การต้านทานคลอไรด์ของเหล็กเสริมเมื่อเคลือบด้วยไฮบริดอัลคาไลผง

Chloride Resistance of Steel Bars Coated by Hybrid Alkali-Activated Powder

ฉัตรฑริกา เพียงพิมาย[1,*] กรกนก จอยนอก[2] ขัตติย ชมพูวงศ์[3] ชุดาภัค เดชพันธ์[4] ศตคุณ เดชพันธ์[5] ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ[6] และ ธนากร ภูเงินขำ[7]

[1,2,3,4,5,7] หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา

[6] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

**Corresponding author; E-mail address: chattarikapeangphimai@gmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการต้านทานคลอไรด์ของเหล็กเสริมเมื่อเคลือบด้วยไฮบริดอัลคาไลผงสังเคราะห์จากผงจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 50 ผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และซิลิกาฟูมร้อยละ 10 กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์และน้ำประปา โดยผงจีโอโพลิเมอร์ผลิตจากปูนซีเมนต์แทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 0 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สารละลายด่างที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยาในระบบ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ แปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 1.0 และ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) เท่ากับ 0.50 และอุณหภูมิที่ใช้บ่มตัวอย่างเท่ากับ 25 และ 60 องศาเซลเซียสทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้ผงจีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ ปริมาณการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและอุณหภูมิในการบ่มเพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของไฮบริดอัลคาไลผงได้เป็นอย่างดี ในขณะเดียวกันไฮบริดอัลคาไลผงที่ผลิตจากผงจีโอโพลิเมอร์สามารถต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์ได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์อยู่ระหว่าง 0.07-0.14x10^{-12} m^2/s มีค่ามากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมเท่ากับ 88.71 เท่า นอกจากนี้พบว่าการเคลือบเหล็กเสริมด้วยไฮบริดอัลคาไลผงมีโอกาสการเกิดการกัดกร่อนจากคลอไรด์น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมและไม่มีการเคลือบผิวด้วยวิธีการเร่งสนิมเนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาภายในระบบทำให้สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนของคลอไรด์ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ:ไฮบริดอัลคาไลผง, ผงจีโอโพลิเมอร์, วัสดุเคลือบผิว, การกัดกร่อน

Abstract

This research investigates the chloride resistance of steel bars coated with hybrid alkali-activated powder (HAAP) made from 50% geopolymer powder (GP), 40% cement Portland (PC), and 10% silica fume (SF) activated by 2 molar sodium hydroxide (NH) solution and tap water. The GP was made by substituting fly ash (FA) with PC at 0% and 20% by weight of binder. Sodium silicate (NS) and 14 molar sodium hydroxide (NH) solutions were used as the liquid alkali solutions. The NS/NH ratios of 1.0 and 2.0, the L/B ratio of 0.50, and curing temperatures of 25 and 60 °C were used in all mixtures. Test results showed that the factors of GP incorporating PC, increased NS/NH ratio, and increased curing temperature could improve the mechanical properties of the HAAP paste. The chloride penetration coefficient of the HAAP paste was between 0.07 and 0.14 x 10^{-12} m^2/s. They were more resistant to chloride than cement paste about 88.71 time. Moreover, it was found that the steel bars coated with HAAP paste seemed to be more resistant to chloride corrosion than those coated with cement paste and with no coating using Rapid Chloride Migration Test. It might be due to the fact that the reaction products of the HAAP paste within the matrix might enhance the resistance to chloride corrosion.

Keywords: hybrid alkali-activated powder, geopolymer powder, coating material, corrosion

1. คำนำ

ปัจจุบันโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่เมื่อผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลายาวนานมักพบปัญหาการแตกร้าวและหลุดร่อนของตัวอาคาร เนื่องจากเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมส่งผลให้โครงสร้างอาคารเกิดความเสียหายมีผลทำให้โครงสร้างรับกำลังได้ลดลงเสี่ยงต่อผู้ใช้งานหรือผู้อยู่อาศัยเป็นอย่างมาก สาเหตุหลักที่พบได้บ่อยคือการแพร่ของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีต (chloride contamination) จนเข้าไปทำลายออกไซด์ฟิล์มของเหล็ก จนเกิดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและความชื้นในอากาศหรือในน้ำทำให้เหล็กในบริเวณนั้นมีลักษณะและคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม มักพบเห็นได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริม

เหล็กที่อยู่ริมทะเลหรือพื้นที่ดินเค็ม เป็นต้น เมื่อคอนกรีตเกิดการสัมผัสกับคลอไรด์โดยตรงจะส่งผลให้คอนกรีตเสียหายอย่างรุนแรง โดยสารอันตรายจะเข้าไปทำลายเนื้อคอนกรีตหรือเหล็กเสริมทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม ส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กลดลงและคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเกิดรอยแตกร้าวหลุดร่อนออกไปในที่สุด เทคโนโลยีสำหรับการป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม เช่น [1] การปรับสภาพพื้นผิว (surface treatments), [2] สารยับยั้งการกัดกร่อน (corrosion inhibitors), [3] การป้องกันแบบแคโทดิก (cathodic protections) และ [4] วัสดุผสมพอลิเมอร์เสริมแรงเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer) ซึ่งสารเคลือบที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่าย (VOC) เป็นสารอันตรายที่ถูกจัดว่าเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ หากผู้ใช้งานรับสารเหล่านี้เข้าสู่ร่างกายเป็นเวลานานจะส่งผลเสียต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก [5] ดังนั้นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่มีคุณสมบัติยึดเกาะดี ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และมีความทึบน้ำสูงที่ได้รับความสนใจและถูกกล่าวถึงอย่างแพร่หลายจากบรรดาเหล่านักวิจัยเพื่อพัฒนามาใช้เป็นวัสดุทดแทนทางภาคอุตสาหกรรมนั่นคือวัสดุอัลคาไล

วัสดุอัลคาไล เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่สังเคราะห์ขึ้นมีโครงสร้างสามมิติแบบอสัณฐานเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นอะลูมิโนซิลิเกตที่เป็นของแข็ง เช่น เมตาคาลิน เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็ก ฯลฯ และกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายด่าง เช่น โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ [6] โดยวัสดุอัลคาไลที่นิยมใช้กันทั่วไปจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นเรียกว่า วัสดุอัลคาไลแบบสองส่วนผสม (Two-part alkali-activated materials) ข้อเสียของการใช้กรรมวิธีการผลิตแบบนี้คือไม่ปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน มีความยุ่งยากในการนำไปใช้งานได้จริง เนื่องจากสารละลายมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง ยากต่อการขนส่ง [7] ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะพัฒนาวัสดุอัลคาไลที่มีความปลอดภัยและให้เกิดความสะดวกต่อผู้ใช้งานมากขึ้นเรียกวิธีการผลิตวัสดุอัลคาไลแบบนี้ว่า “วัสดุอัลคาไลแบบส่วนผสมเดียว” (One-part alkali-activated materials) ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นหลังจากนำวัสดุตั้งต้นอะลูมิโนซิลิเกตผสมกับตัวกระตุ้นอัลคาไลในรูปของของแข็งผสมเข้ากันเป็นส่วนผสมแห้งก่อนและผสมกับน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคล้ายกับการผสมของระบบซีเมนต์ทั่วไป [8-11]. ระยะเวลาการก่อตัวของตะกรันเหล็กแบบส่วนผสมเดียวใช้เซรามิกรวงผึ้งแช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดละเอียดสามารถชะลอระยะเวลาการก่อตัวได้นานถึง 70 ชั่วโมง [12] การใช้สารเคลือบจีโอโพลิเมอร์ผลิตจากเมตาคาลินผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการเคลือบ และจากผลทดสอบการเร่งสนิมเพื่อวัดการกัดกร่อนของคลอไรด์พบว่าจีโอโพลิเมอร์สามารถใช้เป็นสารเคลือบป้องกันสำหรับคอนกรีตที่สัมผัสกับคลอไรด์ได้ [13] ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยผสมตะกรันต่ำกว่าคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ [14] จะเห็นได้ว่าวัสดุอัลคาไลแบบส่วนผสมเดียวมีข้อดีแตกต่างจากวัสดุอัลคาไลแบบสองส่วนผสมคือสามารถชะลอระยะเวลาการก่อตัวได้ค่อนข้างดีและมีคุณสมบัติเด่นอีกหนึ่งอย่างคือมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของผงจีโอโพลิเมอร์สำหรับนำมาผลิตไฮบริดอัลคาไลผงพัฒนาเป็นวัสดุเคลือบผิวป้องกันสนิมในเหล็กเสริม ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดของไฮบริดอัลคาไลผง ตลอดจนทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์ในเหล็กเสริมเมื่อใช้ไฮบริดอัลคาไลผงเป็นวัสดุเคลือบผิวเพื่อยับยั้งการเกิดสนิม ผลการทดสอบที่ได้รับจะช่วยให้สามารถนำข้อมูลเชิงกลเบื้องต้นไปศึกษาวิเคราะห์เพิ่มเติมในเรื่องความเป็นไปได้สำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตยังภาคอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้สำหรับผลิตผงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (GP paste)

