	0.02275	402.9	1.10	2.702	0.02048	378.5	1.12	0.02040	1.12	30.0	68
10	4.164	0.01716	388.6	1.15	4.167	0.02195	403.1	1.15	2.701	0.02007	378.5	1.12	0.01973	1.14	30.2	68
11	4.160	0.01557	388.5	1.12	4.164	0.02076	403.0	1.13	2.698	0.01887	378.6	1.15	0.01840	1.13	30.1	68
12	4.157	0.01437	388.5	1.12	4.159	0.01876	403.0	1.13	2.695	0.01766	378.6	1.15	0.01693	1.13	30.6	67
13	4.152	0.01237	388.5	1.12	4.156	0.01756	402.8	1.08	2.691	0.01606	378.7	1.18	0.01533	1.12	30.1	71
14	4.152	0.01237	388.4	1.09	4.155	0.01716	402.5	1.00	2.691	0.01606	378.5	1.12	0.01520	1.07	30.2	68
15	4.152	0.01237	387.3	0.81	4.153	0.01636	401.8	0.83	2.692	0.01646	377.6	0.88	0.01507	0.84	30.2	69
20	4.145	0.00958	386.9	0.70	4.149	0.01477	401.2	0.68	2.688	0.01485	376.8	0.67	0.01307	0.68	30.5	69
30	4.144	0.00918	383.0	-0.31	4.139	0.01078	397.7	-0.20	2.688	0.01485	375.1	0.21	0.01160	-0.10	30.2	68

ตารางที่ ฉ-4 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.76 mm				L2 = 250.76 mm				L3 = 249.23 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	3.334	0	381.2	0	4.333	0	382.2	0	2.802	0	394.2	0	0	0	28.0	71
1	3.375	0.01642	388.2	1.84	4.392	0.02353	388.6	1.67	2.856	0.02167	399.8	1.42	0.02054	1.64	30.3	60
2	3.398	0.02562	388.4	1.89	4.407	0.02951	388.6	1.67	2.866	0.02568	400.1	1.50	0.02694	1.69	28.6	76
3	3.390	0.02242	388.1	1.81	4.404	0.02831	388.6	1.67	2.871	0.02769	399.9	1.45	0.02614	1.64	28.0	77
4	3.400	0.02642	388.2	1.84	4.394	0.02433	388.6	1.67	2.863	0.02448	399.9	1.45	0.02508	1.65	29.3	64
5	3.398	0.02562	388.0	1.78	4.398	0.02592	388.5	1.65	2.859	0.02287	400.1	1.50	0.02481	1.64	28.4	74
6	3.383	0.01962	387.9	1.76	4.397	0.02552	388.5	1.65	2.853	0.02046	400.0	1.47	0.02187	1.63	29.0	64
7	3.375	0.01642	388.1	1.81	4.388	0.02193	388.5	1.65	2.847	0.01806	399.9	1.45	0.01880	1.63	30.3	62
8	3.387	0.02122	388.0	1.78	4.391	0.02313	388.6	1.67	2.842	0.01605	399.8	1.42	0.02013	1.63	30.5	68
9	3.385	0.02042	388.0	1.78	4.389	0.02233	388.7	1.70	2.845	0.01725	400.0	1.47	0.02000	1.65	29.0	75
10	3.375	0.01642	388.2	1.84	4.387	0.02153	388.9	1.75	2.838	0.01444	400.1	1.50	0.01746	1.70	31.2	66
11	3.381	0.01882	388.3	1.86	4.391	0.02313	388.6	1.67	2.841	0.01565	400.0	1.47	0.01920	1.67	31.0	66
12	3.382	0.01922	388.0	1.78	4.392	0.02353	388.8	1.73	2.844	0.01685	400.0	1.47	0.01987	1.66	30.0	67
13	3.383	0.01962	388.2	1.84	4.392	0.02353	388.8	1.73	2.842	0.01605	400.0	1.47	0.01973	1.68	29.9	68
14	3.386	0.02082	388.4	1.89	4.390	0.02273	389.0	1.78	2.838	0.01444	400.4	1.57	0.01933	1.75	31.3	67
15	3.383	0.01962	388.5	1.92	4.390	0.02273	389.0	1.78	2.837	0.01404	400.5	1.60	0.01880	1.76	30.3	68
20	3.376	0.01682	388.4	1.89	4.378	0.01795	388.7	1.70	2.830	0.01123	400.0	1.47	0.01533	1.69	30.5	69
30	3.365	0.01241	387.5	1.65	4.377	0.01755	388.1	1.54	2.827	0.01003	399.4	1.32	0.01333	1.51	30.4	68

ตารางที่ ฉ-5 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.56 mm				L2 = 250.30 mm				L3 = 253.86 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.130	0	399.0	0	3.868	0	390.1	0	7.433	0	405.4	0	0	0	29.7	70
1	4.203	0.02913	410.1	2.78	3.920	0.02078	400.1	2.56	7.484	0.02009	414.9	2.34	0.02333	2.56	30.0	70
2	4.200	0.02794	409.2	2.56	3.917	0.01958	399.0	2.28	7.486	0.02088	413.8	2.07	0.02280	2.30	30.1	60
3	4.208	0.03113	409.5	2.63	3.922	0.02157	399.4	2.38	7.490	0.02245	414.5	2.24	0.02201	2.42	27.2	77
4	4.204	0.02953	409.8	2.71	3.915	0.01878	399.4	2.38	7.491	0.02285	414.6	2.27	0.02372	2.45	29.7	73
5	4.198	0.02714	409.7	2.68	3.913	0.01798	399.5	2.41	7.487	0.02127	414.3	2.20	0.02213	2.43	29.0	68
6	4.196	0.02634	409.6	2.66	3.920	0.02078	399.5	2.41	7.481	0.01891	414.4	2.22	0.02201	2.43	28.5	71
7	4.195	0.02594	409.9	2.73	3.913	0.01798	399.7	2.46	7.482	0.01930	414.5	2.24	0.02107	2.48	29.5	69
8	4.190	0.02395	410.0	2.76	3.910	0.01678	399.7	2.46	7.480	0.01851	414.6	2.27	0.01975	2.50	30.0	69
9	4.185	0.02195	409.8	2.71	3.905	0.01478	399.6	2.44	7.476	0.01694	414.5	2.24	0.01789	2.46	30.1	69
10	4.185	0.02195	410.1	2.78	3.904	0.01438	400.0	2.54	7.470	0.01457	414.7	2.29	0.01697	2.54	29.6	74
11	4.172	0.01676	410.4	2.86	3.902	0.01358	400.2	2.59	7.467	0.01339	415.0	2.37	0.01458	2.60	31.3	65
12	4.171	0.01636	410.4	2.86	3.901	0.01318	400.2	2.59	7.471	0.01497	414.8	2.32	0.01484	2.59	31.0	66
13	4.171	0.01636	410.6	2.91	3.900	0.01278	400.3	2.61	7.475	0.01654	415.1	2.39	0.01523	2.64	30.0	67
14	4.171	0.01636	410.6	2.91	3.900	0.01278	400.5	2.67	7.474	0.01615	415.2	2.42	0.01510	2.66	30.1	68
15	4.170	0.01596	410.8	2.96	3.901	0.01318	400.7	2.72	7.473	0.01576	415.4	2.47	0.01497	2.71	31.4	66
20	4.159	0.01157	410.1	2.78	3.888	0.00799	399.8	2.49	7.451	0.00709	414.6	2.27	0.00888	2.51	30.4	67
30	4.151	0.00838	410.6	2.91	3.883	0.00599	400.3	2.61	7.449	0.00630	415.1	2.39	0.00689	2.64	30.2	67

ตารางที่ ฉ-6 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.39 mm				L2 = 248.56 mm				L3 = 250.41 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.959	0	392.5	0	2.133	0	396.7	0	3.982	0	384.8	0	0	0	28.3	77
1	3.049	0.03609	401.4	2.27	2.210	0.03098	405.7	2.27	4.069	0.03474	392.2	1.92	0.03394	2.15	27.7	77
2	3.046	0.03489	401.2	2.22	2.202	0.02776	405.2	2.14	4.048	0.02636	392.2	1.92	0.02967	2.09	30.1	69
3	3.043	0.03368	401.7	2.34	2.207	0.02977	405.9	2.32	4.061	0.03155	392.8	2.08	0.03167	2.25	29.7	70
4	3.037	0.03128	401.7	2.34	2.204	0.02856	405.8	2.29	4.041	0.02356	392.6	2.03	0.02780	2.22	30.3	69
5	3.039	0.03208	401.6	2.32	2.198	0.02615	405.4	2.19	4.048	0.02636	392.2	1.92	0.02820	2.14	30.0	59
6	3.031	0.02887	401.8	2.37	2.190	0.02293	405.6	2.24	4.039	0.02276	392.5	2.00	0.02485	2.20	30.2	64
7	3.024	0.02606	401.9	2.39	2.189	0.02253	405.6	2.24	4.032	0.01997	392.2	1.92	0.02285	2.19	30.4	66
8	3.020	0.02446	402.0	2.42	2.183	0.02012	405.6	2.24	4.027	0.01797	392.6	2.03	0.02085	2.23	29.6	69
9	3.012	0.02125	401.9	2.39	2.183	0.02012	405.7	2.27	4.031	0.01957	392.2	1.92	0.02031	2.20	31.5	65
10	3.011	0.02085	401.9	2.39	2.180	0.01891	405.8	2.29	4.030	0.01917	392.5	2.00	0.01964	2.23	30.3	67
11	3.013	0.02165	402.3	2.50	2.182	0.01971	406.1	2.37	4.020	0.01517	392.3	1.95	0.01885	2.27	30.4	67
12	3.010	0.02045	402.0	2.42	2.178	0.01810	406.0	2.34	4.022	0.01597	392.4	1.98	0.01818	2.25	31.0	66
13	3.012	0.02125	402.1	2.45	2.182	0.01971	406.1	2.37	4.025	0.01717	392.2	1.92	0.01938	2.25	30.0	67
14	3.010	0.02045	402.3	2.50	2.180	0.01891	406.3	2.42	4.022	0.01597	392.2	1.92	0.01844	2.28	30.0	68
15	3.010	0.02045	402.5	2.55	2.174	0.01649	406.6	2.50	4.022	0.01597	392.2	1.92	0.01764	2.32	31.4	66
20	2.995	0.01444	401.0	2.17	2.162	0.01167	405.0	2.09	4.019	0.01478	390.9	1.59	0.01363	1.95	31.5	65
30	2.982	0.00922	401.4	2.27	2.153	0.00805	405.3	2.17	4.001	0.00759	391.3	1.69	0.00829	2.04	30.7	66

