

ผลกระทบของการเติมโดโลไมต์ต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ฐานกากตะกอนอะลูมิเนียม
The Effects of Dolomite Addition on the Properties of Aluminium Dross
Residue-Based Geopolymer Material

นางสาวธัชวณี พึ่งพา¹ พัทธ์ เหล่ารัตนกุล² และเบญญา เชิดหิรัญกร^{1*}

Haswanee Phungpha¹, Pitak Laoratanakul², and Benya Cherdhirunkorn^{1*}

สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์¹

Division of Materials and Textiles Technology, Faculty of Science and Technology,
Thammasat University¹

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA)²

National Metal and Materials Technology Center (MTEC), National Science and Technology
Development Agency (NSTDA)²

Email: benya@tu.ac.th

Received : April 2, 2025

Revised : November 18, 2025

Accepted : December 1, 2025

บทคัดย่อ

กากตะกอนอะลูมิเนียมเป็นของเสีย จากกระบวนการรีไซเคิลตะกอนอะลูมิเนียม ซึ่งมีก่ประสบปัญหาการกำจัดที่มีต้นทุนสูงและการลักลอบทิ้ง และผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีพบว่า มีปริมาณสารประกอบของอะลูมิเนียมสูง และมีซิลิกาเล็กน้อย ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากวัตถุดิบหลักคือกากตะกอนอะลูมิเนียม โดยเติมโดโลไมต์ในช่วง 0 ถึง 30% โดยน้ำหนัก และใช้สารละลายอัลคาไลน์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา โดยจะใช้สารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 7 โมลาร์ และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในอัตราส่วน 1:3 และกำหนดอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งที่ 0.5 ผลการทดลองพบว่า กากตะกอนอะลูมิเนียมก่อให้เกิดก๊าซแอมโมเนียจากการทำปฏิกิริยาของ AlN และน้ำ หรือ AlN และ NaOH ทำให้วัสดุมีรูพรุนจำนวนมาก และมีกำลังรับแรงอัดไม่มาก อย่างไรก็ตามการเติมโดโลไมต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ โดยค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดพบในวัสดุที่เติมโดโลไมต์ 10% แต่เมื่อเติมในปริมาณ 20-30% กลับส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้ ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเฟส โครงสร้างจุลภาค และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิคการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงอินฟราเรด ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดง

ให้เห็นว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์ฐานกากตะกัณอะลูมิเนียมมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานด้านวัสดุมวลเบาได้

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์ กากตะกัณอะลูมิเนียม โดโลไมท์

ABSTRACT

Aluminium Dross (AD) is a waste product from the aluminium recycling process, which often faces high disposal costs and illegal dumping issues. The chemical composition analysis revealed a high amount of aluminium compounds and a small amount of silica in AD. In this research, the development of a geopolymer using AD as the main raw material was conducted. Dolomite in the range of 0-30 wt% was added as an additive. In the production of geopolymers, the mixed alkaline solution used as a reaction activator was the mixture of sodium hydroxide (NaOH, 7 M) and sodium silicate (Na_2SiO_3) in a ratio of 1:3. The solid raw materials and alkaline liquid were mixed at a liquid-to-solid ratio of 0.5. The results show that AD residue generates ammonia gas, resulting in a highly porous material with low compressive strength. However, the addition of dolomite enhances material strength as the highest compressive strength was obtained in the sample with 10 wt% dolomite. Further additions of dolomite (20-30 wt%) into the mixtures resulted in lower strength. Additionally, the phase structure, microstructure, and chemical structural changes were investigated using XRD, SEM, and FTIR techniques, respectively. The results indicated that this AD based geopolymer with 10 wt% dolomite established reasonable properties for the lightweight material application.

Keywords: Geopolymer, Aluminium dross residue, Dolomite

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อม และภาวะโลกร้อนเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable development) หนึ่งในปัญหาคือการที่โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิต ซึ่งในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างอย่างปูนซีเมนต์ ก็เป็นหนึ่งใน

อุตสาหกรรมที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก ถึงแม้ว่าปูนซีเมนต์จะเป็นวัสดุที่แข็งแรง และเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการก่อสร้าง แต่การผลิตปูนซีเมนต์ นั้นไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานสูงในการเผาวัตถุดิบ ซึ่งอุณหภูมิในการเผาคือประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส และในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเผา ยังเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ปรากฏการณ์เรือนกระจก และฝนกรดอีกด้วย นอกจากนั้นยังส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นสิ่งแวดล้อม มนุษย์และสัตว์อีกด้วย โดยในการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกมาถึงประมาณ 1 ตันด้วย (Poonyakanok, 2023) ดังนั้น จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอการวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งหนึ่งในวัสดุที่สามารถนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ได้ก็คือ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymers) ซึ่งสามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการใช้พลังงานได้อย่างมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ (Shobeiri, 2021; Stafford, 2016; McLellan, 2011) นอกจากนั้นยังมีขั้นตอนการผลิตง่ายไม่ซับซ้อน และไม่ทำลายหรือก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ซึ่งจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) (Xu, 2005) ซึ่งมีงานวิจัยรายงานว่า เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ โดยในการผลิตใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการชะละลายพันธะของซิลิกาและอะลูมินา ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในการเชื่อมต่อกันระหว่าง Si Al และ O หรือเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยวัตถุดิบหลักที่ใช้จะต้องมีปริมาณซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) สูง ซึ่งสามารถพบได้ในวัสดุธรรมชาติ เช่น ดิน และวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือการเกษตร เช่น เถ้าลอย (Fly ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และตะกอนเตาถลุงเหล็ก (Blast Furnace Slag) ผลพลอยได้จากการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าจากเตาหลอม (Rashad, 2013)

ถึงแม้ว่า โดยทั่วไปวัสดุจีโอพอลิเมอร์จะใช้วัตถุดิบตั้งต้น ที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินา แต่ในงานวิจัยนี้ สนใจศึกษาการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมผสมโดโลไมท์ ซึ่งในวัสดุทั้งสองนี้มีปริมาณซิลิกาค่อนข้างน้อย และมีปริมาณสารประกอบอะลูมิเนียมสูง อย่างไรก็ตาม ในการผลิตโดยทั่วไปจะมีการใช้สารละลายอัลคาไลน์ได้แก่ NaOH และ Na_2SiO_3 ในการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งหากใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณซิลิกาน้อย Si ที่จะดึงมาใช้ในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ จะได้มาจาก Na_2SiO_3 จึงอาจจะต้องเพิ่มปริมาณ Na_2SiO_3 สูงกว่าการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากวัตถุดิบที่มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบ

กากตะกอนอะลูมิเนียม เป็นเศษเหลือทิ้งที่ต้องกำจัดจากโรงงานรีไซเคิลโลหะอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีจำนวนมากในประเทศไทย เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียมจัดว่าเป็นวัสดุหนึ่งที่ยืนยมนิยมนำมาใช้เนื่องจากสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง ไม่เกิดสนิม มีการนำอะลูมิเนียมมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องครัว หรือเฟอร์นิเจอร์ ก็ตาม โดยมีหลายงานวิจัยที่ได้นำกากตะกอนอะลูมิเนียมมาใช้เป็นวัตถุดิบ ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เช่น งานวิจัยของ Pimchanok Puksisuwon และคณะ ได้ทำการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์

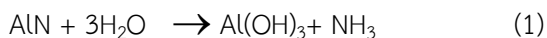
จากกากตะกอนอะลูมิเนียมและเถ้าขานอ้อย กำหนดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนระหว่าง $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 1 : 3 และ 1 : 4 และใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 0.25 ซึ่งมีของเหลวในปริมาณน้อย เพื่อลดกลิ่นของแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของกากตะกอนอะลูมิเนียมกับน้ำ และขึ้นรูปด้วยการอัดพบว่า การเติมกากตะกอนอะลูมิเนียม 50% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดสอบความแข็งแรงที่ดีที่สุด (Puksisuwan, 2018) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ยังไม่ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่มีปริมาณกากตะกอนอะลูมิเนียมมากกว่า 50%

งานวิจัย ของ Mohamed Hamdy Elseknidy ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล และความทนทานของส่วนผสมคอนกรีตที่ประกอบด้วยเถ้าลอย ตะกอนอะลูมิเนียม (Aluminium dross) และหินฝุ่นพบว่า เถ้าลอย 10% ตะกอนอะลูมิเนียม 10% และหินฝุ่น 20% มีสมบัติที่ดีกว่าคอนกรีตมาตรฐาน โดยมีค่าความแข็งแรงอัด (Compressive strength) 35 MPa และความแข็งแรงดัด (Flexural strength) 7 MPa [Elseknidy MH, 2020] และงานวิจัยของ Thye Foo Choo ได้นำตะกอนอะลูมิเนียม (Aluminium dross) กับเถ้าลอย มาเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเซรามิกมัลติโฟรพอร์พบว่ามีสูตรที่เหมาะสมที่สุด คือ เถ้าลอย 80% กากตะกอนอะลูมิเนียม 20% (Choo, 2020)

นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยต้องการพัฒนาวัสดุทางเลือกใหม่เป็นวัสดุสีเขียว (Green materials) ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น งานวิจัยของ J. O Dirisu ได้พัฒนาวัสดุคอมโพสิตสำหรับผ้าเปตาที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยใช้เปลือกไข่ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ปอแก้ว และตะกอนอะลูมิเนียมประกอบกันเป็นโครงสร้าง ผลการวิจัยได้ผลิตภัณฑ์ผ้าเปตาที่มีความสามารถในการระบายความร้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Dirisu, 2019) และมีงานวิจัยจำนวนมาก ได้ทำการพัฒนาวิธีการนำวัสดุเหลือทิ้งต่าง ๆ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เช่น ตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก (Blast furnace slag) (Rashad, 2013) โดยวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูง [Aziz I, 2019] ทนต่ออุณหภูมิและสารเคมี (Thunuguntla, 2018) และน่าจะนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้

กากตะกอนอะลูมิเนียมในงานวิจัยนี้ ได้นำมาจากโรงงานรีไซเคิลตะกอนอะลูมิเนียม (บริษัทท้อปไฟว์แมนูแฟคเจอร์ จำกัด) โดยเป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งเป็นการนำตะกอนอะลูมิเนียมมาแยกเป็นส่วนที่เป็นก้อนขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็กเป็นฝุ่น โดยตะกอนก้อนใหญ่จะมีส่วนที่เป็นโลหะอะลูมิเนียมอยู่มาก ทำให้สามารถนำกลับไปผ่านการหลอมใหม่ และแยกโลหะอะลูมิเนียมออกมาได้ แต่ส่วนที่เป็นก้อนขนาดกลาง และเล็กมีโลหะอะลูมิเนียมอยู่น้อยมาก และไม่คุ้มกับการลงทุนนำไปหลอมใหม่ ดังนั้น โรงงานรีไซเคิลอะลูมิเนียมจากตะกอนจะต้องจ้างกำจัดเศษเหลือทิ้งตะกอนในส่วนนี้ โดยโรงงานต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ในการจ้างกำจัดราคา 3-5 บาทต่อกิโลกรัม หรือประมาณมากกว่า 2 ล้านบาทต่อปี (ข้อมูลจากบริษัทท้อปไฟว์ แมนูแฟคเจอร์ จำกัด) ผู้ประกอบการบางรายอาจทำการกำจัดแบบไม่ถูกต้องหรือขาดความรอบคอบนั้น ตะกอนอะลูมิเนียมจะสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำ ทำให้เกิดกลิ่นฉุนรุนแรงของแอมโมเนีย ดังปฏิกิริยาในสมการ (1) ส่งผลให้มีอาการแสบจมูก และเป็นอันตรายต่อระบบหายใจอีกด้วย ดังนั้น จะต้องใช้ความระมัดระวังสูงในการกำจัด

ปัญหาขยะตะกอนอะลูมิเนียมจึงเป็นปัญหาที่ควรจะได้รับการแก้ไข อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้งานกากตะกอนอะลูมิเนียมอยู่ไม่มาก โดยงานวิจัยส่วนมากทำการวิจัยโดยการนำกากตะกอนอะลูมิเนียมมาใช้ในการผลิตร่วมกับปูนซีเมนต์ หรือใช้ในการผลิตเซรามิก



จากสมการ (1) พบว่า เมื่อเฟส AlN ในกากตะกอนอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดเจล $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งเป็นของแข็ง นอกจากนั้นเฟสที่เป็นสารประกอบของอะลูมิเนียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดเป็นเฟส Boehmite หรือ gibbsite เกิดการแข็งตัวคล้ายซีเมนต์ได้ หรือเมื่อมีการเติม NaOH และ Na_2SiO_3 และสามารถเกิดโครงสร้างพันธะของ Al-O-Si ได้ โดย Si มาจาก Na_2SiO_3

ในงานวิจัยนี้สนใจนำวัตถุดิบอีกตัวที่นำมาใช้ผสมกับกากตะกอนอะลูมิเนียม ก็คือโดโลไมท์ สูตรเคมีคือ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (ชื่อเต็ม แคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต) ลักษณะจะเป็นผงละเอียดสีขาว มีน้ำหนักและมีความหนาแน่นสูง โดโลไมท์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) จะประกอบไปด้วย CaO ด้วย 38% แล้วและ MgO 14% ส่วนองค์ประกอบทางเคมีในส่วนของ Si และ Al พบในปริมาณที่น้อย (Aizat, 2017) ตัวอย่างงานวิจัยที่นำโดโลไมท์มาใช้ในวัสดุโพลิเมอร์ เช่น งานวิจัยของ Y. Zarina และคณะ ได้ผลิตวัสดุโพลิเมอร์จากเถ้าหม้อไอน้ำ (Boiler Ash) ที่ผสมโดโลไมท์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) 1-5% โดยน้ำหนัก โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 12 โมลาร์ ผลการทดลอง พบว่า การเติมโดโลไมท์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) 4% ลงในจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะมีกำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 7.3 MPa (Zarina, 2014) งานวิจัยของ Yip และคณะ ผลของการเติมโดโลไมท์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ลงในวัสดุโพลิเมอร์ฐานดินขาวพบว่า การเติมโดโลไมท์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ประมาณ 20% ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการอัดตัวของวัสดุโพลิเมอร์ได้ [Yip CK, 2008] นอกจากนั้นคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้มีการศึกษาโดยการนำโดโลไมท์มาผลิตเป็นกระเบื้องโดยการอัด และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,050-1,090 องศาเซลเซียสจะช่วยให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น (Tonnyopas, 2011) และงานวิจัยของ Youssef Arkame และคณะ ได้ศึกษาเซรามิกรูปทรงจากโดโลไมท์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ที่มีการเติมตะกอนอะลูมิเนียม และนำไปเผาที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน 1200-1300 องศาเซลเซียส เพื่อดูโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน [Y.Arkame, 2023] นอกจากนั้น จากงานวิจัยพบว่า การเติมโดโลไมท์ในจีโอโพลิเมอร์ฐานเถ้าลอยเป็นแหล่งให้ Ca และ Mg ซึ่งสามารถเกิดเป็นเจล C-S-H หรือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ M-S-H หรือ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ได้ ซึ่งมีคุณสมบัติในการช่วยยึดเหนี่ยวโครงสร้างเหมือนในซีเมนต์ทั่วไป จึงเป็นส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้ (Aizat, 2018; Aizat, 2020) การเติมโดโลไมท์ผสมกับ GGBS (Ground Granulated Blast furnace Slag) ในอัตราส่วน 30 : 70 โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในช่วงต้นได้ดีกว่า ปูนซีเมนต์ โดยโดโลไมท์ทำหน้าที่เติมเต็มหรือแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของจีโอโพลิเมอร์ช่วยลดความพรุนตัว

ในงานวิจัยนี้ จึงได้ศึกษากระบวนการผลิต และสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากการผสมกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์ โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ผสมระหว่าง NaOH และ Na_2SiO_3 เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรชัน และศึกษาสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์ โดยทดสอบหาเวลาในการเซ็ตตัวของส่วนผสม ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด โครงสร้างเฟส โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของชิ้นงานที่ผลิตได้

วิธีการดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบส่วนของแข็งและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ

วัตถุดิบหลักในส่วนของแข็งได้แก่ กากตะกอนอะลูมิเนียม (AD) ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมรีไซเคิล บริษัททอปไฟว์แมนูแฟคเจอร์ จำกัด และผงโดโลไมท์ (DO) พบว่า กากตะกอนอะลูมิเนียมมีขนาดเล็ก และเป็นผงละเอียด และหยาบปะปนกัน มีสีดำเทา และมีกลิ่นฉุนซึ่งอาจเกิดจากการที่ส่วนประกอบของกากตะกอนที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับน้ำในอากาศทำให้เกิดแก๊สแอมโมเนีย ส่วนโดโลไมท์ลักษณะเป็นผงสีขาว มีความละเอียดมากกว่า โดยจะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างเฟส และโครงสร้างทางเคมีของกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซน (X-ray fluorescence, XRF) ด้วยเครื่อง Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometers (WDXRF) ยี่ห้อ Bruker รุ่น S6 Jaguar เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D2 Phaser และเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR) ยี่ห้อ SHIMADZU IR Spirit รุ่น QATR-S

การเตรียมสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline solution)

ในงานวิจัยนี้ส่วนผสมของเหลว ซึ่งเป็นสารละลายอัลคาไลน์ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 7 โมลาร์ (องค์ประกอบหลักใน NaOH ได้แก่ NaOH 99%, Na_2CO_3 0.5%, NaCl 0.04, Fe_2O_3 0.005%) โดยนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้ มาผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , Technical grade : 42-43 Baume) โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง NaOH : Na_2SiO_3 เท่ากับ 1 : 3 กวนส่วนผสมสารละลายเข้าด้วยกันและตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำมาใช้งาน

การผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน

กระบวนการผลิตชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ เริ่มจากเตรียมวัตถุดิบโดยนำกากตะกอนอะลูมิเนียมมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 150 (105 μm) เพื่อนำสิ่งปนเปื้อนในกากตะกอนอะลูมิเนียมที่มีขนาดใหญ่ ออกก่อน ผสมกับส่วนของโดโลไมท์ที่มีความละเอียดอยู่แล้วไม่ต้องนำมาร่อนผ่านตะแกรง โดยปริมาณส่วนผสมของแข็งเป็นดังตารางที่ 1 โดยใช้โดโลไมท์ 0 ถึง 30 % โดยน้ำหนัก ซึ่งการผสมทำภายใน

ผู้ดูแลวันเพื่อความปลอดภัย เนื่องจากการผสมกากตะกอนอะลูมิเนียมกับของเหลวที่มีน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการ (1) เกิดก๊าซแอมโมเนีย

ตารางที่ 1 ส่วนผสมวัตถุดิบของแข็ง

ชื่อชิ้นงาน	กากตะกอนอะลูมิเนียม (AD) (% โดยน้ำหนัก)	โดโลไมต์ (DO) (% โดยน้ำหนัก)
0DO	100	0
10DO	90	10
20DO	80	20
30DO	70	30

หลังจากผสมส่วนผสมของแข็ง (Solid) จนเข้ากันดีแล้ว จึงนำมาผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ (Liquid) โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง (L/S) เท่ากับ 0.5 (โดยน้ำหนัก) จากนั้น กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเทลงแม่แบบขนาด $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ และ $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ สำหรับการทดสอบสมบัติต่าง ๆ เมื่อชิ้นงานเซตตัวแข็งดีแล้ว ทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกใสเพื่อบ่มชิ้นงาน โดยวางไว้ในอุณหภูมิห้อง เพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันดำเนินต่อไปจนสมบูรณ์ โดยจะทำการบ่มที่ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

การวิเคราะห์ทดสอบชิ้นงาน

การทดสอบการเซตตัวของชิ้นงาน (Setting time)

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ การทดสอบเพื่อหาเวลาในการเซตตัว (Setting time) ด้วยเครื่อง VICAT ยี่ห้อ Humboldt รุ่น H-3050 เริ่มการทดสอบด้วยการผสมชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์โดยนำส่วนผสมของแข็งผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ คนให้เข้ากัน แล้วเทใส่แม่แบบที่เตรียมไว้ ทดสอบโดยการวัดระยะขมของเข็มไวแคตในชิ้นงาน ทุก ๆ 2 นาที จนชิ้นงานเซตตัวและเข็มไม่สามารถจมลงในชิ้นงานได้

การทดสอบความหนาแน่น (Bulk density)

ความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ ถูกทดสอบเมื่อบ่มชิ้นงานไว้แล้ว 28 วัน โดยชั่งน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง และวัดขนาดของชิ้นงานเพื่อนำมาคำนวณหาปริมาตร แล้วคำนวณหาความหนาแน่นตามสมการ (1) ดังนี้

$$\text{Bulk Density} = \frac{M}{V} \quad (1)$$

เมื่อ M คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

V คือ ปริมาตรตัวอย่าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

หลังจากขึ้นงานจีโอพอลิเมอร์ถูกบ่มครบ 28 วัน จึงนำตัวอย่างมาแช่ในภาชนะที่มีน้ำสะอาดทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาเช็ดให้ยู่สภาพอิมตัวผิวแห้ง นำมาชั่งเป็นค่าน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วชั่งน้ำหนักแห้ง และคำนวณหาปริมาณการดูดซึมน้ำตามสมการ (2) ดังนี้

$$\% \text{Water Absorption} = \frac{W_S - W_D}{W_D} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_S คือ น้ำหนักตัวอย่างอิมน้ำชั่งในอากาศ (กรัม)

W_D คือ น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)

การทดสอบสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการทดสอบคือ กำลังอัด (Compressive strength) ของขึ้นงาน โดยใช้เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine ยี่ห้อ Tinius Olsen รุ่น H50KT) การทดสอบกำลังอัดของขึ้นงานขนาด $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ โดยทำการทดสอบขึ้นงานหลังการบ่มเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน เพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังอัด ในการทดสอบใช้อัตราเร็วในการอัดตัวอย่างคือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างแตก และคำนวณค่ากำลังอัดของตัวอย่าง ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\text{Compressive strength} = \frac{F}{A} \quad (3)$$

เมื่อ F คือ ค่าแรงอัด (นิวตัน)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขึ้นงานที่ตั้งฉากกับแนวแรงอัด (ตารางเมตร)

การวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของขึ้นงาน

การทดสอบเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของเฟสของขึ้นงานตัวอย่าง 0DO 1DO 2DO และ 3DO หลังบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD, ยี่ห้อ Bruker รุ่น D2 Phaser) โดยในการทดสอบจะใช้รังสีเอกซ์ $\text{CuK}\alpha$ วัดในช่วงมุม (2θ) เท่ากับ 10 ถึง 80 องศา บันทึกค่าทุก ๆ 0.02 องศา และใช้ Time per step เท่ากับ 0.2 วินาที

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวรอยแตกของชิ้นงาน 10DO 20DO และ 30DO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7800F Prime)

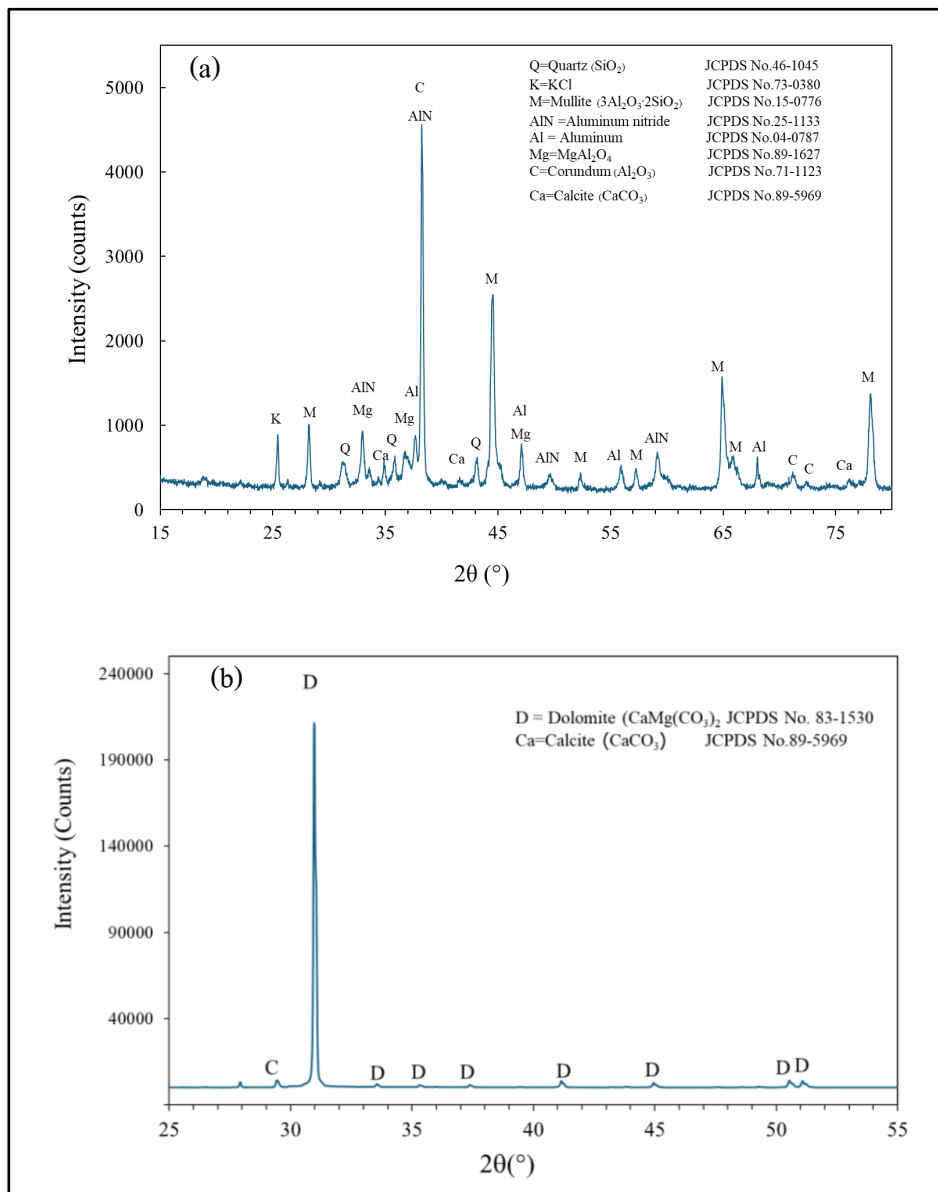
การวิเคราะห์โครงสร้างพันธะเคมีของชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มสเปกโตรสโกปี (Fourier transform Infrared Spectrometer, FTIR, ยี่ห้อ SHIMADZU IR Spirit รุ่น QATR-S) โดยวิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่น $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบด้วยเทคนิค XRD XRF และ FTIR

