



กำลังอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้านหินและซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ

เกียรตินิสา สมณา* ประมวล พันชนะ และ รัฐพล สมณา

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 6603 0553 อีเมล: kiatsuda.so@rmu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.12.010

รับเมื่อ 1 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 19 พฤษภาคม 2563 ตอรับเมื่อ 21 พฤษภาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 15 ธันวาคม 2563

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษา กำลังอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่ได้จากเถ้านหินและซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ซึ่งเถ้าแกลบถูกนำมาสกัดซิลิกาโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และแปรเปลี่ยนค่าอุณหภูมิการเผาแกลบในช่วง 100-800 องศาเซลเซียส นำเถ้าแกลบผสมเถ้านหินในอัตราส่วน 10 : 90 โดยน้ำหนัก และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 14 โมลาร์ ผสมจีโอพอลิเมอร์แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ ลักษณะที่ 1 นำซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบผสมกับเถ้านหิน แล้วผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และลักษณะที่ 2 นำซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วผสมกับเถ้านหิน ทดสอบกำลังอัดของวัสดุ ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค SEM และ XRD การศึกษาพบว่า จีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าแกลบที่เผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด วิถีผสมลักษณะที่ 1 ให้กำลังอัดที่สูงกว่าวิถีผสมลักษณะที่ 2 เนื่องจากมีค่าความเป็นด่างที่ต่างกันของซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นเพื่อทำปฏิกิริยา จีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเกิดสารประกอบใหม่ที่เกิดการจากทำปฏิกิริยาของเถ้านหินและซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ

คำสำคัญ: การสกัดซิลิกา เถ้าแกลบ จีโอพอลิเมอร์



Compressive Strength and Microstructure of Geopolymer Using Fly Ash and Extracted Silica from Rice Husk Ash

Kiatsuda Somna*, Pramoul Punchana and Rattapon Somna

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 6603 0553, E-mail: kiatsuda.so@rmuti.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.12.010

Received 1 April 2020; Revised 19 May 2020; Accepted 21 May 2020; Published online: 15 December 2020

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aimed to study compressive strength and microstructure of geopolymer using fly ash and extracted silica from rice husk ash. Silica was extracted from Rice Husk ash (RH) by hydrochloric acid treatment and burnt in a furnace with temperature between 100–800°C. RH was mixed with Fly Ash (FA) at a ratio of 10 : 90 by weight of binder and 14 M NaOH was used in mixing geopolymer pastes. There were 2 types of mixing geopolymer pastes. First, extracted silica from RH was mixed with FA, then, 14 M NaOH was added (GEO-SEP). Second, extracted silica from RH was mixed with 14 M NaOH then, FA was added (GEO-MIX). The compressive strength of geopolymer pastes were investigated. Microstructures were characterized by SEM and XRD. The results showed that geopolymer pastes made from extracted silica after RH was burnt at 200°C provided the highest compressive strength. GEO-SEP method had higher compressive strength than those of GEO-MIX. It was due to GEO-SEP method having a higher alkali concentration to leach silica and alumina from FA to be starting materials for geopolymerization reaction than GEO-MIX method. The microstructure showed new compounds of geopolymer which was a result of the reaction between FA and extracted silica from RH.

Keywords: Extracted Silica, Rice Husk Ash, Geopolymer

Please cite this article as: K. Somna, P. Punchana, and R. Somna, "Compressive strength and microstructure of geopolymer using fly ash and extracted silica from rice husk ash," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, pp. 25–35, Jan.–Mar. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกต ที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบอสัณฐาน (Amorphous) มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก เช่น แก้วฉนวน ดินขาวเผา และสารละลายต่างเข้มข้น โดยสารละลายต่างเข้มข้นซิลิกาและอะลูมินาเพื่อให้เกิดเป็นโมเลกุลลูกโซ่ที่มีความสามารถในการรับกำลังอัดได้ [1] โครงสร้างโดยทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง Si : Al โดยมีโครงสร้างหลัก 3 ชนิด ได้แก่ 1) Si-O-Al พอลิไซอะเลท 2) Si-O-Si-O-Al พอลิไซอะเลทไฮล๊อกโซ และ 3) Si-O-Si-O-Si-O-Al พอลิไซอะเลทไฮล๊อกโซ ที่ให้ค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกัน โดยพบว่า การเพิ่มขึ้นของซิลิกาจะช่วยทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น [2], [3] โดยทั่วไปแล้วหากใช้วัสดุตั้งต้นเฉพาะแก้วฉนวนหรือดินขาวเผาเพียงอย่างเดียวจะให้ค่าอัตราส่วน Si/Al ประมาณ 1-1.5 หากต้องการเพิ่มอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาแล้วต้องใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต ซิลิกาฟุ่ม แต่สารดังกล่าวเป็นสารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้น ทำให้การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์มีค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น การนำแก้วกลับมาใช้เป็นตัวแทนของซิลิกาจากธรรมชาติ มาปรับปรุงคุณภาพเพื่อเป็นตัวช่วยในการเพิ่มอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาให้กับจีโอพอลิเมอร์แทนการใช้สารเคมีสังเคราะห์ จึงมีความน่าสนใจในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