ตารางที่ ฉ-7 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P30-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 249.07 mm				L2 = 249.84 mm				L3 = 249.00 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.636	0	391.1	0	3.406	0	409.8	0	2.565	0	408.9	0	0	0	29.7	68
1	2.785	0.05982	400.7	2.45	3.533	0.05083	419.9	2.46	2.682	0.04699	418.4	2.32	0.05255	2.41	26.0	84
2	2.770	0.05380	399.7	2.20	3.523	0.04683	418.4	2.10	2.672	0.04297	417.8	2.18	0.04787	2.16	28.6	72
3	2.760	0.04979	399.9	2.25	3.518	0.04483	418.9	2.22	2.668	0.04137	418.5	2.35	0.04533	2.27	29.4	74
4	2.752	0.04657	399.8	2.22	3.513	0.04283	418.9	2.22	2.662	0.03896	418.3	2.30	0.04279	2.25	30.6	67
5	2.751	0.04617	400.0	2.28	3.512	0.04243	419.1	2.27	2.660	0.03815	418.4	2.32	0.04225	2.29	29.6	68
6	2.738	0.04095	399.8	2.22	3.502	0.03843	418.9	2.22	2.650	0.03414	418.5	2.35	0.03784	2.26	30.0	63
7	2.745	0.04376	400.4	2.38	3.499	0.03722	419.4	2.34	2.650	0.03414	419.0	2.47	0.03838	2.40	29.5	69
8	2.744	0.04336	400.4	2.38	3.502	0.03843	419.4	2.34	2.646	0.03253	418.9	2.45	0.03811	2.39	29.6	70
9	2.738	0.04095	400.1	2.30	3.498	0.03682	419.2	2.29	2.641	0.03052	418.6	2.37	0.03610	2.32	31.6	65
10	2.729	0.03734	400.4	2.38	3.498	0.03682	419.5	2.37	2.645	0.03213	418.9	2.45	0.03543	2.40	30.0	68
11	2.726	0.03614	401.0	2.53	3.496	0.03602	420.1	2.51	2.640	0.03012	419.6	2.62	0.03409	2.55	30.4	68
12	2.733	0.03895	401.0	2.53	3.492	0.03442	420.1	2.51	2.641	0.03052	419.7	2.64	0.03463	2.56	31.3	64
13	2.732	0.03854	401.0	2.53	3.492	0.03442	420.2	2.54	2.640	0.03012	419.7	2.64	0.03436	2.57	29.9	68
14	2.732	0.03854	401.0	2.53	3.490	0.03362	420.0	2.49	2.640	0.03012	419.7	2.64	0.03410	2.55	30.0	68
15	2.732	0.03854	400.7	2.45	3.489	0.03322	420.0	2.49	2.641	0.03052	419.8	2.67	0.03410	2.54	30.5	69
20	2.707	0.02851	400.1	2.30	3.478	0.02882	419.6	2.39	2.625	0.02410	419.3	2.54	0.02714	2.41	31.5	64
30	2.695	0.02369	400.4	2.38	3.462	0.02241	420.0	2.49	2.608	0.01727	420.2	2.76	0.02112	2.54	30.8	66

ตารางที่ ฉ-8 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O5-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.54 mm				L2 = 252.14 mm				L3 = 249.35 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.112	0	386.3	0	5.705	0	400.6	0	2.920	0	398.5	0	0	0	29.4	70
1	4.186	0.02954	394.2	2.05	5.788	0.03292	408.6	2.00	2.978	0.02326	405.5	1.76	0.02857	1.93	30.1	66
2	4.195	0.03313	394.8	2.20	5.792	0.03451	409.2	2.15	2.985	0.02607	406.3	1.96	0.03123	2.10	28.1	79
3	4.193	0.03233	394.4	2.10	5.788	0.03292	408.9	2.07	2.983	0.02527	405.9	1.86	0.03017	2.01	28.7	75
4	4.182	0.02794	394.2	2.05	5.787	0.03252	408.6	2.00	2.979	0.02366	405.6	1.78	0.02804	1.94	30.5	59
5	4.188	0.03033	394.3	2.07	5.780	0.02975	408.6	2.00	2.980	0.02406	405.6	1.78	0.02805	1.95	28.2	76
6	4.181	0.02754	394.1	2.02	5.784	0.03133	408.4	1.95	2.970	0.02005	405.5	1.76	0.02631	1.91	29.9	68
7	4.178	0.02634	394.1	2.02	5.784	0.03133	408.5	1.97	2.968	0.01925	405.4	1.73	0.02564	1.91	29.6	68
8	4.170	0.02315	394.1	2.02	5.775	0.02776	408.3	1.92	2.967	0.01885	405.3	1.71	0.02325	1.88	30.0	68
9	4.168	0.02235	394.1	2.02	5.769	0.02538	408.5	1.97	2.967	0.01885	405.3	1.71	0.02219	1.90	30.7	69
10	4.170	0.02315	394.4	2.10	5.753	0.01904	408.5	1.97	2.970	0.02005	405.7	1.81	0.02075	1.96	30.6	69
11	4.164	0.02076	393.7	1.92	5.753	0.01904	408.2	1.90	2.962	0.01684	405.1	1.66	0.01888	1.82	30.7	68
12	4.165	0.02115	394.2	2.05	5.761	0.02221	408.5	1.97	2.966	0.01845	405.4	1.73	0.02060	1.92	31.3	64
13	4.165	0.02115	394.4	2.10	5.760	0.02181	408.6	2.00	2.965	0.01805	405.4	1.73	0.02034	1.94	30.1	67
14	4.166	0.02155	394.5	2.12	5.760	0.02181	408.7	2.02	2.966	0.01845	405.7	1.81	0.02060	1.98	30.0	68
15	4.171	0.02355	394.9	2.23	5.762	0.02261	408.9	2.07	2.972	0.02085	406.9	2.11	0.02234	2.14	30.5	69
20	4.161	0.01956	394.1	2.02	5.753	0.01904	408.4	1.95	2.968	0.01925	405.5	1.76	0.01928	1.91	31.2	65
30	4.151	0.01557	393.8	1.94	5.741	0.01428	408.4	1.95	2.952	0.01283	405.4	1.73	0.01423	1.87	30.8	66

ตารางที่ ๑-9 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-2 ป้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.67 mm				L2 = 249.00 mm				L3 = 250.95 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	6.243	0	401.9	0	2.568	0	393.1	0	4.522	0	391.8	0	0	0	29.7	68
1	6.317	0.02929	411.7	2.44	2.654	0.03454	402.3	2.34	4.602	0.03188	400.2	2.14	0.03190	2.31	31.0	68
2	6.319	0.03008	411.1	2.29	2.656	0.03534	401.8	2.21	4.602	0.03188	400.1	2.12	0.03243	2.21	28.9	71
3	6.312	0.02731	410.7	2.19	2.652	0.03374	401.2	2.06	4.604	0.03268	399.1	1.86	0.03124	2.04	30.1	69
4	6.310	0.02652	410.4	2.11	2.647	0.03173	400.9	1.98	4.593	0.02829	398.9	1.81	0.02885	1.97	30.8	67
5	6.308	0.02572	410.4	2.11	2.640	0.02892	400.9	1.98	4.593	0.02829	398.9	1.81	0.02764	1.97	30.8	65
6	6.307	0.02533	410.3	2.09	2.645	0.03092	400.7	1.93	4.598	0.03028	398.5	1.71	0.02885	1.91	29.1	69
7	6.308	0.02572	410.3	2.09	2.641	0.02932	400.5	1.88	4.593	0.02829	398.7	1.76	0.02778	1.91	29.6	69
8	6.305	0.02454	410.1	2.04	2.633	0.02610	400.4	1.86	4.586	0.02550	398.7	1.76	0.02538	1.89	29.7	69
9	6.307	0.02533	410.1	2.04	2.630	0.02490	400.3	1.83	4.587	0.02590	398.4	1.68	0.02538	1.85	30.6	69
10	6.304	0.02414	410.1	2.04	2.634	0.02651	400.6	1.91	4.590	0.02710	398.5	1.71	0.02591	1.89	30.2	68
11	6.303	0.02375	409.7	1.94	2.636	0.02731	400.3	1.83	4.588	0.02630	398.2	1.63	0.02579	1.80	30.6	68
12	6.303	0.02375	409.7	1.94	2.633	0.02610	400.4	1.86	4.585	0.02510	398.5	1.71	0.02499	1.84	31.3	64
13	6.303	0.02375	409.8	1.97	2.634	0.02651	400.5	1.88	4.586	0.02550	398.5	1.71	0.02525	1.85	30.1	68
14	6.303	0.02375	410.0	2.02	2.634	0.02651	400.9	1.98	4.588	0.02630	398.6	1.74	0.02552	1.91	30.1	68
15	6.308	0.02572	410.6	2.16	2.637	0.02771	401.2	2.06	4.591	0.02750	399.2	1.89	0.02698	2.04	30.6	69
20	6.297	0.02137	409.8	1.97	2.632	0.02570	400.5	1.88	4.585	0.02510	398.1	1.61	0.02406	1.82	31.4	64
30	6.282	0.01543	409.7	1.94	2.615	0.01888	400.1	1.78	4.575	0.02112	398.3	1.66	0.01848	1.79	30.9	66

ตารางที่ ฉ-10 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.35 mm				L2 = 248.93 mm				L3 = 248.87 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.923	0	396.6	0	2.497	0	384.6	0	2.435	0	388.2	0	0	0	29.6	68
1	5.993	0.02774	406.1	2.40	2.572	0.03013	393.8	2.39	2.501	0.02652	397.9	2.50	0.02813	2.43	30.5	60
2	6.003	0.03170	405.9	2.34	2.576	0.03174	394.0	2.44	2.508	0.02933	398.2	2.58	0.03092	2.46	28.3	72
3	6.001	0.03091	404.7	2.04	2.568	0.02852	392.6	2.08	2.505	0.02813	396.7	2.19	0.02919	2.10	30.9	66
4	5.991	0.02695	403.8	1.82	2.568	0.02852	391.8	1.87	2.507	0.02893	395.9	1.98	0.02813	1.89	30.2	62
5	5.998	0.02972	403.8	1.82	2.563	0.02651	391.9	1.90	2.511	0.03054	395.7	1.93	0.02892	1.88	28.2	72
6	5.993	0.02774	403.7	1.79	2.561	0.02571	391.9	1.90	2.509	0.02973	395.8	1.96	0.02773	1.88	29.9	70
7	5.988	0.02576	403.5	1.74	2.557	0.02410	391.5	1.79	2.503	0.02732	395.4	1.85	0.02573	1.80	29.7	68
8	5.982	0.02338	403.3	1.69	2.558	0.02451	391.5	1.79	2.492	0.02290	395.3	1.83	0.02360	1.77	30.3	68
9	5.985	0.02457	403.4	1.71	2.552	0.02209	391.5	1.79	2.492	0.02290	395.4	1.85	0.02319	1.79	30.5	67
10	5.982	0.02338	403.2	1.66	2.547	0.02009	391.2	1.72	2.490	0.02210	395.2	1.80	0.02186	1.73	29.0	73
11	5.975	0.02061	403.2	1.66	2.550	0.02129	391.5	1.79	2.490	0.02210	395.3	1.83	0.02133	1.76	30.7	67
12	5.975	0.02061	403.2	1.66	2.550	0.02129	391.4	1.77	2.490	0.02210	395.3	1.83	0.02133	1.75	29.8	67
13	5.976	0.02100	403.1	1.64	2.550	0.02129	391.3	1.74	2.491	0.02250	395.2	1.80	0.02160	1.73	29.7	65
14	5.976	0.02100	403.8	1.82	2.550	0.02129	391.8	1.87	2.491	0.02250	395.9	1.98	0.02160	1.89	30.0	68
15	5.974	0.02021	403.9	1.84	2.550	0.02129	392.5	2.05	2.492	0.02290	396.1	2.04	0.02147	1.98	31.4	67
20	5.971	0.01902	403.2	1.66	2.548	0.02049	391.3	1.74	2.480	0.01808	395.1	1.78	0.01920	1.73	30.4	70
30	5.961	0.01506	403.3	1.69	2.543	0.01848	391.7	1.85	2.463	0.01125	395.3	1.83	0.01493	1.79	30.6	68

