

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาและเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน

นภารัตน์ ไวยเจริญ* และสุวิมล อัสวพิศิษฐ

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการนำตะกอนประปากับเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมันมาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เพื่อคัดเลือกอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสม โดยแปรผลจากการพัฒนากำลังรับแรงอัด และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของก้อนหล่อแข็งจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ภายหลังจากบ่มสูงสุด 60 วัน โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ระดับโครงสร้างจุลภาคได้แก่ เทคนิค XRF XRD และ SEM ผลการวิจัยสรุปได้ว่า อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เท่ากับ 2.50 (อัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบคือ 1.77 2.00 2.50 และ 3.00) สามารถเกิดผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์ภายใต้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ และให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเท่ากับ 40.56 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนการใช้เทคนิค XRD และ SEM แสดงการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกต สามารถบ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันและผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ได้ สรุปได้ดังนี้ เทคนิค XRD พบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Sodium Aluminum Silicate Hydrate ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}\cdot 216\text{H}_2\text{O}$; NASH) แทนที่ฟลักของ Quartz และ Potassium Aluminum Silicate (KAlSi_2O_6) ตลอดจนการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุม 2 theta เทคนิค SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของจีโอพอลิเมอร์ มีลักษณะเป็นเจลหรือผลึกมีรูปร่างแตกต่างกัน ซ้อนทับหลายชั้น กระจัดกระจายทั่วทั้งก้อนจีโอพอลิเมอร์ สลับกับบางส่วนยังคงปรากฏเป็นช่องโหว่หรือรูพรุน มีทั้งผิวหน้าเรียบและขรุขระ และปรากฏตำแหน่งของ Silicon, Aluminum และ Sodium ในตำแหน่งเดียวกัน แสดงการจับกันภายในโครงสร้างของ NASH ดังนั้น การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาร่วมกับเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมันจึงสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแสดงถึงการเกิดผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์, ตะกอนประปา, เถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: naparat.w@psu.ac.thรับเมื่อ 10 เมษายน 2562 ตอบรับ 10 กรกฎาคม 2562

Synthesis of Geopolymer From Water Treatment Residue and Palm Oil Fuel Ash

Naprarath Waijarean* and Suwimol Asavapisit

Abstract

This research aimed at synthesizing the geopolymer of water treatment residue and palm oil fuel ash using proper suitable $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios by varying the results of compressive strength test and also to examine the quality and microstructure of solidified waste cubes after the maximum of 60 days curing. In the test, the microstructure analysis techniques of XRF XRD SEM were employed. The findings revealed that the proper ratios of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ in synthesizing geopolymer at 2.50 could develop geopolymerization reaction. (In $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ test were 1.77, 2.00, 2.50 and 3.00) It was also found that the synthetic geopolymer with optimum compressive strength at 40.56 Ksc. In employing the microstructure analysis technique of XRD and SEM, the changes inside geopolymer structure both before and after the mixing were found. The results can indicate the developing of geopolymerization reaction and synthetic geopolymer products inside the structure of Aluminosilicate source regarding the internal changes as follows; it was found that the peak of Quartz, Potassium Aluminum Silicate (KAlSi_2O_6), and X-rays diffraction had been superseded by the structure solid of Sodium Aluminum Silicate Hydrate ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}\cdot 216\text{H}_2\text{O}$; NASH). It was also found Silicon, Aluminum, and Sodium at the same bonding position structure of NASH. As a result, the synthesis of the geopolymer of water treatment residue and palm oil fuel ash can developing strength and changing inside geopolymer structure by appear geopolymer product. Both starting materials can be synthesized and applied in environmental filed.

Keywords : Geopolymer, Water treatment residue, Palm oil fuel ash

Department of science Faculty of Science and Technology Prince of Songkla University Pattani.

* Corresponding author, E-mail : naparat.w@psu.ac.th, Received:10 April 2019, Accepted:19 July 2019

1. บทนำ

ปัจจุบันวิธีการทำลายฤทธิ์ของสารอันตรายที่นิยมใช้คือ การปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็ง (Stabilization และ Solidification หรือ S/S) เป็นวิธีการบำบัดสารอันตรายโดยใช้ตัวยึดประสานซีเมนต์ (Ordinary Portland Cement; OPC) ที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยเฉพาะโลหะหนักต่าง ๆ จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ (Metal Hydroxides) ด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์หรือปูนขาว ที่สามารถลดความเป็นพิษ และลดการเคลื่อนย้ายสารพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ระดับหนึ่ง แต่วิธีนี้มีต้นทุนการบำบัดสูง และก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก ซึ่ง [1] ระบุว่า อุตสาหกรรมซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดร้อยละ 75 ประกอบกับการนำวัตถุดิบมาผลิตซีเมนต์ยังเป็นการนำทรัพยากรธรรมชาติประเภทหินและแร่มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตซีเมนต์ และถือได้ว่ากระบวนการผลิตซีเมนต์ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ต่อมามีนักวิจัยหลายท่านทำการศึกษาค้นคว้าหาวัสดุใหม่เพื่อนำมาเป็นส่วนผสมหรือใช้ทดแทนซีเมนต์ทั้งระบบ ซึ่งในระยะแรกมีการนำวัสดุปอซโซลานที่มาจากเถ้าถ่านหิน แกลบ เถ้าจากวัสดุทางการเกษตรอื่น ๆ มาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตซีเมนต์ด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน เช่น วัตถุดิบและแหล่งที่มา การเตรียมวัตถุดิบ การผสม อัตราส่วน การทำปฏิกิริยา การบ่ม และระยะเวลาการบ่ม ตลอดจนวัตถุประสงค์ของการนำผลิตภัณฑ์ไปประยุกต์ใช้ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหลากหลาย ไม่สามารถควบคุมคุณภาพการผลิตระดับอุตสาหกรรมและขยายผลในเชิงพาณิชย์ได้ อีกทั้ง

