

ผลกระทบของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมน้ำทะเลต่อกำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์

The Effect of Sodium Hydroxide Solution with Seawater on Compressive Strength of Geopolymer

ชัยวัฒน์ บางทราย (Chaiwat Bangsai)* ดร.ปริญา จินดาประเสริฐ (Dr.Prinya Chindaprasit)**

ดร.พรณา เกษมศิริ (Dr.Pornnapa Kasemsiri)*** ดร.พัชรพล โพธิ์ศรี (Dr.Patcharapol Posi)^{1****}

(Received: December 31, 2021; Revised: May 6, 2022; Accepted: May 6, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมน้ำทะเลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ โดยมีส่วนผสมคือ แก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง, สารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS), สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งจังหวัดชลบุรี ทำการศึกษาค้นคว้าที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ โดยการทดสอบได้แบ่งชุดการทดสอบดังนี้ 1.Series A : เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอย (L/F), 2.Series B : เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NaOH) และ 3.Series C : เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยทำการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 28 วัน ผลทดสอบ Series A เปลี่ยนแปลงอัตราส่วน L/F จาก 0.5 ถึง 0.7 พบว่าเมื่ออัตราส่วน L/F เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง ซึ่งผลการทดสอบกำลังอัดสูงสุดเท่ากับอัตราส่วน L/F=0.50 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเล (NaSe)=100% กำลังอัดเท่ากับ 463.89 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีกำลังอัดที่สูงกว่าตัวอย่างที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำกลั่น (NaDI)=100% เพียงเล็กน้อยซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับ 442.36 กก./ตร.ซม. ผลทดสอบ Series B เปลี่ยนแปลงอัตราส่วน NS/NaOH จาก 0.33 ถึง 0.67 พบว่าเมื่ออัตราส่วน NS/NaOH เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่ออัตราส่วน NS/NaOH เพิ่มขึ้นจาก 0.67 ถึง 1.50 กำลังอัดจะมีค่าลดลง ซึ่งผลการทดสอบกำลังอัดสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วน NS/NaOH=0.67 ซึ่ง NaDI=100% (508.02 กก./ตร.ซม.) แต่กำลังอัดสูงกว่า NaSe=100% (506.40 กก./ตร.ซม.) เพียงเล็กน้อย และผลการทดสอบ Series C เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 5 ถึง 15 โมลาร์ พบว่ากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มจาก 5 เป็น 10 โมลาร์ แต่เมื่อความเข้มข้นสูงมากกว่า 10 โมลาร์ทำให้กำลังอัดลดลง

¹Corresponding author: mister_wing@hotmail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

**ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***รองศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

****รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

ABSTRACT

This research study the effect of sodium hydroxide solution with seawater to compressive strength of geopolymers. The ingredients are fly ash from Mae Moh Power Plant Lampang Province, sodium silicate solution (NS), Sodium hydroxide (NaOH) solution and seawater on the coast of Chonburi province. The test divided the test series as follows : 1. Series A: Change the solution to fly ash ratio (L/F), 2. Series B : Change the sodium silicate solution to sodium hydroxide solution ratio (NS/NaOH) and 3. Series C : Changes in the concentration of sodium hydroxide solution (NaOH). Test compressive strength of geopolymers at the age of 28 days. The test results Series A which changed the L/F from 0.5 to 0.7 showed that as the L/F increased the compressive strength was reduced. The highest compressive strength test results are in the L/F ratio = 0.50 using a solution of sodium hydroxide from seawater (NaSE) = 100% Compressive strength of 463.89 kg/cm². This has a higher compressive strength than samples using a solution of sodium hydroxide from distilled water (NaDI)=100% slightly equal to 442.36 kg/cm². The test results Series B which changed the NS/NaOH ratio from 0.33 to 0.67 showed that as the NS/NaOH ratio increased compressive strength increased and as the NS/NaOH ratio increased from 0.67 to 1.50 compressive strength decreased. The highest compressive strength test results are in the NS/NaOH=0.67 which NaDI=100% (508.02 kg/cm²) higher compressive strength than NaSE=100% (506.40 kg/cm²) slightly. And the test results Series C which changed in the concentration of sodium hydroxide solution increasing from 5 to 10 molar compressive strength capacity was found to increase as the intensity increased from 5 to 10 molar but when the concentration was higher than 10 molar the compressive strength decreased.