ตารางที่ ฉ-11 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O5-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.41 mm				L2 = 248.95 mm				L3 = 247.85 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	3.975	0	382.9	0	2.521	0	394.2	0	1.422	0	384.1	0	0	0	29.1	71
1	4.040	0.02596	392.5	2.51	2.580	0.02370	403.9	2.46	1.466	0.01775	393.5	2.45	0.02247	2.47	28.8	70
2	4.040	0.02596	392.3	2.45	2.588	0.02691	404.0	2.49	1.470	0.01937	393.7	2.50	0.02408	2.48	26.5	78
3	4.032	0.02276	392.0	2.38	2.586	0.02611	403.7	2.41	1.478	0.02259	393.4	2.42	0.02382	2.40	29.5	70
4	4.025	0.01997	391.3	2.19	2.581	0.02410	403.0	2.23	1.485	0.02542	392.3	2.13	0.02316	2.19	29.1	64
5	4.026	0.02037	390.9	2.09	2.584	0.02531	402.6	2.13	1.462	0.01614	392.2	2.11	0.02060	2.11	28.4	71
6	4.020	0.01797	391.2	2.17	2.581	0.02410	402.9	2.21	1.473	0.02058	392.2	2.11	0.02088	2.16	29.9	70
7	4.016	0.01637	390.5	1.98	2.569	0.01928	402.2	2.03	1.460	0.01533	391.6	1.95	0.01700	1.99	29.7	69
8	4.011	0.01438	390.9	2.09	2.568	0.01888	402.7	2.16	1.460	0.01533	392.0	2.06	0.01620	2.10	30.3	68
9	4.011	0.01438	391.0	2.12	2.569	0.01928	402.8	2.18	1.458	0.01452	391.9	2.03	0.01606	2.11	30.4	67
10	4.011	0.01438	391.1	2.14	2.566	0.01808	402.7	2.16	1.460	0.01533	392.2	2.11	0.01593	2.14	29.0	72
11	4.010	0.01398	391.3	2.19	2.564	0.01727	402.9	2.21	1.453	0.01251	392.0	2.06	0.01459	2.15	30.8	67
12	4.011	0.01438	391.2	2.17	2.568	0.01888	402.8	2.18	1.453	0.01251	392.4	2.16	0.01525	2.17	30.0	68
13	4.012	0.01478	391.3	2.19	2.572	0.02049	402.9	2.21	1.456	0.01372	392.4	2.16	0.01633	2.19	29.8	66
14	4.011	0.01438	391.8	2.32	2.573	0.02089	403.2	2.28	1.457	0.01412	392.7	2.24	0.01646	2.28	30.1	68
15	4.011	0.01438	392.2	2.43	2.577	0.02249	403.8	2.44	1.462	0.01614	393.1	2.34	0.01767	2.40	31.4	67
20	4.000	0.00998	391	2.12	2.558	0.01486	402.8	2.18	1.443	0.00847	392.0	2.06	0.01111	2.12	30.6	70
30	3.978	0.00120	391.2	2.17	2.541	0.00803	403.1	2.26	1.433	0.00444	392.3	2.13	0.00456	2.19	30.5	68

ตารางที่ ฉ-12 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.25 mm				L2 = 252.01 mm				L3 = 249.44 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.820	0	405.7	0	5.580	0	394.3	0	3.013	0	398.3	0	0	0	30.1	62
1	5.898	0.03092	416.7	2.71	5.658	0.03095	404.4	2.56	3.092	0.03167	407.6	2.33	0.03118	2.54	30.2	61
2	5.903	0.03290	417.3	2.86	5.664	0.03333	404.8	2.66	3.105	0.03688	407.9	2.41	0.03437	2.64	28.0	77
3	5.896	0.03013	417.0	2.79	5.658	0.03095	404.8	2.66	3.094	0.03247	407.6	2.33	0.03118	2.59	28.0	77
4	5.903	0.03290	416.9	2.76	5.653	0.02897	404.8	2.66	3.093	0.03207	407.1	2.21	0.03131	2.54	29.3	63
5	5.879	0.02339	417.2	2.83	5.643	0.02500	405.2	2.76	3.090	0.03087	407.2	2.23	0.02642	2.61	28.5	75
6	5.882	0.02458	417.3	2.86	5.652	0.02857	405.1	2.74	3.082	0.02766	407.2	2.23	0.02694	2.61	29.2	64
7	5.879	0.02339	417.0	2.79	5.647	0.02659	405.3	2.79	3.078	0.02606	407.1	2.21	0.02534	2.59	30.4	61
8	5.868	0.01903	417.2	2.83	5.644	0.02540	405.5	2.84	3.073	0.02405	407.3	2.26	0.02283	2.64	30.6	68
9	5.864	0.01744	417.0	2.79	5.639	0.02341	405.7	2.89	3.071	0.02325	407.2	2.23	0.02137	2.64	30.0	68
10	5.863	0.01705	417.2	2.83	5.638	0.02301	405.9	2.94	3.077	0.02566	407.7	2.36	0.02191	2.71	29.0	72
11	5.865	0.01784	417.3	2.86	5.641	0.02421	406.0	2.97	3.073	0.02405	407.9	2.41	0.02203	2.75	30.8	67
12	5.864	0.01744	417.3	2.86	5.640	0.02381	406.0	2.97	3.073	0.02405	407.8	2.39	0.02177	2.74	29.9	67
13	5.864	0.01744	417.2	2.83	5.636	0.02222	405.9	2.94	3.074	0.02445	407.8	2.39	0.02137	2.72	29.8	65
14	5.864	0.01744	417.0	2.79	5.636	0.02222	405.5	2.84	3.074	0.02445	407.6	2.33	0.02137	2.65	30.2	68
15	5.866	0.01824	416.7	2.71	5.633	0.02103	405.3	2.79	3.075	0.02486	406.9	2.16	0.02137	2.55	31.5	67
20	5.850	0.01189	416.4	2.64	5.625	0.01786	404.5	2.59	3.062	0.01964	406.7	2.11	0.01646	2.44	30.8	69
30	5.832	0.00476	416.7	2.71	5.610	0.01190	404.9	2.69	3.042	0.01163	407.0	2.18	0.00943	2.53	30.8	68

ตารางที่ ฉ-13 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.23 mm				L2 = 247.74 mm				L3 = 250.53 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.795	0	392.7	0	1.312	0	393.5	0	4.098	0	399.5	0	0	0	28.5	73
1	5.869	0.02934	402.8	2.57	1.420	0.04359	404.5	2.80	4.183	0.03393	409.1	2.40	0.03562	2.59	29.4	62
2	5.877	0.03251	403.8	2.83	1.403	0.03673	405.4	3.02	4.185	0.03473	410.4	2.73	0.03466	2.86	27.5	77
3	5.880	0.03370	403.9	2.85	1.398	0.03471	406.0	3.18	4.188	0.03592	410.9	2.85	0.03478	2.96	29.8	74
4	5.883	0.03489	404.1	2.90	1.398	0.03471	406.1	3.20	4.184	0.03433	410.9	2.85	0.03464	2.99	29.0	68
5	5.877	0.03251	404.3	2.95	1.390	0.03148	406.7	3.35	4.180	0.03273	411.4	2.98	0.03224	3.10	28.4	71
6	5.863	0.02696	404.3	2.95	1.388	0.03068	406.7	3.35	4.172	0.02954	411.4	2.98	0.02906	3.10	29.5	68
7	5.863	0.02696	404.4	2.98	1.388	0.03068	406.7	3.35	4.163	0.02595	411.3	2.95	0.02786	3.10	29.9	69
8	5.861	0.02617	404.5	3.00	1.381	0.02785	406.9	3.41	4.168	0.02794	411.4	2.98	0.02732	3.13	30.2	69
9	5.865	0.02775	405.1	3.16	1.383	0.02866	407.6	3.58	4.168	0.02794	412.0	3.13	0.02812	3.29	30.4	67
10	5.859	0.02537	405.2	3.18	1.390	0.03148	407.6	3.58	4.165	0.02674	412.0	3.13	0.02787	3.30	30.4	68
11	5.859	0.02537	405.3	3.21	1.381	0.02785	407.6	3.58	4.162	0.02555	412.0	3.13	0.02626	3.31	31.0	65
12	5.859	0.02537	405.3	3.21	1.380	0.02745	407.7	3.61	4.163	0.02595	411.9	3.10	0.02626	3.31	29.9	68
13	5.859	0.02537	405.2	3.18	1.378	0.02664	407.8	3.63	4.164	0.02634	411.9	3.10	0.02612	3.31	30.7	66
14	5.859	0.02537	405.0	3.13	1.378	0.02664	407.6	3.58	4.163	0.02595	411.9	3.10	0.02599	3.27	30.1	68
15	5.859	0.02537	405.0	3.13	1.378	0.02664	407.5	3.56	4.160	0.02475	411.9	3.10	0.02559	3.26	31.5	67
20	5.852	0.02260	404.7	3.06	1.362	0.02018	407.2	3.48	4.159	0.02435	412.0	3.13	0.02238	3.22	30.6	69
30	5.835	0.01586	405.3	3.21	1.352	0.01615	407.9	3.66	4.135	0.01477	412.2	3.18	0.01559	3.35	30.9	68