งานวิจัยที่ผ่านมาจะเน้นการศึกษาและพัฒนาสมบัติเชิงกลด้านการพัฒนากำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์นำไปใช้ในงานก่อสร้าง มิได้เน้นการประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการจัดการของเสียอันตราย ต่อมา มีนักวิจัยกลุ่มหนึ่งมีความพยายามพัฒนาและสังเคราะห์วัสดุทดแทนซีเมนต์ที่ให้สมบัติเชิงกลใกล้เคียงกัน สามารถนำไปใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม การจัดการของเสียอันตรายได้ อีกทั้งเป็นการนำวัสดุจากภาคอุตสาหกรรม และทางการเกษตรกลับมาใช้ใหม่ และทดแทนทรัพยากรหินและแร่ วัสดุสังเคราะห์ดังกล่าวเรียกว่า จีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุสังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตและสารละลายต่างภายใต้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรชัน [2] ได้ผลิตภัณฑ์ที่ให้สมบัติการแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง สามารถรองรับแรงอัดได้ดี ทนทานต่อการกัดกร่อน เป็นวัสดุทนไฟ และมีสมบัติในการกักเก็บโลหะหนักได้ [3, 4, 5] ปัจจุบันมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เถ้าเปลือกไม้ (Bark Ash) เถ้าไม้ยางพารา (Rubber Ash) และเถ้าจากปาล์ม น้ำมัน (Palm Oil Fuel ash) และจากภาคอุตสาหกรรม ได้แก่ ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast Furnace Slag) เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly Ssh) ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment residue) ตะกอนประปา (water treatment residue) ตลอดจนกลุ่มแร่ดินเหนียวซึ่งมีความบริสุทธิ์มากกว่า มาเป็นวัสดุเดิมผสมในวัสดุตั้งต้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ให้สมบัติตามที่กำหนด แม้ว่า จะมีการเรียกชื่อตัวยึดประสานจีโอพอลิเมอร์ในทางวิชาการ แตกต่างกันไป อาทิ เช่น Aluminosilicate Inorganic Polymers, Aluminosilicate Cement Mineral Polymers,

Inorganic Polymers, Inorganic Polymer Glasses, Alkali Ash Material Hydroceramics, Alkali-activated Material Alkaline Inorganic Polymers, Alkali-bonded Ceramics, Geocements, Zeoceramics, Zeocement และ Green cement แต่ชื่อที่ได้รับการนิยามอย่างแพร่หลายทางทางวิจัยยังคงเป็นชื่อ จีโอพอลิเมอร์ [6, 7, 8, 9] งานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกใช้คำว่า จีโอพอลิเมอร์ แทนวัสดุสังเคราะห์หรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

การวิจัยครั้งนี้มีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในรูปเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) และวัสดุเหลือใช้จากโรงผลิตน้ำประปาในรูปตะกอนประปามาเป็นวัสดุตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากการนำเส้นใยปาล์มน้ำมันไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อต้มไอน้ำ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและภายหลังการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส จะเกิดเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีปริมาณสูงถึงประมาณ 578,998.00 ตันต่อปี ด้วยลักษณะของเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน มีขนาดเล็กเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบา สามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ละอองขนาดเล็กจึงมักก่อให้เกิดปัญหาหมอกพิษทางอากาศ ในทางกลับกันเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน มีส่วนประกอบของ SiO_2 มากที่สุดมากกว่าร้อยละ 55 รองลงมาเป็นองค์ประกอบของ K_2O CaO Al_2O_3 และ MgO มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.2, 6.5, 4.5, และ 4.2 ตามลำดับ หากเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618 พบว่า เถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน มีองค์ประกอบทางเคมีตรงกับข้อกำหนดของวัสดุปอซโซลาน Class N แม้ว่าเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน จะจัดเป็นวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ที่ผ่าน

กระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงแล้วก็ตาม ยังคงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการบดให้ละเอียด เพื่อเพิ่ม

พื้นที่ผิวของการทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วยิ่งขึ้น และเป็น การลดความพรุนของเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมันอีกด้วย ในทางวิศวกรรมสามารถนำเถ้าเส้นใยปาล์มที่มีความละเอียดเพียงพอผสมกับซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสม สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดและความทนทานของคอนกรีตได้ [10] ในปัจจุบันทางโรงงาน ฯ มีการนำเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์น้อยมาก ส่วนมากเลือกวิธีการทิ้งในพื้นที่โรงงาน บางส่วนนำไปใช้เป็นสารปรับปรุงคุณภาพดิน และถมพื้นที่ เถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมันจึงเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการบริหารจัดการพื้นที่ที่ใช้สอยภายใน โรงงาน เช่นเดียวกับ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น แกลบ ตะกรัน และตะกอนประปา ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจนำเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมันมาเพิ่มมูลค่า โดยวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นส่วนผสมในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ และนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม

ส่วนตะกอนประปาเป็นผลผลิตจากกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงผลิตน้ำประปา จากงานวิจัยของ [11, 12, 13] พบว่า เป็นสารประกอบในกลุ่มแร่ดินเหนียว (clay minerals) ที่มีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ อยู่ระหว่าง 1.60-2.40 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ [8] ผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้สมบัติด้านการพัฒนากำลังอัดได้ดี และสามารถกักเก็บโลหะหนักจากโรงชุบสังกะสีได้ [11] อีกทั้งปัจจุบัน วัสดุเหลือใช้จากโรงผลิตน้ำประปาเกิดขึ้นปริมาณมากและไม่มีการนำวัสดุเหลือใช้จากโรงผลิตน้ำประปามาใช้ประโยชน์ มักจะเลือกใช้

วิธีการกำจัดแบบถมพื้นที่ ก่อให้เกิดปัญหาในการบริหารจัดการพื้นที่ในโรงงาน ฯ และเพิ่มต้นทุนในการ

ขนถ่าย ซึ่งจำเป็นต้องว่าจ้างบริษัทเอกชนเพื่อนำไปกำจัดภายนอกโรงงาน จากปัญหาดังกล่าวและการมองเห็นความสำคัญของการนำกลับมาใช้ใหม่ จึงเป็นที่มาของการนำวัสดุเหลือใช้จากโรงผลิตน้ำประปามาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกับเส้นใยปาล์มน้ำมัน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และวัสดุเหลือใช้จากโรงผลิตน้ำประปามาเป็น สารตั้งต้น ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เพื่อหาอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมในการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยการปรับอัตราส่วนผสมของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีการติดตามการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน จากการพัฒนากำลังรับแรงอัดตลอดอายุการบ่ม 60 วัน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาภายในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ XRD และ SEM ประกอบการอธิบาย เพื่อประยุกต์ใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์

อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์สมบัติเชิงกล เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้เครื่องทดสอบการรับแรงอัดแบบ Universal testing machine รุ่น H5000L/Tinius Olsen, English ส่วนค่าออกไซด์ของธาตุใช้เครื่องยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น S4 Pioneer ด้วย Rh Radiation XRD ใช้เครื่องยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Discover และใช้โปรแกรม match peak ของเครื่อง Panalytical series X Pert Pro และ SEM-EDS ใช้เครื่องยี่ห้อ JEOL รุ่น 6400