แก้วกลับมาได้มาจากการเผาแก้วที่เหลือจากการสีข้าวเพื่อให้เกิดเป็นพลังงานและนำพลังงานที่ได้ไปผลิตกระแสไฟฟ้า มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ซิลิกาอยู่มากกว่าร้อยละ 90 และมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและเป็นอสัณฐาน ลักษณะรูปร่างจะเป็นรูพรุน แก้วกลับมีความไวในการทำปฏิกิริยาได้น้อย ดูดกลืนน้ำได้ดีส่วนที่เป็นอสัณฐานของแก้วกลับสามารถทำปฏิกิริยาได้ดี สามารถใช้เป็นวัสดุพอลิเมอร์ เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตได้ นอกจากนี้ ยังสามารถนำแก้วกลับมาแทนที่แก้วฉนวนเพื่อช่วยเพื่อค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ได้อีกด้วย [4]-[9] จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การแทนที่แก้วฉนวนด้วยแก้วกลับช่วยเพิ่มความแข็งแรงในวัสดุได้เพียงเล็กน้อย

เท่านั้น เนื่องจากแก้วกลับมีความไวในการทำปฏิกิริยาได้น้อย แต่ข้อดีของแก้วกลับคือมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ดังนั้นหากมีการปรับปรุงคุณภาพของแก้วกลับ เช่น การเพิ่มอุณหภูมิการเผาแก้วกลับ [10] หรือการสกัดเอาเฉพาะส่วนของซิลิกาที่มีความเป็นอสัณฐานในแก้วกลับ [11] และนำมาแทนที่แก้วฉนวนในงานจีโอพอลิเมอร์ มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้คุณสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์ดีขึ้น งานวิจัยนี้มีความสนใจในการใช้แก้วกลับ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้าพลังงานชีวมวล โดยการนำแก้วกลับมาสกัดซิลิกาเป็นตัวช่วยในการเพิ่มอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาให้กับจีโอพอลิเมอร์แทนการใช้สารเคมี และเป็นแนวทางในการนำเอาแก้วกลับซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งในสิ่งแวดล้อมมาใช้ประโยชน์สูงสุดในงานก่อสร้างต่อไป

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้

- 1) แก้วฉนวน (FA) ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปรับปรุงคุณภาพของแก้วฉนวนด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อควบคุมให้มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน (ใช้สัญลักษณ์ GFA)
- 2) แก้วกลับ (RH) ได้จากโรงผลิตไฟฟ้าชีวมวล ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นำแก้วกลับมาบดเพื่อให้ค่าตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 (ใช้สัญลักษณ์ GRH)
- 3) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 4) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

2.2 วิธีการสกัดสารซิลิกา (SiO_2) จากแก้วกลับ

การสกัดซิลิกาจากแก้วกลับในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการของ Yalcin และ Sevinc [11] และข้อมูลสนับสนุนจาก Donanta และคณะ [12] ซึ่งในงานวิจัยระบุว่า ทำการสกัดซิลิกาจากแก้วกลับหรือแก้วโดยการใส่กรด HCl 1 โมลาร์ และน้ำ DI มีวิธีการ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การกำจัดสิ่งเจือปนและแร่ธาตุปริมาณน้อยที่อยู่ในแก้วกลับ โดยการล้างแก้วกลับด้วยสารละลายกรด HCl 1 โมลาร์ และต้มอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 1-2 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองเอาส่วนที่เหลือ

ไปเพื่อไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (ใช้สัญลักษณ์ RH-HCl) แล้วจึงนำเอาแก้วแกลบจากการกำจัดสิ่งเจือปนไปเผาที่อุณหภูมิ 100, 200, 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้สัญลักษณ์ RH-100, RH-200, RH-400, RH-600 และ RH-800 ตามลำดับ ขั้นตอนนี้จะทำให้แกลบหรือแก้วแกลบเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทำให้ได้ซิลิกาที่มีความเป็นอสัณฐานที่สูง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการใช้เทคนิค XRD

2.3 ทาค่าความสูญเสียน้ำหนักของแก้วแกลบเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

แก้วแกลบที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในหัวข้อที่ 2.2 จะมีค่าความสูญเสียน้ำหนักของแต่ละอุณหภูมิโดยทำการบันทึกค่าน้ำหนักก่อนการเผาแก้วแกลบ จากนั้นเมื่อเผาแก้วแกลบ จากนั้นทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของแก้วแกลบปรับปรุงและสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

2.4 วิธีการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

การผสมจีโอพอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

ลักษณะที่ 1 นำซิลิกาที่สังเคราะห์จากแก้วแกลบมาผสมกับแก้วถ่านหิน โดยมีอัตราส่วนแก้วถ่านหินต่อแก้วแกลบเท่ากับ 90 : 10 โดยน้ำหนัก [13] ผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้นผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 14 โมลาร์ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ เกียรติสุตา และคณะ [14] กวนผสมเป็นเวลา 3 นาที (ใช้สัญลักษณ์เป็น GEO-SEP สำหรับวิธีการ และ RH-100-S, RH-200-S, RH-400-S, RH-600-S และ RH-800-S สำหรับตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ซิลิกาสกัดจากแก้วแกลบที่อุณหภูมิ 100, 200, 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส)

