

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และนาโนซิลิกาในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย

Use of Ordinary Portland Cement and Nano-Silica in Fly Ash Based Geopolymer Concrete

กิม เหนือคลอง (Peem Nuaklong)* ดร.วันชัย สะตะ (Dr.Vanchai Sata)^{1**}

ดร.ปริญา จินดาประเสริฐ (Dr.Prinya Chindaprasirt)^{***}

(Received: February 16, 2018; Revised: May 25, 2018; Accepted: May 30, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษสมบัติทางกลและความทนทานของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และนาโนซิลิกา (nS) ในส่วนผสม ทำการแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูง (HCF) ด้วย OPC ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก และใส่ nS เพิ่มร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ทำการทดสอบค่าการไหล แผล่ กำลัง การดูดซึมน้ำ การแทรกซึมของคลอไรด์ และการทนทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ OPC มีแนวโน้มทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดลง ส่วนการใช้ nS ทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลงมาก จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ OPC และ nS ในส่วนผสมให้กำลังสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยล้วน นอกจากนั้นยังพบว่าการใช้ OPC สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้นขณะที่ความทนทานต่อการกัดกร่อนกรดซัลฟูริกมีแนวโน้มลดลง ส่วนการใช้ nS ทำให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกลดลง

ABSTRACT

This study investigated the mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing ordinary Portland cement (OPC) and nano-SiO₂ (nS). OPC was used as a partial replacement of high calcium fly ash (HCF) in geopolymer concrete at the rate of 5, 10 and 15% by weight of binder. While, nS was added at the rate of 1, 2 and 3% by weight of HCF. The slump flow, strength, water absorption, chloride penetration and sulfuric acid resistant of geopolymer concrete were tested. The results revealed that the use of OPC decreased the workability of geopolymer concrete and the use of nS resulted in little change in the workability. The use of both OPC and nS gave higher strength than that of geopolymer concrete with only fly ash. In addition, it was found that the use of OPC resulted in the improvement of chloride penetration of geopolymer concrete, while the resistant to sulfuric acid tended to decrease. The use of nS led to reductions in resistances to chloride penetration and acid attack.

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นาโนซิลิกา เถ้าลอย

Keywords: Geopolymer concrete, Ordinary Portland cement, Nano silica, Fly ash

¹ Correspondent author: vancsa@kku.ac.th

* นักศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** รองศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*** ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และภาควิชาวิศวกรรมโยธา สานามเสื่อป่า เขตคูสิต กรุงเทพมหานคร



บทนำ

เถ้าลอยเป็นหนึ่งในวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักเมื่อผสมกับสารละลายต่าง เช่น โซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะก่อให้เกิดสารที่มีความข้นเหลวและมีสมบัติในการเชื่อมประสานเช่นเดียวกับสารซีเมนต์ที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ สามารถยึดเหนี่ยวมวลรวมเข้าด้วยกัน เมื่อก่อตัวและแข็งตัวจะมีความแข็งแรงและรับกำลังได้อีกทั้งยังสามารถทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้อย่างดี [1] วัสดุเชื่อมประสานประเภทนี้มีชื่อเรียกว่า “จีโอโพลิเมอร์”

ปริมาณซิลิกา (SiO_2) ที่ได้จากวัตถุดิบที่นำมาผลิตส่งผลต่อสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มปริมาณ SiO_2 สามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวและลดปริมาณโพรงในโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ [2] นาโนซิลิกาเป็นวัสดุที่มี SiO_2 ในปริมาณที่สูงมากอีกทั้งยังมีขนาดอนุภาคที่เล็กระดับนาโนเมตร (1-100 nm) ส่งผลให้มีความไวต่อการทำปฏิกิริยา [3] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณซิลิกาในวัสดุจีโอโพลิเมอร์โดยการใช้นาโนซิลิกาจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการพัฒนาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

นอกจากซิลิกาที่มีอยู่ในวัตถุดิบตั้งต้นแล้ว แคลเซียมยังเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่มีบทบาทสำคัญและส่งผลต่อสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ Chindaprasirt และคณะ [2] รายงานว่าแคลเซียมออกไซด์สามารถลดการเกิดโซเดียมอลูมิโนซิลิเกตไฮดรตที่อยู่ในรูปของผลึกหรือซีโอไลต์ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ ซึ่งเจลชนิดนี้ไม่ส่งผลดีต่อกำลังรับแรงของจีโอโพลิเมอร์ นอกจากนั้นงานวิจัยของ Nath และ Sarker [4] ยังพบว่าแคลเซียมออกไซด์จากตะกรันเตาถลุงเหล็กสามารถช่วยให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำก่อตัวได้เร็วขึ้น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มกำลังอัดในระยะแรกได้อีกด้วย