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์ กำลังอัด สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำทะเล

Keywords: Geopolymer, Compressive strength, Sodium hydroxide solution, Seawater

บทนำ

ในการผลิตปูนซีเมนต์จะมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องหลายขั้นตอน เริ่มตั้งแต่การทำเหมืองผลิตหินปูนเป็นวัตถุดิบป้อนเข้าสู่โรงงาน และผ่านเข้าสู่กระบวนการผลิตจนกระทั่งได้ผลผลิตเป็นปูนซีเมนต์ ซึ่งกิจกรรมในกระบวนการต่างๆ เหล่านี้จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ อันเป็นผลให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมา เช่น ปัญหาความเสื่อมโทรมของป่าไม้ ปัญหาจากการชะล้างพังทลายของดิน ปัญหามลพิษทางน้ำ อากาศ เสียง และปัญหาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดร็อกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศทำให้เกิดปัญหาโลกร้อนตามมา ในปัจจุบันได้มีหลากหลายงานวิจัยที่ได้สังเกตเห็นปัญหาดังกล่าว และได้มีแนวคิดที่จะนำเอาวัสดุทางเลือกอื่นๆ มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ วัสดุดังกล่าวได้แก่ จีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ในอุณหภูมิต่ำใช้วัสดุตั้งต้นที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า ได้แก่ แกลลอยซึ่งจีโอโพลิเมอร์นั้นเหมาะสำหรับที่จะนำมาเป็นวัสดุทางเลือกแทนที่ปูนซีเมนต์ในอนาคต

ซึ่งในปัจจุบันไม่เพียงแต่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เท่านั้นที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม แต่การใช้งานทรัพยากรธรรมชาติที่มีอย่างจำกัดยังคงเป็นปัญหาที่รอการแก้ไขปัญหานี้ในปัจจุบัน ซึ่งในรายงานการเก็บสถิติของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม พบว่าการผลิตคอนกรีตภายในประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี ในปี พ.ศ.2563 พบว่าประเทศไทยมี

การผลิตคอนกรีตภายในประเทศรวม 18.2 ล้านลูกบาศก์เมตร [1] งานวิจัยในครั้งนี้จึงได้เล็งเห็น และให้ความสำคัญกับวัสดุทางเลือกไปพร้อมกับการพัฒนาให้มีการลดการใช้ทรัพยากรที่มีอย่างจำกัด เช่น การแทนที่น้ำจืดด้วยน้ำทะเล จากการเก็บข้อมูลของสถาบันจัดการน้ำระหว่างประเทศ (IWMI) พบว่าน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของระบบนิเวศและสิ่งมีชีวิตถึงแม้ว่าน้ำจะเป็นทรัพยากรหมุนเวียน แต่ 97 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำทั้งหมดบนโลกเป็นน้ำในมหาสมุทร มีส่วนที่เหลือเพียง 3 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่เป็นน้ำจืด ซึ่งหากแบ่งน้ำจืดออกเป็น 100 ส่วน ประมาณ 68.7 ส่วน ถูกกักเก็บในรูปแบบของน้ำแข็ง หิมะ อีก 30.1 ส่วนเป็นน้ำใต้ดิน ประมาณ 0.9 ส่วน เป็นความชื้นในดินและชั้นบรรยากาศ ดังนั้นจึงเหลือน้ำจืดเพียง 0.3 ส่วนเท่านั้นที่เป็นน้ำผิวดินที่มนุษย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ [2] สถาบันจัดการน้ำระหว่างประเทศ (IWMI) ประมาณการว่าในราวปี ค.ศ. 2025 ประชากร 4,000 ล้านคน ใน 48 ประเทศ (2 ใน 3 ของประชากรโลก) จะเผชิญกับปัญหาการขาดแคลนน้ำ ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวบริเวณที่จะพบปัญหาได้ภายในประเทศไทย คือบริเวณชายฝั่งทะเล หรือบริเวณหมู่เกาะ จากผลกระทบดังกล่าวทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษา และแก้ไขปัญหาโดยการเลือกใช้วัสดุที่เป็นทรัพยากรหมุนเวียนคือ น้ำทะเล การใช้งานทรัพยากรในส่วนที่เป็นน้ำในทางจีโอโพลิเมอร์นั้น น้ำไม่ใช่องค์ประกอบโดยตรงในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์ แต่ต้องนำน้ำไปผ่านขั้นตอนในการเตรียมสารละลายเบส จึงจะได้สารละลายเบสที่เป็นตัวทำละลายในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์

การพัฒนาในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงและการพัฒนาสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งเป็นสารละลายเบสที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีขั้นตอนในการเตรียมสารละลายโดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ของแข็งที่อยู่รูป เม็ด(Bead) หรือเกล็ด(Flake) มีโมเลกุล 40 กรัม/โมล เติมน้ำลงในน้ำ โดยทั่วไปแล้วจะใช้น้ำกลั่น หรือน้ำที่ไม่มีประจุในการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายเบสจะทำหน้าที่ชะลอออนของซิลิกอน และอลูมิเนียมออกมาจากสารประกอบซิลิเกต(เกลือ) โดยความสามารถในการชะลอออนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเบส สารละลายเบสที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้แก่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นที่ใช้อยู่ในช่วง 5 – 15 โมลาร์ [3]

ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาพัฒนาโดยการแทนที่น้ำจืดด้วยน้ำทะเล ศึกษาคุณสมบัติกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ และระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ช่วยส่งเสริมการใช้งานวัสดุทดแทน อีกทั้งยังช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด และนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้างต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเล และน้ำกลั่น
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์ ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเล และน้ำกลั่น
3. เพื่อเป็นข้อมูลในการนำน้ำทะเลมาใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ต่อไป

วิธีการศึกษา

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย แก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทย, น้ำทะเลบริเวณชายฝั่ง จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย, สารละลายโซเดียมซิลิเกต(NS) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

1.1 เถ้าลอย

การศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ประกอบด้วย SiO_2 ร้อยละ 36.20 Al_2O_3 ร้อยละ 15.52 Fe_2O_3 ร้อยละ 14.25 และ CaO ร้อยละ 22.57 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 0.88 ซึ่งจัดเป็นเถ้าลอยชนิด C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [4] ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอย
SiO_2	36.20
Al_2O_3	15.52
Fe_2O_3	14.25
CaO	22.57
K_2O	1.63
Na_2O	0.33
SO_3	8.90
LOI	0.88

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

คุณสมบัติ	เถ้าลอย
ความถ่วงจำเพาะ	2.66
ขนาดอนุภาค(ไมโครเมตร)	18.6

1.2 น้ำทะเล, สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำทะเลประกอบด้วย Calcium ร้อยละ 1.14, Chloride ร้อยละ 57.50, Sulfate ร้อยละ 6.71, Magnesium ร้อยละ 3.83, Potassium ร้อยละ 1.38 และ Sodium ร้อยละ 29.43 ค่าการนำไฟฟ้า(Electrical Conductivity) เท่ากับ 50.6 mS/cm, ค่าความเค็มของน้ำ(Salinity) เท่ากับ 33.1 ppt และค่าความเป็นกรด/ด่าง เท่ากับ 8.4 pH, สารละลายโซเดียมซัลเฟตมีส่วนผสม Na_2O ร้อยละ 15.32, SiO_2 ร้อยละ 32.87 และน้ำ ร้อยละ 51.8 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำทะเล

องค์ประกอบทางเคมี (%)	น้ำทะเล
Calcium	1.14
Chloride	57.50
Sulfate	6.71
Magnesium	3.83
Potassium	1.38
Sodium	29.43