ลักษณะที่ 2 นำซิลิกาที่สังเคราะห์จากแก้วแกลบมาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 14 โมลาร์ ในอัตราส่วน L/B=0.4 กวนผสมให้เข้ากัน นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นผสมกับแก้วถ่านหินในอัตราส่วน แก้วถ่านหินต่อแก้วแกลบ 90 : 10 โดยน้ำหนัก โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ

เกียรติสุตา [13] กวนผสมเป็นเวลา 3 นาที (ใช้สัญลักษณ์เป็น GEO-MIX สำหรับวิธีการ และ RH-100-L, RH-200-L, RH-400-L, RH-600-L และ RH-800-L สำหรับตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ซิลิกาสกัดจากแก้วแกลบที่อุณหภูมิ 100, 200, 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส)

นำส่วนผสมที่ได้ทั้ง 2 ลักษณะ เข้าแบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร เมื่อบ่มครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อรอการทดสอบกำลังอัดของวัสดุ และศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค

2.5 การศึกษากำลังอัดและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ ทดสอบที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน

แก้วแกลบ ซิลิกาที่สกัดจากแก้วแกลบและแก้วถ่านหิน ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคแก้วถ่านหินและแก้วแกลบ ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ความพรุนของซิลิกาจากแก้วแกลบด้วยเทคนิค MIP

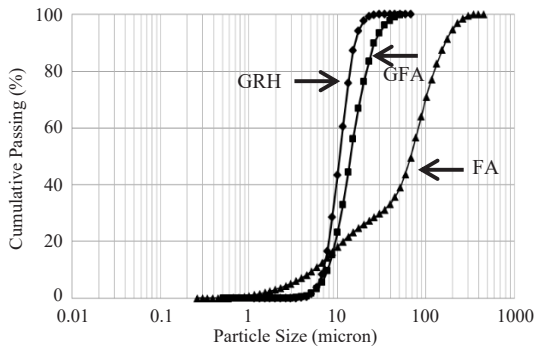
ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ ด้วยการศึกษาลักษณะพื้นผิวของ GEO-SEP และ GEO-MIX ด้วยเทคนิค SEM และ EDS ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

3. ผลการทดลอง

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุตั้งต้น

3.1.1 การกระจายตัวของแก้วแกลบและแก้วถ่านหิน

การกระจายตัวของอนุภาคแสดงดังรูปที่ 1 พบว่า FA มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.25-500 ไมครอน มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย อาจทำให้การทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ จึงปรับปรุงคุณภาพให้แก้วถ่านหินมีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน และแก้วแกลบมีขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่า การปรับปรุงขนาดของวัสดุตั้งต้นทั้งสองช่วยให้มีการกระจายตัวที่ดี พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้นและทำให้การทำปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น [14]-[16]

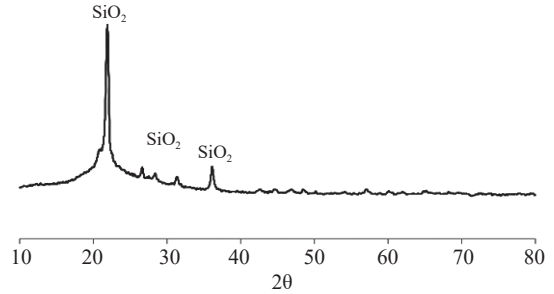


รูปที่ 1 การกระจายของอนุภาคของเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน

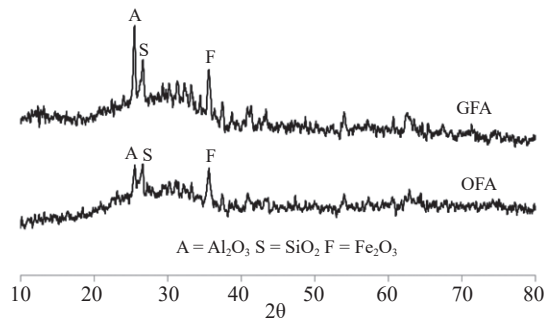
3.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 78.78 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผาเท่ากับ ร้อยละ 1.8 จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 (ASTM C618-08a, 2010) [17] นอกจากนี้เถ้าถ่านหินยังมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงถึงร้อยละ 13.82 ในขณะที่เถ้าแกลบมีปริมาณ องค์ประกอบทางเคมีหลัก ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ ร้อยละ 77.97 และมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 17.69 เถ้าแกลบมีค่า LOI สูงเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สังเกตได้จากเถ้าแกลบที่ใช้ในการวิจัย มีสีดำซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นธาตุถ่านคุดน้ำสูง และถ้ามีจำนวนมากจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้ [18]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ

Comp (%)	GFA	GRH
SiO_2	39.47	77.97
Al_2O_3	29.46	0.56
Fe_2O_3	9.85	1.41
CaO	13.82	0.52
MgO	-	0.32
SO_3	3.66	0.03
Na_2O	-	0.07
K_2O	1.95	1.44
LOI	1.80	17.69



รูปที่ 2 โครงสร้างผลึกของ GRH



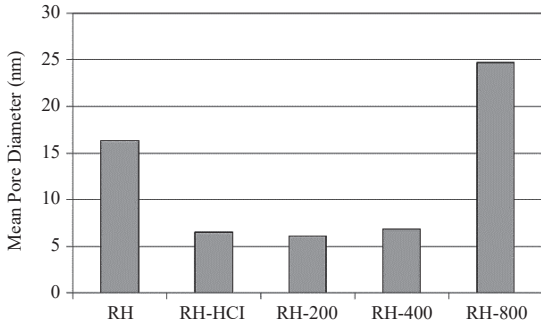
รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของ FA และ GFA