จะเห็นได้ว่าวัสดุทั้งสองชนิดมีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนาสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ นอกจากนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ OPC หรือ mS ผสมร่วมกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงนั้นมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติในด้านของความทนทาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสม OPC และ mS เปรียบเทียบผลการทดสอบกับส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยล้วน พร้อมทั้งหาปริมาณการใช้ที่เหมาะสมในการทำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูง (ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.43) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง เป็นวัตถุดิบหลักในการสังเคราะห์สารจีโอโพลิเมอร์ ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และนาโนซิลิกา (เกรดการค้า) ที่มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 40 นาโนเมตร สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหล่านี้แสดงในตารางที่ 1 ในส่วนของสารละลายต่างที่ใช้ ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , NH) ที่มีความเข้มข้น 12 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , NS) ที่มีองค์ประกอบของ Na_2O , SiO_2 และ H_2O เท่ากับ 12.3%, 30.3% และ 57.3% ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบและละเอียดที่ใช้ในงานวิจัย (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM) มวลรวมหยาบจากหินปูนย่อยมีขนาดโตสุดเท่ากับ 9.5 mm มีความถ่วงจำเพาะ, โมดูลัสความละเอียด และหน่วยน้ำหนักกระทุ้งแน่นแบบแห้งเท่ากับ 2.65, 6.0 และ 1,511 kg/m^3 ตามลำดับ ในขณะที่มวลรวมละเอียดจะใช้ทรายแม่น้ำที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.6

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และนาโนซิลิกา

สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอยแคลเซียมสูง (HCF)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)	นาโนซิลิกา (nS)
SiO ₂	36.2	17.2	99.8
Al ₂ O ₃	19.9	4.02	0.08
CaO	14.2	63.1	-
FeO ₃	11.9	3.11	0.01
MgO	1.88	0.94	0.03
K ₂ O	2.41	0.64	-
SO ₃	3.57	3.85	-
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา	0.4	0.9	<1.0
ร้อยละของน้ำหนักที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325	34.8	5.0	<0.2

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบและละเอียด

สมบัติของมวลรวม	หินปูน	ทราย
ความถ่วงจำเพาะ (อิมิตัวผิวแห้ง)	2.65	2.63
หน่วยน้ำหนักกระทุ้งแน่นแบบแห้ง (kg/m ³)	1,511	1,764
ร้อยละการดูดซึมน้ำ	0.61	1.07
ร้อยละการสึกกร่อน (Los Angeles abrasion loss)	33.9	-

2. สัดส่วนผสมและขอบเขตงานวิจัย

ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนผสมและหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยทุกส่วนผสมจะมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายต่างต่อวัสดุประสานและ NS/NH เท่ากับ 0.60 และ 1.5 ตามลำดับ ส่วนผสมที่ทำการแทนที่เถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก จะใช้สัญลักษณ์ย่อ 5OPC, 10OPC และ 15OPC ตามลำดับ ในขณะที่สัญลักษณ์ย่อ nS, 2nS และ 3nS ใช้กำกับส่วนผสมที่ใส่นาโนซิลิกาเพิ่มร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอยตามลำดับ สำหรับส่วนผสมควบคุมที่ใช้เถ้าลอยล้วนเป็นส่วนผสมจะใช้สัญลักษณ์ย่อเป็น CON จะเห็นได้ว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของ OPC หรือ nS มีหน่วยน้ำหนักที่ไม่แตกต่างจากส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยล้วนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากมีการใช้ในส่วนผสมในปริมาณไม่มาก

3. ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

การผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน แต่ละขั้นตอนจะใช้เวลาในการผสมในโม่ผสมเป็นระยะเวลา 5 นาที เริ่มจากการคลุกเคล้าเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์หรือนาโนซิลิกาจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงใส่ NH ในลำดับแรก หลังจากนั้นจึงใส่มวลรวมทั้งหมดและ NS ในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ทำการเก็บตัวอย่างด้วยการอัดแน่นโดยใช้เหล็กกระทุ้ง หลังจากผสมคอนกรีตเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะทำการหล่อแบบหล่อด้วยพลาสติกฟิล์มแล้วจึงนำตัวอย่างเข้าเตาอบและบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านการบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง นำ



ตัวอย่างออกจากแบบหล่อและห่อด้วยพลาสติกฟิล์มอีกครั้ง แล้วนำไปเก็บรักษาที่ห้องควบคุมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50-55 และมีอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีอายุครบ 7 วัน จึงนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมและหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (kg/m^3)

ส่วนผสม	HCF	OPC	nS	ทราย	NS	NH (12 M)	หินปูน	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)
CON	450	-	-	500	162	108	1,150	2,370
5OPC	428	22	-	500	162	108	1,150	2,358
10OPC	405	45	-	500	162	108	1,150	2,331
15OPC	382	68	-	500	162	108	1,150	2,334
1nS	450	-	4.5	500	162	108	1,150	2,341
2nS	450	-	9.0	500	162	108	1,150	2,314
3nS	450	-	13.5	500	162	108	1,150	2,323