ภาพที่ 1 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

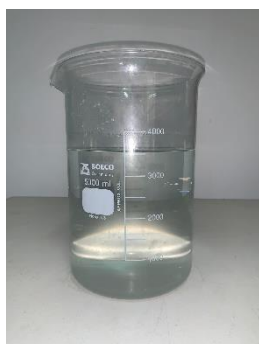


ภาพที่ 2 น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งจังหวัดชลบุรี

2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 การเตรียมสารละลาย

การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะมีขั้นตอนในการเตรียมสารละลาย โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ของแข็งที่อยู่รูป เม็ด (Bead) หรือเกล็ด (Flake) มีโมเลกุล 40 กรัม/โมล เติมน้ำลงไปโดยทั่วไปแล้วจะใช้น้ำกลั่น จากนั้นคนสารละลายอย่างรวดเร็วเพื่อให้ส่วนใดส่วนหนึ่งมีความเข้มข้นมากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดไอสารละลายหรือเกิดการเดือดของสารละลายได้ ในการเตรียมสารละลาย ควรเตรียมในตู้ควันหรือที่อากาศถ่ายเท เมื่อสารละลายเย็นตัวลงจึงบรรจุลงภาชนะที่เป็นพลาสติก [3]



ภาพที่ 3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำกลั่น



ภาพที่ 4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเล

2.2 การเตรียมอย่างจีโอโพลิเมอร์

การผสมตัวอย่างมีวิธีการดังนี้ ขั้นแรกเตรียมเถ้าลอยตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้เทลงไปในเครื่องผสม จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในเครื่องผสม เพื่อทำการชะอ้อนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมออกมาจากอนุภาคปอกโซลาน(เถ้าลอย)ใช้เวลาผสมเป็นเวลา 5-10 นาที ต่อมาเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อให้เกิดการก่อตัวในขั้นตอนสุดท้าย [5] จากนั้นบรรจุส่วนผสมลงในแบบหล่อขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. สำหรับทดสอบกำลังอัด หลังจากบรรจุเสร็จแล้วให้ใช้แผ่นพลาสติกใสคลุมผิวหน้าตัวอย่างก่อนบ่มความร้อนในตู้อบ เมื่ออบครบ 24 ชม. จึงถอดแบบหล่อและห่อตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกใสเพื่อรักษาความชื้นและบ่มด้วยอุณหภูมิบรรยากาศ จนกระทั่งตัวอย่างอายุครบ 28 วัน



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

3. อัตราส่วนผสม

เพื่อศึกษาผลกระทบของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมน้ำทะเลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ได้ออกแบบการทดลองออกเป็น Series ดังนี้

Series A: ทำการศึกษาลงของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เป็น 0.5, 0.6 และ 0.7 โดยคงที่ค่า NaOH = 10 M, NS/NaOH = 1:1 และอุณหภูมิในการบ่ม 60 °C 1 วัน

Series B: ทำการศึกษาลงของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน NS/NaOH เป็น 1:3, 2:3, 1:1 และ 3:2 โดยคงที่ค่า NaOH = 10 M, L/F = 0.5 และอุณหภูมิในการบ่ม 60 °C 1 วัน

Series C: ทำการศึกษาลงของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เป็น 10, 15 และ 20 M โดยคงที่ค่า NS/NaOH = 1:1, L/F = 0.5 และอุณหภูมิในการบ่ม 60 °C 1 วัน โดยอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์ [6]

Series	L/F	NS/NaOH	NaOH (M)	Curing Temp. (°C)	Na=(NaSE/NaDI)
A	0.50, 0.60, 70.0	1:1	10	60	0:1, 1:0
B	50.0	1:3, 2:3, 1:1, 3:2	10	60	0:1, 1:0
C	50.0	1:1	5, 10, 15	60	0:1, 1:0

L/F : Liquid/Fly Ash, Na_2SiO_3 (NS) : สารละลายโซเดียมซิลิเกต, NaOH : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

NaOH Seawater (NaSE) : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเล,

NaOH Distilled water (NaDI) : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำกลั่น

4. การทดสอบ

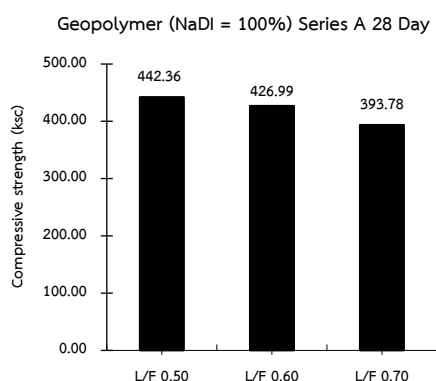
การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ทำการเตรียมตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 มม. 3 ตัวอย่างต่อ 1 ชุดอายุการบ่ม 28 วัน โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัด ได้แก่ อัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย (L/F), อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NaOH) และค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 / C109M [7]