3.1.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน ลักษณะโครงสร้างผลึกของเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน แสดงดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่า เถ้าแกลบมีส่วนที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึก พบส่วนที่เป็นผลึกของ SiO_2 ในขณะที่เถ้าถ่านหินทั้งที่ยังไม่ปรับปรุงคุณภาพ (FA) และปรับปรุงคุณภาพ (GFA) มีองค์ประกอบทั้งที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึก ส่วนที่เป็นผลึกเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3 , SiO_2 และ Fe_2O_3 ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีเป็นไปตามองค์ประกอบทางเคมี แสดงถึงความเป็นวัสดุอะมอร์ฟัส เนื่องจากมี SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก และมีความเหมาะสมในการเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ [3]

3.2 คุณสมบัติของเถ้าแกลบเมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายกรด

3.2.1 ความพรุนของวัสดุ

ค่าเฉลี่ยความพรุนของวัสดุ แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า เถ้าแกลบที่ยังไม่ปรับปรุงคุณภาพมีค่าเฉลี่ยความพรุน

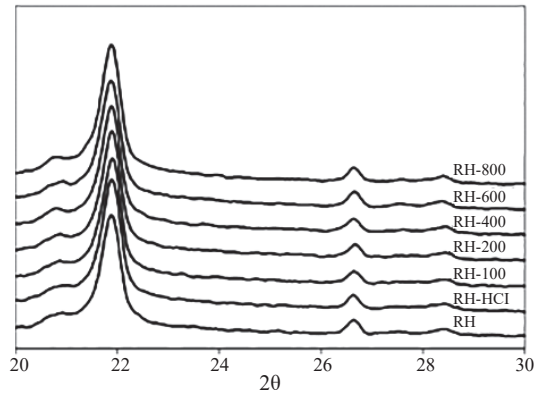
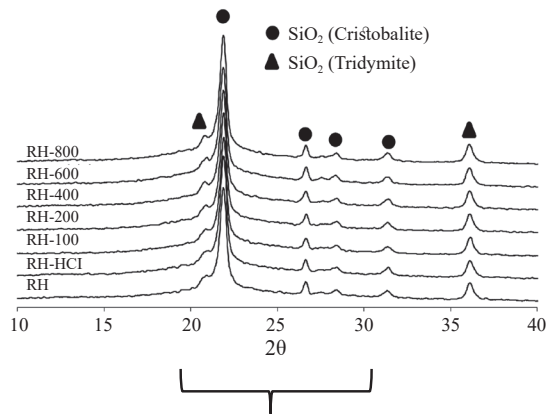


รูปที่ 4 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างของแก้วเคลือบที่ปรับปรุงคุณภาพ

ช่องว่างเท่ากับ 16.361 นาโนเมตร เมื่อปรับปรุงคุณภาพโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกและเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ค่าเฉลี่ยความพรุนของแก้วเคลือบมีค่าลดลงและมีค่าต่ำสุดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 200 หลังจากนั้นค่าความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นและจะมีค่าความพรุนสูงสุดที่อุณหภูมิ 800 ค่าความพรุนเท่ากับ 24.719 นาโนเมตร การเปลี่ยนแปลงค่าความพรุนมีแนวโน้มเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบ SiO₂ ในรูปของ Tridymite และ Cristobalite ที่เกิดจากการเผาแก้วเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน จาก 100 ถึง 800 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างภายในของแก้วเคลือบทำให้เกิดขนาดความพรุนที่แตกต่างกัน [19]

3.2.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

โครงสร้างผลึกของแก้วเคลือบเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5 และตารางที่ 2 พบว่า แก้วเคลือบ (RH) มีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึกของสารประกอบ SiO₂ เมื่อทำการสกัดซิลิกาจากแก้วเคลือบด้วยการแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกพบว่า พบตำแหน่งพิกหลักที่ 21.8 องศา ที่มุม 2θ ซึ่งสัมพันธ์กับสารประกอบซิลิกอนออกไซด์ในรูปของ Cristobalite และเมื่อมีการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นพบว่า มีแนวโน้มของการเกิดผลึกในตำแหน่งที่ 20.7 องศา ที่มุม 2θ ซึ่งสัมพันธ์กับสารประกอบซิลิกอนออกไซด์ในรูปของ Tridymite และพิกมีความเข้มข้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น [20] นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่าช่วงตำแหน่ง 20-24 องศา ที่มุม 2θ มีขนาดพื้นที่ใต้กราฟที่เพิ่มขึ้น หมายถึงแก้วเคลือบเกิดความเป็น