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ประกอบด้วย เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุตั้งต้นประกอบด้วย เถ้าลอยและปูนซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ซึ่งเถ้าลอยมีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 36.93 อะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 18.10 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 11.91 และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 21.41 เป็นหลัก จะเห็นว่าปริมาณผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 66.94 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จึงจัดเป็นเถ้าลอยประเภท C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [15]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูม [16]

CHEMICAL COMPOSITIONS (%)	FA	PC	SF
SiO_2	36.93	20.80	92.00
Al_2O_3	18.10	4.70	0.70
Fe_2O_3	11.91	3.40	1.20
CaO	21.41	65.30	0.20
MgO	2.78	1.50	0.20
K_2O	2.28	0.10	0.40
Na_2O	1.42	0.40	0.10
TiO_2	0.36	-	-
P_2O_5	0.20	-	-
SO_3	2.90	2.70	-
LOI	1.54	0.90	-

สารละลายด่างที่ใช้สำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 12.37 ซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 29.94 และน้ำ (H_2O) ร้อยละ 57.69 โดยน้ำหนัก และมีซิลิกาโมดูลัสเท่ากับ 2.40

2.2 วัสดุที่ใช้ในสำหรับผลิตไฮบริดอัลคาไลผง (HAAP paste)

วัสดุตั้งต้นที่ใช้สำหรับผลิตเพสต์จากผงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ประกอบด้วยผงจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากหัวข้อย่อยที่ 2.1 นำมาผ่านกระบวนการปรับปรุง

คุณภาพด้วยวิธีการบดละเอียดด้วยเครื่องบดแบบบอลมิล (Ball-mill) และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซิลิกาฟูม กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ผสมเข้ากับน้ำประปา ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูมแสดงไว้ในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย ปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูม

MATERIALS	FA	PC	SF
Specific gravity	2.67	3.15	2.29
Median Particle Size, d_{50} (μm)	15.3	14.6	0.10
Blaine fineness (cm^2/g)	4300	3600	6680

2.3 อัตราส่วนผสมของผงจีโอโพลิเมอร์เพสต์

อัตราส่วนสำหรับการผลิตผงจีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุตั้งต้นเพื่อผลิตไฮบริดอัลคาไลผงแสดงดังตารางที่ 3 แปรผันอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าลอยร้อยละ 0 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(NS/NH) เท่ากับ 1.0 และ 2.0 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน (L/B) เท่ากับ 0.50 และใช้อุณหภูมิในการบ่มจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 25 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทุกอัตราส่วนผสม

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของผงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ [16]

NS/NH	SYMBOL	FA (g)	PC (g)	NS (g)	14M NH (g)
1.0	100FA-0PC	100	-	25	25
	80FA-20PC	80	20	25	25
2.0	100FA-0PC	100	-	33	17
	80FA-20PC	80	20	33	17

2.4 อัตราส่วนผสมของไฮบริดอัลคาไลผง

อัตราส่วนผสมสำหรับใช้ผลิตเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงแสดงในตารางที่ 4 ประกอบด้วยอัตราส่วนของผงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (GP) ร้อยละ 50 ปูนซีเมนต์ (PC) ร้อยละ 40 และซิลิกาฟูม (SF) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ยังมีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เพิ่มเข้ามาในระบบเพื่อใช้ในเร่งปฏิกิริยาเคมี และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 ของทุกอัตราส่วนผสม

กระบวนการสุดท้ายสำหรับการผลิตเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผง : เริ่มต้นดำเนินการผสมผงจีโอโพลิเมอร์ ปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูมคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำประปาแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นเปิดเครื่องผสมด้วยความเร็วต่ำ (140±5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 60 วินาที สุดท้ายหยุดพักเครื่องเป็นเวลา 20 วินาที และเปิดเครื่องผสมอีกครั้งด้วยความเร็วปานกลาง (285±10 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที จนส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน [16]