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของกากตะกอนอะลูมิเนียม (AD) และโดโลไมท์ (DO) ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD : X-ray diffraction) แสดงในภาพประกอบ 1 (a) และ (b) ตามลำดับ พบว่า กากตะกอนอะลูมิเนียมปรากฏเฟสหลักคือ อะลูมินัมไนไตรด์ (AlN) และมัลไลต์ ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) นอกจากนั้นยังพบเฟสของ ซิลิกา (SiO_2) แมกนีเซียมอะลูมิเนียมสปิเนล (MgAl_2O_4) อะลูมิเนียม (Al) แคลไซต์ (CaCO_3) และ โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ในกากตะกอนอะลูมิเนียมอีกด้วย ส่วนโดโลไมท์ (DO) ปรากฏเฟสหลักคือ โดโลไมท์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) และพบเฟสของแคลไซต์ (CaCO_3) เล็กน้อย



ภาพประกอบ 1 ผลวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (a) ภาาตะกอนอะลูมิเนียม และ (b) โดโลไมท์

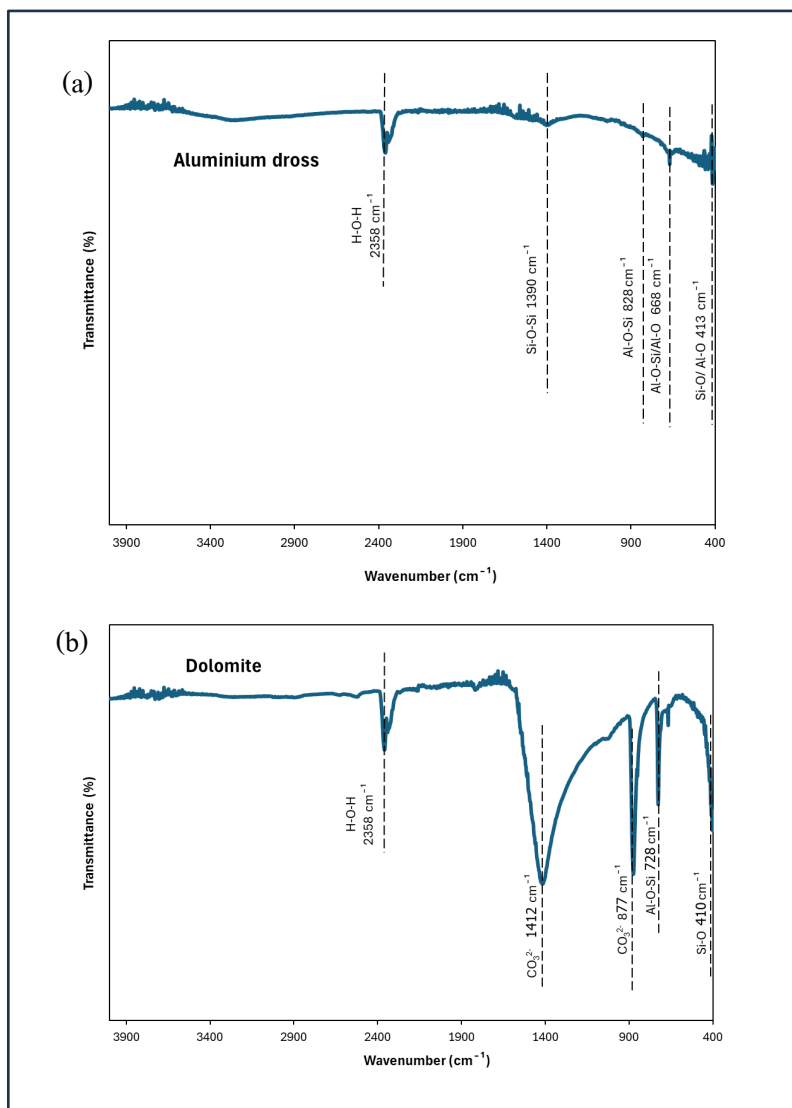
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนอะลูมิเนียม และโดโลไมท์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ *XRF : X-ray fluorescence* (ตารางที่ 2) พบว่า กากตะกอนอะลูมิเนียมมีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือสารประกอบของอะลูมิเนียม โดยแสดงผลในรูปของออกไซด์คือมีอะลูมินา (Al_2O_3) ถึง 64.1 wt% อย่างไรก็ตามจากผลวิเคราะห์ XRD พบว่า อะลูมิเนียมส่วนมากอยู่ในรูปของสารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) และมีเฟสอะลูมินา (Al_2O_3) และโลหะอะลูมิเนียม (Al) ด้วย ส่วนโดโลไมท์มีองค์ประกอบทางเคมีหลักแสดงในรูปของสารประกอบออกไซด์คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) 52.23 wt% และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 42.43 wt% ซึ่งจากผลวิเคราะห์เฟสด้วย XRD พบว่า เป็นโดโลไมท์ ซึ่งเป็นสารประกอบ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ และบางส่วนเป็นเฟสของ CaCO_3 และพบว่า มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เล็กน้อย

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนอะลูมิเนียม และโดโลไมท์ด้วยเทคนิค XRF

Oxide Composition	wt%	
	Aluminium dross residue (AD)	โดโลไมท์ (DO)
SiO_2	6.3	0.58
Al_2O_3	64.1	0.11
Fe_2O_3	1.9	-
CaO	1.6	52.23
MgO	7.9	42.43
Na_2O	3	-
K_2O	1	-
SO_3	0.5	-
Total	86.3	95.96
Loss on ignition	13.7	4.35

โครงสร้างทางเคมีของวัตถุดิบกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์ ทดสอบโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR : Fourier transform Infrared Spectroscopy) ในภาพประกอบ 2 พบว่า กากตะกอนอะลูมิเนียมจะปรากฏพีคที่เลขคลื่น 2358 cm^{-1} ซึ่งเป็น H-O-H stretching ของกลุ่ม -OH ซึ่งเป็นโมเลกุลของน้ำที่ดูดซับบนพื้นผิวของผงกากตะกอนอะลูมิเนียม ส่วนพีคที่เลขคลื่น 1390 cm^{-1} เกิดการสั่นของหมู่ฟังก์ชันซิลิกา (Si-O-Si) และพีคที่เลขคลื่น 828 cm^{-1} 678 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิกอนในเฟสของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต Al-O-Si พีคที่เลขคลื่น 686 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) หรือเฟสผสม Al-Si-O ส่วนผลวิเคราะห์ FTIR ของโดโลไมท์จะปรากฏพีคเลขคลื่น 2358 cm^{-1} ซึ่งเป็น H-O-H

stretching ของกลุ่ม -OH ซึ่งเป็นโมเลกุลของน้ำ และพบพีคที่เลขคลื่น 1412 และ 877 cm^{-1} เกิดจากการสั่นสารประกอบคาร์บอเนต ซึ่งโดโลไมท์ก็คือ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ นอกจากนั้นที่เลขคลื่น 728 และ 410 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะ Al-O-Si และ Si-O ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD และ XRF



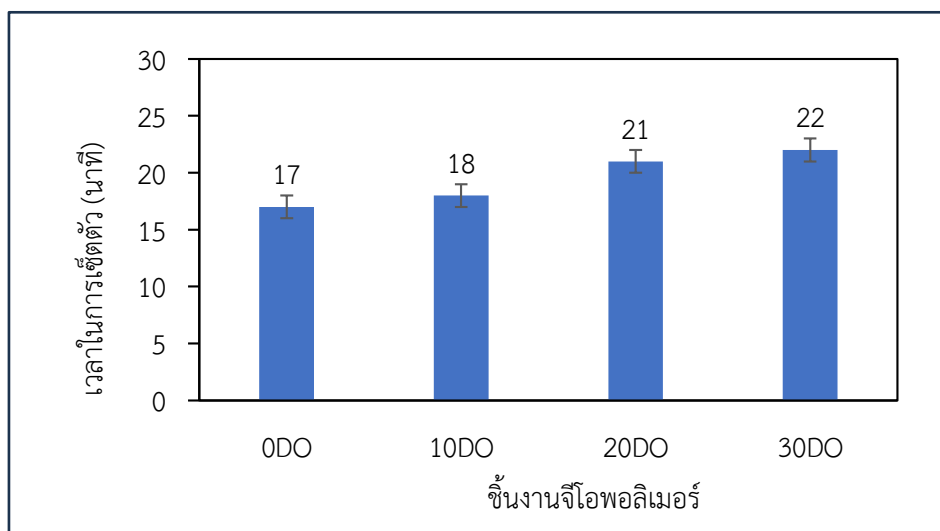
ภาพประกอบ 2 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลด้วยเทคนิค FTIR (a) กากตะกั่วอะลูมิเนียม (b) โดโลไมท์