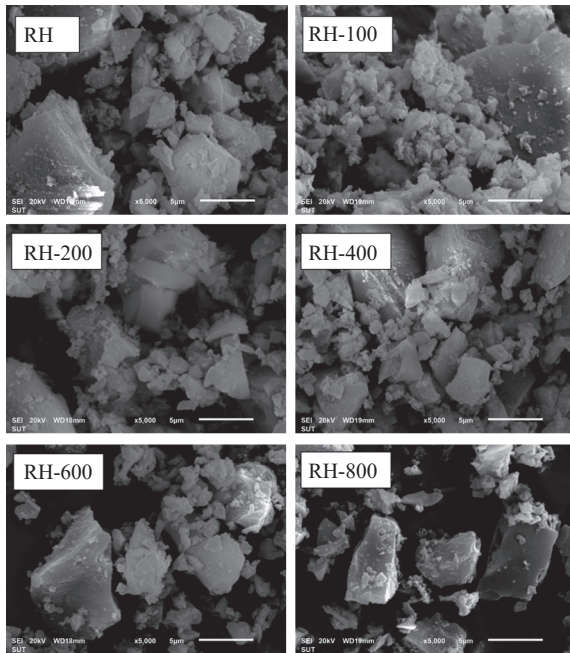


รูปที่ 5 โครงสร้างผลึกของแก้วเคลือบเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อสัณฐานเพิ่มขึ้น [12] ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของแก้วเคลือบที่ว่า เมื่อแก้วเคลือบมีอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้นจะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ สังเกตได้จากแก้วเคลือบมีการเปลี่ยนสีจากสีดำเป็นสีเทา และมีแนวโน้มในการทำปฏิกิริยากับวัสดุอื่นๆ ได้ดีขึ้น [18]

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความพรุนของแก้วเคลือบ

ตัวอย่าง	Mean Pore Diameter (nm)	BET (m ² g ⁻¹)
RH	16.361	8.0793
RH-HCl	6.494	31.185
RH-200	6.122	31.421
RH-400	6.877	27.070
RH-800	24.719	5.9272

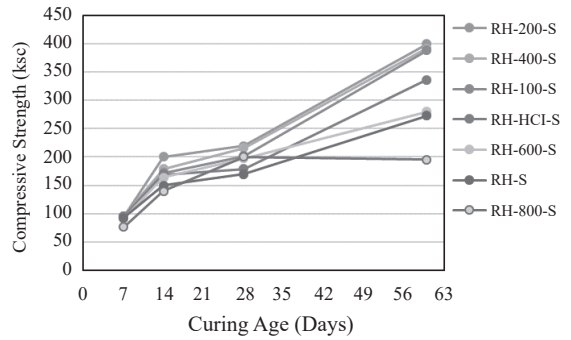


รูปที่ 6 ลักษณะพื้นผิวของเถ้าแกลบโดยการแปรผันอุณหภูมิที่เผา

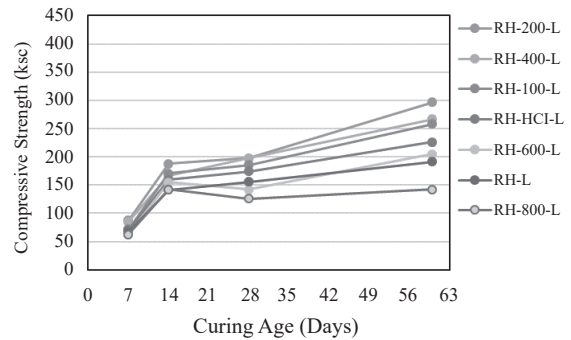
ค่าพื้นที่ได้กราฟ XRD ของเถ้าแกลบที่ปรับปรุงแล้ว แสดงดังรูปที่ 7 วิธีการหาพื้นที่ได้กราฟด้วยวิธีการใช้เศษส่วน คูณไขว้เลือกมุมที่ทำในช่วงที่ 20–30 องศา ที่มุม 2θ แสดงดัง ตารางที่ 3 เนื่องจากเป็นตำแหน่งของการยกตัวของพีคสูงที่สุด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เป็นส่วนที่ไม่เป็นผลึกนั่นเองพบว่า พื้นที่ที่ได้กราฟของเถ้าแกลบที่ปรับปรุงคุณภาพ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ได้กราฟมากที่สุด เท่ากับ 1,159.49 ตารางหน่วย มีแนวโน้มของการเป็นไม่ผลึกสูงและส่งผลให้เถ้าแกลบทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น [21], [22]

ตารางที่ 3 ค่าพื้นที่ได้กราฟ XRD ของเถ้าแกลบที่ปรับปรุงคุณภาพ

Temp (°C)	RH	100	200
Sample	RH-HCL	RH-100	RH-200
Area	1,054.33	1,109.58	1,159.49
Temp (°C)	400	600	800
Sample	RH-400	RH-600	RH-800
Area	1,103.32	1,096.56	1,149.27



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ และอุณหภูมิของการเผาเถ้าแกลบของ GEO-SEP



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ และอุณหภูมิของการเผาเถ้าแกลบของ GEO-MIX

3.2.3 ลักษณะพื้นผิวของเถ้าแกลบ

ลักษณะพื้นผิวของเถ้าแกลบโดยเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงรูปที่ 8 ที่กำลังขยาย 5000 เท่า พบว่า พื้นผิวของ GRH และ RH-100, RH-200, RH-400, RH-600 และ RH-800 มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน มีทั้งขนาดที่เล็กกว่า 5 ไมครอน และใหญ่กว่า 5 ไมครอน (หากพิจารณาจากการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าแกลบ) พื้นผิวมีความขรุขระ ไม่สังเกตเห็นรูพรุนของเถ้าแกลบในทุกๆ อุณหภูมิของการเผา จากการสังเกตบนพื้นผิวของตัวอย่างเถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 5 ไมครอน มีความเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน หากเป็นเถ้าแกลบที่มีขนาดเล็กพื้นผิวจะมีความขรุขระและเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม

3.3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์

3.3.1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ผสม GEO-SEP

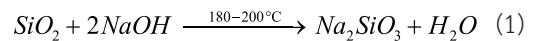
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของ GEO-SEP และอุณหภูมิของการเผาเถ้าแกลบ แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น หากพิจารณาถึงตัวอย่าง RH-800-S มีค่ากำลังอัดลดลง เนื่องจากอุณหภูมิการเผาเถ้าแกลบที่สูงขึ้นพบว่า มีแนวโน้มของการเปลี่ยนรูป SiO_2 ให้เป็นโครงสร้างผลึกซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 7 ที่พบผลึกของซิลิกาในรูปของ Tridymite และตารางที่ 3 ที่มีพื้นที่ใต้กราฟซึ่งเป็นส่วนของความเป็นอสัณฐานลดลง นอกจากนี้ยังมีค่าความพรุนที่สูงมาก (รูปที่ 6) ทำให้เถ้าแกลบดูดซับสารละลายที่ใช้ในการทำผสมตัวอย่างและทำปฏิกิริยา สารละลายจึงชะซิลิกาและอะลูมินาจากส่วนผสมได้น้อยลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงด้วยและเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิมิพบว่า ที่ 200 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด โดยมีค่ากำลังอัดที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน เท่ากับ 95.35, 200.21, 219.12 และ 399.46 กก./ซม² ตามลำดับ การเพิ่มเถ้าแกลบที่ไม่เป็นผลึกในส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไลเซชันดีขึ้น [23] ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ได้ค่ากำลังอัดที่ดี สอดคล้องกับการทดสอบคุณสมบัติของการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าแกลบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ทดสอบด้วยวิธี BET เท่ากับ $31.421 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ซึ่งมีค่าสูงสุด นอกจากนี้ผลการศึกษาพื้นที่ใต้กราฟ XRD ยังให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุด ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มถึงความไม่เป็นผลึกของวัสดุสูงที่สุดอีกด้วย

3.3.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ผสม GEO-MIX

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์และอุณหภูมิของการเผาเถ้าแกลบด้วยวิธีการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ วิธีที่ 2 แสดงดังรูปที่ 8 พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการเผาพบว่า ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด โดยมีค่ากำลังอัดที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน เท่ากับ 87, 187, 197 และ 296 กก./ซม² ตามลำดับ

เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์แบบ Mixed ซิลิกาจากเถ้าแกลบละลายอยู่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนในรูปของโซเดียมซิลิเกต

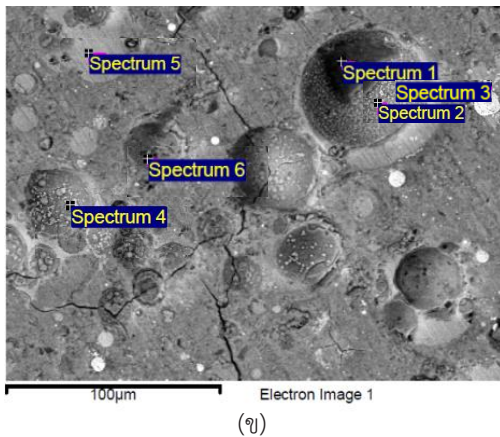
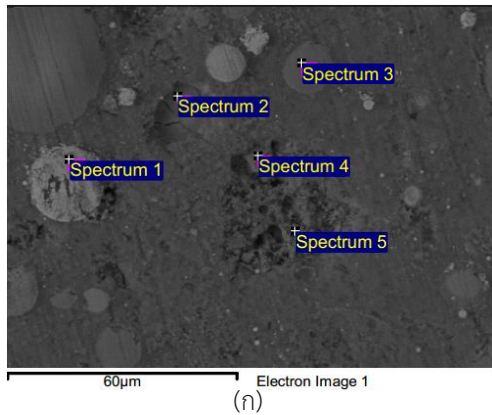
ดังสมการที่ (1) จึงทำให้ในสารละลายเปลี่ยนรูปเป็นโซเดียมซิลิเกตและมีความเป็นด่างเพียงบางส่วนที่สามารถชะละลายซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้ จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานกว่า แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปวัสดุมีซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะจากเถ้าถ่านหินเพียงพอและทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกต [จากสมการที่ (1) [24]] ทำให้เกิดเป็นโครงข่ายจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงและสามารถรับกำลังอัดได้ดี



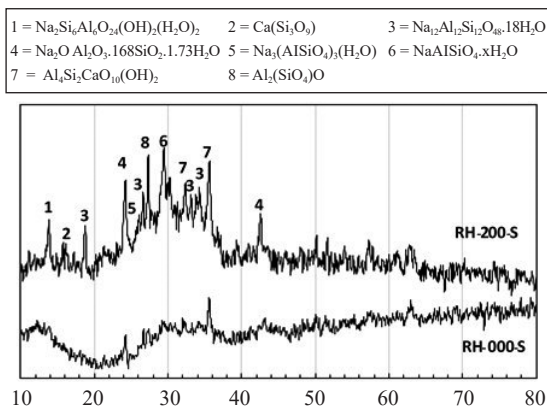
รูปที่ 9 แสดงลักษณะพื้นผิวของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกโดยที่ (ก) RH-HCL-S และ (ข) RH-HCL-L พบว่า ทั้งสองวิธีการผสมมีลักษณะพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน (ก) ตำแหน่งที่ 2 และ 4 เป็นบริเวณที่มีการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ที่มีค่า Si : Al และ Na : Al เท่ากับ 2.94 และ 2.03 และ 1.73 และ 1.38 นอกจากนี้ในตำแหน่งที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นการหลุดออกของเถ้าถ่านหินมีปริมาณของเหล็กสูง ซึ่งเหล็กเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในเถ้าถ่านหิน สำหรับรูปที่ 9 (ข) แสดงให้เห็นตำแหน่งการหลุดของเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจนในหลายตำแหน่ง และพบตำแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดเป็นจีโอพอลิเมอร์ได้แก่ 3 ในขณะที่ ในตำแหน่งที่ 4 พบว่า มีปริมาณซิลิกาที่สูงซึ่งสามารถพบได้ในเถ้าแกลบทำให้ตำแหน่งนี้มีแนวโน้มที่จะเป็นเถ้าแกลบ

3.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกของจีโอพอลิเมอร์

โครงสร้างผลึกของตัวอย่าง GEO-SEP แสดงดังรูปที่ 10 และโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง GEO-MIX แสดงดังรูปที่ 11 พบว่า ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดเป็นสารประกอบ $Na_2Si_6Al_6O_{24}(OH)_2(H_2O)_2$, $Ca(Si_3O_9)$, $Na_{12}Al_{12}Si_{12}O_{48} \cdot 18H_2O$, $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 1.68SiO_2 \cdot 1.73H_2O$, $Na_3(AlSiO_4)_3(H_2O)$, $NaAlSiO_4 \cdot xH_2O$, $Al_4Si_2CaO_{10}(OH)_2$ และ $Al_2(SiO_4)O$ มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบเกิดเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างจากอะตอมของซิลิกา

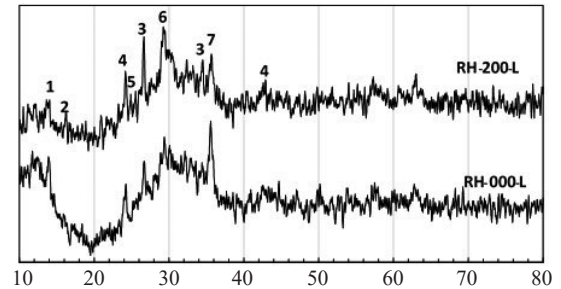


รูปที่ 9 ลักษณะพื้นผิวของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (ก) RH-HCL-S (ข) RH-HCL-L



รูปที่ 10 โครงสร้างผลึกของจีโอพอลิเมอร์ GEO-SEP

1 = $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{Al}_4\text{O}_9(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_2$	2 = $\text{Ca}(\text{Si}_3\text{O}_9)$	3 = $\text{Na}_{12}\text{Al}_2\text{Si}_{12}\text{O}_{36}\cdot 18\text{H}_2\text{O}$
4 = $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 1.68\text{SiO}_2\cdot 1.73\text{H}_2\text{O}$	5 = $\text{Na}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{H}_2\text{O})$	6 = $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\cdot x\text{H}_2\text{O}$
7 = $\text{Al}_4\text{Si}_2\text{CaO}_{10}(\text{OH})_2$	8 = $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{O}$	



รูปที่ 11 โครงสร้างผลึกของจีโอพอลิเมอร์ GEO-MIX

อะลูมินา และโซเดียมและบางตำแหน่งเกิดโครงสร้างสารประกอบร่วมกับแคลเซียมที่ได้จากเถ้าถ่านหิน

4. สรุป

จากการศึกษาสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

- 1) เถ้าแกลบที่ปรับปรุงคุณภาพที่อุณหภูมิ 200 มีค่าความพรุนต่ำที่สุดเท่ากับ 6.122 นาโนเมตร และมีค่าพื้นที่ใต้กราฟในช่วง 20–30 องศา ที่มุม 2θ มากที่สุดเท่ากับ 1,159.49 ตารางหน่วย มีแนวโน้มความไม่บริสุทธิ์สูง และส่งผลให้เถ้าแกลบทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุด
- 2) กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์แบบ GEO-SEP พบว่าตัวอย่าง GEO-200-S ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ที่อายุ 28 และ 60 วัน เท่ากับ 219 และ 399 กก/ซม² ตามลำดับ จีโอพอลิเมอร์แบบ GEO-MIX ตัวอย่าง GEO-200-L ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 และ 60 วัน เท่ากับ 197 และ 296 กก/ซม² ตามลำดับ
- 3) วิธี GEO-SEP ให้กำลังอัดที่สูงกว่าวิธี GEO-MIX เนื่องจากมีค่าความเป็นด่างมากกว่าที่จะชะซิลิกาและอะลูมินาออกจากวัสดุตั้งต้นเพื่อทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน เนื่องจากการผสมเถ้าแกลบร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดเป็นสารโซเดียมซิลิเกตที่ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาและการชะซิลิกาจากเถ้าถ่านหินที่ยาวนานกว่าแบบแยกผสม (GEO-SEP)
- 4) ลักษณะพื้นผิวพบมีบริเวณที่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์ และในบางตำแหน่งพบผลิตภัณฑ์แคลเซียม