4. สมบัติของคอนกรีตที่ทำการทดสอบ

ทำการทดสอบสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ หาค่าการไหลแผ่ ปริมาณโพรง กำลังรับแรง การดูดซึมน้ำ และอัตราการดูดซึมน้ำโดยใช้ตัวอย่างที่มีลักษณะและทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4 สำหรับการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะทำตามวิธีของ Somma และคณะ [5] และ Rerkpiboon และคณะ [6] โดยใช้ตัวอย่างที่มีลักษณะเดียวกับตัวอย่างที่ใช้ทดสอบกำลังอัด หลังจากนำมาตัดที่กึ่งกลางความสูงจะได้ตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 10 cm จากนั้นจึงทำการเคลือบผิวด้านข้างและด้านบนของตัวอย่างด้วยอีพอกซีเพื่อให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ในทิศทางเดียว (บริเวณแนวตัดที่กึ่งกลางความสูง) ความลึกจากการแทรกซึมของคลอไรด์จะถูกวัดหลังจากการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (0.1 N) ทดพ่นผิวด้านในของตัวอย่างที่ผ่านการดึงแยกแบบผ่าซีก การทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายทั้งสองจะปรากฏทราบเกลือสีขาว (ซิลเวอร์คลอไรด์) ในบริเวณที่คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปได้ จากนั้นจึงใช้เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์วัดความลึกของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่เนื้อของคอนกรีต

ประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM C267 [7] เพื่อวัดความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรด โดยใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 10 cm แช่จุ่มในสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 หลังจากสัมผัสกับกรดเป็นระยะเวลา 7, 14, 28, 56, 84 และ 120 วัน เอาตัวอย่างขึ้นจากสารละลาย นำเศษผิวคอนกรีตที่หลุดล่อนจากการกัดกร่อนของกรดออกโดยใช้แปรงขัดเบา ๆ ก่อนจะนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น (น้ำหนักของตัวอย่างก่อนที่จะนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลาย) สำหรับการทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์และกรดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เมื่อตัวอย่างแช่ในสารละลายจนกระทั่งถึงอายุการทดสอบ เปลี่ยนสารละลายใหม่เพื่อเป็นการรักษาความเข้มข้นของสารละลายให้สม่ำเสมอตลอดงานวิจัย

ตารางที่ 4 ลักษณะของตัวอย่างและมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

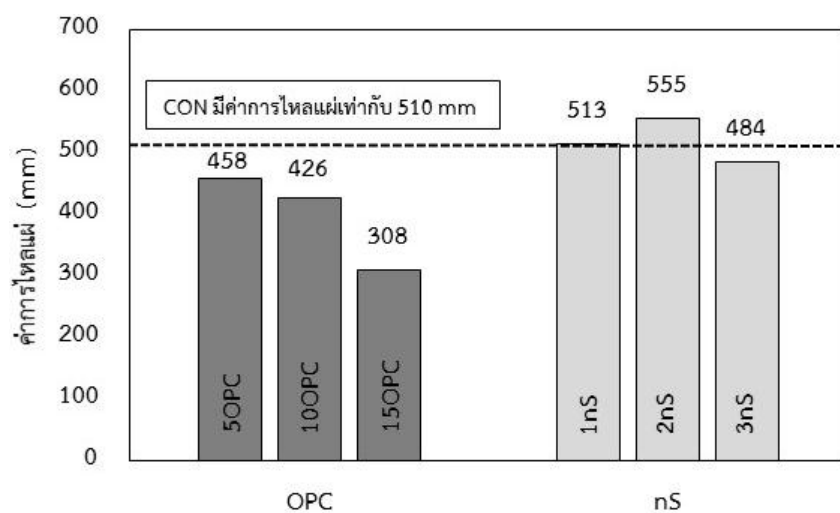
สมบัติ	รูปร่างและลักษณะของตัวอย่าง	มาตรฐานการทดสอบ
ค่าการไหลแผ่	คอนกรีตสด	ASTM C1611 [8]
โพรง	แผ่นกลม, เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cmหนา 5 cm	ASTM C642 [9]
กำลังอัด	ทรงกระบอก, เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	ASTM C39 [10]
กำลังดึงแยก	ทรงกระบอก, เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	ASTM C496 [11]
กำลังดัด	คาน, หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 7.5 cm ยาว 30 cm	ASTM C78 [12]
การดูดซึมน้ำ	แผ่นกลม, เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cmหนา 5 cm	ASTM C642 [9]
อัตราการดูดซึมน้ำ	แผ่นกลม, เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cmหนา 5 cm	ASTM C1585 [13]