ผลการทดสอบ

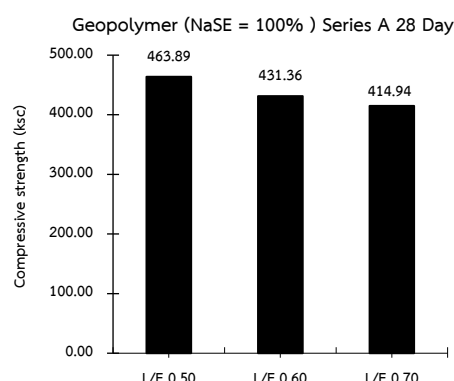
กำลังอัด

1. Series A

ผลการทดสอบกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์ตามอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4 ในส่วนของ Series A ได้ทำการศึกษาค่ากำลังอัดจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย (L/F) เท่ากับ 0.50 , 0.60 และ 0.70 ในกลุ่มอัตราส่วน NaDI = 100% เท่ากับ 442.36, 426.99 และ 393.78 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และในกลุ่มอัตราส่วน NaSE = 100% เท่ากับ 463.89, 431.36 และ 414.94 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ แนวโน้มกำลังอัดของ Series A มีแนวโน้มที่ลดลงตามค่าอัตราส่วน L/F ที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 6 และภาพที่ 7 เนื่องจากปริมาณของเหลวส่วนเกินที่มากเกินไปคล้ายกับลักษณะ w/c ของคอนกรีต [8-11] ปริมาณของเหลวที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความสามารถในการผสมมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกตัวของของเหลว และเกิดการหดตัวอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของปริมาณของเหลวทำให้ความเข้มข้นของซิลิกา และอะลูมินาลดลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันลดลง [5] และเมื่อทดสอบโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเล (NaSE) จะพบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 4-5% เนื่องจากวัสดุตั้งต้นที่ใช้เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นน้ำทะเลที่มีค่าความเป็นด่างที่สูงกว่าน้ำกลั่น ซึ่งเป็นผลทำให้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเล (NaSE) มีความเข้มข้นที่สูงกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำกลั่น (NaDI) และเมื่อความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจะเป็นส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งทำให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กับ L/F (NaDI =100 %)

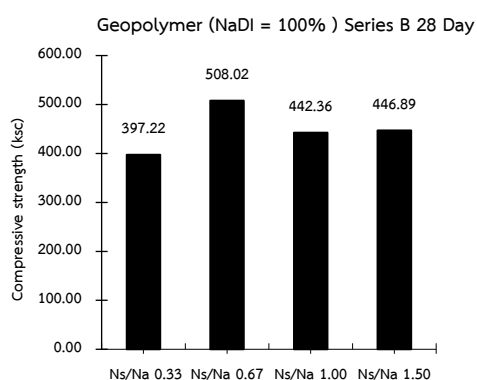


ภาพที่ 7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กับ L/F (NaSE =100 %)

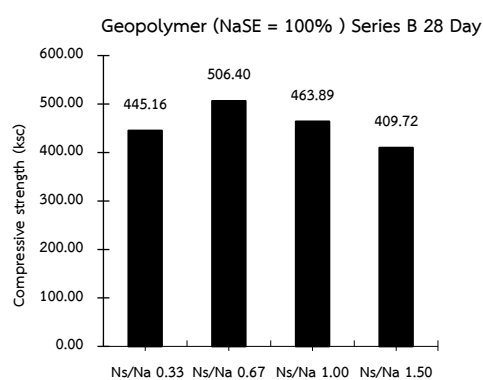
2. Series B

ผลการทดสอบกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์ตามอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4 ในส่วนของ Series B ได้ทำการศึกษาค่ากำลังอัดจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/ NaOH) เท่ากับ 0.33, 0.67, 1.00 และ 1.50 ในกลุ่มอัตราส่วน NaDI = 100% เท่ากับ 397.22, 508.02, 442.36 และ 446.89 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และในกลุ่มอัตราส่วน NaSE = 100% เท่ากับ 445.16, 506.40, 463.89 และ 409.72 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ แนวโน้มของกำลังอัดใน Series B มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน NS/NaOH เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่ออัตราส่วน NS/NaOH เพิ่มขึ้นจาก 0.67 ถึง 1.50 กำลังอัดจะมีค่าลดลง ดังแสดงในภาพที่ 8 และภาพที่ 9 เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NaOH) มีผล