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผง

Symbol	GP (g)	FA (g)	PC (g)	SF (g)	2M NH (g)	TAP WATER (g)
50GP-40PC-10SF	50	-	40	10	10	35
50FA-40PC-10SF	-	50	40	10	10	35
100PC	-		100	-	-	45

2.5 การทดสอบตัวอย่าง

2.5.1 ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัด

ทดสอบการก่อตัวของไฮบริดอัลคาไลผงด้วยเครื่องมือไวแคท โดยประยุกต์ตามมาตรฐาน ASTM C191 [17] หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการผสมเสร็จแล้วทำการเทลงแบบขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 [18] จากนั้นทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างและเก็บรักษาตัวอย่างที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดทำการถอดแบบและห่อด้วยฟิล์มพลาสติกและเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการบ่ม 1, 7 และ 28 วัน วิเคราะห์ผลการทดสอบโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง

2.5.2 การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์ด้วยวิธีการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid migration) ดำเนินการตามมาตรฐาน NT-Build 492 [19] หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้วทำการเทเพสต์ลงในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง จากนั้นทำการตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างด้วยการพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.10 นอร์มอล สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์ ดังแสดงในสมการที่ (1)

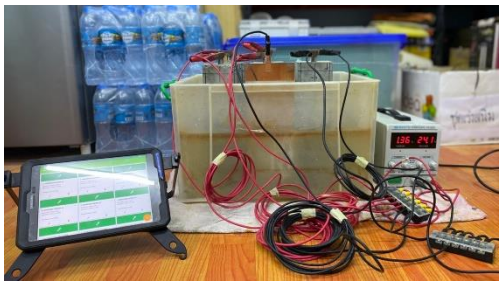
$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t}\left(x_d - 0.0238\sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}}\right) \quad (1)$$

เมื่อ D_{nssm} หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์ ($x10^{-12}$ m^2/s), U หมายถึง แรงดันไฟฟ้า (V), T หมายถึง ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายในสารละลาย Anolyte (°C), L หมายถึง ความหนาของตัวอย่าง (mm), x_d หมายถึง ค่าเฉลี่ยความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ (mm), t หมายถึง ระยะเวลาการทดสอบ (hour)

2.5.3 การวัดพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบการกัดกร่อนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตเมื่อใช้เพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงเป็นวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม คอนกรีตจะถูกออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามวิธีการ

ออกแบบมาตรฐาน ACI 211.1 [20] เท่ากับ 25 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่น 28 วัน โดยจะดำเนินการเคลือบผิวเหล็กเสริมที่อายุ 1 วัน เมื่อครบอายุการเคลือบผิวเหล็กเสริม หลังจากนั้นทำการเทคอนกรีตสดลงในแบบหล่อรูปทรงปริซึมขนาด 75x75x260 มิลลิเมตร เสียบเหล็กเส้นข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร ที่กึ่งกลางหน้าตัด การทดสอบดำเนินวิธีการตามมาตรฐาน ASTM C876 [21] การต้านทานการกัดกร่อนแบบเร่งเรียกว่า Accelerated Corrosion with Impressed Voltage (ACTIV) โดยทำการวัดพื้นที่การเกิดสนิมในเหล็กเสริมที่อายุคอนกรีตเท่ากับ 28 วัน เริ่มวัดพื้นที่การเกิดสนิมของตัวอย่างหลังจากการเร่งสนิมเป็นระยะเวลา 3 และ 6 ชั่วโมง ที่บริเวณผิวด้านบนของตัวอย่างคอนกรีต เก็บบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลผ่านโปรแกรม Giatec xCell ลักษณะเครื่องมือสำหรับการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential)

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัด

ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์ที่แปรผันปริมาณปูนซีเมนต์ในเถ้าลอยร้อยละ 0 และ 20 ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงสามารถแบ่งออกเป็น 3 กรณี ประกอบด้วย กรณีของการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าลอย กรณีของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าลอยและปริมาณอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์มีผลให้ปริมาณแคลเซียมในระบบเพิ่มขึ้นทำให้มีระยะเวลาการก่อตัวสั้นลงและเพสต์ก่อตัวเร็วขึ้น [22] กรณีเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิกาจะช่วยเร่งระยะเวลาการก่อตัวให้รวดเร็วขึ้น [23] และกรณีสุดท้าย คือ ปัจจัยของอุณหภูมิในการบ่มของผงจีโอโพลิเมอร์ พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

คากำลังรับแรงอัดของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงสังเคราะห์จากผงจีโอโพลิเมอร์ที่แปรผันปริมาณปูนซีเมนต์ในเถ้าลอยดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่ากำลังอัดของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงมีแนวโนมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนตในเถ้าลอยเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์ในเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ในระบบมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นร่วมกับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่นของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผง [22, 24] ส่งผลเชิงบวกต่อกำลังรับแรงอัดแต่อย่างไรก็ตามจะเป็นการเร่งระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์เร็วขึ้น [24] ขณะที่ปัจจัยของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) ต่อกำลังอัดของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากซิลิกาที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมเชียมออกไซด์จากวัสดุตั้งต้นและเกิดเป็นผลผลิตแคลเซียมอะลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) อยู่ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจล (N-A-S-H) [23] จึงส่งผลเชิงบวกต่อสมบัติเชิงกลของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผง ส่วนปัจจัยด้านอุณหภูมิการบ่มตัวอย่างต่อกำลังอัดของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผง พบว่ากำลังอัดของการบ่มที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส โดยปกติอุณหภูมิการบ่มตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นช่วยเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชั่นทำนองเดียวกันกับการใช้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ในระบบของจีโอโพลิเมอร์ [22] แต่อย่างไรก็ตามผลการทดสอบของงานวิจัยนี้ที่ใช้เป็นผงจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการบดเรียบร้อยแล้วอาจส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาภายในระบบอย่างมีนัยสำคัญ โดยข้อมูลเชิงลึกด้านโครงสร้างทางจุลภาคจะดำเนินการวิเคราะห์และอภิปรายในงานวิจัยต่อไป

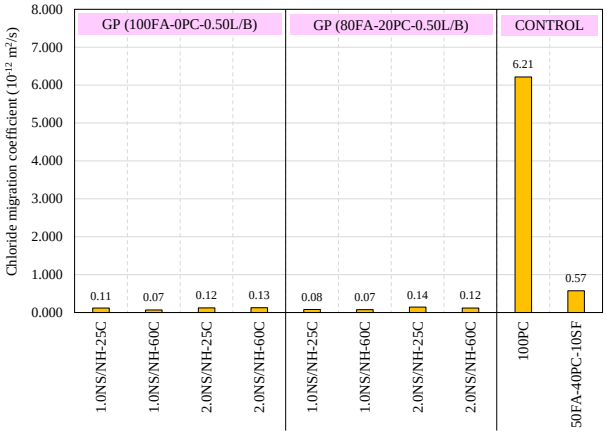
ตารางที่ 5 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงสังเคราะห์จากผงจีโอโพลิเมอร์เทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม

NS/NH	SYMBOL (50GP-40PC-10SF)	COMPRESSIVE STRENGTH (MPa)						SETTING TIME (Min)			
		CURED AT 25 °C			CURED AT 60 °C			CURED AT 25 °C		CURED AT 60 °C	
		1-d	7-d	28-d	1-d	7-d	28-d	INITIAL	FINAL	INITIAL	FINAL
1.0	100FA-0PC	4.19	8.58	11.10	5.30	8.84	11.65	28	38	36	46
	80FA-20PC	4.47	8.75	12.08	5.38	9.06	12.61	24	33	31	42
2.0	100FA-0PC	5.13	9.34	12.04	6.41	10.66	12.30	22	33	30	40
	80FA-20PC	5.31	9.47	13.79	6.65	10.74	13.95	17	28	27	36
CONTROL	100PC	20.49	37.01	41.93	-	-	-	208	322	-	-
	50FA-40PC-10SF	4.86	19.00	24.25	-	-	-	350	457	-	-

หมายเหตุ: CONTROL (ซีเมนต์เพสต์ควบคุม คือ วัสดุที่ไม่ได้มีการนำไปปรับปรุงคุณภาพ) = หลังจากการผสมเสร็จเก็บตัวอย่างไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ 25°C