จีโอพอลิเมอร์และสอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ที่พบสารประกอบในจีโอพอลิเมอร์เฟสที่เกิดขึ้น

ผลการศึกษากำลั้งอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินและซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบสามารถนำแต่ละส่วนผสมที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อผลิตวัสดุก่อสร้างในงานโยธาได้ตามความต้องการของผู้ใช้งานได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัย งบประมาณรายจ่าย ประจำปี พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. G. S. Jaarsveld and J. S. J. Deventer, "Effect the alkali metal activator on the properties of fly ash based geopolymers," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 38, no. 10, pp. 3932–3941, 1999.
- [2] W. Sun, Y. Zhang, W. Lin, and Z. Liu, "In situ monitoring of the hydration process of K-PS geopolymer cement with ESEM," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 34, pp. 935–940, 2004.
- [3] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Application*. France: Institute Geopolymer, 2008, pp. 585.
- [4] K. Srituileng, "A study on the properties of fly ash with rice husk ash geopolymer," M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, 2007 (in Thai).
- [5] J. Wongpa, K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, and P. Chindapasirt, "Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete," *Materials and Design*, vol. 31, no. 10, pp. 4748–4754, 2010.
- [6] P. Kamhangrittirong, P. Suwanvitaya, P. Suwanvitaya, and P. Chindapasirt, "Synthesis and properties of high calcium fly ash based geopolymer for concrete," presented at Applications, 36th Conference on Our World in Concrete & Structures Singapore, August 14–16, 2011.
- [7] H. Jian, J. Yuxin, Z. Jianhong, Y. Yuzhen, and Z. G. Zhang "Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, pp 108–118. 2013.
- [8] B. Chatveera and N. Makul. "Properties of geopolymer mortar produced from fly ash and rice husk ash: Influences of fly ash-rice husk ash ratio and Na_2SiO_3 -NaOH ratio under curing by microwave energy," *KMUTT Research & Development Journal*, vol. 35, no. 3, pp. 299–310, 2012 (in Thai).
- [9] H.H. Un, S. Kaushik, M. Waltraud, S Kriven, and S. Musil, "Rice husk ash as a silica source in a geopolymer developments in strategic materials and computational design V," presented at the 38th International Conference on Advanced Ceramics and Composites, Daytona Beach, Florida, 2014.
- [10] X. Weiting, T. Y. Lo, and S. A. Memon, "Microstructure and reactivity of rich husk ash," *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 541–547, 2012.
- [11] N. Yalcin and V. Sevinc, "Studies on silica obtained from rice husk," *Ceramics International*,

- vol. 27, no. 2. pp. 219–224, 2001.
- [12] D. Donanta, F. F. Jaka, W. S. Frans, and N. H. Alfina, “Synthesis of amorphous silica from rice husk ash: Comparing HCl and CH₃COOH acidification methods and various alkaline concentrations,” *International Journal of Technology*, vol. 11, no.1, pp. 200–208, 2020.
- [13] K. Somna. “Synthetic acid rain resistance on geopolymer mortar based fly ash and rice husk ash,” presented at the 19th National Convention on Civil Engineering, Khon Kaen, Thailand, 2014 (in Thai).
- [14] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul, and P. Chindaprasirt, “NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature,” *Fuel*, vol. 90, no. 6, pp. 2118–2124, 2011 (in Thai).
- [15] T. Chareerat and P. Chindaprasirt, “Preliminary study of geopolymer from selected size of Mae Moh fly ash,” presented at the 1st National Conference on Concrete and Geopolymer, Khon Kaen, Thailand, 2005 (in Thai).
- [16] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, and T. Sinsiri, “Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste,” *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 7, pp. 1534–1541, 2007.
- [17] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*, ASTM C618-08a, 2010.
- [18] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, *Cement Pozzolan and Concrete*. 7th ed. Bangkok: Thai Concrete Association, 2010 (in Thai).
- [19] M. Celestine, O. T. Audu, G. Msughter, and T. R. Dooshima, “Variation of some physical properties of rice husk ash refractory with temperature,” *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 2, no.9, pp. 26–29, 2013.
- [20] M. M. Haslinawati, K. A. Matori, Z. A. Wahab, H.A.A.Sidek, and A. Zainal, “Effect of temperature on ceramic from rice husk ash,” *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS*, vol. 9, no. 9. pp. 22–25. 2009.
- [21] M. F. Souzaa, P. S. Batistaa, I. Regiania, J. B. L. Liboriob, and D. P. F. Souza, “Rice hull-derived silica: Applications in Portland cement and mullite whiskers,” *Materials Research*, vol. 3, no. 2, pp. 25–30, 2000.
- [22] V. P. Della, I. Kuhm, and H. Dachamir, “Rice husk ash as an alternate source for active silica production,” *Materials Letters*, vol. 57, no. 4, pp. 818–821, 2002.
- [23] G. Liang, H. Zhu, Z. Zhang, and Q. Wu, “Effect of rice husk ash addition on the compressive strength and thermal stability of metakaolin based geopolymer,” *Construction and Building Materials*, vol. 222, pp. 872–881, 2019.
- [24] M. Davinder, “Silica from ash: A valuable product from waste material,” *Resonance*, vol. 2, no. 7, pp. 64–66, 1997.