ตารางที่ ฉ-14 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O5-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 246.74 mm				L2 = 248.13 mm				L3 = 248.37 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	0.305	0	384.6	0	1.702	0	395.0	0	1.942	0	397.9	0	0	0	27.3	77
1	0.388	0.03364	393.3	2.26	1.785	0.03345	404.2	2.33	2.015	0.02939	406.6	2.19	0.03216	2.26	29.9	67
2	0.391	0.03486	394.5	2.57	1.787	0.03426	405.0	2.53	2.028	0.03463	407.5	2.41	0.03458	2.51	29.7	71
3	0.384	0.03202	394.8	2.65	1.778	0.03063	405.1	2.56	2.017	0.03020	407.7	2.46	0.03095	2.56	30.4	69
4	0.383	0.03161	394.8	2.65	1.778	0.03063	405.1	2.56	2.016	0.02979	407.6	2.44	0.03068	2.55	30.2	66
5	0.376	0.02878	395.1	2.73	1.777	0.03023	405.3	2.61	2.003	0.02456	407.9	2.51	0.02785	2.62	30.7	64
6	0.373	0.02756	395.1	2.73	1.768	0.02660	405.6	2.68	2.002	0.02416	408.1	2.56	0.02611	2.66	30.7	66
7	0.380	0.03040	395.4	2.81	1.775	0.02942	405.8	2.73	2.011	0.02778	408.2	2.59	0.02920	2.71	29.6	70
8	0.383	0.03161	395.5	2.83	1.772	0.02821	405.9	2.76	2.008	0.02657	408.1	2.56	0.02880	2.72	31.9	65
9	0.368	0.02553	395.9	2.94	1.772	0.02821	406.3	2.86	2.003	0.02456	408.4	2.64	0.02610	2.81	30.4	67
10	0.368	0.02553	396.0	2.96	1.767	0.02620	406.3	2.86	1.998	0.02255	408.6	2.69	0.02476	2.84	30.4	68
11	0.370	0.02634	396.1	2.99	1.768	0.02660	406.4	2.89	1.999	0.02295	408.8	2.74	0.02530	2.87	31.0	64
12	0.370	0.02634	396.2	3.02	1.767	0.02620	406.5	2.91	1.999	0.02295	408.9	2.76	0.02516	2.90	30.1	68
13	0.370	0.02634	396.4	3.07	1.763	0.02458	406.5	2.91	1.999	0.02295	409.0	2.79	0.02463	2.92	30.7	65
14	0.367	0.02513	396.3	3.04	1.763	0.02458	406.3	2.86	2.000	0.02335	409.0	2.79	0.02435	2.90	30.2	68
15	0.365	0.02432	396.0	2.96	1.764	0.02499	406.2	2.84	2.000	0.02335	408.6	2.69	0.02422	2.83	31.5	67
20	0.350	0.01824	395.7	2.89	1.752	0.02015	405.9	2.76	1.984	0.01691	408.5	2.66	0.01843	2.77	31.3	64
30	0.334	0.01175	396	2.96	1.738	0.01451	406.7	2.96	1.972	0.01208	409	2.79	0.01278	2.91	30.9	66

ตารางที่ ฉ-15 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O10-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.46 mm				L2 = 249.58 mm				L3 = 250.56 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.183	0	386.7	0	3.923	0	401.4	0	3.808	0	381.6	0	0	0	30.3	69
1	2.299	0.04666	392.2	1.42	4.038	0.04594	406.3	1.22	3.903	0.03796	386.2	1.21	0.04352	1.28	28.8	71
2	2.285	0.04103	392.1	1.40	4.028	0.04194	406.2	1.20	3.902	0.03756	385.9	1.13	0.04018	1.24	30.8	68
3	2.288	0.04223	392.2	1.42	4.023	0.03994	406.1	1.17	3.895	0.03477	385.9	1.13	0.03898	1.24	31.0	58
4	2.284	0.04063	392.0	1.37	4.022	0.03954	406.1	1.17	3.897	0.03557	385.7	1.07	0.03858	1.21	31.0	62
5	2.293	0.04425	392.2	1.42	4.027	0.04154	406.4	1.25	3.893	0.03397	385.9	1.13	0.03992	1.26	29.1	69
6	2.274	0.03660	392.2	1.42	4.017	0.03755	406.3	1.22	3.887	0.03157	385.9	1.13	0.03524	1.26	29.7	69
7	2.272	0.03580	392.2	1.42	4.013	0.03595	406.1	1.17	3.881	0.02917	386.1	1.18	0.03364	1.26	29.7	69
8	2.272	0.03580	392.1	1.40	4.010	0.03475	406.4	1.25	3.882	0.02957	386.0	1.15	0.03337	1.27	30.4	69
9	2.266	0.03339	392.4	1.47	4.000	0.03076	406.6	1.30	3.880	0.02877	386.0	1.15	0.03097	1.31	30.5	66
10	2.267	0.03379	392.1	1.40	4.000	0.03076	406.3	1.22	3.879	0.02837	385.9	1.13	0.03097	1.25	30.5	67
11	2.264	0.03258	392.2	1.42	3.995	0.02876	406.3	1.22	3.878	0.02797	385.9	1.13	0.02977	1.26	31.0	64
12	2.262	0.03178	392.4	1.47	3.992	0.02756	406.3	1.22	3.875	0.02677	386.0	1.15	0.02870	1.28	30.1	68
13	2.260	0.03097	392.6	1.53	3.990	0.02676	406.4	1.25	3.873	0.02598	386.1	1.18	0.02790	1.32	30.7	65
14	2.258	0.03017	392.4	1.47	3.990	0.02676	406.3	1.22	3.872	0.02558	385.7	1.07	0.02750	1.26	30.3	68
15	2.253	0.02816	392.0	1.37	3.988	0.02596	406.0	1.15	3.872	0.02558	385.3	0.97	0.02657	1.16	29.7	71
20	2.247	0.02574	391.3	1.19	3.974	0.02037	405.7	1.07	3.860	0.02078	384.8	0.84	0.02230	1.03	31.1	64
30	2.232	0.01971	391.8	1.32	3.959	0.01438	406.3	1.22	3.847	0.01559	385.1	0.92	0.01656	1.15	30.9	66

ตารางที่ ฉ-16 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P20O15-2 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 252.12 mm				L2 = 249.41 mm				L3 = 248.58 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	5.688	0	390.0	0	2.984	0	377.8	0.00	2.146	0	387.9	0	0	0	30.0	66
1	5.828	0.05553	397.6	1.95	3.144	0.06415	387.5	2.57	2.281	0.05431	397.6	2.50	0.05800	2.34	28.3	77
2	5.820	0.05236	397.2	1.85	3.142	0.06335	387.3	2.51	2.262	0.04667	397.3	2.42	0.05412	2.26	28.5	76
3	5.815	0.05037	397.5	1.92	3.125	0.05653	387.4	2.54	2.252	0.04264	397.6	2.50	0.04985	2.32	30.4	59
4	5.820	0.05236	397.4	1.90	3.132	0.05934	387.4	2.54	2.262	0.04667	397.5	2.47	0.05279	2.30	28.4	75
5	5.808	0.04760	396.8	1.74	3.119	0.05413	387.5	2.57	2.258	0.04506	396.4	2.19	0.04893	2.17	30.0	67
6	5.802	0.04522	396.5	1.67	3.121	0.05493	387.5	2.57	2.257	0.04465	397.5	2.47	0.04827	2.24	29.8	68
7	5.807	0.04720	396.6	1.69	3.124	0.05613	387.6	2.59	2.248	0.04103	397.6	2.50	0.04812	2.26	30.1	68
8	5.805	0.04641	396.6	1.69	3.118	0.05373	387.5	2.57	2.244	0.03942	397.5	2.47	0.04652	2.24	30.8	69
9	5.804	0.04601	397.3	1.87	3.119	0.05413	387.9	2.67	2.247	0.04063	398.0	2.60	0.04692	2.38	30.6	69
10	5.798	0.04363	396.9	1.77	3.117	0.05332	387.7	2.62	2.242	0.03862	397.7	2.53	0.04519	2.31	29.8	64
11	5.797	0.04323	397.0	1.79	3.115	0.05252	387.8	2.65	2.243	0.03902	397.9	2.58	0.04493	2.34	30.1	68
12	5.797	0.04323	397.0	1.79	3.115	0.05252	387.9	2.67	2.249	0.04144	397.9	2.58	0.04573	2.35	30.4	68
13	5.796	0.04284	397.1	1.82	3.115	0.05252	388.0	2.70	2.247	0.04063	398.0	2.60	0.04533	2.37	30.1	68
14	5.794	0.04204	397.0	1.79	3.114	0.05212	387.7	2.62	2.245	0.03983	397.6	2.50	0.04466	2.31	30.2	68
15	5.786	0.03887	396.9	1.77	3.112	0.05132	387.1	2.46	2.242	0.03862	397.2	2.40	0.04294	2.21	29.8	71
20	5.782	0.03728	396.3	1.62	3.098	0.04571	387.1	2.46	2.228	0.03299	396.6	2.24	0.03866	2.11	30.1	69
30	5.763	0.02975	396.9	1.77	3.086	0.04090	387.8	2.65	2.228	0.03299	397.9	2.58	0.03454	2.33	30.9	67

ตารางที่ ฉ-17 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 247.67 mm				L2 = 250.21 mm				L3 = 249.29 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	1.235	0	371.0	0	3.775	0	376.4	0	2.858	0	388.3	0	0	0	29.8	69
1	1.300	0.02625	378.3	1.97	3.831	0.02238	384.3	2.10	2.927	0.02768	397.3	2.32	0.02544	2.13	28.7	65
2	1.312	0.03109	378.7	2.08	3.846	0.02838	384.7	2.21	2.931	0.02928	397.8	2.45	0.02958	2.24	28.6	73
3	1.298	0.02544	378.4	1.99	3.828	0.02118	384.6	2.18	2.926	0.02728	397.8	2.45	0.02463	2.21	29.8	69
4	1.292	0.02301	378.5	2.02	3.822	0.01878	384.6	2.18	2.922	0.02567	397.4	2.34	0.02249	2.18	29.8	68
5	1.302	0.02705	378.5	2.02	3.842	0.02678	384.6	2.18	2.923	0.02607	397.6	2.40	0.02663	2.20	30.0	69
6	1.307	0.02907	378.7	2.08	3.847	0.02878	384.7	2.21	2.922	0.02567	397.7	2.42	0.02784	2.23	30.7	69
7	1.302	0.02705	378.5	2.02	3.847	0.02878	384.6	2.18	2.921	0.02527	397.5	2.37	0.02703	2.19	30.8	69
8	1.300	0.02625	378.4	1.99	3.840	0.02598	384.6	2.18	2.918	0.02407	397.5	2.37	0.02543	2.18	29.8	64
9	1.300	0.02625	378.5	2.02	3.838	0.02518	384.6	2.18	2.918	0.02407	397.5	2.37	0.02516	2.19	29.9	69
10	1.302	0.02705	378.6	2.05	3.838	0.02518	384.6	2.18	2.919	0.02447	397.6	2.40	0.02557	2.21	30.5	68
11	1.300	0.02625	378.7	2.08	3.836	0.02438	384.7	2.21	2.918	0.02407	397.7	2.42	0.02490	2.23	30.2	68
12	1.300	0.02625	378.7	2.08	3.833	0.02318	384.7	2.21	2.918	0.02407	397.7	2.42	0.02450	2.23	30.2	67
13	1.298	0.02544	378.8	2.10	3.830	0.02198	384.8	2.23	2.917	0.02367	397.8	2.45	0.02370	2.26	30.6	67
14	1.296	0.02463	378.9	2.13	3.828	0.02118	384.8	2.23	2.916	0.02327	397.9	2.47	0.02303	2.28	29.9	72
15	1.303	0.02746	378.7	2.08	3.828	0.02118	384.6	2.18	2.917	0.02367	397.5	2.37	0.02410	2.21	29.4	71
20	1.298	0.02544	378.4	1.99	3.825	0.01998	384.1	2.05	2.912	0.02166	397.4	2.34	0.02236	2.13	29.6	74
30	1.296	0.02463	374	0.81	3.828	0.02118	379.0	0.69	2.912	0.02166	391.8	0.90	0.02249	0.80	30.3	69