ต่อการเกิดซีโอไลต์ในจีโอโพลิเมอร์ หากอัตราส่วน NS/NaOH มีค่าน้อยทำให้ปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมมาก ทำให้เกิดซีโอไลต์ในจีโอโพลิเมอร์เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ลดลง และเมื่ออัตราส่วน NS/NaOH ที่มากเกินไปจะส่งผลต่อความชื้นเหลวของส่วนผสมให้มีความหนืดมากขึ้น [12] และเมื่อทดสอบโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเล (NaSE) จะพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน NS/NaOH จะมีลักษณะที่คล้ายกับกลุ่มทดสอบที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำกลั่น (NaDI) โดยที่กำลังอัดสูงสุดจะแตกต่างกันไม่มากนัก แต่โดยรวมกลุ่มทดสอบที่ใช้ NaS=100% จะมีกำลังอัดที่สูงกว่า เนื่องจากความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจากการใช้น้ำทะเลในการเตรียมสารละลาย



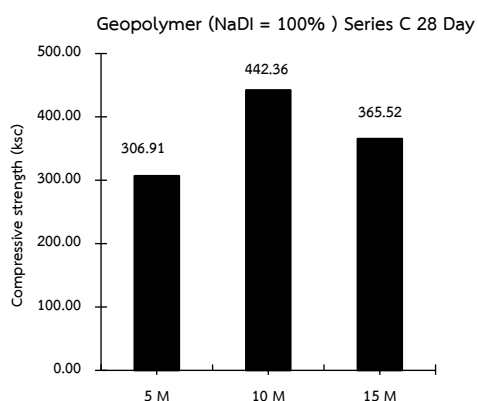
ภาพที่ 8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กับ
NS/NaOH (NaDI = 100%)



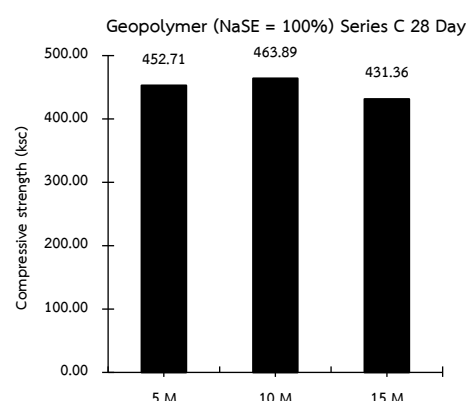
ภาพที่ 9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กับ
NS/NaOH (NaSE = 100%)

3. Series C

ผลการทดสอบกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์ตามอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4 ในส่วนของ Series C ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีค่าเท่ากับ 5, 10 และ 15 โมลาร์ ในกลุ่มอัตราส่วน NaDI = 100% เท่ากับ 306.91, 442.36 และ 365.52 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และในกลุ่มอัตราส่วน NaSE = 100% เท่ากับ 452.71, 463.89 และ 431.36 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ซึ่งค่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ ดังแสดงในภาพที่ 10 และภาพที่ 11 ผลจากการทดสอบกำลังอัดพบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อค่ากำลังอัด โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ชะซิลิกาและอะลูมินาที่เป็นอสัณฐานจากผิวของแก้วลอยออกมาเป็นอ็อน และเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดการก่อตัวเป็นเจลอีตอนุภาคแก้วลอยเข้าด้วยกัน ซึ่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงจะสามารถชะซิลิกา และอะลูมินาที่เป็น อสัณฐานออกมาได้ดี แต่ทำให้ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มีความหนืดสูง และเทลงแบบหล่อได้ยาก ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5-10 โมลาร์ [3, 5] และเมื่อทดสอบโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเล (NaSE) จะพบว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนความเข้มข้น เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงกว่าของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเล (NaSE) ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งได้สอดคล้องกับกลุ่มทดสอบ Series A และ Series B ในส่วนของ NaSE=100% จะมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า NaDI=100% ประมาณ 4-5%