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ความสามารถในการทำงานได้

ภาพที่ 1 แสดงค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทุกส่วนผสม จะเห็นได้ว่าค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อใช้ OPC ในส่วนผสมและมีค่าลดลงมากยิ่งขึ้นเมื่อใช้ในปริมาณที่มากขึ้น ส่วนผสม 5OPC, 10OPC และ 15OPC มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 458, 426 และ 308 mm ซึ่งลดลงร้อยละ 10, 16 และ 40 เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม เนื่องจากลักษณะของ OPC ที่เป็นเหลี่ยมมุมแตกต่างจากเกล็ดลอยที่มีลักษณะกลมมน ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานหรือแรงเสียดทานภายในส่วนผสมมากขึ้น [14]

ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของ nS มีค่าการไหลเปลี่ยนแปลงไม่มาก แต่ถ้าใส่ในปริมาณที่มากขึ้นมีแนวโน้มของค่าการไหลแผ่ที่ลดลงเล็กน้อย โดยการผสม nS ร้อยละ 3 ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลงร้อยละ 5 เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Bernal และคณะ [15] ที่ใช้นาโนซิลิกาในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต โดยพวกเขาให้เหตุผลว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กของ nS สามารถดูดซับน้ำหรือของเหลวที่ใช้ในส่วนผสมส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ลดลง



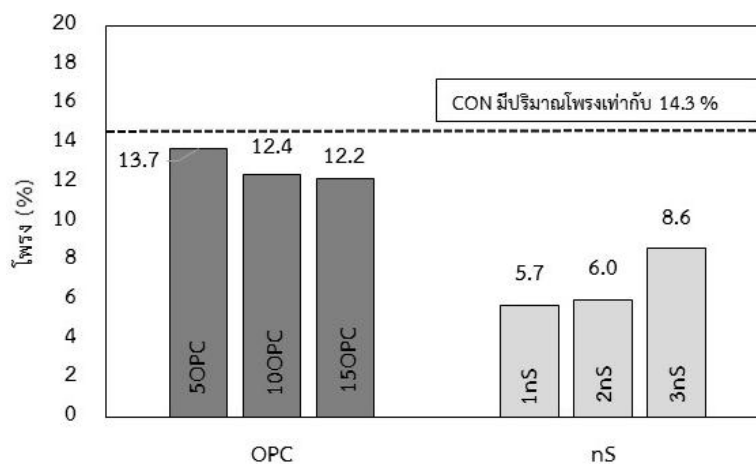
ภาพที่ 1 ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



2. โพรงในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

จากภาพที่ 2 ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าการใช้ OPC และ nS ผสมร่วมกับเถ้าลอยส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีปริมาณโพรงที่ลดลง โดยการแทนที่เถ้าลอยด้วย OPC ร้อยละ 5 ถึง 15 ส่งผลให้โพรงของคอนกรีตลดลงร้อยละ 0.6 ถึง 2.1 และลดลงร้อยละ 5.7 ถึง 8.6 สำหรับการใช้นS ใส่เพิ่มร้อยละ 1 ถึง 3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย การใช้ OPC ผสมร่วมกับเถ้าลอยในการสังเคราะห์สารจีโอโพลิเมอร์ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์โมโนซิลิเกตไฮเดรตเจล (CASH) ในระบบมากขึ้น [16] โดยเจลชนิดนี้มีโครงสร้างในระดับจุลภาคที่แน่นและแข็งแรงกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์โมโนซิลิเกตไฮเดรตเจล (NASH) ที่มีอยู่เดิม (ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยและสารละลายต่าง) [17] ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีโพรงที่ลดลงและมีแนวโน้มที่ลดลงมากขึ้นเมื่อใช้ OPC ในปริมาณที่มากขึ้น

สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้นาโนซิลิการ้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของส่วนผสมเพิ่มขึ้นจาก 4.02 (ส่วนผสมควบคุม) เป็น 4.10, 4.19 และ 4.28 ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณซิลิกาในส่วนผสมเป็นการเพิ่มการเกิดพันธะ -Si-O-Si- ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ซึ่งมีความแข็งแรงกว่าพันธะ -Si-O-Al- หรือ -Al-O-Al- [18] ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีโพรงที่ลดลงเนื่องจากมีโครงสร้างที่มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ถึงแม้ว่าส่วนผสม 2nS และ 3nS จะมีความพรุนมากกว่า 1nS แต่ยังคงมีแนวโน้มที่ดีกว่าส่วนผสมควบคุมที่ไม่ใช้นาโนซิลิกา Gao และคณะ [19] ระบุว่าหากใช้นS ในปริมาณที่มากเกินไปอาจเกิดการเกาะกลุ่มกันระหว่างอนุภาคของ nS และกลายเป็นบริเวณที่อ่อนแอในคอนกรีตซึ่งเป็นสาเหตุของความพรุนที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2 ปริมาณโพรงในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