ผลของการเติมโดโลไมท์ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ฐานตะกอนอะลูมิเนียม

จากการผสมวัตถุดิบกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์ (0 ถึง 30%โดยน้ำหนัก) ร่วมกับสารละลายอัลคาไลน์ NaOH 7 M และ Na_2SiO_3 (อัตราส่วน 1 : 3) พบว่า เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน และเกิดฟองก๊าซแอมโมเนียจำนวนมาก ทำให้ชิ้นงานพองตัว

ผลการทดสอบเวลาในการเซตตัว (Setting time) ด้วยเครื่อง VICAT

ผลการทดสอบเวลาในการเซตตัวของจีโอพอลิเมอร์ พบว่า ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียม 100% (ODO) เซตตัวเร็วที่สุดโดยใช้เวลาไป 17 นาที เมื่อเติมโดโลไมท์ลงไป ชิ้นงานส่งผลให้การเซตตัวของชิ้นงานช้าลงเล็กน้อย โดยเวลาในการเซตตัวมีค่าไม่ต่างกันมาก ดังแสดงในภาพประกอบ 3 ชิ้นงานที่ผสมโดโลไมท์ 10% โดยน้ำหนัก (10DO) โดยใช้เวลาในการเซตตัว 18 นาที ส่วนชิ้นงาน 20DO และ 30DO ใช้เวลา 21 และ 22 นาทีตามลำดับ

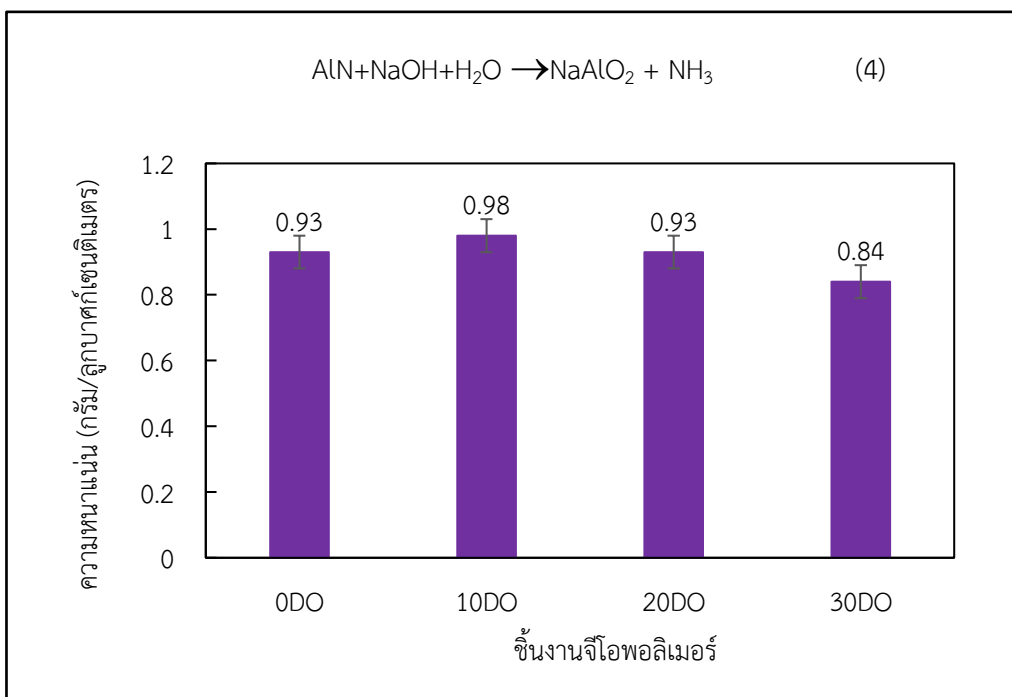


ภาพประกอบ 3 ระยะเวลาในการเซตตัวของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

ความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ (Bulk density)

จากภาพประกอบ 4 แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมที่มีการเติมโดโลไมท์ มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.84-0.98 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยชิ้นงานจากกากตะกอนอะลูมิเนียม ODO มีค่าความหนาแน่น 0.93 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และเมื่อเติมโดโลไมท์ไป 10% โดยน้ำหนักค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย 0.98 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร แต่เมื่อเติมโดโลไมท์ในปริมาณเพิ่มมากขึ้นเป็น 20 และ 30% โดยน้ำหนักค่าความหนาแน่นลดลงเป็น 0.93 และ 0.84 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้น การเติมโดโลไมท์ (DO) 10% ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

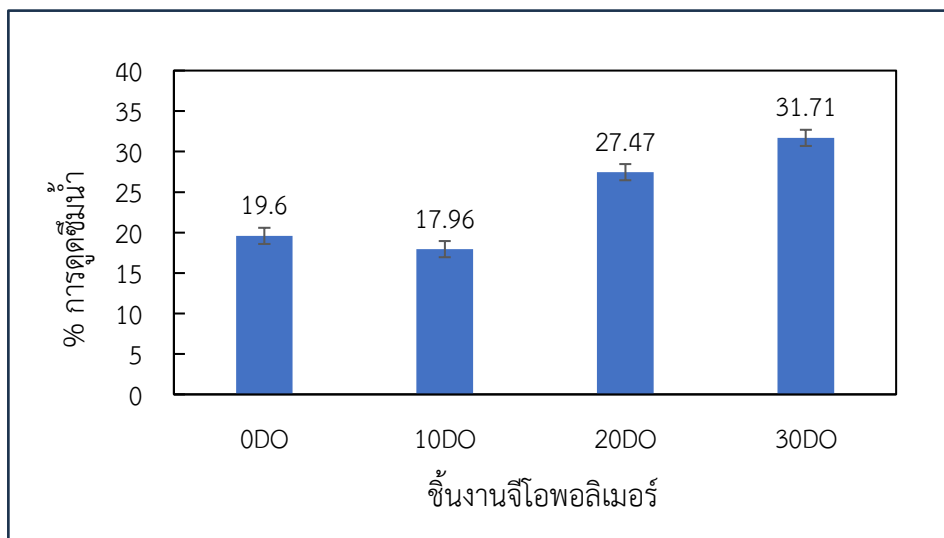
เล็กน้อย แต่การเติมโดโลไมท์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย จากผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานจะเห็นว่าชิ้นงานมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ซึ่งเกิดจากในระหว่างการผลิตชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ฐานกากตะกอนอะลูมิเนียม เมื่อกากตะกอนอะลูมิเนียมสัมผัสกับน้ำที่อยู่ในสารละลายอัลคาไลน์ จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (AlN) ที่อยู่ในกากตะกอนอะลูมิเนียมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ น้ำ ตามปฏิกิริยาในสมการที่ (4) ทำให้เกิดก๊าซแอมโมเนีย ส่งผลให้ชิ้นงานมีรูพรุนสูง



ภาพประกอบ 4 ความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

การดูดซึมน้ำของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

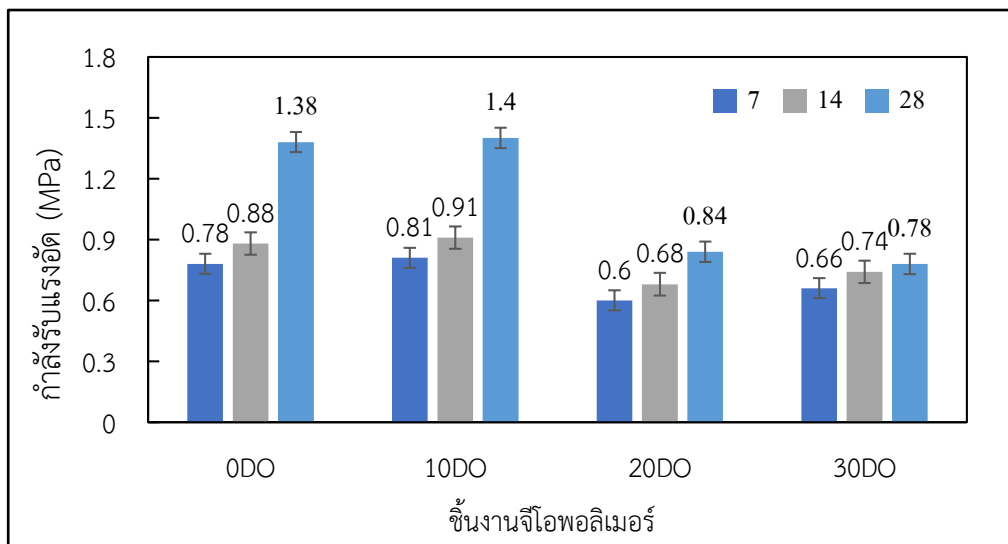
ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานตัวอย่างแสดงในภาพประกอบ 5 พบว่า ชิ้นงานที่ไม่เติมโดโลไมท์ (ODO) มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ 19.6% เมื่อเติมโดโลไมท์ลงไปในชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ 10% โดยน้ำหนัก พบว่า ชิ้นงานมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลง โดยมีค่าการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 17.96% อย่างไรก็ตามการเติมโดโลไมท์เพิ่มขึ้นเป็น 20-30% โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นที่น้อยลง หรือมีรูพรุนเพิ่มขึ้นนั่นเอง