2.2 วิธีการศึกษางานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำตะกอนประปา และเส้นใยปาล์มน้ำมัน มาเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เพื่อหาอัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมโดยใช้อัตราส่วนผสมของสารอะลูมิเนียมซิลิเกตที่แตกต่างกัน เริ่มตั้งแต่อัตราส่วน 1.77 2.00 2.50 และ 3.00 แปรผลโดยการทดสอบการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีอายุการบ่มสูงสุด 60 วัน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างหล่อแข็งจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ XRF XRD และ SEM ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

2.2.1 การเตรียมวัสดุตั้งต้น การเผาที่อุณหภูมิสูงและการบดละเอียดให้อนุภาคมีขนาดเล็ก มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ [8] ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จึงมีการนำตะกอนประปามาผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วยการบดละเอียด 13 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องบดแบบชนิดสิ (Ios Angeles Abrasion achine) และการทดสอบความละเอียดของวัสดุด้วยวิธีการร่อนเปียก (wet sieving) เช่นเดียวกับชุดควบคุมตามมาตรฐาน ASTM C 430-71 (ทดสอบอนุภาคข้างตะแกรงได้ร้อยละ 12) ส่วนการเตรียมเส้นใยปาล์มน้ำมันซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงและผ่านการบดละเอียดมีการเตรียมวัสดุตั้งต้นเช่นเดียวกับตะกอนประปา จากนั้นนำวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด มาหาชนิดและปริมาณธาตุในรูปออกไซด์ด้วย

เทคนิควิเคราะห์ XRF ใช้เครื่อง Bruker AXS รุ่น S4 Pioneer ด้วย Rh Radiation เพื่อคำนวณอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของก้อนหล่อแข็งจีโอพอลิเมอร์ที่เหมาะสม

และคัดเลือกอัตราส่วนจากผลการทดสอบการพัฒนา กำลังรับแรงอัดและโครงสร้างจุลภาคในลำดับต่อไป

2.2.2 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ขั้นตอนการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เพื่อหาอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อประยุกต์ใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม ขั้นตอนนี้เริ่มจากการกำหนดอัตราส่วนผสมของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เริ่มต้นที่ 1.77 2.00 2.50 และ 3.00 ซึ่งแสดงอัตราส่วนดังตารางที่ 1 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ครั้งนี้ใช้ตัวกระตุ้นปฏิกิริยาต่างโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ยี่ห้อ Merck, AR grad CAS# 1310-73-2, impurity $\geq 98.0\%$) ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ คงที่เท่ากับ 0.25 ในทุกชุดการทดสอบ เพื่อเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมระหว่างตะกอนประปา เถ้าเส้นใยปาล์ม และโซเดียมไฮดรอกไซด์

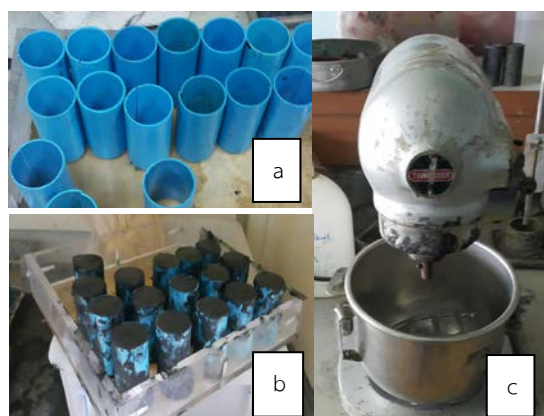
Samples	Quantity of raw materials (gram)		
	WTR	POFA	NaOH
WTR	600	-	60
WTRPA2.00	330	270	60
WTRPA2.50	189	411	60
WTRPA3.00	126	474	60

หมายเหตุ

WTR หมายถึง ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา เพียงอย่างเดียว WTRPA2.00 หมายถึง ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา

ร่วมกับเถ้าเส้นใยปาล์มในอัตราส่วน 2.00 ตัวเลข 2.50 และ 3.00 หมายถึง จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ระหว่างตะกอนประปากับเถ้าเส้นใยปาล์มที่อัตราส่วนผสม 2.50 และ 3.00

จากนั้นทำการผสมด้วยเครื่องกวนอัตโนมัติด้วยอัตราเร็วและช้า ตามลำดับ จนกระทั่ง จีโอพอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เทส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์ลงในแบบหล่อพลาสติกทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางและสูงเท่ากับ 3.5 และ 7.0 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งขนาดของก้อนหล่อแข็งจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบกำลังอัดยังไม่มีการกำหนดใช้ตามมาตรฐาน การวิจัยครั้งนี้ จึงมีการปรับขนาดก้อนหล่อแข็งแบบทรงกระบอก และทดสอบกำลังรับแรงอัดตามข้อกำหนดการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ทรงกระบอกที่ระบุตามมาตรฐาน ASTM C 39 (จำนวน 3 ชุด) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 อุปกรณ์การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

a. แบบหล่อทรงกระบอก b. จีโอพอลิเมอร์บรรจุในแบบหล่อ และ c. เครื่องผสมตัวอย่าง

จากนั้นทำการใส่ฟองอากาศเพื่อลดช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็งด้วยวิธีการสั่นใช้เครื่องเขย่า 1 นาที กระทั่งตาม 30 ครั้งและเขย่าอีก 1 นาทีตามลำดับ วิธีการผสมประยุกต์จาก ASTM C 305-65 หรือ มอก. 15 เล่ม 17 ทำการปาดผิวหน้าให้เรียบสม่ำเสมอ หุ้มแบบหล่อด้วยพลาสติก เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ และป้องกัน

การ carbonation เมื่อสัมผัสกับอากาศ จากนั้นบ่มก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง และถอดแบบภายหลังการผสมเสร็จสิ้น 24 ชั่วโมง ภายหลังถอดแบบให้ บ่มจีโอพอลิเมอร์ต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 1 องศาเซลเซียส) จนกระทั่งครบกำหนดการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ซึ่งปฏิกิริยา จีโอพอลิเมอร์ไรเซชันจะเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุล ตลอดการบ่มให้ห่อก้อนจีโอพอลิเมอร์ด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น จากนั้น นำผลการทดสอบมาหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน นอกจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแล้ว นำส่วนที่เหลือจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคของ จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM ในลำดับต่อไป

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ความเป็นไปได้ในการนำสารอะลูมิเนียมซิลิเกตมาเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

การวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุตั้งต้นของสารอะลูมิเนียมซิลิเกต รวมกัน 2 ชนิดคือ ตะกอนประปา และเถาเส้นใยปาล์มน้ำมัน ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและการบดให้ละเอียด ให้มีขนาดอนุภาคละเอียดเหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้อย่างรวดเร็ว ตามผลการศึกษาของผู้วิจัยหลายท่าน ที่มีการแนะนำในเรื่องการเตรียมตัวอย่างที่จำเป็นต้องผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงให้อยู่ในรูปแบบของสารอนินทรีย์คงตัวและทำให้โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวใหม่ พร้อมกับการบดละเอียดเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยามากยิ่งขึ้น ส่วนผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุในรูปออกไซด์ของ

ธาตุของวัสดุตั้งต้นแสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ตะกอนประปาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตามด้วยการบดละเอียด จะปรากฏออกไซด์ของธาตุซิลิกอนในปริมาณมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 55.06 รองลงมาคือธาตุอะลูมิเนียมเท่ากับร้อยละ 31.08 ส่งผลให้อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่พบมีค่าตั้งต้นเท่ากับ 1.77 ซึ่งธาตุซิลิกอนในตะกอนมาจากแร่ปฐมนิคม ส่วนธาตุอะลูมิเนียมมาจากกระบวนการผลิตน้ำประปามีการเติมสารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) เป็นตัวช่วยเร่งการสร้างตะกอนในกระบวนการตกตะกอนของระบบผลิตน้ำประปา ทั้งนี้ อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1.77 เป็นค่าที่ใกล้เคียงสำหรับการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ระหว่าง 2.00-3.00 เป็นค่าที่เหมาะสม สำหรับวัสดุอนินทรีย์ตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยาร่วมกับด่างและผลิตภัณฑ์สามารถแข็งตัวได้รวดเร็ว ประกอบกับการเตรียมวัตถุดิบมีการบดละเอียดซึ่งผ่านการทดสอบอนุภาคคงค้างบนตะแกรงให้น้อยกว่าร้อยละ 34 จึงเป็นปัจจัยสนับสนุนให้การเกิดปฏิกิริยาได้มากยิ่งขึ้น อีกทั้งจีโอพอลิเมอร์ที่ได้ยังเป็นวัสดุทนไฟ และสามารถกักเก็บของเสียอันตรายได้ [2, 11, 13, 14, 15] ส่วนเถาเส้นใยปาล์มมีองค์ประกอบของธาตุซิลิกอนเป็นองค์ประกอบหลักมากกว่าร้อยละ 45.00 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาเถาตากปาล์มของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มของ [16, 17, 18] ที่แสดงผลในตารางที่ 2 มีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ระหว่างร้อยละ 46.00-67.72 รองลงมาเป็นองค์ประกอบของธาตุ Ca, Al, Fe, Mg, K, และ P ไม่เกินร้อยละ 10.00 และมี Cl ในเถาเส้นใยปาล์มด้วย

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของธาตุในรูปออกไซด์ของวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์โอพอลิเมอร์

Samples	Oxide compositions of the elements (%wt.wet)															
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Cl	P ₂ O ₅	ZnO	MnO	CuO	NiO	SiO ₂ / Al ₂ O ₃
WTR ¹	55.06	31.08	7.80	0.94	1.12	2.33	-	0.80	0.32	-	0.37	-	0.20	-	-	1.77
WTR ²	48.21	23.39	9.81	15.30	1.63	1.20	0.27	-	-	-	-	-	-	-	-	2.06
WTR ³	52.68	42.42	2.01	0.04	0.12	0.34	0.07	1.46	0.05	-	0.40	-	0.08	-	-	1.24
POFA ⁴	48.83	4.78	3.25	8.43	3.32	6.55	0.09	0.23	1.72	0.77	3.72	0.02	0.13	0.06	0.01	10.22
POFA ⁵	63.41	5.55	4.19	4.34	3.74	6.33	0.16	0.33	0.91	0.45	7.78	-	0.17	-	-	11.43
POFA ⁶	60.43	4.26	3.34	11.0	5.31	5.03	0.18	0.19	0.45	-	4.48	-	-	-	-	14.18

หมายเหตุ WTR¹ ตะกอนประปาผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง
(ผู้วิจัยทดสอบและใช้ในงานวิจัยนี้)

WTR² ตะกอนประปา ผู้วิจัยทดสอบในปีพ.ศ. 2552

WTR³ ตะกอนประปา จากงานวิจัยของ [21]

POFA⁴ แก๊สเส้นใยปาล์มน้ำมันผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800-1,000 องศาเซลเซียส
(ผู้วิจัยทดสอบและใช้ในงานวิจัยนี้)

POFA⁵ แก๊สเส้นใยปาล์มน้ำมัน จากงานวิจัยของ [21]

POFA⁶ แก๊สเส้นใยปาล์มน้ำมัน จากงานวิจัยของ [20]

ส่วนการจัดเรียงของอะตอมภายในโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่แสดงดังรูปที่ 2 พบว่า ตะกอนประปามีส่วนประกอบของแร่ดินเหนียวกลุ่ม Muscovite และพบกลุ่มของซิลิกอนไดออกไซด์โดยเฉพาะในรูป Quartz และโครงสร้างที่มีซิลิกอนและอะลูมิเนียม เป็นองค์ประกอบได้แก่ Aluminum Silicate Sillimanite, Aluminum Silicate Hydroxide และ Sodium Aluminum Oxide Silicate ซึ่งจะระบุสัญลักษณ์เลขแสดงตำแหน่งฟังก์ในรูปที่ 2 โครงสร้างการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 theta ระหว่าง 10-80 องศา จากภาพ พบโครงสร้างกิ่งผลึก มีลักษณะส่วนโค้งหลังเต่า

ระหว่างมุม 17-34 องศา ใกล้เคียงกับผลการศึกษาที่มีการนำแร่ดินเหนียวกลุ่ม Metakaolin ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เกิดโครงสร้างออสฐานเป็นผลมาจากกระบวนการ dehydroxylation ในกลุ่มแร่ดินเหนียว การศึกษาครั้งนี้พบฟังก์หลักที่สำคัญและสังเกตเห็นชัดเจนตลอดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 theta ระหว่างมุม 25-30 องศา โครงสร้างนี้คือ Quartz ในรูปของ SiO₂ ซึ่งการเกิดแร่ Quartz จะไม่ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน [19] ส่วนแร่ muscovite ภายในโครงสร้างประกอบด้วยแร่โพแทสเซียม ซึ่งเป็นสารประกอบของแร่ดินเหนียวกลุ่มแร่ปฐมภูมิ [20] ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ตะกอน