3. กำลังอัด กำลังดึงแยก และกำลังดัด

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัด กำลังดึงแยก และกำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า การใช้ OPC ในส่วนผสมส่งผลให้กำลังรับแรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ OPC แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 5, 10 และ 15 มีค่าเท่ากับ 42.1, 43.0 และ 54.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าส่วนผสมควบคุมร้อยละ 20 ถึง 55 สอดคล้องกับผลการทดสอบโพรง นอกจากนั้นกำลังดึงแยกและกำลังดัดมีค่าสูงกว่า CON ร้อยละ 21 ถึง 59 และ 6 ถึง 24 ตามลำดับ

ปริมาณซิลิกาในระบบที่เพิ่มมากขึ้นจากการผสม nS ส่งผลให้กำลังรับแรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนผสมที่ใช้นาโนซิลิกาเพิ่มร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย (1nS) มีกำลังอัด กำลังดึงแยก และกำลังดัดสูงกว่า CON ร้อยละ 41, 41 และ 20 ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตที่

เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับความพรุนที่ลดลงจากปริมาณโพรงที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 2) อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อใช้นาโนซิลิกามากกว่าร้อยละ 1

ตารางที่ 5 กำลังอัด กำลังดึงแยก และกำลังค้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	กำลังอัด (MPa)	กำลังดึงแยก (MPa)	กำลังค้ำ (MPa)
CON	35.2	2.9	5.0
5OPC	42.1	3.5	5.3
10OPC	43.0	3.5	5.7
15OPC	54.5	4.6	6.2
1nS	49.6	4.1	6.0
2nS	50.9	3.7	5.6
3nS	48.0	3.5	6.1

4. การดูดซึมน้ำ

ปริมาณโพรงที่ลดลงนอกจากจะส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงที่ดีขึ้นแล้วยังส่งผลต่อพฤติกรรมการดูดซึมน้ำอีกด้วย จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าการใช้ OPC และ nS ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีการดูดซึมน้ำรวมถึงอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำลง เมื่อใช้ OPC แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 5 ถึง 15 ส่งผลให้คอนกรีตมีร้อยละการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าการใช้เถ้าลอยล้วนเล็กน้อย อย่างไรก็ตามส่วนผสม 5OPC, 10OPC และ 15OPC มีอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่า CON ร้อยละ 12, 13 และ 22 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 การดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

พฤติกรรมการดูดซึมน้ำ	CON	5OPC	10OPC	15OPC	1nS	2nS	3nS
การดูดซึมน้ำจนกระทั่งคอนกรีตอิ่มตัว (%)	5.1	5.0	4.4	4.7	2.4	2.5	3.3
อัตราการดูดซึมน้ำ ($\times 10^{-3}$ mm/s ^{0.5})	38.2	33.8	33.1	29.8	7.5	8.6	12.5

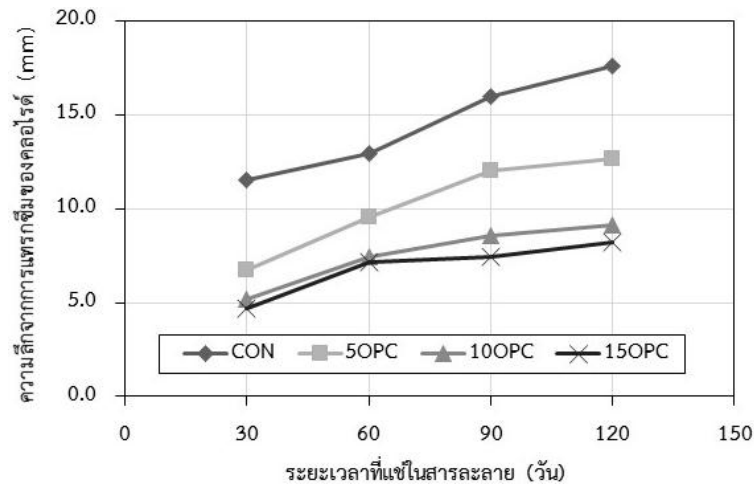
ร้อยละการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีการดูดซึมน้ำลดลงจากร้อยละ 5.1 (CON) เป็นร้อยละ 2.4, 2.5 และ 3.3 สำหรับส่วนผสมที่ใส่ nS ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (ตามลำดับ) ในขณะที่อัตราการดูดซึมน้ำมีค่าลดลงร้อยละ 80, 77 และ 67 ตามลำดับ (เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Du และคณะ [20] ที่ศึกษาอัตราการดูดซึมน้ำในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ผสมนาโนซิลิกา

5. ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์

จากภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่าการแทรกซึมของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่แช่ในสารละลาย โดยจะแทรกซึมได้มากในระยะแรกและเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น ยกตัวอย่างเช่น หลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ส่วนผสม CON มีระยะการแทรกซึมของคลอไรด์เท่ากับ 11.5, 13.0, 16.0 และ 17.6 mm นอกจากนั้นผลการทดสอบยังบ่งชี้ว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ OPC แทนที่เถ้าลอย และการผสม OPC ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าการ

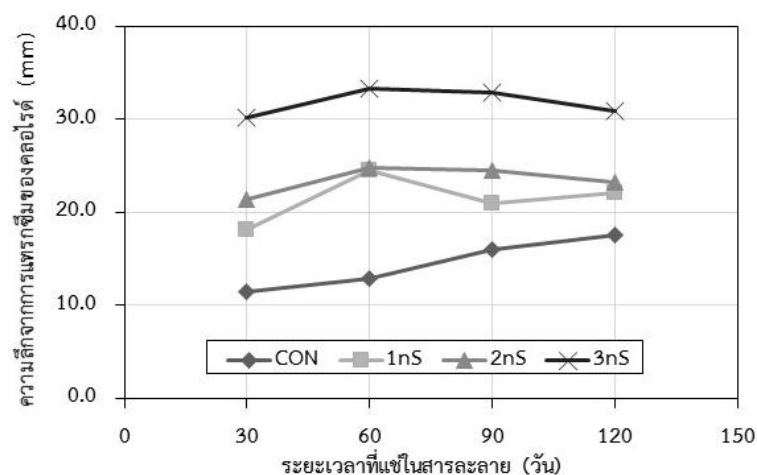


ของการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น คลอไรด์สามารถแทรกซึมได้ในส่วนผสม CON, 5OPC, 10OPC และ 15OPC เท่ากับ 16.0, 12.0, 8.6 และ 7.4 mm หลังจากการแช่ในสารละลายเป็นระยะเวลา 90 วัน การผสม OPC นอกจากจะเป็นการเพิ่ม CASH ที่มีความแข็งแรงกว่า NASH แล้ว CASH ยังมีความสามารถในการดูดซับคลอไรด์ได้ดีอีกด้วย [21]

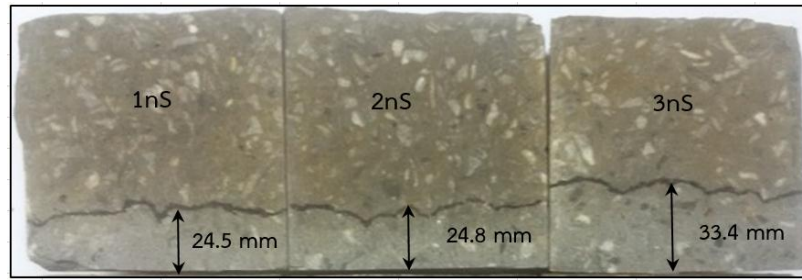


ภาพที่ 3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในส่วนผสม CON, 5OPC, 10OPC และ 15OPC

ในทางตรงกันข้ามจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสม nS มีความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ต่ำลงดังแสดงในภาพที่ 4 แตกต่างจากการใช้โบรต์แลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้น [22] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ nS ในปริมาณมาก ยกตัวอย่างเช่น หลังจากแช่ในสารละลายเป็นระยะเวลา 60 วัน สามารถวัดความลึกจากการแทรกซึมของคลอไรด์ในส่วนผสม 1nS, 2nS และ 3nS ได้เท่ากับ 24.5, 24.8 และ 33.4 mm ดังแสดงในภาพที่ 5 ถึงแม้ว่า nS จะสามารถลดโพรงและเพิ่มกำลังรับแรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตได้ แต่การเพิ่มปริมาณของซิลิกาเป็นสาเหตุให้อัตราส่วน CaO/SiO_2 ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นเจลที่ปรากฏในจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีค่าลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคลอไรด์ของเจลชนิดนี้ลดลงด้วย [23] สารละลายโซเดียมคลอไรด์จึงสามารถแทรกซึมเข้ามาในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมนาโนซิลิกาได้มาก



ภาพที่ 4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในส่วนผสม CON, 1nS, 2nS และ 3nS