ตารางที่ ฉ-18 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 250.81 mm				L2 = 252.20 mm				L3 = 249.28 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	4.376	0	395.5	0	5.769	0	389.3	0	2.852	0	375.2	0	0	0	30.1	68
1	4.445	0.02751	403.7	2.07	5.830	0.02419	398.2	2.29	2.929	0.03089	383.8	2.29	0.02753	2.22	31.5	58
2	4.468	0.03668	403.6	2.05	5.842	0.02895	397.9	2.21	2.935	0.03330	383.8	2.29	0.03297	2.18	28.9	71
3	4.447	0.02831	402.7	1.82	5.840	0.02815	397.3	2.05	2.930	0.03129	383.2	2.13	0.02925	2.00	30.0	69
4	4.446	0.02791	403.0	1.90	5.833	0.02538	397.6	2.13	2.925	0.02928	383.4	2.19	0.02752	2.07	29.6	69
5	4.437	0.02432	402.9	1.87	5.831	0.02458	397.7	2.16	2.920	0.02728	383.7	2.27	0.02539	2.10	30.5	67
6	4.439	0.02512	402.5	1.77	5.830	0.02419	397.3	2.05	2.918	0.02648	383.5	2.21	0.02526	2.01	30.2	67
7	4.439	0.02512	403.0	1.90	5.828	0.02339	398.0	2.23	2.920	0.02728	383.8	2.29	0.02526	2.14	29.0	72
8	4.432	0.02233	403.2	1.95	5.822	0.02102	398.0	2.23	2.915	0.02527	383.8	2.29	0.02287	2.16	30.2	65
9	4.430	0.02153	403.2	1.95	5.822	0.02102	398.0	2.23	2.917	0.02607	383.8	2.29	0.02287	2.16	30.0	68
10	4.430	0.02153	403.3	1.97	5.823	0.02141	398.0	2.23	2.916	0.02567	383.9	2.32	0.02287	2.18	30.1	68
11	4.429	0.02113	403.2	1.95	5.822	0.02102	398.1	2.26	2.915	0.02527	384.0	2.35	0.02247	2.18	29.9	67
12	4.429	0.02113	403.2	1.95	5.822	0.02102	398.0	2.23	2.914	0.02487	384.0	2.35	0.02234	2.18	30.4	67
13	4.427	0.02033	403.2	1.95	5.822	0.02102	398.1	2.26	2.912	0.02407	384.2	2.40	0.02181	2.20	30.8	68
14	4.428	0.02073	403.2	1.95	5.822	0.02102	398.1	2.26	2.912	0.02407	384.0	2.35	0.02194	2.18	30.2	68
15	4.430	0.02153	403.1	1.92	5.823	0.02141	398.0	2.23	2.913	0.02447	384.0	2.35	0.02247	2.17	29.7	70
20	4.419	0.01714	401.2	1.44	5.813	0.01745	396.3	1.80	2.907	0.02206	382.3	1.89	0.01888	1.71	30.0	72
30	4.41	0.01356	402.3	1.72	5.811	0.01665	397.3	2.05	2.893	0.01645	383.2	2.13	0.01555	1.97	30.4	68

ตารางที่ ฉ-19 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10-4 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อายุ (สัปดาห์)	L1 = 248.92 mm				L2 = 250.17 mm				L3 = 249.16 mm				เฉลี่ย		อุณหภูมิ °C	ค.ส. (%)
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (%)		
	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)	Lx (mm)	ขยายตัว (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (%)				
0	2.494	0	387.9	0	3.740	0	372.5	0	2.732	0	381.3	0	0	0	32.3	65
1	2.562	0.02732	396.6	2.24	3.822	0.03278	381.7	2.47	2.800	0.02729	391.0	2.54	0.02913	2.42	30.5	66
2	2.575	0.03254	396.3	2.17	3.826	0.03438	381.4	2.39	2.800	0.02729	391.2	2.60	0.03140	2.38	29.1	69
3	2.572	0.03133	397.3	2.42	3.822	0.03278	381.6	2.44	2.801	0.02769	390.8	2.49	0.03060	2.45	29.6	69
4	2.576	0.03294	395.9	2.06	3.823	0.03318	380.9	2.26	2.801	0.02769	390.5	2.41	0.03127	2.24	29.7	68
5	2.573	0.03174	395.3	1.91	3.822	0.03278	380.5	2.15	2.796	0.02569	389.8	2.23	0.03007	2.09	30.1	69
6	2.571	0.03093	394.8	1.78	3.815	0.02998	380.1	2.04	2.797	0.02609	389.5	2.15	0.02900	1.99	31.0	68
7	2.570	0.03053	394.7	1.75	3.816	0.03038	379.9	1.99	2.793	0.02448	389.3	2.10	0.02846	1.95	30.4	69
8	2.568	0.02973	394.5	1.70	3.815	0.02998	380.0	2.01	2.795	0.02528	389.2	2.07	0.02833	1.93	29.5	68
9	2.566	0.02892	394.5	1.70	3.815	0.02998	380.0	2.01	2.795	0.02528	389.2	2.07	0.02806	1.93	30.2	68
10	2.566	0.02892	394.5	1.70	3.813	0.02918	380.0	2.01	2.793	0.02448	389.2	2.07	0.02753	1.93	30.6	67
11	2.564	0.02812	394.4	1.68	3.813	0.02918	379.9	1.99	2.794	0.02488	389.1	2.05	0.02739	1.90	29.9	70
12	2.563	0.02772	394.4	1.68	3.811	0.02838	379.9	1.99	2.795	0.02528	389.1	2.05	0.02713	1.90	30.1	69
13	2.560	0.02651	394.4	1.68	3.811	0.02838	379.8	1.96	2.795	0.02528	389.1	2.05	0.02673	1.89	29.8	72
14	2.560	0.02651	394.4	1.68	3.811	0.02838	379.6	1.91	2.795	0.02528	389.1	2.05	0.02673	1.88	30.2	68
15	2.561	0.02692	394.1	1.60	3.811	0.02838	379.5	1.88	2.794	0.02488	388.9	1.99	0.02673	1.82	30.4	69
20	2.556	0.02491	394	1.57	3.799	0.02358	379.6	1.91	2.781	0.01967	388.5	1.89	0.02272	1.79	31.1	66
30	2.557	0.02531	391	0.80	3.796	0.02238	376.6	1.10	2.779	0.01886	396.6	4.01	0.02219	1.97	29.4	68

ภาคผนวก ช

กำลังยึดหน่วยระหว่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์กับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์

ตารางที่ ข-1 กำลังยึดหยุ่นระหว่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ Control กับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์ ปรมิอนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ส่วนผสม	ตัวอย่าง	ซีเมนต์มอร์ตาร์					ซีเมนต์มอร์ตาร์ + จีโอพอลิเมอร์					แรง (kg)	กำลังยึดหยุ่น (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังยึดหยุ่น (MPa)
		กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	เฉียง (mm)	น้ำหนัก (g)	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	น้ำหนัก (g)				
Control-1	1	51.05	48.08	50.65	69.84	136.9	50.80	50.30	52.42	274.5	1892.79	2.73	2.64	
	2	51.11	49.54	50.94	71.06	139.1	50.89	50.86	51.80	275.1	1848.82	2.62		
	3	51.17	48.84	50.33	70.13	143.1	51.10	50.48	53.01	278.9	1780.50	2.55		
Control-2	1	51.03	49.43	50.21	70.46	138.3	50.95	50.44	52.95	274.2	1744.80	2.50	2.87	
	2	50.96	50.07	51.24	71.64	141.6	51.04	51.03	52.62	277.6	2323.01	3.28		
	3	50.96	49.29	50.35	70.46	144.1	50.91	50.98	52.59	277.0	1983.62	2.84		
Control-4	1	51.02	48.46	49.35	69.16	136.7	50.88	50.36	51.92	270.9	3156.08	4.60	4.48	
	2	51.10	48.51	49.96	69.64	139.4	51.00	50.44	52.36	274.0	3051.81	4.42		
	3	51.03	48.55	50.21	69.84	142.0	50.99	50.28	52.73	276.1	3055.20	4.41		

ตารางที่ ข-2 กำลังยึดหยุ่นระหว่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ P10 กับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์ ปรมีรอนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ส่วนผสม	ตัวอย่าง	ซีเมนต์มอร์ตาร์					ซีเมนต์มอร์ตาร์ + จีโอพอลิเมอร์					กำลังยึดหยุ่น (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังยึดหยุ่น (MPa)
		กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	เฉียง (mm)	น้ำหนัก (g)	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	น้ำหนัก (g)	แรง (kg)		
P10-1	1	50.80	50.06	50.33	70.99	141.1	50.69	50.34	51.89	271.9	7664.51	10.94	9.59
	2	50.81	50.43	51.83	72.32	149.2	50.73	51.00	52.18	279.3	6710.02	9.40	
	3	51.06	49.16	51.69	71.33	140.0	50.88	49.99	52.15	275.1	5961.51	8.43	
P10-2	1	50.99	49.31	50.58	70.64	139.1	50.94	50.80	51.82	274.5	6578.47	9.40	10.22
	2	50.93	50.16	50.66	71.29	138.0	50.90	50.69	52.42	276.2	7322.89	10.38	
	3	50.85	50.20	52.24	72.45	146.5	50.81	50.85	52.18	277.9	7774.65	10.86	
P10-4	1	50.91	49.12	50.37	70.36	139.3	50.91	50.23	52.16	272.5	7920.47	11.38	11.68
	2	50.93	49.07	51.63	71.23	141.6	50.82	50.44	52.56	274.1	7772.61	11.03	
	3	51.00	49.45	51.87	71.66	143.9	50.84	50.32	52.99	273.9	8970.82	12.64	