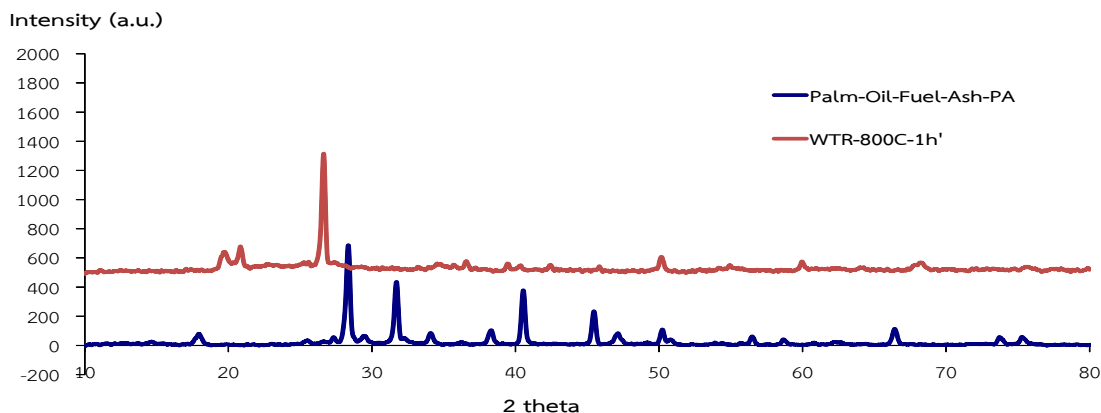
ประปาจากโรงผลิตน้ำประปาเป็นกลุ่มแร่ดินเหนียวเป็นสารอนินทรีย์อะลูมิโนซิลิเกต

รูปที่ 2 แสดงการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของเส้นใยปาล์ม ซึ่งพบว่ามีส่วนประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์โดยเฉพาะในรูป Quartz แฉกชัดเจนมากที่สุดที่มุม 2θ ประมาณ 21.88° องศา มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งซิลิกาในโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกหากผ่านกระบวนการบดละเอียดจะเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นสารปอซโซลานมากยิ่งขึ้น ซึ่งวัตถุดิบกลุ่มปอซโซลานที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง มีโครงสร้างอสัณฐาน จะสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งพบในแก้วเคลือบดำเช่นเดียวกัน [11, 21] ส่วนโครงสร้างอื่น ๆ ที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบส่วนมากจะอยู่ร่วมกับธาตุ Calcium ได้แก่ Akermanite ($\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$), Wollastonite (CaOSiO_2), Grossular ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) และร่วมกับ Potassium เช่น Potassium Aluminum Silicate นอกจากนี้พบโครงสร้างของ Aluminum Oxide, Calcium Carbonate (Calcite) [16] เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ออกไซด์ของธาตุด้วยเทคนิค XRF

นอกจากนี้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตลอดมุม 2θ ระหว่าง $10-80^\circ$ องศา พบพีกของสารประกอบ Potassium และ Silicon ในเส้นใยปาล์ม ได้แก่ Potassium Aluminum Chloride Oxide, Potassium Aluminum Silicate, Calcium Aluminum Silicate และ Silicon Oxide ในรูปของ Cristobalite และ Quartz ส่วนอะลูมิเนียม พบในรูปของ Aluminum Oxide ส่วนพีกที่

พบมากที่สุดคือรูปสารประกอบของ Calcium ได้แก่ Calcium Silicate, Calcium Magnesium Silicate, Calcium Carbonate และ Calcium Aluminum Silicate ซึ่งในกระบวนการกักเก็บเส้นใยปาล์มมีการฉีดพ่นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เพื่อลดการฟุ้งกระจายของเส้นใยปาล์ม ส่วนซิลิกอนในรูปของสารประกอบต่าง ๆ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ออกไซด์ของธาตุซิลิกอนพบในปริมาณมากที่สุดมากกว่าร้อยละ 45 [16, 17]

เมื่อพิจารณาอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ สำหรับการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ระหว่าง 2.00-3.00) ซึ่งเป็นอัตราส่วนเหมาะสมสำหรับวัสดุอินทรีย์ดั้งเดิมเพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยาร่วมกับค่าและผลิตภัณฑ์สามารถแข็งตัวได้รวดเร็ว [2, 11, 14, 15] ดังนั้น ตะกอนประปาภายหลังการกระตุ้นด้วยความร้อนและการบดละเอียดมีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1.77 จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ส่วนเส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม มีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 10.22 ซึ่งมีสัดส่วนของซิลิกอนมากที่สุด แต่ทั้งนี้มีส่วนผสมของแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 8.00 จึงสามารถนำมาเป็นส่วนผสมของการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ได้ แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการคำนวณอัตราส่วนของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ และทดสอบสมบัติเชิงกลและการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างหล่อแข็งจีโอพอลิเมอร์เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันในลำดับต่อไป

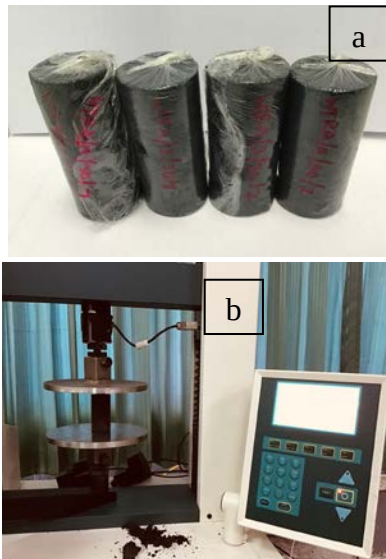


รูปที่ 2 การจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่มุม 2 theta ของวัสดุตั้งต้นเถ้าเส้นใยปาล์มและตะกอนประปา

3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค ของ จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์

การวิจัยครั้งนี้ทำการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 คงที่ในทุกชุดการทดสอบ และทำซ้ำจำนวน 5 ก่อนทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 1 องศาเซลเซียส) ภายหลังเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน นำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการบ่มที่ 7 14 28 และ 60 วัน ไปทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบรับแรงอัดแบบ Universal testing machine รุ่น H5000L/Tinius Oisen, English แสดงดังรูปที่ 3 และนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สรุปได้ดังรูปที่ 4 จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มก่อนตัวอย่างและการพัฒนากำลังอัด ซึ่งการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อประยุกต์ใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม ผลการศึกษาพบว่า ก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ในทุกชุดการทดสอบ มีแนวโน้มพัฒนากำลัง