3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์

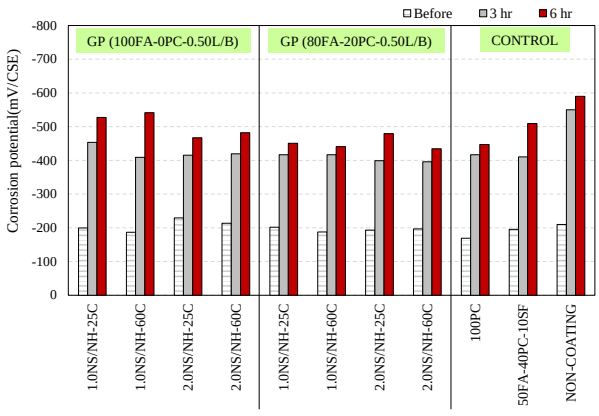
ผลการศึกษาการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่งของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์ได้ดีเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม ยกตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์ของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์เพสต์สำหรับอัตราส่วนผสมของ GP(100FA-0PC-0.50L/B) และ GP(80FA-20PC-0.50L/B) เท่ากับ 0.11, 0.07, 0.12 และ 0.13x10^{-12} m^2/s และ 0.08, 0.07, 0.14 และ 0.12 x10^{-12} m^2/s สำหรับอัตราส่วน 1.0NS/NH-25ºC, 1.0NS/NH-60ºC, 2.0NS/NH-25ºC และ 2.0NS/NH-60ºC ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์อยู่ระหว่าง 0.07-0.14x10^{-12} m^2/s ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ควบคุมให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์เท่ากับ 6.21x10^{-12} m^2/s สำหรับอัตราส่วนผสมของ 100PC และ 0.57x10^{-12} m^2/s สำหรับอัตราส่วนผสมของ 50FA-40PC-10SF จะเห็นได้ว่าเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมของ 100PC มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์สูงกว่าประมาณ 44.36-88.71 เท่า และสำหรับอัตราส่วนผสมของ 50FA-40PC-10SF มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์สูงกว่าเช่นเดียวกันประมาณ 4.07-8.14 เท่า เนื่องจากผลผลิตโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) ที่จับตัวกันอย่างหนาแน่น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง วัสดุอัลคาไลจึงมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์ได้ดี [25]



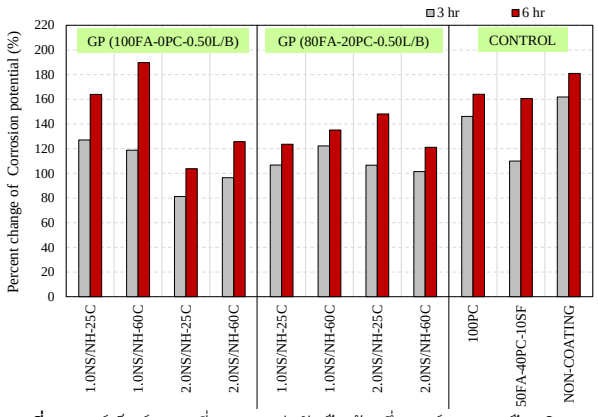
รูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์

3.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ผลการศึกษาการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตเมื่อใช้เพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงเป็นวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริมและร้อยละการสูญเสียค่าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมหลังจากแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยวิธีการเร่งสนิมดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์หลังจากการเร่งสนิมของเหล็กเสริมที่เคลือบด้วยเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีโอกาสการเกิดสนิมน้อยกว่าเหล็กเสริมที่ไม่มีการเคลือบผิว ยกตัวอย่างเช่น อัตราส่วนผสมของ GP(100FA-0PC-0.50L/B) และ GP(80FA-20PC-0.50L/B) เท่ากับ -527, -542, -467, และ -482 mV/CSE และ -451, -441, -479 และ -434 mV/CSE สำหรับอัตราส่วน 1.0NS/NH-25ºC, 1.0NS/NH-60ºC, 2.0NS/NH-25ºC และ 2.0NS/NH-60ºC ตามลำดับ ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ควบคุมอย่างอัตราส่วนผสมของ 100PC, 50FA-40PC-10SF และเหล็กเสริมที่ไม่ได้เคลือบผิวเหล็กเสริมพบว่ามีค่าการกัดกร่อนเท่ากับ -447, -509 และ -590 mV/CSE เมื่อเปรียบเทียบค่าผลการทดสอบก่อนการเร่งสนิมพบว่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของการกัดกร่อนเหล็กเสริมของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากค่าเริ่มต้นมาถึงการเร่งสนิมเวลา 6 ชั่วโมง มีโอกาสเกิดสนิมเพิ่มขึ้นจากเดิมเท่ากับ 164, 190, 104, และ 126 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอัตราส่วนผสม GP(100FA-0PC-0.50L/B) และ 124, 135, 148, และ 121 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอัตราส่วนผสม GP(80FA-20PC-0.50L/B) ที่อัตราส่วน 1.0NS/NH-25ºC, 1.0NS/NH-60ºC, 2.0NS/NH-25ºC และ 2.0NS/NH-60ºC ตามลำดับ ในขณะเดียวกันอัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ควบคุมเท่ากับ 164, 161, และ 181 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอัตราส่วนผสมของ 100PC, 50FA-40PC-10SF และเหล็กเสริมที่ไม่ได้เคลือบผิวตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์ที่การแปรผันอัตราส่วน NS/NH=2.0 และอุณหภูมิที่ใช้บ่มสูงขึ้นทำให้ค่าการกัดกร่อนของการเร่งสนิมลดลง จากงานวิจัยของ Aguirre-Guerrero et al. [26] เนื่องจากผลผลิตโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) จากวัสดุจีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้มีคุณสมบัติความทึบน้ำสูงขึ้นส่งผลให้สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนจากคลอไรด์ได้เป็นอย่างดี และผลจากการก่อตัวที่เชื่อมโยงกันของโครงข่ายสามมิติของเจลโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ช่วยลดการแพร่ของคลอไรด์ [27]