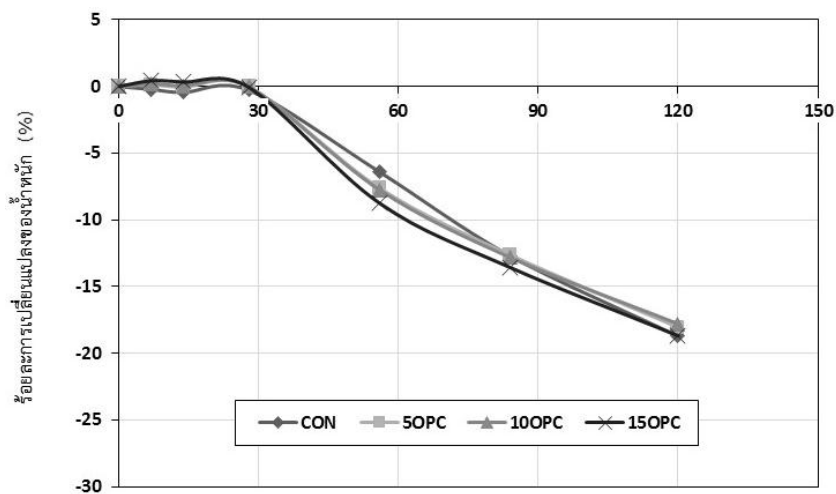


ภาพที่ 5 ความลึกจากการแทรกซึมของคลอไรด์ของส่วนผสม 1nS, 2nS และ 3nS หลังจากการแช่ในสารละลายเป็นระยะเวลา 60 วัน

6. การต้านทานต่อการกัดกร่อน

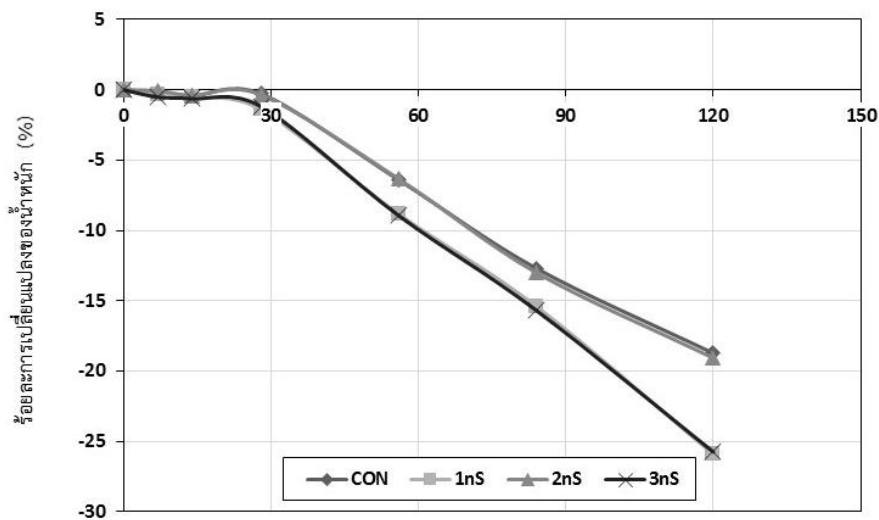
ภาพที่ 6 และ 7 แสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังจากการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 จะเห็นได้ว่าการใช้ OPC และ nS ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดต่ำลง ถึงแม้ว่าการผสม OPC จะช่วยให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีโพรงที่ต่ำลงและมีกำลังรับแรงที่ดีขึ้น แต่ทว่าการเพิ่มขึ้นของ CASH ซึ่งมีองค์ประกอบของแคลเซียมเป็นหลักจะถูกกัดกร่อนและชะละลายออกได้ง่ายกว่า NASH เมื่อสัมผัสกับกรดซัลฟูริก [24] ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของ OPC สูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้เถ้าลอยล้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง 15OPC ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 8.8% หลังจากการสัมผัสกับกรดซัลฟูริกเป็นระยะเวลา 56 วัน ซึ่งสูงกว่า CON ร้อยละ 2.4

เมื่อวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงสัมผัสกับกรดซัลฟูริกจะก่อให้เกิดเอททริงไกต์ [25] สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมนาโนซิลิกาความเป็นไปได้ที่อนุภาคของ nS ที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาจะแทรกตัวอยู่ตามโพรงในคอนกรีตจนมีช่องว่างไม่เพียงพอสำหรับรองรับการขยายตัวของเอททริงไกต์ [26] ส่งผลให้เกิดแรงดันภายในและเกิดรอยแตกในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เป็นสาเหตุให้กรดซัลฟูริกสามารถแทรกตัวเข้ามากัดกร่อนได้มากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในส่วนผสม 3nS ที่สูญเสียน้ำหนักมากกว่าส่วนผสมควบคุมที่ไม่ผสมนาโนซิลิกา



ระยะเวลาการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 3

ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของส่วนผสม CON, 5OPC, 10OPC และ 15OPC หลังจากแช่ในสารละลายกรด



ระยะเวลาการแช่ในสารละลายการดัดรูปความเข้มข้นร้อยละ 3

ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของส่วนผสม CON, 1nS, 2nS และ 3nS หลังจากแช่ในสารละลายกรด