ตารางที่ ข-3 กำลังยึดหยุ่นระหว่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ O10 กับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์ บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ส่วนผสม	ตัวอย่าง	ซีเมนต์มอร์ตาร์					ซีเมนต์มอร์ตาร์ + จีโอพอลิเมอร์					กำลังยึดหยุ่น (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังยึดหยุ่น (MPa)
		กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	เฉียง (mm)	น้ำหนัก (g)	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	น้ำหนัก (g)	แรง (kg)		
O10-1	1	50.80	49.22	50.81	70.74	139.1	50.61	49.93	52.40	272.0	7713.46	11.05	11.24
	2	50.88	48.84	51.31	70.84	145.1	50.66	50.71	52.19	278.1	7521.28	10.74	
	3	51.04	49.54	51.31	71.32	143.5	50.81	50.54	52.00	274.8	8434.34	11.93	
O10-2	1	50.96	50.15	51.46	71.86	139.5	50.85	50.86	51.95	273.6	7345.84	10.33	11.14
	2	50.93	50.83	51.95	72.68	142.2	50.84	50.80	51.62	272.6	8091.79	11.25	
	3	50.82	48.89	52.97	72.08	143.9	50.70	50.45	52.45	274.5	7927.34	11.14	
O10-4	1	50.88	49.75	51.23	71.41	136.1	50.77	50.44	51.87	270.7	8483.38	12.02	11.80
	2	50.83	49.00	51.86	71.35	138.5	50.71	50.47	52.22	273.9	8527.23	12.10	
	3	50.92	48.94	51.66	71.16	136.7	50.87	50.38	52.33	274.0	7931.69	11.27	

ภาคผนวก ฉ

วารสารระดับนานาชาติในฐานข้อมูล ISI (Minor Revision)

Materials Science

Performance Evaluation of Metakaolin Based Geopolymer Containing Parawood Ash
and Oil Palm Ash Blends

Performance Evaluation of Metakaolin Based Geopolymer Containing Parawood Ash and Oil Palm Ash Blends

Abideng HAWA^{1,*}, Danupon TONNAYOPAS², Woraphot PRACHASAREE¹

¹ Department of Civil Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand 90112

² Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand 90112

Received dd mm yyyy; accepted dd mm yyyy

Experimental tests were used to identify the optimum mix of metakaolin (MK) geopolymer mortars needed to achieve high early compressive strength. These tests investigated compressive strength, drying shrinkage, and sodium sulfate expansion of binary and ternary MK-based geopolymer mortar samples containing Parawood ash (PWA) and oil palm ash (OPA) in different replacement levels. The following amounts of PWA and OPA were used: 10%, 20%, 30% and 5%, 10%, 15% by weight of MK, respectively. Sodium hydroxide, sodium silicate and a curing temperature of 80°C for 2 h were used as parameters to activate the geopolymerization of mortars. Thirteen geopolymer mortar formulations containing PWA and OPA were prepared, and the compressive strengths at 2 h, 6 h, 24 h, 7 days and 28 days were determined. The highest compressive strength of 62 MPa, after 2 h at 80°C and 2 h at ambient temperature, was obtained with 5% OPA.

Keywords: Compressive strength, Geopolymer, Parawood Ash, Oil palm ash.

1. INTRODUCTION

The term “geopolymer” appears in the fields of materials science and materials engineering. The geopolymer process is a chemical reaction between aluminosilicate materials and alkaline solutions under elevated curing temperatures. Geopolymers are binders that exhibit good physical and chemical properties, and have a wide range of potential applications. Geopolymers were developed for use as construction materials [1]. Currently though, mainly cements are still used for construction [2-5] even in such specific applications as shielding barriers [6].

Products from geopolymers have certain advantages, including high early strength, high strength, low shrinkage, and resistance to chemical agents [7]. The important raw materials of geopolymers include fly ash, blast furnace slag, and metakaolin (MK) or calcined kaolin clay containing SiO₂ and Al₂O₃, which are the main chemical constituents. Recently, geopolymers have replaced conventional raw materials such as rice husk and bark ashes [8, 9].

Oil palm ash (OPA) is a by-product of the use of palm kernels, palm fibers, palm shells, and empty fruit bunches, when used as biomass fuel to replace petroleum in electricity generation. OPA has been reported to have main chemical component SiO₂. However, there have been few studies on the use of OPA to develop geopolymer binder in combination with MK and fly ash. Yusuf et al. [10] studied the binary replacement of MK with ultrafine palm oil fuel ash in geopolymer concrete with ground blast furnace slag to achieve the compressive strength of 69 MPa.

Parawood ash (PWA) is a by-product of burning Parawood lumber or waste, for example from furniture industry. Parawood is often used as raw material by biomass power plants. Currently, PWA is disposed of in landfills, which has the potential to cause environmental

problems for the industry and health risks for the public. It seems that there is no prior publication about the use of PWA as a material in geopolymer.

Drying shrinkage and sulfate attack are the most important problems concerning the durability of concrete structures. Under sulphate attack and high temperature conditions, binder paste undergoes deterioration resulting from expansion and shrinkage, cracking. Some researchers [11, 12] report that fly ash based geopolymers have low drying shrinkage characteristics. Chindaprasirt et al. [13] showed that high-calcium fly ash based geopolymer mortars present excellent volume stability with very little shrinkage when exposed to a 50% RH environment.

Research by Sata et al. [14] shows that sodium sulfate expansion of fly ash geopolymer is lower than that of ordinary cement. The fly ash geopolymer mortars gave excellent resistance to sodium sulfate attack.

In the present study, geopolymers were prepared, with PWA and OPA ratios of 0-30% and 0-15%, respectively. They were prepared as hot mixtures, using sodium silicate and sodium hydroxide as activators, and heat-cured in an oven at 80°C for 2 h. The study aimed to analyze the effects on compressive strength, drying shrinkage, and sulphate expansion, and on characteristics observed with SEM and XRD techniques.

2. EXPERIMENTAL PROGRAMS

2.1. Materials

The MK was derived from kaolin by calcination at 750°C for 2 h. The raw kaolin came from a kaolin mine in Narathiwat province of southern Thailand. The diffractograms of the natural kaolin and calcined sample are compared in Fig. 1. The crystalline phases of MK consisted of quartz, illite, and microcline. The crystal in

* Corresponding author. Tel.: +6672855328,
E-mail address: abideng.hawa@gmail.com (A. Hawa)

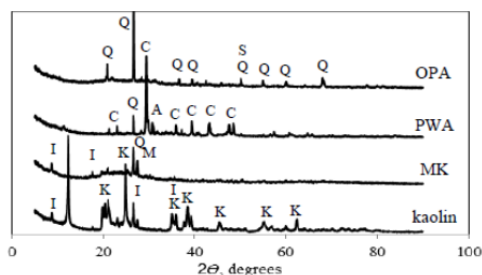


Fig. 1. XRD patterns of natural kaolin, MK, PWA and OPA. The peaks are indicated with Q - quartz, M - microcline, K - kaolinite, I - illite, A - arcanite, C - calcite, and S - sylvite

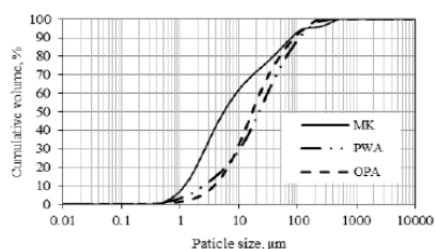


Fig. 2. Particle size distributions of raw materials

Table 1 Chemical compositions (wt.%) of materials used

Oxides	MK	PWA	OPA
SiO ₂	50.30	2.57	38.37
Al ₂ O ₃	41.02	0.53	1.48
Fe ₂ O ₃	1.05	0.56	3.01
CaO	0.33	41.19	13.84
TiO ₂	1.50	-	0.21
MgO	-	4.52	3.00
K ₂ O	4.08	16.11	14.09
Other	-	10.78	5.57

Fig. 1 show kaolinite and illite in untreated kaolin; and absence of kaolinite but presence of illite, microcline, and quartz in MK. According to Zibouche [15] and Wang, [16] quartz stabilizes the geopolymerization reaction. In PWA the crystalline phases detected are calcite, quartz, and arcanite, while OPA contains quartz and sylvite. PWA from the combustion of Parawood was collected from a biomass thermal power plant. OPA was collected from a palm oil mill in the Krabi province of southern Thailand. Both PWA and OPA were ground in a ball mill for approximately 4 h. The particle size distributions, determined by laser diffraction technique in hydro 2000MU type device, are shown in Fig. 2. The major chemical compositions analyzed by X-ray fluorescence (XRF) of the cementitious materials are given in Table 1.

An alkaline solution was formed by mixing into water sodium hydroxide in flake form (NaOH with 98% purity) and sodium silicate. The sodium silicate solution had a composition by weight of 14.14% Na₂O, 27.67% SiO₂ and 56.28% H₂O. The composition was analyzed using inductively coupled plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES) for Na₂O and SiO₂, and by drying at 103-105 °C for H₂O.

In this study, river sand was used as the fine aggregate of the geopolymer mortars. The specific gravity and maximum granule size of the river sand were 2.51 and 4.75 mm, respectively.

2.2. Mixture proportions

Geopolymer mortar samples were mixed from the raw materials and river sand as inert filler. Then, sodium hydroxide was mixed into sodium silicate and added to water, and the mixture temperature became 74±2°C from reaction heat. When the powder raw materials and river sand were added, the mixture temperature became 48±2°C. The texture of the samples was quite sticky and fast-setting, and to cast them in an acrylic mold required effort.

The factors in the experimental design led to 13 different formulations (Table 2). This is a full factorial for PWA (0, 10, 20 or 30% by wt. of MK) and OPA (0, 5, 10, or 15% by wt. of MK), plus the case with 30% PWA. The mass ratio of sand/raw materials (metakaolin, PWA and OPA)/activator/water was 3/1/0.83/0.45. The activator used was a mixture of sodium silicate to sodium hydroxide in a weight ratio of 2.5:1.

Table 2 Mixture proportions of geopolymer mortars (%)

Code of Mixture	MK	PWA	OPA
Control	100	0	0
P10	90	10	0
P20	80	20	0
P30	70	30	0
O5	95	0	5
O10	90	0	10
O15	85	0	15
P10O5	85	10	5
P10O10	80	10	10
P10O15	75	10	15
P20O5	75	20	5
P20O10	70	20	10
P20O15	65	20	15

2.3. Test procedure

After geopolymer casting, the molds were wrapped with a polyvinyl sheet to prevent moisture loss, cured in an oven at 80°C for 2 h, and aged with the wrapping removed at 30±2°C ambient temperature with 70±5% relative humidity. The compressive strength was tested at 2 h, 6 h, 24 h, 7 days and 28 days of aging, in accordance with ASTM C109/C109M-97. The geopolymer mortar specimens were cubes of size 50×50×50 mm.