ภาพประกอบ 5 เปอร์เซนต์การดูดซึมน้ำของชั้นงานจีโอพอลิเมอร์

ผลการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

จากการทดสอบการรับแรงอัดของชั้นงานหลังการบ่ม 7 14 และ 28 วัน พบว่า กำลังอัดของชั้นงานเป็นดังภาพประกอบ 6 โดยกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อบ่มนานขึ้นซึ่งเวลาบ่มที่นานนั้นทำให้ชั้นงานมีการพัฒนาโครงสร้างจากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันที่สมบูรณ์มากขึ้น ชั้นงาน 0DO หรือชั้นงานจากกากตะกอนอะลูมิเนียม 100% โดยน้ำหนักที่บ่ม 7 14 และ 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 0.78 0.88 และ 1.38 MPa เมื่อเติมโดโลไมท์ในจีโอพอลิเมอร์ที่ฐานกากตะกอนอะลูมิเนียม 10% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ชั้นงานมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 0.81 0.91 และ 1.4 MPa เนื่องจากโดโลไมท์มีองค์ประกอบของ Ca และ Mg สูง อาจทำให้เกิดเจล Ca-S-H หรือ M-S-H ที่ไปเติมในรูพรุนทำให้ความพรุนลดลง แต่การเติมโดโลไมท์มากขึ้นเป็น 20-30% โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของชั้นงานจีโอพอลิเมอร์ 20DO และ 30 DO มีรูพรุนสูง สอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำที่ได้กล่าวไปแล้ว

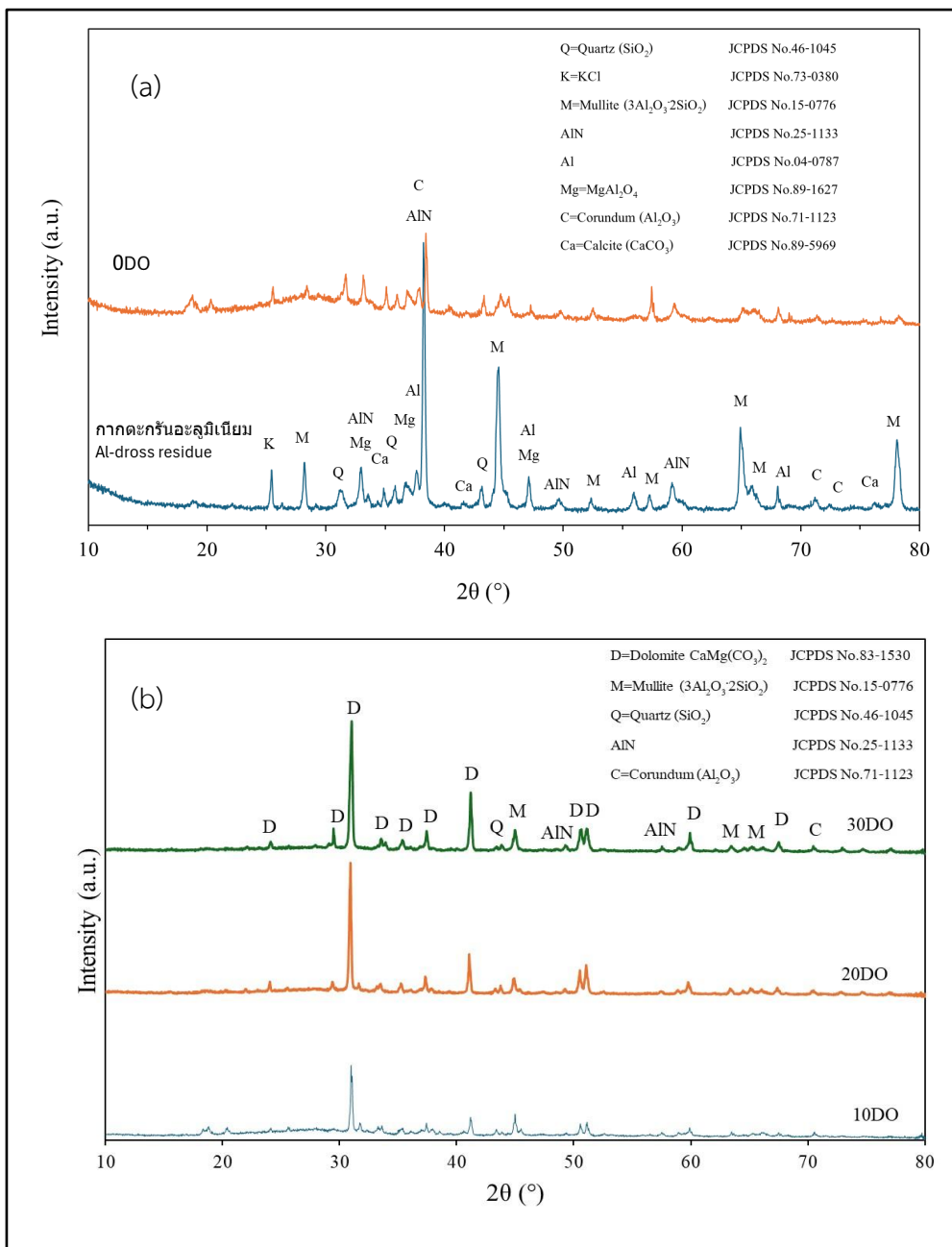


ภาพประกอบ 6 กําลังรับแรงอัดของชั้นงานจิโพลิเมอร์

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเฟส (Phase structure) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ภาพประกอบ 7 (a) กราฟเปรียบเทียบผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสของชั้นงาน 0DO หรือ กากตะกอนอะลูมิเนียม 100% เทียบกับเฟสที่พบในวัตถุดิบกากตะกอนอะลูมิเนียม ซึ่งพบว่า หลังจากกากตะกอนอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน และพบเฟสอสัณฐาน (Amorphous) แสดงโดยการพบพีคกว้างที่มุม 2θ เท่ากับ $20-35^\circ$ นอกนั้นพบเฟสเดิมของวัตถุดิบซึ่งเกิดจากการที่วัตถุดิบบางส่วนยังไม่ทำปฏิกิริยา

ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของชั้นงานจิโพลิเมอร์ 10DO 20DO และ 30AD แสดงในภาพประกอบ 7 (b) พบว่า ชั้นงานจิโพลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมที่มีการเติมโดโลไมท์ มีพีคที่สูงและแหลม ซึ่งแสดงถึงความเป็นผลึก (Crystal) ของโดโลไมท์ โดยพบพีคหลักที่มุม 2θ เท่ากับ 31° การเติมโดโลไมท์ปริมาณมากขึ้นพบพีคที่ความเข้มสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมโดโลไมท์เพิ่มขึ้นอาจจะไม่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น พีคของโดโลไมท์จึงปรากฏสูงขึ้นนั่นเอง นอกจากนั้นยังพบเฟสที่เป็นส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาของกากตะกอนอะลูมิเนียมเล็กน้อย ได้แก่ AlN, Al_2O_3 , Mullite และ Quartz เล็กน้อย