ภาพที่ 10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กับ ความเข้มข้นของ NaOH (NaDI = 100%)



ภาพที่ 11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กับ ความเข้มข้นของ NaOH (NaSE = 100%)

สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาของผลกระทบของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมน้ำทะเลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1. ผลทดสอบ Series A เปลี่ยนแปลงอัตราส่วน L/F จาก 0.5 ถึง 0.7 พบว่าเมื่ออัตราส่วน L/F เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง ซึ่งผลการทดสอบกำลังอัดสูงสุดเท่ากับอัตราส่วน L/F=0.50 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเล (NaSE)=100% กำลังอัดเท่ากับ 463.89 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีกำลังอัดที่สูงกว่าตัวอย่างที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำกลั่น (NaDI)=100% เพียงเล็กน้อยเท่ากับ 442.36 กก./ตร.ซม.
2. ผลทดสอบ Series B เปลี่ยนแปลงอัตราส่วน NS/NaOH จาก 0.33 ถึง 0.67 พบว่าเมื่ออัตราส่วน NS/NaOH เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่ออัตราส่วน NS/NaOH เพิ่มขึ้นจาก 0.67 ถึง 1.50 กำลังอัดจะมีค่าลดลง ซึ่งผลการทดสอบกำลังอัดสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วน NS/NaOH=0.67 ซึ่ง NaDI=100% (508.02 กก./ตร.ซม.) แต่กำลังอัดสูงกว่า NaSE=100% (506.40 กก./ตร.ซม.) เพียงเล็กน้อย
3. ผลการทดสอบ Series C เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 5 ถึง 15 โมลาร์ พบว่ากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มจาก 5 เป็น 10 โมลาร์ แต่เมื่อความเข้มข้นสูงมากกว่า 10 โมลาร์ทำให้กำลังอัดลดลง
4. ผลกระทบจากน้ำทะเลเมื่อนำมาเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะพบว่าการกำลังอัด ในทุกกลุ่มทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 4-5 % เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำทะเลมีความเข้มข้นสูงกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำกลั่น(จากการเตรียมสารละลาย ณ ความเข้มข้นที่เท่ากัน) เป็นผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขต ขอนแก่น และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. The office of industrial economics Thailand(e-Statistic) [Internet]. 2020 [updated 2019 Oct 19; cited 2021 Feb 10]. Available from: <https://indexes.oie.go.th/industrialStatistics1.aspx>
2. Minerals Yearbook (USGS) [Internet]. 2016 [updated 2019 Jan 10; cited 2020 Apr 5] Available from: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/myb.html>
3. Rattanasak U. Geopolymer :Thailand Concrete Association; 2017
4. ASTM C618-19. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019
5. Rattanasak U, Chindapasirt P. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, Miner. Eng. 2009; 22 (12): 1073–1078.
6. Posi P, Ridditirud C, Ekvong C, Chammanee D, Janthowong K, Chindapasirt P. Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam. Construction and Building Materials. 2015; 94: pp.408-413
7. ASTM C109-21. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021
8. Posi P, Teerachanwit C, Tanutong C, Limkamoltip S, Lertnimoolchai S, Sata V, et al. Lightweight geopolymer concrete containing aggregate from recycle lightweight block, Mater. Des. 2013; 52: 580–586
9. Rols S, Ambroise J, Péra J. Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete, Cem. Concr. Res. 1999; 29 (2): 261–266.
10. Wongpa J, Kiattikomol K, Jaturapitakkul C, Chindapasirt P. Compressive strength modulus of elasticity and water permeability of inorganic polymer concrete, Mater. Des. 1999; 31 (10): 4748–4754.
11. Kharita MH, Yousef S, AlNassar M. The effect of the initial water to cement on shielding properties of ordinary concrete, Prog. Nucl. Energy. 2010; 52 (5) 491–493.
12. Eiamwijit M, Pachana K, kaewpirom S, Rattanasak U, Chindapasirt P. Comparative study on morphology of ground sub-bituminous FBC fly ash geopolymeric mater. Advanced Power Technology. 2009; 26(4): 1053-1057