บทสรุป

- 1) การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และนาโนซิลิกาผสมร่วมกับเถ้าลอยสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุจีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้คอนกรีตมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นและมีค่าสูงกว่าส่วนผสมควบคุมที่ใช้เถ้าลอยล้วน
- 2) การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมส่งผลต่อกำลังรับแรงของคอนกรีตอย่างชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 ส่งผลให้กำลังอัด กำลังดึงแยก และกำลังดัดมีค่าสูงกว่าส่วนผสมควบคุมร้อยละ 55, 59 และ 24 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลการทดสอบบ่งชี้ว่าการใช้ OPC มีแนวโน้มที่จะทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดลง
- 3) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสม OPC สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น แต่ทว่าตัวอย่างจะถูกกัดกร่อนจากกรดได้มากขึ้น
- 4) การใส่นาโนซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย จะส่งผลดีต่อกำลังรับแรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมากกว่าการใส่ในปริมาณที่สูงขึ้น
- 5) การผสม nS เป็นสาเหตุให้คอนกรีตมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นเมื่อถูกกัดกร่อนโดยกรดซัลฟูริก นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมนาโนซิลิกายังมีความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ต่ำกว่าส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยล้วน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) รุ่นที่ 17 สัญญาเลขที่ PHD/0195/2557 ภายใต้โครงการของสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) และงบประมาณจากทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ ดุษฎีนิพนธ์หรือการศึกษาอิสระ สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, Deventer JSJ. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*. 2007; 42: 2917-2933.
2. Chindaprasirt P, De Silva P, Sagoe-Crentsil K, Hanjitsuwan S. 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*. 2012; 47: 4876-4883.
3. Gao K, Lin K, Wang D, Hwang C, Shiu H, Chang Y, Cheng T. Effects $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano- SiO_2 metakaolin-based geopolymers. *Construction and building materials*. 2014; 53: 503-510.
4. Nath P, Sarker PK. Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and building materials*. 2014; 66: 163-171.
5. Somna R, Jaturapitakkul C, Amde AM. Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on durability of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete composites*. 2012; 34: 848-854.
6. Rerkpiboon A, Tangchirapat W, Jaturapitakkul C. Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. *Construction and building materials*. 2015; 101: 983-989.
7. American Society for Testing and Materials (ASTM) C267-01, Standard test method for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes. 2012.
8. American Society for Testing and Materials (ASTM) C1611/1611M-14, Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. 2014.
9. American Society for Testing and Materials (ASTM) C642-13, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. 2013.
10. American Society for Testing and Materials (ASTM) C39/C39M-16b, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. 2016.
11. American Society for Testing and Materials (ASTM) C496/C496M-11, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. 2016.
12. American Society for Testing and Materials (ASTM) C78/78M-16, Standard test method for flexural strength of concrete (using sample beam with third-point loading). 2016.
13. American Society for Testing and Materials (ASTM) C1585-13, Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concrete. 2013.
14. Nath P, Sarker PK. Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Cement and concrete composites*. 2015; 55: 205-14.
15. Bernal J, Reyes E, Massana J, Leon N, Sanchez E. Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures. *Construction and building materials*. 2018; 160: 196-210.



16. Posi P, Thongjapo P, Thamultree N, Boontee P, Kasemsiri P, Chindaprasirt P. Pressed lightweight fly ash-OPC geopolymer concrete containing recycled lightweight concrete aggregate. *Construction and building materials*. 2016; 127: 450-456.
17. Provis JL, Myers RJ, White CE, Rose V, Deventer JSJ. X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders. *Cement and concrete research*. 2012; 42: 855-864.
18. He P, Wang M, Fu S, Jia D, Yan S, Yuan j, Xu J, Wang P, Zhou Y. Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer. *Ceramics international*. 2016; 42: 14416-14422.
19. Gao K, Lin K, Wang D, Hwang C, Tuan B, Shiu H, Cheng T. Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers. *Construction and building materials*. 2013; 48: 441-447.
20. Du H, Du S, Liu X. Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and building materials*. 2014; 73: 705-712.
21. Tennakoon C, Shayan A, Sanjayan JG, Xu A. Chloride ingress and steel corrosion in geopolymer concrete based on long term tests. *Materials & design*. 2017; 116: 287-299.
22. Shaikh F, Supit SWM. Chloride induced corrosion durability of high volume fly ash concretes containing nano particles. *Construction and building materials*. 2015; 99: 208-225.
23. Zibara H, Hooton RD, Thomas MDA, Stanish K. Influence of the C/S and C/A ratios of hydration products on the chloride ion binding capacity of lime-SF and lime-MK mixtures. *Cement and concrete research*. 2008; 38: 422-426.
24. Lee NK, Lee HK. Influence of the slag content on the chloride and sulfuric acid resistances of alkali-activated fly ash/slag paste. *Cement and concrete composites*. 2016; 72: 168-179.
25. Chindaprasirt P, Rattanasak U, Taebuanhuad S. Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer. *Materials and structures*. 2013; 46: 375-381.
26. Monteny J, De Belie B, Taerwe L. Resistance of difference types of concrete mixtures to sulfuric acid. *Materials and structures*. 2013; 47: 242-249.