รูปที่ 3 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์



รูปที่ 4 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์

4. บทสรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1) การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในเถ้าลอยและปริมาณการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถทำงานได้ลดลง อย่างไรก็ตามยังส่งผลเชิงบวกต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของเพสต์ไฮบริดอัลคาไลผง เนื่องจากเป็นการเพิ่มแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาในระบบ
2) การซึมผ่านของคลอไรด์ของไฮบริดอัลคาไลผงที่ผลิตจากผงจีโอโพลิเมอร์สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ได้ถึง 88 เท่า หรือเท่ากับ 0.07×10^{-12} m^2/s
3) เพสต์ไฮบริดอัลคาไลผงจากผงจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสมของ 80FA-20PC มีโอกาสเกิดสนิมได้น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมและเหล็กเสริมที่ไม่มีการเคลือบ เนื่องจากเจลโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ที่เกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายจีโอโพลิเมอร์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ โดยหน่วยงานบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคนและทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม เลขที่สัญญา B05F640178 และขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน (SUSCON LAB) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่

activator. *Construction and Building Materials*, 235, pp. 117091.

[13] Aguirre-Guerrero, A.M., Robayo-Salazar, R.A. and Gutiérrez, R.M. (2017). A novel geopolymer application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion. *Applied Clay Science*, 135, pp. 437-446.

[14] Tennakoon, C., Shayan, A., Sanjayan, J.G. and Xu, A. (2017). Chloride ingress and steel corrosion in geopolymer concrete based on long term tests. *Materials and Design*, 116, pp. 287–299.

[15] ASTM C618. (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Cement. *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01.

[16] กรกนก จอยนอก, ขัตติยะ ชมพูวงศ์, ชุดาภัค เดชพันธ์, ศตคุณ เดชพันธ์, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ และ ธนากร ภูเงินขำ (2563). การศึกษาเบื้องต้นของผงอัลคาไล. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า 1-6.

[17] ASTM C191. (2021). Standard test method for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle. *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01.

[18] ASTM C109. (2020). Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01.

[19] NT-BUILD-492 NM. (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride Migration Coefficient from non-steady-state migration experiments.

[20] ACI 211.1. (1991). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. American Concrete Institute.

[21] ASTM C876. (2016). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 04.01.

[22] Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V. and Chindaprasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials & Design*, 53, pp. 269-274.

[23] Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K. and Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *Journal of Materials Science*, 47, pp. 4876-4883.

[24] Dombrowski, K., Buchwald, A. and Weil, M. (2007). The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42, pp. 3033-3043.

[25] Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., San Nicolas, R., Brice, D.G., Kilcullen, A.R., Hamdan, S. and van Deventer, J.S.J. (2013). Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 48, pp. 1187–1201.

[26] Aguirre-Guerrero, A. M., Robayo-Salazar, R. A. and de Gutiérrez, R. M. (2017). A novel geopolymer application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion. *Applied Clay Science*, 135, pp. 437-446.

[27] Gunasekara, C., Law, D., Bhuiyan, S., Setunge, S. and Ward, L. (2019). Chloride induced corrosion in different fly ash based geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 200, pp. 502-513.