อัดได้ตลอดอายุการบ่ม โดยสามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มช่วงต้น (7 วัน) โดยเฉพาะที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2.50 พัฒนากำลังอัดได้สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 15.05 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสามารถพัฒนากำลังอัดได้เพิ่มขึ้นที่ 60 วัน มีค่าเท่ากับ 40.56 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 3.00 เพียงเล็กน้อย แต่ทั้งนี้หากพิจารณาที่อายุต้น (7 วัน) ที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 3.00 พัฒนากำลังอัดได้น้อยกว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 2.50 และใช้วัสดุตั้งต้นมาสมน้อยกว่า การวิจัยครั้งนี้ จึงเลือกอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2.50 เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ส่วนชุดการทดสอบอื่น ๆ พัฒนากำลังอัดได้อยู่ในช่วง 5.03-6.64 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทุกอัตราส่วนผ่านเกณฑ์มาตรฐานทำก้อนหล่อแข็งของเสียอันตรายของ US.EPA. ที่กำหนดค่ารับแรงอัดไม่น้อยกว่า 3.515 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3 a. ก่อนตัวอย่าง และ b. เครื่องทดสอบรับ

แรงอัดแบบ Universal testing machine รุ่น

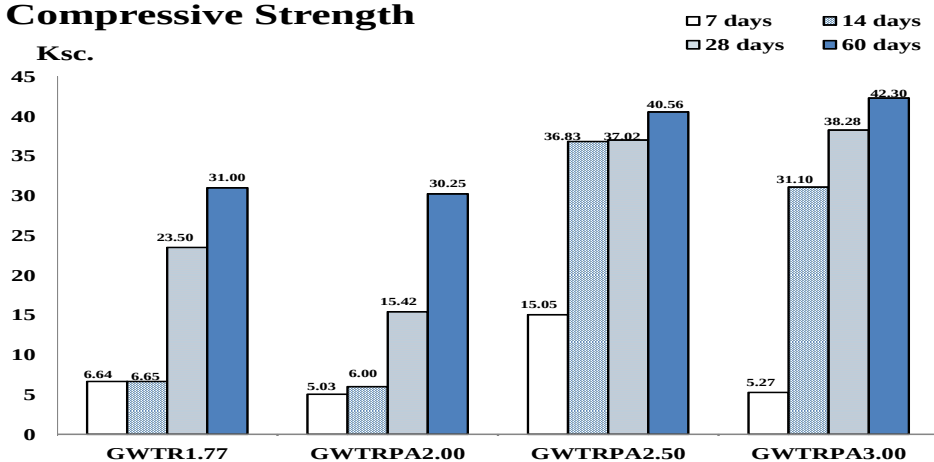
H5000L/Tinius Oisen, English

มีการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ร่วมกับซีเมนต์ผสมเถ้ากากปาล์มน้ำมัน [22] พบว่า ชุดการทดสอบที่มีการเติมเถ้ากากปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์มีกำลังอัดลดลง หากมีการบดเถ้ากากปาล์มให้มีขนาดเล็กลงหรือละเอียดมากขึ้น จะสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ ดังนั้น การเพิ่มกำลังรับแรงอัดด้วยส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานจำเป็นต้องบดอนุภาคละเอียด และขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการแทนที่ด้วยซีเมนต์ด้วย เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ [23] ทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้ากากปาล์มที่อัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 พบว่าที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีที่สุด เมื่อเพิ่มอัตราส่วนมากขึ้น พบว่า การพัฒนากำลังอัดกลับลดลง ส่วน [24] ได้ศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของ

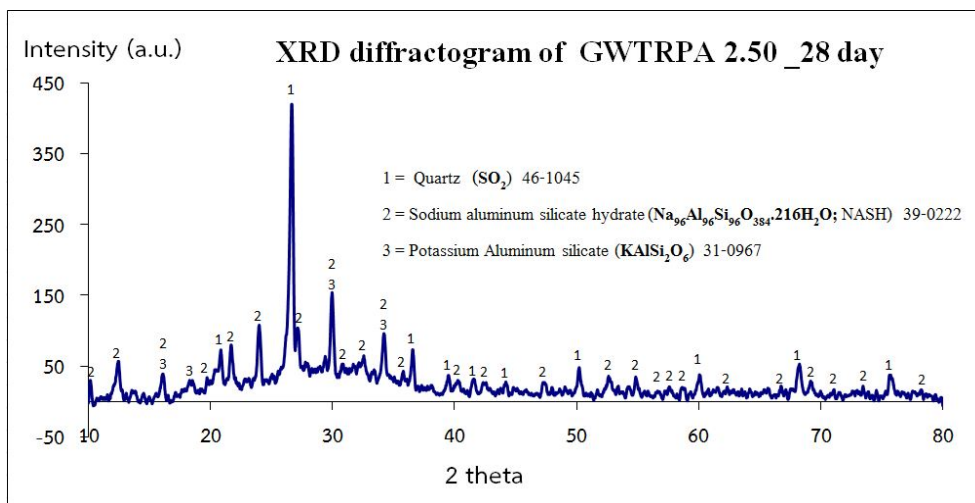
คอนกรีตผสมกับเถ้ากากปาล์มเช่นเดียวกัน พบว่า ขนาดของเส้นใยปาล์มมีอนุภาคน้อยกว่า 11 ไมครอน เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีและสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดี ซึ่งที่อัตราส่วนผสมเถ้ากากปาล์มร้อยละ 10 พัฒนากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ได้ระหว่าง 80-91 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเถ้ากากปาล์ม นอกจากนี้ การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้ากากปาล์มผสมเถ้าลอยโดยการเพิ่มอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ตั้งแต่ 4.07 -34.03 พบว่า ที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่างกันส่งผลต่อปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ต่างกัน โดยที่อัตราส่วนเท่ากับ 7.68-34.03 สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีที่สุดในช่วงต้น 3 วัน ซึ่งการเพิ่มอัตราส่วนเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาของความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในช่วงต้น ประกอบกับการบดละเอียดของซิลิกอน จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น และเปลี่ยนรูปให้อยู่ในพันธะ oligomeric silicates ได้ดียิ่งขึ้น

ส่วนผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 theta แสดงดังรูปที่ 5 สามารถเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ตลอดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ระหว่างมุม 10-80 องศา ซึ่งจะปรากฏโครงสร้างผลึก $\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384} \cdot 216\text{H}_2\text{O}$ (Sodium Aluminum Silicate Hydrate; NASH) ตรงกับเลข pattern 39-0222 นอกจากนี้ ณ ตำแหน่งนี้จะเกิดการแทนที่ผลึก Quartz ด้วยฟิกของ NASH เป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย NaOH ตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเป็นตัวชะละลายกับสารอะลูมิโนซิลิเกตในตะกอนประปาและเส้นใยปาล์ม ส่วนการคงอยู่ของโครงสร้างผลึก Quartz เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาอาจจะไม่ทั่วถึงและไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง

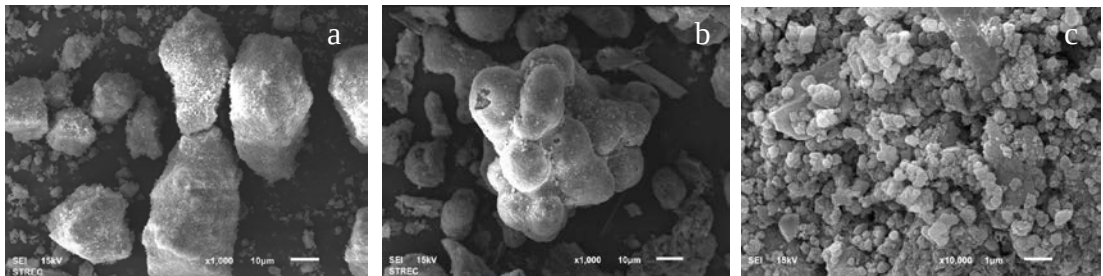
Compressive Strength



รูปที่ 4 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์



รูปที่ 5 โครงสร้างผลึกของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ระหว่างตะกอนประปาและเส้นใยปาล์มที่อัตราส่วน 2.50 (อายุการบ่ม 28 วัน) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่มุม 2 theta



รูปที่ 6 ลักษณะพื้นผิวภายในของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคภาพถ่าย SEM a ตะกอนประปาก่อนทำปฏิกิริยา b เถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยา และ c จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จาก ตะกอนประปาและเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน

ปฏิกิริยา [10, 11, 12] การศึกษาครั้งนี้ยังพบ โครงสร้างผลึกของ KAlSi_2O_6 (Potassium Aluminum Silicate) ตรงกับเลข pattern 31-0967 อาจจะเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างวัสดุตั้งต้นตะกอนประปาและเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน ซึ่งเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมันพบออกไซด์ของธาตุโพแทสเซียมตั้งต้นร้อยละ 6.55 ภายหลังจากทำปฏิกิริยากับ ดังจะพบ โครงสร้างผลึก ได้แก่ Halite (NaCl), Quartz (SiO_2) Sylvite (KCl) เช่นเดียวกับการศึกษาครั้งนี้ และพบฟิสิกอื่นๆ โดยเฉพาะกลุ่มของ Ca ดังนี้ CaSO_4 , $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ และ CaCO_3 นอกจากนี้พบว่า ชุดการทดสอบที่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงจะแปรตามการเพิ่มจำนวน CaCO_3 ในอัตราส่วนผสมที่มากกว่า

ส่วนลักษณะพื้นผิวภายใน โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ ด้วยเทคนิคภาพถ่าย SEM ของการศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า ภายหลังจากทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และวัสดุตั้งต้น (ตะกอนประปาและเถ้าเส้นใยปาล์มน้ำมัน) จะเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวและรูปทรงผลึกในลักษณะเดียวกันในทุกชุดการทดสอบ ลักษณะพื้นผิวของวัสดุจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะเป็นเจลหรือผลึกมีรูปทรงแตกต่างกัน ซ้อนทับหลายชั้น กระจัดกระจายทั่วทั้งก้อนจีโอพอลิเมอร์ สลับกับบางส่วนยังคงปรากฏเป็นช่องโหว่หรือรูพรุน มีทั้งผิวหน้าเรียบและขรุขระ ซึ่งในสภาวะการเกิดปฏิกิริยากับด่าง อะตอมของซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะถูกสารละลายค้างชะละลายออกมาบริเวณผิวหน้าอนุภาค ดังปรากฏให้เห็นเป็นพื้นผิวขรุขระ ส่วนภายในโครงสร้างอะลูมิเนียมซิลิเกตของวัสดุตั้งต้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างประจุลบของอะลูมิเนียมจับกับประจุบวกของอะตอมโซเดียม ไอออนทั้งสองถูกเคลื่อนย้ายและจัดเรียงตัวใหม่ เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ที่ยาวขึ้น จนกลายเป็นโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่แข็งแรงกว่าเดิม ซึ่งสังเกตจากลักษณะพื้นผิวที่มีการซ้อนทับกันหนาแน่น กระจายทั่วพื้นผิวของก้อนจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งปรากฏเด่นชัดเมื่อ

อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเข้าสู่ภาวะสมดุล

4. สรุปผล

การวิจัยครั้งนี้สามารถนำตะกอนน้ำประปาและเส้นใยปาล์มน้ำมันมาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ได้ โดยแปรผลจากการพัฒนากำลังรับแรงอัด และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของก้อนหล่อแข็งจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRF XRD และ SEM ที่อายุการบ่มสูงสุด 60 วัน

สรุปได้ว่า อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เท่ากับ 2.50 สามารถเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ เกิดผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเท่ากับ 40.56 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนการใช้เทคนิค XRD และ SEM แสดงการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างอะลูมินอซิลิเกต สามารถบ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันและผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ได้ กล่าวคือ พบโครงสร้างผลึกของ

สารประกอบ Sodium Aluminum Silicate Hydrate ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}\cdot 216\text{H}_2\text{O}$; NASH) แทนที่ฟิสิกของ Quartz และ Potassium Aluminum Silicate (KAlSi_2O_6) ตลอดจนการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ส่วนเทคนิค SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของจีโอพอลิเมอร์ มีลักษณะเป็นเจลหรือผลึกมีรูปร่างแตกต่างกัน ซ้อนทับหลายชั้น การจัดกระจายตัวทั้งก่อนจีโอพอลิเมอร์ สลับกับบางส่วนยังคงปรากฏเป็นช่องโหว่หรือรูพรุน มีทั้งผิวหน้าเรียบและขรุขระ มีลักษณะแตกต่างจากวัสดุตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยากับค่า

ดังนั้น การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาร่วมกับเส้นใยปาล์มน้ำมันจึงสามารถพัฒนา กำลังรับแรงอัดได้ เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแสดงถึงการเกิดผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ หากมีการประยุกต์ใช้ในการกักเก็บสารอันตรายควรมีการศึกษาในลำดับต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณแหล่งทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานประสานงานโครงการวิจัยการพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานความหลากหลายทางชีวภาพ ปีงบประมาณ 2560 และขอกราบขอบพระคุณรศ.ดร. สุวิมล อศวพิศิษฐ ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่สนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเรียบร้อย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pollution control department, "State of Solid Waste and Hazardous Waste, and Solid Waste and Hazardous Waste Management", Available: http://www.pcd.go.th/infoserv/haz_report.html#top, 2 July 2016. (in Thai)
- [2] J. Davidovits, Geopolymer Chemistry & Applications, 3rd ed, Institute Geopolymer, 16 rue Galilee, Saint-Quentin France, Institut Geopolymere, pp. 585. 2008.

- [3] P. Duxson, A. Fernandez-Jimenez, J. Provis, G. Lucky, A. Palomo and J. van Deventer, "Geopolymer Technology: The Current State of The Art" *J. Mater. Sci.*, 42, 2007a, pp. 2917-2933.
- [4] P. Duxson, S. W. Mallicoat, G. C. Lukey, W. M. Kriven and J.S.J. van Deventer, "The Effect of Alkali and Si/Al Ratio on the Development of Mechanical Properties of Metakaolin-Based Geopolymer", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng.*, 292, 2007b, pp. 8-20.
- [5] A. Fernández-Jiménez, M. Monzó, M. Vicent, A. Barba and A. Palomo "Alkaline Activation of Metakaolin-Fly Ash Mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements", *Microporous and Mesoporous Materials*, 108, 2008, pp. 41-49.
- [6] J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, "Introduction to Geopolymers", *Geopolymers Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, TJ International limited, Padstow, Cornwall, UK., 2009, pp. 1-6.
- [7] A. Buchwald, M. Hohmann, K. Posern and E. Brendler, "The Suitability of Thermally Activate Illite/Smectite Clay as Raw Material for Geopolymer Binders", *Applied Clay Science*, 46, 2009, pp. 300-304.
- [8] K. J. D. MacKenzie, "Utilisation of non-Thermally activated clays in the production of geopolymer, Geopolymers structure, processing, properties and industrial applicatrions", New York Washington, DC: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC. 2009.
- [9] A. Hajimohammadi, J.L. Provis and J. S.J. van Deventer, "The Effect of Silica Availability On the Mechanism of Geopolymerisation", *Cement and Concrete Research*, 41, 2011, pp. 210-216.
- [10] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, "Cement, Pozzolan and Concrete" SCG company, Bangkok, 2009. (in Thai)
- [11] N. Waijarean, S. Asavapisit, and K. Sombatsompop, "Strength and Microstructure of Water Treatment Residue-Based Geopolymers Containing Heavy Metals", *Construction and Building Materials*, 50, 2014, pp. 486-491.
- [12] N. Waijarean, S. Asavapisit, and K. Sombatsompop and K. J. D. MacKenzie., "The Effect of the Si/Al Ratio on the Properties of Geopolymers Prepared from Water Treatment Residue (WTR) Containing Heavy Metals", *The 8th GMSARN Int. Conf. 2013 on Green Growth in GMS: Energy, Environmental and Social Issues*, 18-20 December 2013, Mandalay, Myanmar.

- [13] N. Waijarean, S. Asavapisit, and K. Sombatsompop and K. J. D. MacKenzie., "The Effect of the Si/Al Ratio on the Properties of Water Treatment Residue (WTR) –Based Geopolymers", International Conference on Traditional and Advanced Ceramic 2013 (ICTA2013), 11-13 September 2013, Bangkok, Thailand.
- [14] R. A. Fletcher, K. J. D. MacKenzie and C. L. Nicholson, "The Composition Range of Aluminosilicate Geopolymers", J. Eur Ceram. Soc., 25, 2005, pp. 1471-1477.
- [15] C. Montes, "Development of a Geopolymer-Based Cementitious Coating for the Rehabilitation of Buried Concrete Infrastructure. A Dissertation for the Degree Doctor of Philosophy", College of engineering and science, Louisiana Tech University, U.S.A. 2010.
- [16] M. Yusuf, M. Johari, Z. Ahmad, M. Maslehuddin, "Strength and Microstructure of Alkali-Activated Binary Blended Binder Containing Palm Oil Fuel Ash and Ground Blast-Furnace Slag", Construction and Building Materials, 52, 2014, pp. 504-510.
- [17] Kabir et al 2017 S.M. A. Kabir, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, S. Yusoff, A. Sharmin and I. I. Bashar, "Performance evaluation and some durability characteristics of environmental friendly palm oil clinker based geopolymer concrete", Journal of cleaner Production, 161, 2017, pp. 477-492.
- [18] I.I. Bashar, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat and A. Islam, "Development of Sustainable Geopolymer Mortar using Industrial Waste Materials" materialstoday proceedings, 3, 2016, pp. 125-199.
- [19] M.R. Wang, D.C. Jia, P.G. He and Y. Zhou, "Influence of Calcinations Temperature of Kaolin on the Structure and Properties of Final Geopolymer", Material Letters, 64, 2010, pp. 2551-2554.
- [20] R.E. Grim, "Clay Mineralogy", 2nd ed, McGraw-Hill, Inc. printed in the United States of America. 1968
- [21] N. H. Rodríguez, S. Martínez-Ramírez, M.T. Blanco-Varala, M. Guillem, J. Puig, E. Larrotcha and J. Flores, "Evaluation of Spray-Dried Sludge From Drinking Water Treatment Plants as a Prime Material for Clinker Manufacture", Cement & Concrete Composites, 33, 2011, pp. 267-275.

- [22] E.Khankhaje, M.W. Hussin, J.Mirza, M. Rafieizonooz, M.N.M.Warid, “On blended cement and geopolymer concretes containing palm oil fuel ash” *Materials & Design*, 89, 2016, pp. 385-398.
- [23] N. Ranjber, M. Mehrali, A. Behnia, U. J. Alengaram and M.Z. Jumaat “Compressive Strength and Microstructural Analysis of Fly ash/Palm Oil Fuel Ash Based Geopolymer Mortar”, *Materials and Design*, 59, 2014, pp. 532-539.
- [24] E. Diaz-Loya, N. Allouche, E. Eklund, S.R. Joshi. and A. Kupwade-Patil, “Toxicity Mitigation and Solidification of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash Using Alkaline Activated Coal Ash”, *Waste Management*, 32, 2012, pp. 1521-1527.