The drying shrinkage test was performed using a length comparator in accordance with ASTM C490-96. The geopolymer mortars were prepared using 2 h curing at 80°C. After demolding, they were measured for initial size. Shrinkage was measured during a period of 1 to 30 weeks.

Sulfate expansion of the geopolymer mortars was determined according to ASTM C1012-96 using 5% sodium. Both drying shrinkage and sulfate expansion tests were done with prismatic specimens of 25×25×285 mm, that were kept at ambient temperature of 30±2°C with 70±5% relative humidity throughout this study. Sulfate

expansion tests were conducted during a period of 1 to 30 weeks.

The chemical compositions of MK, PWA, and OPA were determined by X-ray fluorescence with a spectrometer (PW2400, PHILIPS) for the oxides.

A JMS-5800 LV model scanning electron microscope (JEOL, Japan) was used to identify the microstructure of the geopolymer mortars. Small scraps of the samples were tested using scanning electron microscopy.

Powder XRD analyses were conducted using an X'Pert MPD X-ray diffractometer (PHILIPS) at angles from 5° to 90° (2θ) using the clay and rock 0.4 program. The kaolin, MK, PWA, OPA, and geopolymer paste were characterized directly. XRD was conducted to identify the dominant crystalline phases and to detect the positions of the peaks.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Compressive strength

The effects of PWA-OPA content on the compressive strength of metakaolin based-geopolymer mortar are shown in Fig. 3. The early compressive strengths at 2 h are in general good, partly because the geopolymer mortar was prepared as a hot mixture before oven curing it. The compressive strengths of mortars containing PWA are graphed in Fig. 3a. The inclusion of PWA decreased the compressive strength relative to control. This is due to the reduction of Si and Al when MK is replaced by PWA, affecting the main geopolymerization reaction. Winnefeld [17] found that high calcium caused low strength, in part by its poor reactivity with alkaline activators, and fly ash based geopolymers have elevated calcium content. Test results confirmed that adding CaO into raw materials decreased compressive strength. These results are similar to those of Temuujin et al. [18], who reported a curing temperature of 70°C . However, PWA has larger particle size than MK. This can reduce the compressive strength due to poor accessibility for reaction. Compressive strength values of geopolymer mortars containing OPA are in Fig. 3b. The initial compressive strength at 2 h is lowered by OPA content of geopolymer mortars. The later strength development of 5% OPA mixtures is better than the control, and this content appears near optimal. The compressive strengths kept improving over 28 days.

The compressive strength differences between 10% contents of PWA and OPA may be due to different amorphous phase contents (see Fig. 1.). Also the average particles sizes differ (see Fig. 2.), and finer particles with greater surface area tend to be more reactive [19]. Finer particles may also fill cavities between large particles, increasing packing density and leading to stronger samples.

The compressive strengths of ternary PWA-OPA geopolymer mortars are shown in Figs. 3c and 3d. The specimens P10 and P10O5 were duplicated, confirming that 5% OPA improved the strength, 10% PWA degraded it, and the combination in P10O5 was an improvement over control. However, replacement of raw materials with PWA containing a high amount of CaO may give unstable geopolymer binders [20].

3.2. Drying shrinkage

The drying shrinkages are presented in Fig. 4. Comparison with the control shows that PWA decreased drying shrinkage. The shrinkage was rapid during the first three weeks, then a lower rate of shrinkage was observed until 30 weeks. Especially the geopolymer mortar with 30% PWA had very low drying shrinkage. Similar trends in drying shrinkage were reported by Chareera [21]. Geopolymers with fine-sized calcined kaolin particles have high shrinkage [22]. This is due to fine particles having a larger geopolymerization reaction surface area, and if they are packed inadequately in the slurry they will produce high shrinkage.

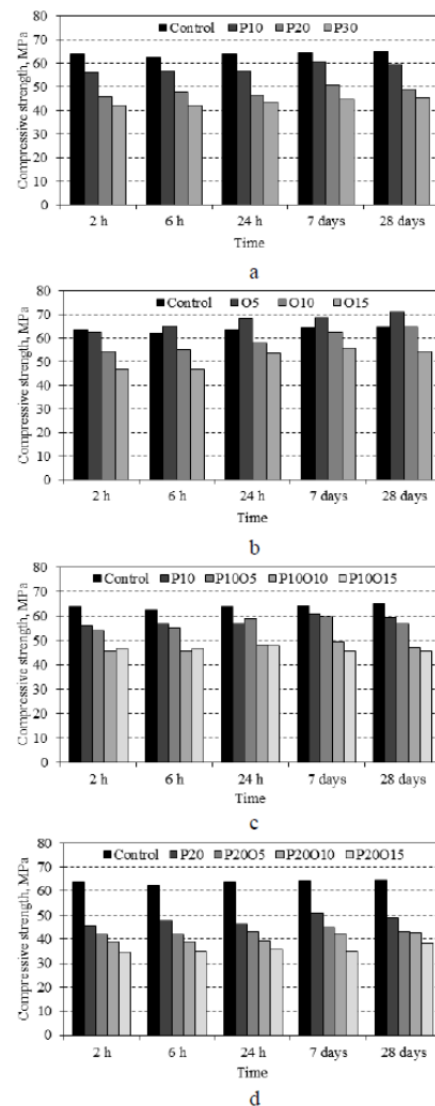


Fig. 3. Compressive strengths of geopolymer mortars: a – PWA; b – OPA; c – 10%WPA/OPA; d – 20%WPA/OPA

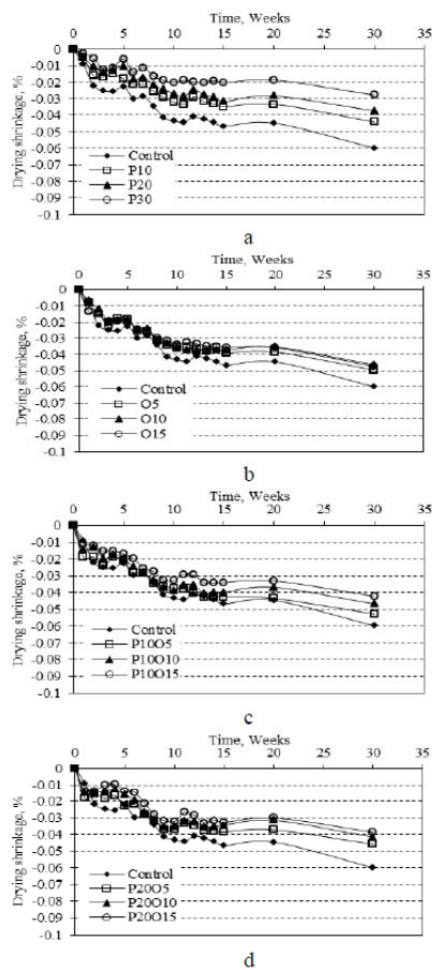


Fig. 4. Drying shrinkages of geopolymer mortars: a – PWA; b – OPA; c – 10%WPA/OPA; d – 20%WPA/OPA

The drying shrinkages of geopolymer mortars containing OPA are shown in Fig. 4b. OPA tends to decrease drying shrinkage. Shrinkage was again rapid for the first 3 weeks, and the rate then decreased gradually. The drying shrinkages of ternary PWA-OPA geopolymer mortars are shown in Figs. 4c and d. Again, substitution of MK by PWA-OPA lowered the shrinkage relative to control, especially at long times where the results are clear and stable. At early times, the shrinkages of some blends appear higher than of control. Portland cement mortars had drying shrinkages 0.0484%, 0.0765%, 0.0993% and 0.1004% measured at 7 days, 28 days, 2 months and 3 months, respectively [23]. In comparison our geopolymers shrunk less.

3.3. Sulfate expansion

The expansions caused by sodium sulfate solutions are shown in Fig. 5. The early expansion in the first week of submersion, in sodium sulfate solutions, was rapid. After a maximum peak, the expansion decreased for the rest of the

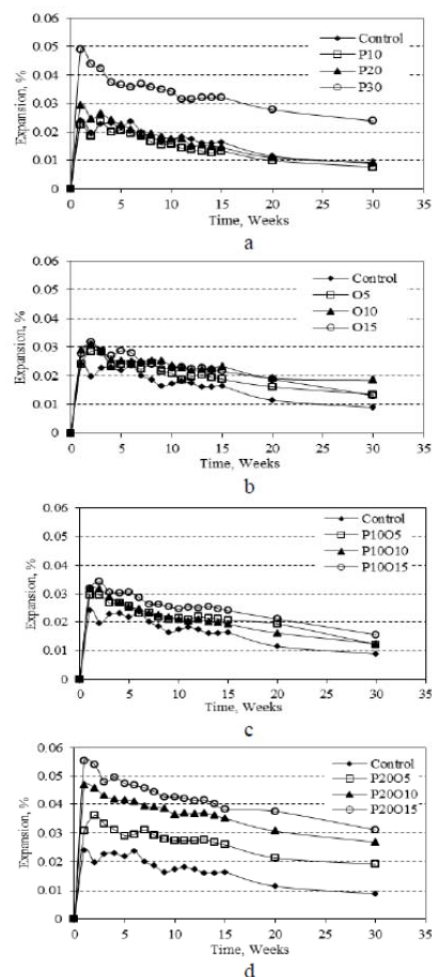


Fig. 5. Sodium sulfate expansion of geopolymer mortars: a – PWA; b – OPA; c – 10%PWA/OPA; d – 20%PWA/OPA

30 weeks. Expansion of mortars containing only PWA is shown in Fig. 5a. These mortars had a high resistance to the sodium sulfate attack. After submersion in the solution for 4 and 30 weeks, the expansions varied in the ranges from 0.020 to 0.037% and 0.007 to 0.023%, respectively. The expansion of mortars containing 10 and 20% PWA, submerged in sodium sulfate solutions, was similar to control immersed in Na_2SO_4 , see Figure 5a. However, mortar containing 30% PWA had the highest expansion, possibly due to the average particles size (d_{50} 6.308 μm for MK against 25.128 μm for PWA), as larger particle size tends to increase sulfate expansion [24].