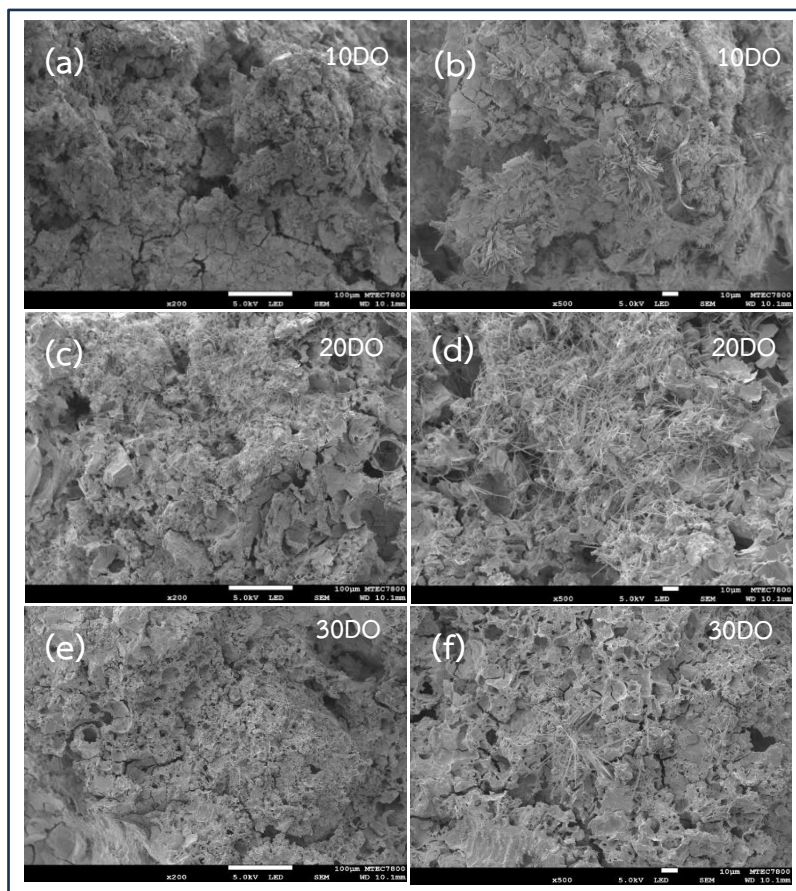


ภาพประกอบ 7 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

(a) วัสดุดิบกากตะกอนอะลูมิเนียมและ 0DO (b) 10 DO, 20DO และ 30DO

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

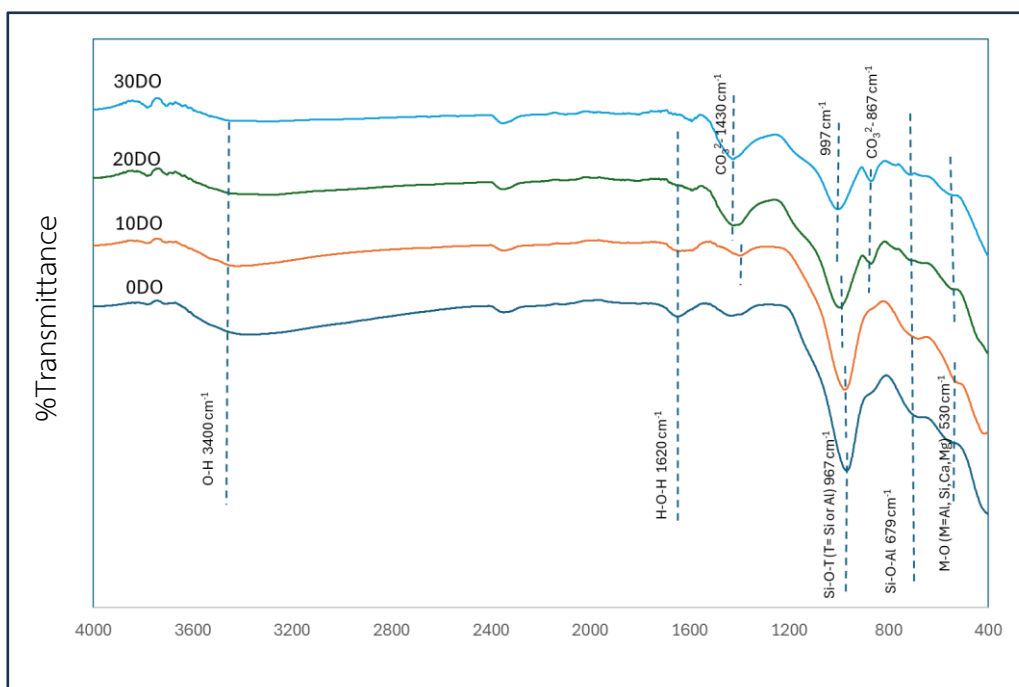
ผลการวิเคราะห์ พื้นผิวรอยแตกของตัวอย่างชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ฐานกากตะกักรันอะลูมิเนียมผสมโดโลไมท์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงในภาพประกอบ 8 โดยภาพ (a) และ (b) คือ ชิ้นงาน 10DO (c) และ (d) คือ ชิ้นงาน 20DO (e) และ (f) คือ ชิ้นงาน 30DO ทำการถ่ายภาพที่กำลังขยาย 200 และ 500 เท่า จากภาพถ่าย SEM พบว่า ชิ้นงานมีรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน จากภาพส่วนสี่เท่าคือเนื้อจีโอพอลิเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันแล้ว พบโครงสร้างผลึกรูปเข็มกระจายทั่วชิ้นงาน แต่ไม่ได้ส่งผลต่อชิ้นงานโดยตรง เนื่องจากเมื่อเติมโดโลไมท์เพิ่มขึ้นพบผลึกรูปเข็มที่มีลักษณะเหมือนเส้นใยยาวขึ้นและมากขึ้น แต่ผลกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานกลับมีค่าลดลง



ภาพประกอบ 8 ภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์กากตะกักรันอะลูมิเนียมผสมโดโลไมท์ (a), (c), (e) กำลังขยาย 200 เท่า และ (b), (d), (f) กำลังขยาย 500 เท่า

ผลวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR : Fourier transform Infrared Spectroscopy)

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีในภาพประกอบ 9 พบว่า ทุกตัวอย่างมีโครงสร้างทางเคมีใกล้เคียงกัน เมื่อเติมโดโลไมท์ปริมาณมากขึ้น 20DO และ 30DO พบพีกที่เลขคลื่น 867 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นของคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) พีกที่เป็นแถบกว้างที่เลขคลื่น 3400 cm^{-1} เกิดจากการยืดตัว (Stretching) ของหมู่ฟังก์ชัน O-H ซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ในชั้นงาน ส่วนที่เลขคลื่น 1620 cm^{-1} พบพีกการงอของ H-O-H ซึ่งเกิดจากโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างผลึก หรือเจลพิดในตำแหน่ง 1430 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบไม่สมมาตรของคาร์บอเนต CO_3^{2-} ซึ่งพบพีกชัดเจน ในชั้นงานที่มีโดโลไมท์สูง พีกที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นจีโอพอลิเมอร์ โดยเกิดจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-T (T=Si/Al) คือพีกที่เลขคลื่น 967 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกที่ไม่ปรากฏในผลการวิเคราะห์ FTIR ของวัตถุดิบกากตะกอนอะลูมิเนียม นอกจากนี้ ยังพบการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Al ที่เลขคลื่น 679 cm^{-1} เมื่อพิจารณาตำแหน่งพีกการสั่นของพันธะ Si-O-T เมื่อมีการเติมโดโลไมท์ ทำให้พีกนี้ปรากฏที่เลขคลื่นสูงขึ้น แสดงถึงการที่พันธะที่เชื่อมโยงกันแน่นกว่า



ภาพประกอบ 9 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของชั้นงาน 0DO 10DO 20DO และ 30DO ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานด้วยเทคนิค XRF

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมผสมโดโลไมท์ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) แสดงในตารางที่ 2 พบว่า องค์ประกอบทางเคมีหลักคือธาตุ Si และ Al ถึงแม้ว่าในวัตถุดิบหลักคือกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์จะมีปริมาณ Si น้อยมาก แต่ Si ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เหล่านั้นมาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทำให้พบ Si ปริมาณมากในชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ ชิ้นงานที่เติมโดโลไมท์ไปจำนวนมากขึ้นพบว่า มี Ca และ Mg ในปริมาณมากขึ้น การเติมโดโลไมท์ (DO) ลงไปในชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ 10-30% โดยน้ำหนัก นั้นส่งผลให้ค่า Si และ Al ลดลง ส่วนค่าที่มีปริมาณมากขึ้น อย่างชัดเจนได้แก่ Ca พบเป็น 5.23% 10.5% และ 14.4% ตามลำดับ เนื่องจากในโดโลไมท์ มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบปริมาณมาก อย่างไรก็ตามเมื่อนำปริมาณของ Si และ Al มาแสดงผลในรูปอัตราส่วนของ Si/Al พบว่า ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมที่มีการผสมโดโลไมท์ (DO) ในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนของ Si/Al สูงขึ้น โดยชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ Si/Al สูงสุดที่ 2.10 ได้แก่ 30DO ส่วนธาตุโซเดียมหรือ Na ที่พบมาจากสารละลายอัลคาไลน์ที่เติมไปเพื่อเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

ตารางที่ 2 องค์ประกอบเคมีของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมผสมโดโลไมท์

องค์ประกอบทางเคมี % โดยน้ำหนัก	0DO	10DO	20DO	30DO
Si	14.7	15.57	11.83	10.58
Al	10.2	11.9	5.91	5.01
Na	10.3	8.35	7.01	6.99
Ca	0.4	5.23	10.55	14.4
K	0.6	0.47	0.33	0.25
Ba		0.1		
K		1.04		
Mg	0.2	0.08	1.99	2.97
S	0.1	0.07	0.05	
Zn		0.1		
Cu		0.43	0.31	0.23
Fe	0.8	0.7	0.47	0.35
Mn		0.1	0.08	
Si/Al	1.44	1.31	2	2.1

อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ทำการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเศษเหลือทิ้งอุตสาหกรรมรีไซเคิลตะกรันอะลูมิเนียม และเติมโดโลไมท์ เพื่อปรับสมบัติของชิ้นงาน ถึงแม้ว่าวัตถุดิบทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นส่วนของ Si น้อยแต่จำเป็นในการเกิดเจลจีโอพอลิเมอร์ในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชัน และวัตถุดิบทั้งสองมี Al Ca และ Mg สูง แต่ในกระบวนการผลิตนั้นสามารถเพิ่มองค์ประกอบของ Si เข้าไปในระบบได้จากสารละลายโซเดียมซิลิเกต ดังนั้นการใช้วัตถุดิบส่วนของแข็งที่มี Si น้อยจึงมีความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกผลิตโดยใช้ $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ อัตราส่วน 1:3 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มี Si สูง และจากผลการทดสอบ พบว่า ส่วนผสมทั้งที่ไม่ และไม่มีโดโลไมท์สามารถเกิดการเซตตัวแข็งได้ หลังผสมต้องเทลงแม่แบบทันที เพราะส่วนผสมเกิดปฏิกิริยาความร้อน และมีฟองก๊าซเกิดขึ้นจำนวนมาก และทำให้ชิ้นงานพองตัวตามปริมาณของฟองที่เกิดขึ้น ก๊าซที่เกิดขึ้นนี้ส่วนมากคือก๊าซแอมโมเนีย ดังนั้นในขั้นตอนการผสมจึงต้องอยู่ในตู้ดูดควัน เพื่อความปลอดภัย

การเติมโดโลไมท์มีผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลงและทำให้เวลาในการเซตตัวนานขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการผลิต โดยเป็นการเพิ่มเวลาที่สามารถเทลงแม่แบบ (Workability) นอกจากนั้นการเติมโดโลไมท์ในปริมาณ 10% ทำให้เกิดฟองก๊าซลดลง จำนวนรูพรุนน้อยลง ซึ่งส่งเสริมให้ความแข็งแรงของชิ้นงานสูงขึ้น ทั้งนี้จากงานวิจัยหลายงานได้รายงานถึงสาเหตุที่โดโลไมท์สามารถช่วยเสริมความแข็งแรงของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากการเกิดโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรืออาจเกิดโครงสร้างของแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งจะไปแทรกแทนที่รูพรุน ทำให้รูพรุนน้อยลง และทำให้ชิ้นงานแข็งแรงขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมโดโลไมท์ 20 และ 30% ทำให้มีส่วนของโดโลไมท์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่จำนวนมากทำให้ความแข็งแรงลดลง ดังนั้นการศึกษาวิจัยในอนาคตควรจะเพิ่มส่วนของวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของ Si สูงขึ้น เช่นเศษเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าพลังชีวมวลได้แก่ ถ่านอัดแท่ง ถ่านอัดแท่ง หรืออื่น ๆ ซึ่งถ่านเหล่านี้มักมีซิลิกาสูง นอกจากนั้นยังอาจจะเพิ่มกำลังอัดได้โดยการอบที่อุณหภูมิสูงด้วย

สรุปผล

เศษเหลือทิ้ง จากอุตสาหกรรมรีไซเคิลอะลูมิเนียมจากตะกรันอะลูมิเนียม (Al dross residue) และโดโลไมท์สามารถนำมาใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ โดยใช้ Si ในการสร้างเจล และโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์จากสารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งการเติมโดโลไมท์ 10% ให้ผลดีที่สุด โดยทำให้เกิดรูพรุนลดลง มีการดูดซึมน้ำลดลง และมีกำลังอัดสูงสุด คือ 1.4 MPa เมื่อบ่ม 28 วัน ซึ่งวัสดุจีโอพอลิเมอร์นี้มีน้ำหนักเบาโดยมีความหนาแน่นเพียง 0.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งน่าจะสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างในส่วนที่ไม่ต้องรับน้ำหนัก หรืออาจจะใช้ในงานตกแต่งสวนได้ เนื่องจากมีรูพรุนสูงน้ำซึม

ผ่านได้ง่าย ทั้งนี้การนำเศษเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์เป็นการช่วยในเรื่องของการลดปัญหาการนำเศษเหลือทิ้งเหล่านี้ไปทิ้ง และเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้เศษเหลือทิ้งเหล่านี้ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับการสนับสนุนด้านเครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบและสถานที่ และผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนของหน่วยวิจัยด้านวัสดุยั่งยืนและเศรษฐกิจหมุนเวียน แห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (Thammasat University Research Unit in Sustainable Materials and Circular Economy, SMACE)

เอกสารอ้างอิง

- Aziz, I., Abdullah, M.M.A. B., Yong, H., & Ming, L. (2019). Behaviour changes of ground granulated blast furnace slag geopolymers at high temperature. *Advances in Cement Research*, 32, 1-28. doi:10.1680/jadcr.18.00162.
- Aizat, E.A., Abdullah, M.M.A., Liew Y.M., & Heah, C.Y. (2018). Dolomite/fly ash alkali activated geopolymer strengths with the influence of solid/liquid ratio. *AIP Conference Proceeding: Proceeding of the 4th International Conference on Green Design and Manufacture 2018: Advanced and emerging applications, Ho Chi Minh, Vietnam*, 2030(1). doi:10.1063/1.5066915.
- Aizat, E.A., Abdullah, M.M.A., Vizureanu, P., Salleh, M.A.A.M., Sandu, A.V., Chaiprapa, J., Yoriya, S., Hussin, K. & Aziz, I.H. (2020) Strength development and elemental distribution of dolomite/fly ash geopolymer composite under elevated temperature. *Materials (Basel)*, 13(4):1015. doi:10.3390/ma13041015.
- Arkame, Y., Harrati, A., Jannaoui, M., Et-Tayea, Y., Yamari, I., Sdiri, A., & Sadik, C. (2023). Effects of slag addition and sintering temperature on the technological properties of dolomite based porous ceramics. *Open Ceramics*, 13, 100333. doi:10.1016/j.oceram.2023.100333.
- Ashfaq, M., Sharif, M., Irfan-ul-Hassan, M., Sahar, U., Akmal, U., & Mohamed, A. (2024). Up-scaling of fly ash-based geopolymer concrete to investigate the binary

- effect of locally available metakaolin with fly ash. *Heliyon*, 10, e26331. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e26331.
- Choo, T.F., Mohd Salleh, M.A., Kok, K Y., Matori, K.A., & Abdul Rashid, S. (2020). Characterization of High-Temperature Hierarchical Porous Mullite Washcoat Synthesized Using Aluminium Dross and Coal Fly Ash. *Crystals*, 10(3). doi:10.3390/cryst10030178.
- Dirisu, J.O., Fayomi, O.S.I., Oyedepo, S.O., Jolayemi, K.J., & Moboluwarin, D.M. (2019). Critical evaluation of aluminium dross composites and other potential building ceiling materials. *Procedia Manufacturing*, 35, 1205-1210. doi:10.1016/j.promfg.2019.06.078.
- Elseknidy, M.H., Salmiaton, A., Nor Shafizah, I., & Saad, A.H. (2020). A Study on Mechanical Properties of Concrete Incorporating Aluminium Dross, Fly Ash, and Quarry Dust. *Sustainability*, 12(21). doi:10.3390/su12219230.
- Lv, S., Ni, H., Wang, X., Ni, W., & Wu, W. (2022). Effects of Hydrolysis Parameters on AlN Content in Aluminium Dross and Multivariate Nonlinear Regression Analysis. *Coatings*, 12(5). doi:10.3390/coatings12050552.
- McLellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J., van Riessen, A., & Corder, G.D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9), 1080-1090. doi:10.1016/j.jclepro.2011.02.010.
- Naghizadeh, A., Tchadjie, L.N., Ekolu, S.O., & Welman-Purchase, M. (2024). Circular production of recycled binder from fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 415, 135098. doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.135098.
- Poonyakanok, W. (n.d.) Green concrete. Retrieved from <https://risc.in.th/th/knowledge/>.
- Puksisuwan, P., Laoratanakul, P., & Cherdhirunkorn, B. (2018). Utilization of aluminium dross as a main raw material for synthesis of geopolymer. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 27(2).
- Rashad, A.M. (2013). A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag – A guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 47, 29-55. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.011.

- Shobeiri, V., Bennett, B., Xie, T., & Visintin, P. (2021). A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126669. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126669>.
- Stafford, F.N., Dias, A.C., Arroja, L., Labrincha, J.A., & Hotza, D. (2016). Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study. *Journal of Cleaner Production*, 126, 159-165. doi:10.1016/j.jclepro.2016.02.110.
- Thunuguntla, C.S., & Gunneswara Rao, T.D. (2018). Effect of mix design parameters on mechanical and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 193, 173-188. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.189.
- Tonnayopas, D., Saelee, P., & Chantaramanee, S. (2011). *Production of Lightweight Ceramic Tile from Kaolin Refining Waste and Addition of Dolomite and Waste Clay Brick*. Thaksin University Journal, 14(2), 140-148.
- Toobpeng, N., Thavorniti, P., & Jiemsirilars, S. (2024). Effect of additives on the setting time and compressive strength of activated high-calcium fly ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 417, 135035. doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.135035.
- Xu, H., & Van Deventer, J.S.J. (2000). The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266. doi:10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
- Zarina, Y., Abdullah, A. M., & Ahmad, M. A. (2014). *The effect of dolomite incorporation on the properties of boiler ash-based geopolymer*. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 660, pp. 289-293). Trans Tech Publications.