The expansion of geopolymer mortars containing the OPA submerged in sodium sulfate solutions is shown in Fig. 5b. The expansion ranges of the geopolymer mortars were 0.023 to 0.027% and 0.009 to 0.018%, for aged 4 and 30 weeks, respectively. Later expansions of these mortars containing OPA were much higher than control. Expansion time profiles of ternary PWA-OPA geopolymer mortars

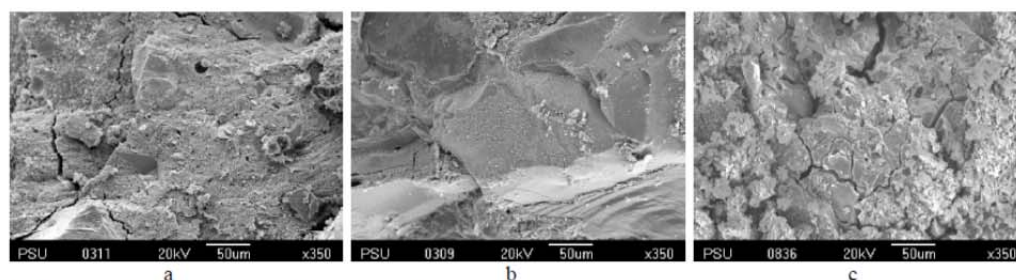


Fig. 6. Microstructure of the surface of hardened geopolymer mortar: a – Control; b – O5; c – P20

are shown in Figs. 5c and 5d. The expansions were in the range from 0.023 to 0.049% at 4 weeks of immersion, and from 0.009 to 0.031% at 30 weeks. Notably, the ternary geopolymer mortars containing PWA-OPA expanded more than the control mortars.

It was observed that high strength geopolymer samples expanded less than lower strength samples, when submerged in Na_2SO_4 .

Chareerat [21] reported that the particle size of the raw materials was essential to the expansion of the submerged geopolymer in sulfate solution. The raw materials with a small particle size expanded less than with large particles. For ordinary portland cement the addition of nano-silica to the concrete mixture substantially improves sulfate resistance [25]. Moreover, high CaO content of raw materials also caused large porosity [26]. So, increasing the particle size and CaO content produced greater porosity, in agreement with the images in Fig. 6. The increased porosity allows penetration of the sulfate solutions into the mortar, and this may contribute to the expansion. This matches our observation that the samples P30, P20O10 and P20O15, with 30% or higher partial replacement of MK, had the highest expansions. However, hardened geopolymer became a strong structure that could not be cracked [22].

In general, the hydration products were provided by ordinary Portland cement. These products were highly sensitive to sulfate attack compared with the geopolymerization products. The main geopolymerization product is from sodium hydroxide, sodium silicate and other raw materials (Si and Al are essential chemical components). Geopolymers submerged in sodium and magnesium sulfate solutions have a comparatively stable cross-linked aluminosilicate polymer structure [27].

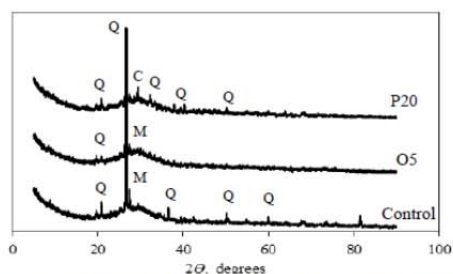


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of geopolymer: Q – the peaks of quartz; M – the peaks of microcline; C – the peaks of calcite

3.4. Microstructure

SEM results shown in Fig. 6 represent typical microstructures of geopolymerization products obtained in this study. Some unreacted raw materials were covered with flakes in the Control and P20 samples (see Figs. 6a and c) and the samples appeared nonhomogeneous. In comparison the O5 sample had less unreacted raw materials (see Fig. 6b), and appeared more homogeneous. Also the geopolymer mortar microstructure appeared finer in O5. This may be related to the high compressive strengths of the O5 samples shown in Fig. 3.

3.5. X-ray diffraction

The XRD patterns of Control, O5 and P20 samples are shown in Fig. 7, at 28 days of aging. The geopolymers were aluminosilicates with crystallised compounds, such as quartz (SiO_2), microcline (KAlSi_3O_8), and calcite (CaCO_3). The Control showed broad peaks from quartz at 21° , 26° , 36° , 42° and 50° 2θ , and from microcline at 27° 2θ . The CaO from PWA in P20 samples had calcite mineral causing a broad peak at 29° 2θ , and these samples had low strength. Geopolymer containing OPA (O5) had XRD pattern indicating amorphous structure. In all three geopolymers, amorphous materials are an important fraction, with an evident broad peak in the $25\text{--}35^\circ$ 2θ range. The amorphous fraction in metakaolin remains in the geopolymers after the polymerization reactions.

4. CONCLUSIONS

The influence of PWA and OPA contents on binary and ternary MK-based geopolymer mortars was experimentally investigated.

The compressive strength improved by adding 5% OPA relative to MK by weight. Both PWA and OPA significantly reduced drying shrinkage.

The CaO content was in general harmful to the geopolymers, and with 30% PWA the expansion in sodium sulfate solutions was excessive.

Only minor effects on compressive strength were observed with long aging times, and these raw materials appear suitable for applications requiring the high strength, low shrinkage, and superior durability properties of rapid-set geopolymer mortars demonstrated.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge financial support from the Office of the Higher Education Commission, and thesis research funding from Prince of Songkla University (PSU), Thailand. Dr. Seppo Karrila, from the Faculty of Science and Technology, is also acknowledged for comments and suggestions, as is the copy-editing service of the Research and Development Office of PSU.

REFERENCES

- Davidovits J. Geopolymers: Man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement. *Journal of Materials Education*, 1994, 16(2-3), pp. 91-139.
- Mindess S. Concrete materials. *Journal of Materials Education*, 1982, 5, pp. 983-1046.
- Regoud M. New progress in inorganic building materials. *Journal of Materials Education*, 1986, 9, pp. 201-227.
- Roy D.-M., Scheetz B.-E., Silsbee M.-R. Processing of optimized cements and concretes via particle packing. *Journal of Materials Education*, 1993, 15, pp. 1-16.
- McPhee D.-E., Glasser F.P. Immobilization science of cement systems. *Journal of Materials Education*, 1993, 15, pp. 33.
- Gencel O., Brostow W., Ozel C., Filiz M. Concretes containing hematite for use as shielding barriers. *Materials Science (Medziagotyra)*, 2010, 16(3), pp. 249-256.
- Yunsheng Z., Wei S., Zongjin L. Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. *Applied Clay Science*, 2010, 47(3-4), pp. 271-275.
- Wongpa J., Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., Chindapasirt P. Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete. *Materials and design*, 2010, 31(10), pp. 4748-4754.
- Nazari A., Bagheri A., Riahi S. Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(24), pp. 7395-7401.
- Yusuf M.-O., Johari M.-A.-M., Ahmad Z.-A., Maslehuddin M. Evolution of alkaline activated ground blast furnace slag-ultrafine palm oil fuel ash based concrete. *Materials and Design*, 2014, 55, pp. 387-393.
- Hardjito D., Wallah S.-E., Sumajouw D.-M.-J., Rangan B.-V. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, 2004, 101(6), pp. 467-472.
- Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Lopez-Hombrados, C. Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, 2006, 103(2), pp. 106-112.
- Chindapasirt P., Chareerat T., Hatanaka S., Cao T. High-Strength geopolymer using fine high-calcium fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23(3), pp. 264-270.
- Sata V., Sathonsaowaphak A., Chindapasirt P. Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Composite*, 2012, 34(5), pp. 700-708.
- Zibouche F., Kerdjoudj H., Lacaillerie J.-B.-E., Van Dam H. Geopolymers from Algerian metakaolin. Influence of secondary minerals. *Applied Clay Science*, 2009, 43(3-4), pp. 453-458.
- Wang M.-R., Jia D.-C., He P.-G., Zhou Y. Influence of calcination temperature of kaolin on the structure and properties of final geopolymer. *Materials Letters*, 2010, 64(22), pp. 2551-2554.
- Winnefeld F., Leemann A., Lucuk M., Svoboda P., Neuroth M. Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(6), pp. 1086-1093.
- Temuujin J., Riessen A.-V., Williams R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1-3), pp. 82-88.
- van Jaarsveld J.-G.-S., van Deventer J.-S.-J., Lukey G.-C. The characterization of source materials in fly ash-based geopolymers. *Materials Letters*, 2003, 57(7), pp. 1272-80.
- Alvarez-Ayuso E., Querol X., Plan F., Alastuey A., Moreno N., Izquierdo M., Font O., Moreno T., Diez S., Vazquez E., Barra M. Environmental, physical and structural characterization of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes. *Journal of Hazard Mater.*, 2008, 154(1-3), pp. 175-183.
- Chareerat T. A study of compressive strength and durability of Mae Moh fly ash geopolymer. A thesis of degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Khon Kaen University, 2008.
- Zuhua Z., Xiao Y., Huajun Z., Yue C. Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*, 2009, 43(2), pp. 218-223.
- Atis C.-D., Billim C., Celik O., Karahan O. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(1), pp. 548-555.
- Sathonsaowaphak A. The comparative study of sulfate and acid attack of high volume pozzolan Portland cement and bottom ash geopolymer mortars. A thesis of degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Khon Kaen University, 2010.
- Otterstedt J., Greenwood P. Some important fairly new uses of colloidal silica/ silica sol. In: Bergna HE, Roberts WO, editors. *Colloidal silica fundamentals and applications*. Taylor and Francis Group, 2006, pp. 737-756.
- Patil K.-K., Allouche E. Effect of alkali silica reaction (ASR) in geopolymer concrete. World Coal Ash (WOCA) Conference. May 9-12, 2011, Denver, CO, USA.
- Bakharev T. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6), pp. 1233-1246.

วารสารระดับชาติ

1. **อาปีเต็ง ฮาวา**, ดนุพล ตันนโยภาส, วรพจน์ ประชาเสรี และพิชัย ธาณีรณานนท์ (2556) สมบัติวัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาเพื่องานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ฉบับที่ 5 เล่ม 2 หน้า 37-47 [TCI]

งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. D. Tonnyopas, **A. Hawa**, W. Prachasaree, and P. Taneerananon (2013). Effect of Parawood Ash on Drying Shrinkage, Compressive Strength and Microstructural Characterization of Metakaolin-based Geopolymer Mortar. 2nd International Conference on Advanced Materials Engineering and Technology (ICAMET 2013), 28-29 November 2013, Bandung, Indonesia.
2. **A. Hawa** and D. Tonnyopas (2013). Lightweight Aggregate Concrete Blended with Rice Husk Ash and Para Rubber Wood Fly Ash. The 11th International Conference on Mining, Materials and Petroleum Engineering. November 11-13, 2013, Chiang Mai, Thailand.

งานประชุมวิชาการระดับชาติ

1. **อาปีเต็ง ฮาวา** และดนุพล ตันนโยภาส (2551) ผลกระทบของเถ้าไม้ยางพาราที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตมวลรวมพืชมัช การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6 8-9 พฤษภาคม 2551 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. **อาปีเต็ง ฮาวา** และดนุพล ตันนโยภาส (2551) อิทธิพลของเถ้าแกลบที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตมวลรวมพืชมัช การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13 14-16 พฤษภาคม 2551 ณ โรงแรม จอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา