

การศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและโซเดียมไฮดรอกไซด์

Study on the Properties of Soil-Cement Mixed with Fly Ash and Sodium Hydroxide

ศุภชัย ไทยพุ่ม¹, ชุศักดิ์ คีรีรัตน์^{1*}, นพดล สุดสุข¹ และ ศักดิ์สิทธิ์ ณ น่าน¹

Supachai Thaipum, Chusak Kererat, Noppadon Sudsui and Saksit Na Nan

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

วิทยาเขตวังไกลกังวล ถนนเพชรเกษม อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin Wong Klai Kangwon Campus, Petchkasem Road, HuaHin, Prachuap Khiri Khan

* E-mail: chusak.k@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษานำมาจากโครงการอ่างเก็บน้ำมรสวบ การเตรียมตัวอย่างทดสอบแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ ดินซีเมนต์ ดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ดินซีเมนต์ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ และดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทุกกลุ่มใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 5 สัดส่วน ได้แก่ 220, 230, 240, 250 และ 260 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยปริมาตร ใช้ดินชนิด CL ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เถ้าลอยผ่านตะแกรงเบอร์ 325 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์ การทดสอบค่าแรงอัดแกนเดียวดำเนินการเมื่อตัวอย่างมีอายุการบ่มที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างทุกอัตราส่วนสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์และตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาจากวัสดุผสมช่วยเพิ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็นตัวประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยผลการทดสอบค่าแรงอัดแกนเดียวมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค

คำสำคัญ: กำลังอัดแกนเดียว โมดูลัสยืดหยุ่น ดินซีเมนต์ เถ้าลอย โซเดียมไฮดรอกไซด์

Abstract

This article presents a study on the properties of cement-stabilized clay modified with fly ash and sodium hydroxide. The clay samples were obtained from the Mor Suap Reservoir Project. Test specimens were categorized into four groups: (1) cement-stabilized clay, (2) cement-stabilized clay with fly ash, (3) cement-stabilized clay with sodium hydroxide, and (4) cement-stabilized clay with both fly ash and sodium hydroxide. Each group was prepared with five cement contents: 220, 230, 240, 250, and

260 kilograms per cubic meter by volume. The clay used was classified as CL and passed through a No. 4 sieve, while the fly ash passed through a No. 325 sieve. A 5-molar sodium hydroxide solution was used in the relevant mixtures. Unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted after curing periods of 1, 7, 14, and 28 days. The results indicated that UCS values increased with higher cement content across all specimen groups. The specimens incorporating sodium hydroxide exhibited higher UCS and elastic modulus values compared to those with only cement or cement with fly ash. The addition of sodium hydroxide enhanced silica dissolution from the blended materials, promoting the formation of cementitious products primarily through hydration reactions. The contribution of pozzolanic reactions was found to be minimal in comparison. The UCS results were consistent with the findings from microstructural analysis.

Keywords: Unconfined Compressive Strength, Elastic Modulus, Soil-Cement, Fly Ash, Sodium Hydroxide

1. บทนำ

ปัจจุบันการนำวิธีการต่าง ๆ มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินมีให้เห็นกันอย่างแพร่หลายเพื่อให้ดินมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของงานก่อสร้าง เช่น การเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนัก ลดการซึมผ่านน้ำ ลดการทรุดตัว เป็นต้น การนำปูนซีเมนต์มาผสมกับวัสดุในสนามก็เป็นวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน อาจจะอยู่ในรูปแบบของการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทาง สำหรับงานทาง หรือการผสมลึก (Deep Mixing) ที่เรียกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ก็ได้ แต่การใช้ปูนซีเมนต์เป็นจำนวนมากก็ส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม (Ridtirud et al., 2018) จึงได้นักวิจัยหลายท่านดำเนินการศึกษาการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์และพบว่าเถ้าลอย (Fly Ash) สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้ โดยผลจากการใช้เถ้าลอยผสมในดินลูกรังซีเมนต์พบว่าช่วยเพิ่มอัตราส่วนปลอดภัยต่อการทำลายของสารละลายซิลเฟตในสถานะเปือกสลับแห้ง (อภิจิต คำภาหล้า และคณะ, 2560) นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติซึ่งสามารถนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ได้ดีเมื่อผสมกับสารกระตุ้นที่เป็นด่าง (Alkaline Activator) โดยส่งผลให้ค่าแรงอัดแกนเดียว (UCS) เพิ่มขึ้น จึงสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินชั้นทาง (Sofri et al., 2020; Widarto et al., 2023; Ahmad et al., 2024; Nanda and Priya, 2024) และปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวสำหรับวิธีการผสมลึกได้ (Suksiripattanapong et al., 2022; Abdullah and Shahin, 2022; Yenginar and Olgun, 2024)

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถใช้กับดินเหนียวอ่อนที่ต้องการเพิ่มคุณสมบัติทางด้านกำลังในระดับลึกด้วยวิธีอัดฉีดแรงสูง (Jet Grouting หรือ Jet Mixing) โดยจะอัดฉีดน้ำและน้ำปูนซีเมนต์ด้วยแรงดันสูงลงไป在地จนถึงความลึกที่ต้องการ เมื่อน้ำปูนซีเมนต์ผสมกับดินที่ถูกทำลายโครงสร้างแล้วจะรวมตัวกันซึ่งถูกเรียกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ (Cement Column) โดยเทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้ในโครงการปรับปรุงคุณภาพดินชั้นฐานรากของอ่างเก็บน้ำมรสวบ อำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เพื่อแก้ปัญหาการรั่วของดินชั้นฐานรากและเพิ่มประสิทธิภาพของอ่างเก็บน้ำ การใช้เทคนิคการอัดฉีดแรงสูงมักถูกใช้กับดินเหนียวอ่อนชนิดความเหนียวสูง (CH) ในพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล ทั้งยังมีการศึกษาการปรับปรุงดินชนิด CH ด้วยปูนซีเมนต์รวมกับการใช้สารกระตุ้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตในงานวิจัยที่ผ่านมา (Abdullah and Shahin, 2022; Suksiripattanapong et al., 2022) แต่สำหรับกรณีของดินที่อ่างเก็บน้ำมรสวบเป็นดินเหนียวชนิดความเหนียวต่ำ (CL) ซึ่งการศึกษาคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการใช้เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ยังมีอยู่น้อย ประกอบกับการศึกษาผลของการใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยโดยใช้สารกระตุ้นที่เป็นด่างแทนน้ำบางส่วนสำหรับดินชนิด CL ยังไม่มีในงานวิจัยที่

ผ่านมา อีกทั้งในการศึกษาที่ผ่านมา มักมุ่งเน้นศึกษาเฉพาะค่าแรงอัดแกนเดียวโดยไม่ได้ศึกษาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) ร่วมด้วย (Riditirud et al.) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพารามิเตอร์สำหรับศึกษาในระดับการสร้างโมเดลได้ และเนื่องจากในโครงการดังกล่าวเมื่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แล้ว ตัวอย่างที่ถูกเก็บในสนามจะถูกนำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นหลัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ตัวอย่างดินจากอ่างเก็บน้ำมรสวบผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) ของตัวอย่างทดสอบด้วย

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุ

ตัวอย่างดินนำมาโครงการปรับปรุงดินชั้นฐานรากของอ่างเก็บน้ำมรสวบ ตำบลชัยเกษม อำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ (รูปที่ 1ก) ซึ่งตัวอย่างดินมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (w_n) เท่ากับร้อยละ 11.80 ความหนาแน่นเปียก (ρ_{wet}) เท่ากับ 2.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (2190 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ความหนาแน่นแห้ง (ρ_d) เท่ากับ 1.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (1960 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.53 ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) ขีดจำกัดพลาสติก (PL) และดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับ ร้อยละ 31.24 ร้อยละ 13.78 และร้อยละ 17.46 ตามลำดับ ดินเหนียวมีขนาดโดยเฉลี่ย (D_{50}) เท่ากับ 0.028 มิลลิเมตร เมื่อนำมาจำแนกประเภทของดินด้วยวิธีเอกภาพ (USCS) จัดอยู่ในกลุ่มดินเหนียวชนิดความเหนียวต่ำปนทราย (Sandy Lean Clay, CL)

เถ้าลอย (FA) นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง (รูปที่ 1ข) มีสีน้ำตาลเทา มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.46 นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 จากข้อมูลการทำ SEM/EDS แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยมีรูปร่างกลมและมีผลรวมของส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก จัดเป็นวัสดุปอสโซลานคลาส F

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 มีส่วนประกอบหลักทางเคมีได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 65.11

สารกระตุ้นด่างใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แบบเกล็ดสีขาว 200 กรัม ละลายในน้ำ 1000 มิลลิตร ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้งาน ซึ่งมีความเข้มข้น 5 โมลาร์ เนื่องจากการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูงจะเพิ่มความเป็นด่าง (Sofri et al., 2020) ซึ่งอาจมีผลในการนำไปใช้ในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ และอาจส่งผลกระทบต่อดินรวมถึงน้ำใต้ดินด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 วัสดุทดสอบ (ก) ตัวอย่างดิน (ข) เถ้าลอย

2.2 การออกแบบอัตราส่วนผสม

งานวิจัยนี้กำหนดตัวอย่างทดสอบออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ ดินซีเมนต์ ดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ดินซีเมนต์ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ และดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทุกกลุ่มใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 5 สัดส่วน ได้แก่ 220, 230, 240, 250 และ 260 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยปริมาตรของดินเปียก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C Ratio) เท่ากับ 1.1 (ตามข้อกำหนดของการก่อสร้าง) ดินชนิด CL ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เถ้าลอยผ่านตะแกรงเบอร์ 325 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์ การทดสอบค่าแรงอัดแกนเดียวจะดำเนินการเมื่อตัวอย่างมีอายุการบ่มที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งปริมาณของวัสดุสำหรับเตรียมตัวอย่างทดสอบคำนวณตามปริมาณปูนซีเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยแต่ละอัตราส่วนจะใช้จำนวน 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 อายุการบ่ม ทำให้มีตัวอย่างทดสอบจำนวน 12 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 15 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และกลุ่มตัวอย่างที่มีส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะใช้แทนที่น้ำในปริมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักน้ำตามอัตราส่วน W/C โดยรายละเอียดร้อยละของวัสดุผสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบ 1 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปริมาณวัสดุสำหรับตัวอย่างทดสอบตามปริมาณปูนซีเมนต์

ส่วนผสม	ปริมาณต่อ 1 ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณต่อ 12 ตัวอย่าง (กรัม)
ปรับปริมาณความชื้นดินแห้ง		
ดินแห้ง	214.11	2569.35
น้ำ	25.26	303.18
ปูนซีเมนต์ 220 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C Ratio = 1.1)		
ปูนซีเมนต์	24.05	288.62
น้ำ	26.46	317.49
ปูนซีเมนต์ 230 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C Ratio = 1.1)		
ปูนซีเมนต์	25.15	301.74
น้ำ	27.66	331.92
ปูนซีเมนต์ 240 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C Ratio = 1.1)		
ปูนซีเมนต์	26.24	314.86
น้ำ	28.86	346.35
ปูนซีเมนต์ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C Ratio = 1.1)		
ปูนซีเมนต์	27.33	327.98
น้ำ	30.07	360.78
ปูนซีเมนต์ 260 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C Ratio = 1.1)		
ปูนซีเมนต์	28.43	341.10
น้ำ	31.27	375.21

ตารางที่ 2 ร้อยละของวัสดุผสมสำหรับตัวอย่างทดสอบตามปริมาณปูนซีเมนต์

กลุ่ม	วัสดุ	อัตราส่วนผสมต่อ 1 ตัวอย่าง (ร้อยละ)				
		220 กก./ลบ.ม	230 กก./ลบ.ม	240 กก./ลบ.ม	250 กก./ลบ.ม	260 กก./ลบ.ม
1	ดินแห้ง	73.86	73.28	72.71	72.15	71.59
	น้ำ	17.84	18.11	18.38	18.64	18.90
	ปูนซีเมนต์	8.30	8.61	8.91	9.21	9.51
2	ดินแห้ง	73.86	73.28	72.71	72.15	71.59
	น้ำ	17.84	18.11	18.38	18.64	18.90
	ปูนซีเมนต์	7.05	7.32	7.57	7.83	8.08
	เถ้าลอย	1.25	1.29	1.34	1.38	1.43
3	ดินแห้ง	73.86	73.28	72.71	72.15	71.59
	น้ำ	13.28	13.38	13.48	13.58	13.67
	ปูนซีเมนต์	8.30	8.61	8.91	9.21	9.51
	โซเดียมไฮดรอกไซด์	4.56	4.73	4.90	5.06	5.23
4	ดินแห้ง	73.86	73.28	72.71	72.15	71.59
	น้ำ	13.28	13.38	13.48	13.58	13.67
	ปูนซีเมนต์	7.05	7.32	7.57	7.83	8.08
	เถ้าลอย	1.25	1.29	1.34	1.38	1.43
	โซเดียมไฮดรอกไซด์	4.56	4.73	4.90	5.06	5.23

2.3 การเตรียมตัวอย่างและทดสอบ

ตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการศึกษาถูกนำไปปรับสภาพให้มีค่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (ร้อยละ 11.80) ปูนซีเมนต์และน้ำ (กลุ่มที่ 1) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและน้ำ (กลุ่มที่ 2) ปูนซีเมนต์และน้ำผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กลุ่มที่ 3) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและน้ำผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กลุ่มที่ 4) ถูกผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมขนาดเล็กโดยใช้เวลา 2 นาที หลังจากนั้นนำมาผสมกับดินเหนียวเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมขนาดเล็กเป็นเวลา 5 นาที เมื่อผสมเสร็จแล้วนำไปขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบในแบบหล่อท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 4 เซนติเมตร สูง 8.7 เซนติเมตร ทำการบดอัดส่วนผสมโดยแบ่งเป็น 5 ชั้น ชั้นละเท่า ๆ กัน โดยควบคุมความหนาแน่นรวมตามสภาพในสนามจริงให้เท่ากันทุกก้อนตัวอย่าง ทำการบ่มในแบบหล่อท่อพีวีซีพร้อมปิดรัดทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างให้แน่นเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำจากก้อนตัวอย่างหลังจากนั้นนำไปบ่มในถังโพลีเมทริกซ์ เมื่อครบอายุการบ่มที่อายุ 1, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ นำก้อนตัวอย่างทดสอบออกจากแบบหล่อท่อพีวีซี ดำเนินการหาค่าความหนาแน่นรวมดังรูปที่ 2 แล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำตัวอย่างมาทดสอบแรงอัดแกนเดียวจนตัวอย่างวิบัติโดยการควบคุมความเครียด (Strain) ในแนวตั้งให้คงที่ ด้วยอัตราความเร็ว 0.50 มิลลิเมตรต่อวินาที เมื่อตัวอย่างวิบัติเก็บตัวอย่างบางส่วนไปทดสอบ SEM นำผลที่ได้จากการทดสอบไปหาค่าแรงอัดแกนเดียว (UCS) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50})



รูปที่ 2 การวัดขนาดชิ้นน้ำหนักรวบรวมเพื่อหาค่าความหนาแน่นรวม

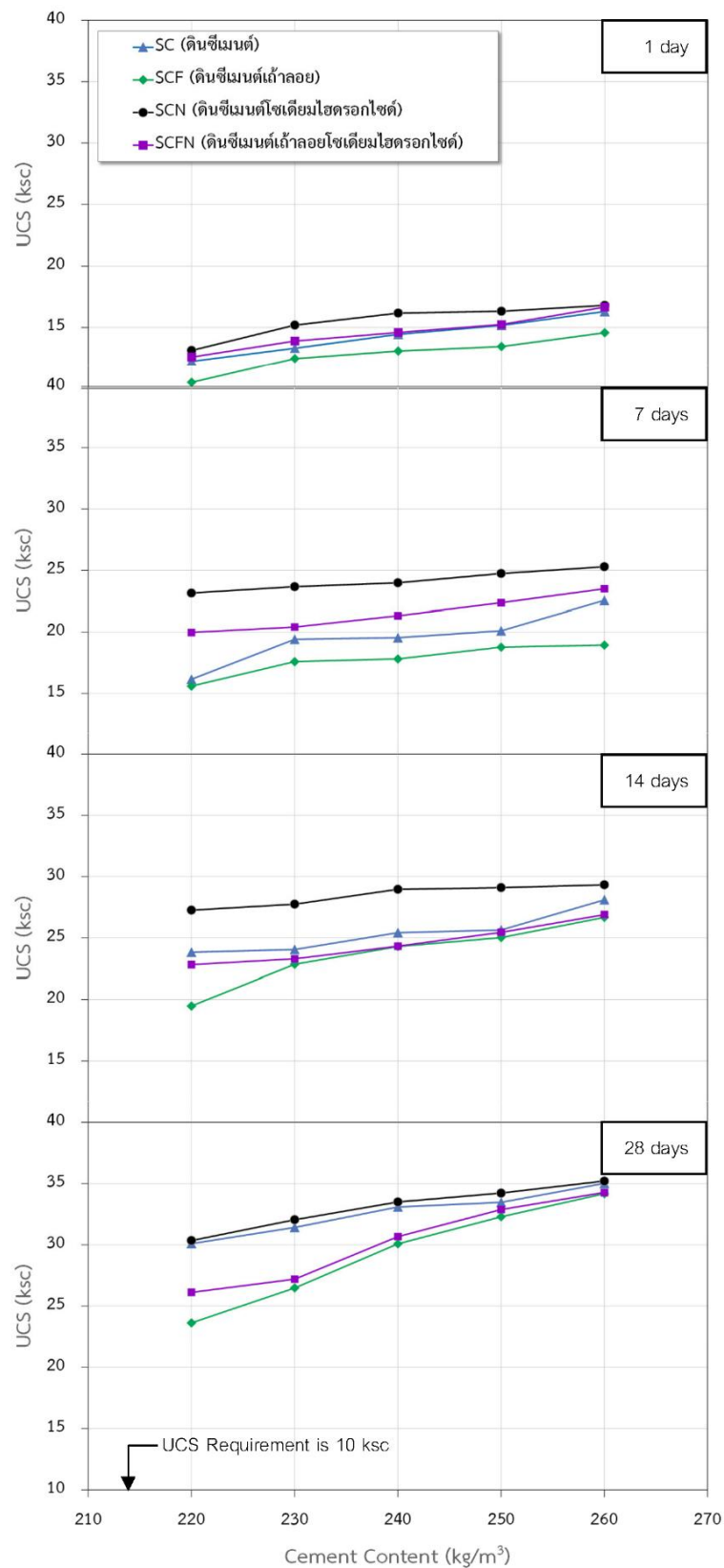
4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว

ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงอัดแกนเดียว (UCS) ของตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม โดยพบว่าค่า UCS เฉลี่ยของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่า UCS เฉลี่ยสูงที่สุดในทุกช่วงเวลาการบ่ม เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ในการชะซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุผสมมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความสมบูรณ์มากขึ้น เป็นผลให้ซิลิกาและอะลูมินาทำปฏิกิริยาทางเคมีก่อให้เกิดปริมาณโซเดียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และปริมาณโซเดียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) ซึ่งเป็นวัสดุประสาน (Cementitious Product) เกิดขึ้นในระบบการยึดเกาะกันมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rattanasak และ Chindaprasirt (2009) ในขณะที่ตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมแกลลวยให้ค่า UCS เฉลี่ยต่ำที่สุดในทุกช่วงเวลาการบ่ม เนื่องจากการใช้แกลลวยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้ปริมาณซิลิกาและอะลูมินาซึ่งเป็นส่วนประกอบทางเคมีของแกลลวยมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ซึ่งไม่ได้ถูกชะออกมาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง สำหรับตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมแกลลวยและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่า UCS เฉลี่ยสูงกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 1 วัน และ 7 วัน สำหรับค่า UCS เฉลี่ยที่อายุการบ่ม 14 วัน และ 28 วัน พบว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ให้ค่า UCS สูงกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมแกลลวยและโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงให้เห็นว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ค่า UCS เฉลี่ยมีค่าสูงในช่วงแรกเนื่องจากปริมาณซิลิกาที่ถูกชะออกมามากทำให้เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากในช่วงแรกเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS โดยอาศัยข้อมูลจากรูปที่ 3 พบว่าร้อยละของอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS เฉลี่ยจาก 1 วัน ถึง 7 วัน จาก 7 วัน ถึง 14 วัน และ จาก 14 วัน ถึง 28 วัน มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับตัวอย่างดินซีเมนต์และตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมแกลลวย ในขณะที่ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีร้อยละของอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS เฉลี่ยสูงสุดในช่วง 1 วัน ถึง 7 วัน และจะมีค่าลดลงโดยอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของค่า UCS ของตัวอย่างดินซีเมนต์และตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมแกลลวยมีค่าประมาณร้อยละ 30 ในทุกช่วงเวลาบ่มที่ทำการทดสอบ เมื่อพิจารณาที่อายุการบ่มจาก 1 วัน ถึง 7 วัน อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS ของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์และตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมแกลลวยและโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าสูงกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ประมาณร้อยละ 15 และร้อยละ 10 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อายุการบ่มจาก 7 วัน ถึง 14 วัน และจาก 14 วัน ถึง 28 วัน พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของค่า UCS ของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ และตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมแกลลวยและโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ร้อยละ 13 และร้อยละ 10 ตามลำดับ

จากข้อกำหนดของโครงการปรับปรุงคุณภาพดินชั้นฐานรากของอ่างเก็บน้ำมรสว ซึ่งกำหนดให้ค่า UCS ที่ทดสอบได้จะต้องไม่น้อยกว่า 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน และดินซีเมนต์จะต้องมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงจริงในสนามไม่น้อยกว่า 220 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า

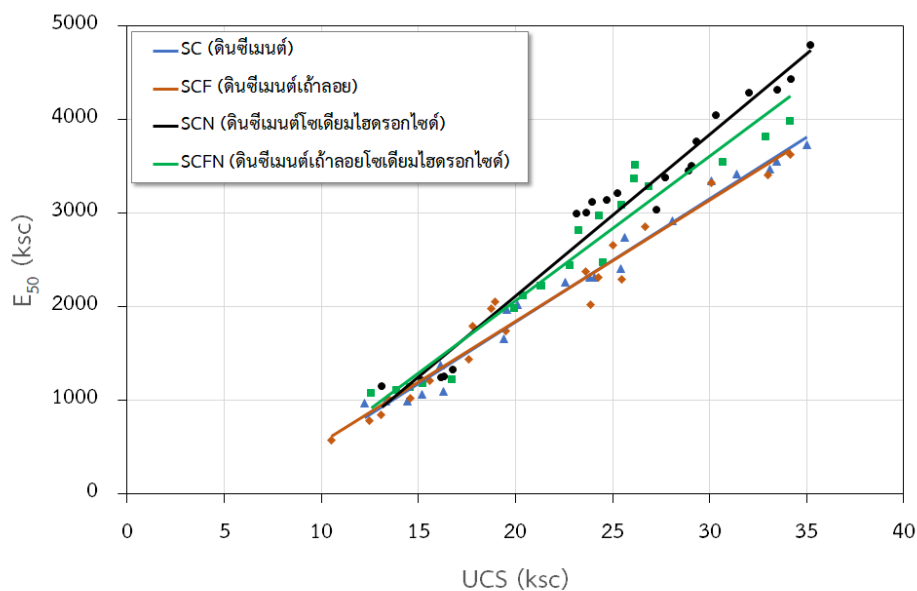
สามารถใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในปริมาณ 220 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งให้ค่า UCS มากกว่า 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในทุกอัตราส่วน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์และค่าแรงอัดแกนเดียว

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดแกนเดียวและโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50})

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดแกนเดียวและโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) พบว่าสามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ ดังแสดงในสมการที่ (1) ถึง (4) โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของเส้นกราฟตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 กลุ่ม มีค่ามากกว่า 0.94 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) มากกว่า 0.95 แสดงว่ามีความสัมพันธ์ดีมาก โดยทั่วไปการศึกษาทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering) จะพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ร้อยละ 50 ของค่า UCS เมื่อมีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ (Jamsawang et al., 2017) ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่า E_{50} จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า UCS และปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Dang et al., 2023; Redjem et al., 2023) เมื่อใช้สมการที่ (1) ถึง (4) ทำนายค่า E_{50} สามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า E_{50} ที่ได้จากการทดสอบดังรูปที่ 5 โดยจากความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของอัตราส่วนผสมไม่เพียงส่งผลต่อค่า UCS แต่ยังส่งผลต่อค่า E_{50} ด้วยซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Cong et al. (2014)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS และ E_{50}

ตัวอย่างดินซีเมนต์

$$E_{50} = 131.77(UCS) - 794.44 \quad (R^2 = 0.9817) \dots (1)$$

ตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมแกลลวย

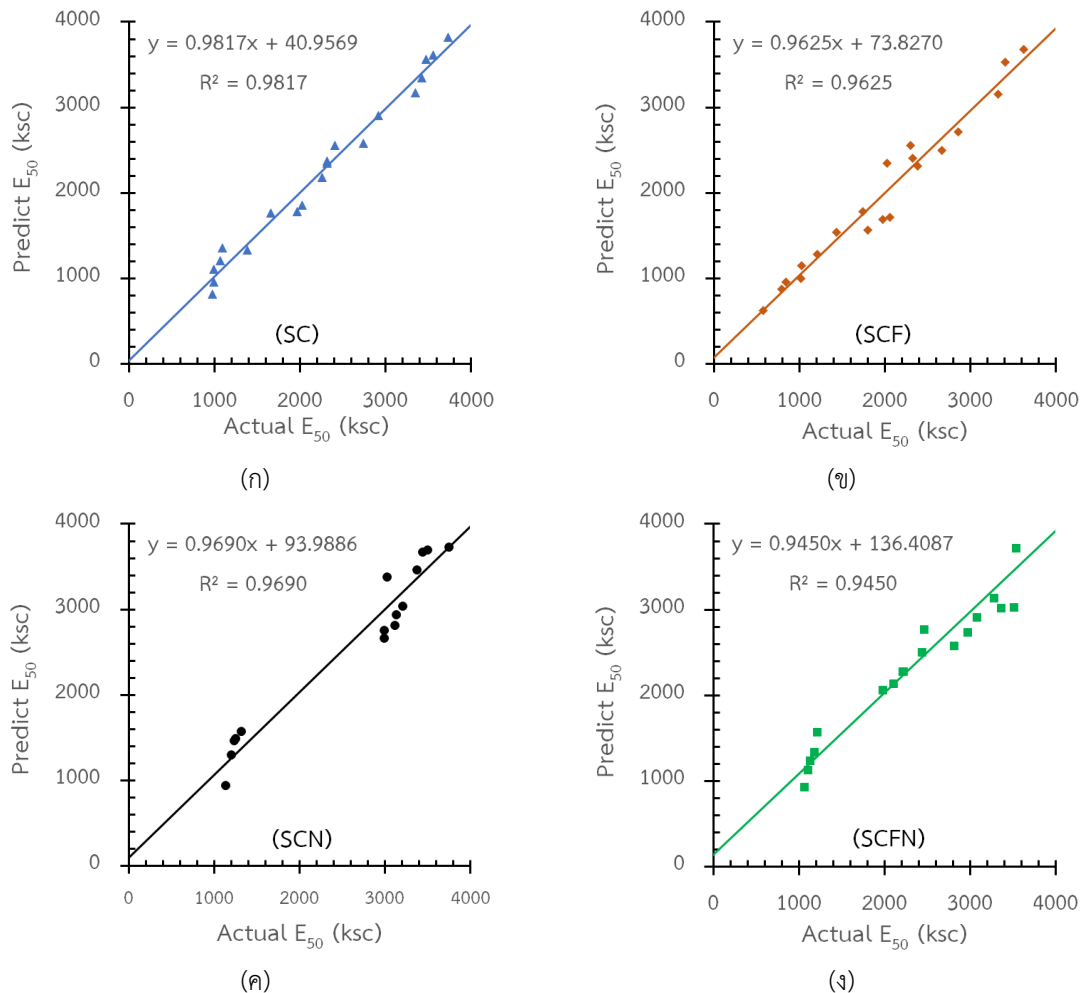
$$E_{50} = 123.23(UCS) - 735.34 \quad (R^2 = 0.9625) \dots (2)$$

ตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์

$$E_{50} = 172.40(UCS) - 1331.67 \quad (R^2 = 0.9690) \dots (3)$$

ตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมแกลลวยและโซเดียมไฮดรอกไซด์

$$E_{50} = 154.49(UCS) - 1025.13 \quad (R^2 = 0.9450) \dots (4)$$

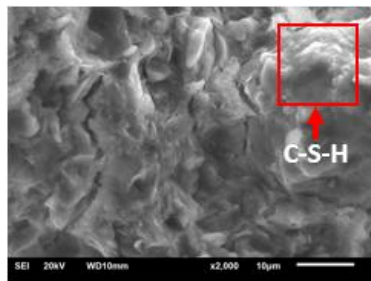


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} ทำนาย และ E_{50} ทดสอบ (ก) ดินซีเมนต์ (ข) ดินซีเมนต์เถ้าลอย (ค) ดินซีเมนต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ง) ดินซีเมนต์เถ้าลอยโซเดียมไฮดรอกไซด์

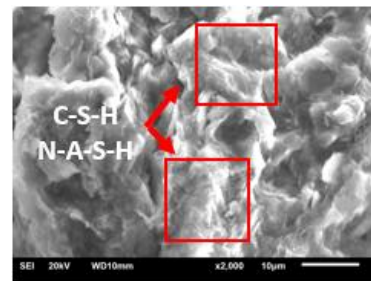
4.3 โครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 6 แสดงภาพถ่ายขยาย 2000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของตัวอย่างทดสอบที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนผสมที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ของตัวอย่างดินซีเมนต์ (SC) ดินซีเมนต์เถ้าลอย (SCF) ดินซีเมนต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ (SCN) และดินซีเมนต์เถ้าลอยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (SCFN) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและบางส่วนจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่พัฒนาขึ้นจะเกิดขึ้นรอบอนุภาคของวัสดุผสมเชื่อมต่อกันของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยเข้าด้วยกันที่อายุการบ่มเดียวกัน โดยตัวอย่าง SCN (รูปที่ 6ข และ 6ค) แสดงให้เห็นว่าความต่อเนื่องของผลิตภัณฑ์ (C-S-H) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีมากกว่าตัวอย่าง SC (รูปที่ 6ก และ 6จ) และเนื่องจากผลของการชะละลายซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของดินเหนียว (รุ่งลาวัลย์ และ ทรงสุตา, 2556) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ (N-A-S-H) ซึ่งเป็นวัสดุประสานที่เกิดจากซิลิกาและอลูมินาทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้มีวัสดุประสานมากขึ้น สำหรับตัวอย่าง SCFN (รูปที่ 6ง และ 6ช) แสดงให้เห็นว่าผิวของเถ้าลอยจะถูกเคลือบด้วยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและบางส่วนจากปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าตัวอย่าง SCF (รูปที่ 6ค และ 6ข) เนื่องจากผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ชะละลายออกมาได้มากกว่า โดยภาพรวมแล้วตัวอย่าง SCN จะมีการเชื่อมต่อนะหว่างวัสดุผสมที่ดีที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ให้

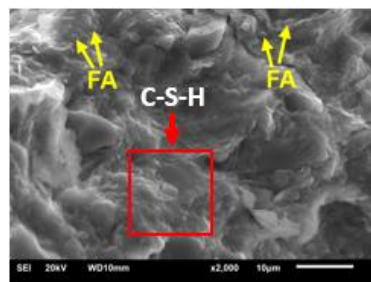
ค่ามากที่สุดเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าผิวของเถ้าลอยที่ถูกเคลือบด้วยชั้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังคงเรียบ แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุเฉื่อยซึ่งเป็นผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นน้อยกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันมาก ดังนั้น การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยจึงส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบรับแรงอัดแกนเดียวได้น้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าลอย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานแทบจะไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุการบ่ม 28 วัน สอดคล้องกับการศึกษาของ สุขสันต์ หอพิบูลสุข (2551) สำหรับปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นนั้นอ้างอิงจากผลการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งได้จากการทดสอบหาธาตุองค์ประกอบด้วยวิธี EDS หรือ XRD



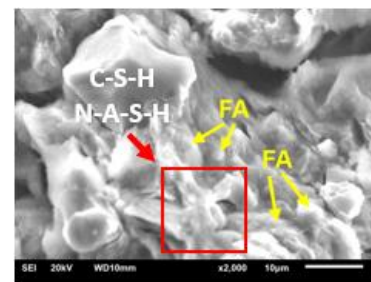
(ก) SC-220 กก./ลบ.ม.



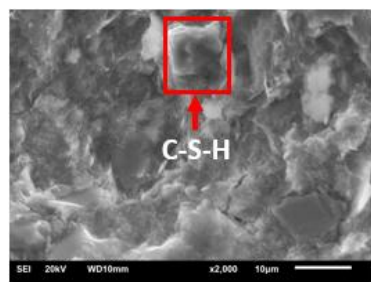
(ข) SCN-220 กก./ลบ.ม.



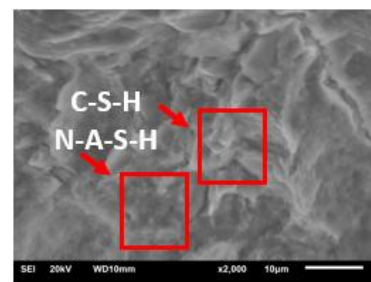
(ค) SCF-220 กก./ลบ.ม.



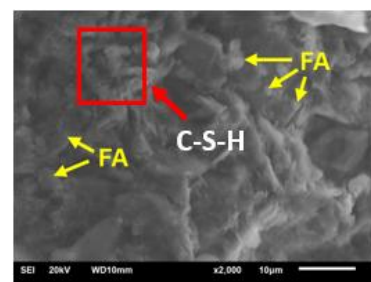
(ง) SCFN-220 กก./ลบ.ม.



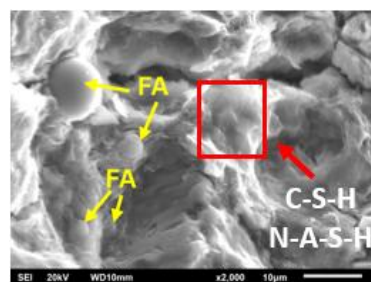
(จ) SC-250 กก./ลบ.ม.



(ฉ) SCN-250 กก./ลบ.ม.



(ช) SCF-250 กก./ลบ.ม.



(ซ) SCFN-250 กก./ลบ.ม.

รูปที่ 6 ภาพถ่ายกำลังขยายของตัวอย่างทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4. สรุปผล

การศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งพิจารณาจากอิทธิพลของการใช้เถ้าลอยและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบต่อค่าแรงอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาค รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) ของตัวอย่างทดสอบ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) ค่า UCS เฉลี่ยของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (SC) ให้ค่า UCS เฉลี่ยสูงที่สุดในทุกช่วงเวลาการบ่ม ในขณะที่ตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย (SCF) ให้ค่า UCS เฉลี่ยต่ำที่สุดในทุกช่วงเวลาการบ่ม สำหรับตัวอย่างดินซีเมนต์ (SC) ให้ค่า UCS มากกว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย และตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (SCFN) ให้ค่า UCS มากกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย (SCF)

2) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) ของตัวอย่างตามอัตราส่วนผสมทั้ง 4 กลุ่ม สามารถทำนายค่าได้โดยการแทนค่า UCS ในสมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.94 โดยค่า E_{50} จะเพิ่มขึ้นตามค่า UCS และอายุการบ่ม จากความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมมีอิทธิพลต่อค่า UCS และค่า E_{50} ด้วย

3) ผลจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายกำลังขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการชะละลายจากวัสดุผสมส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากขึ้น ทำให้ความต่อเนื่องของวัสดุประสานในตัวอย่างดินซีเมนต์โซเดียมไฮดรอกไซด์มีมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลของค่า UCS สำหรับผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอกโซลานเกิดขึ้นน้อยจึงส่งผลให้ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมีค่า UCS ลดลง

จากผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและดำเนินการการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามสำหรับดินเหนียวชนิดความเหนียวต่ำ (CL) ด้วยวิธีอัดฉีดแรงสูงได้ โดยใช้เถ้าลอยและสารกระตุ้นที่เป็นต่างเป็นส่วนผสม ซึ่งให้ค่าแรงอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งเป็นข้อกำหนดทั่วไปของการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ การศึกษาในครั้งนี้อาจให้ผลที่แตกต่างหากใช้ชนิดดินที่ต่างกัน หรือสภาพแวดล้อมต่างกัน สำหรับข้อเสนอแนะสำหรับใช้เป็นแนวทางการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต ได้แก่ การทดสอบในระยะยาว การใช้วัสดุปอกโซลานชนิดอื่น การใช้ระดับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่าง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าลอย และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือในการทดสอบ ทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- รุ่งลาวัลย์ ราชัน, และทรงสุดา วิจารณ์. (2556). การพัฒนาแรงอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวอ่อน กรุงเทพมหานคร: อัดผสมจากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวล. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 36(1), 51-71.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2551). *ลักษณะทางวิศวกรรมของดินเหนียวโคราชบดอัดผสมและไม่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอย*. ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 67 หน้า.
- อภิชาติ คำภีร์, ทรงวิทย์ ชินกลาง, และคำภีร์ จิตชัยภูมิ. (2560, 15-17 กุมภาพันธ์). *อิทธิพลของเถ้าลอยต่อกำลังของดินซีเมนต์ภายใต้การทำให้ละลายของซัลเฟต* (หน้า GTE-04-GTE-09). การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 12, เพชรบุรี.

- Abdullah, H. H., & Shahin, M. A. (2022). Geomechanical Behaviour of Clay Stabilised with Fly-Ash-Based Geopolymer for Deep Mixing. **Geosciences**, **12**(207), 1-15.
<https://doi.org/10.3390/geosciences12050207>
- Ahmad, M. M., Razak, R. A., Abdullah, M. M. A. B., Muhamad, K., Mydin, A. O., & Sandu. A. V. (2024). Stabilization of Lateritic Soil using Fly Ash Based Geopolymer. **Archives of Metallurgy and Materials**, **69**, 1165-1173. <https://doi.org/10.24425/amm.2024.150939>
- Cong, M., Longzhu, C., & Bing, C. (2014). Analysis of Strength Development in Soft Clay Stabilized with Cement-Based Stabilizer. **Construction and Building Materials**, **71**, 354–362.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.087>
- Dang, V. Q., Chau, V. N., Thuyen, N. T., Quan, H. A., Hieu, V. T., Vinh, D. T., Ganja, C. S., & Ho, L. S. (2023). Mechanical Properties and Microstructures of Cement-Treated Soils: A Review. **Journal of Science and Transport Technology**, **3**(4), 52-68.
<https://doi.org/10.58845/jsstt.utt.2023.en.3.4.52-68>
- Jamsawang, P., Poorahong, H., Yoobanpot, N., Songpiriyakij, S., & Jongpradist, P. (2017). Improvement of Soft Clay with Cement and Bagasse Ash Waste. **Construction and Building Materials**, **154**, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.188>
- Nanda, R. P., & Priya, N. (2024). Geopolymer as Stabilising Materials in Pavement Constructions: A Review. **Cleaner Waste Systems**, **7**, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100134>
- Redjem, M., Hidjeb, M., Lamri, I., & Boudjellal, K. (2023). Unconfined Compressive Strength of Weakly Cemented Compacted Sand under Different Loads. **Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA**, **54**(4), 34-41. <https://doi.org/10.14456/seagj.2023.5>
- Ridtirud, C., Leekongbub, S., & Chindaprasirt, P. (2018). Compressive Strength of Soil Cement Base Mixed with Fly Ash – Based Geopolymer. **International Journal of GEOMATE**, **14**(46), 82-88.
Retrieved from <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/2882>
- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer. **Minerals Engineering**, **22**(12), 1073-1078.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.022>
- Sofri, L. A., Abdullah, M. M. A. B., Hasan, M. R. M., & Huang, Y. (2020). The Influence of Sodium Hydroxide Concentration on Physical Properties and Strength Development of High Calcium Fly Ash Based Geopolymer as Pavement Base Materials. **IOP Conference Series Materials Science and Engineering**, **864**(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012016>
- Suksiripattanapong, C., Sakdinakorn, R., Tiyaangthong, S., Wonglakorn, N., Phetchuy, C., & Tabyang, W. (2022). Properties of Soft Bangkok Clay Stabilized with Cement and Fly Ash Geopolymer for Deep Mixing Application. **Case Studies in Construction Materials**, **16**, e01081.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01081>

- Widarto, R., Suparma, L. B., & Siswosukarto, S. (2023). Base Course Stabilization Performance Using Fly Ash-Based Geopolymers and Their Effect on Water Quality Standards. **UKaRsT**, 7(1), 1-16. <https://doi.org/10.30737/ukarst.v7i2.4235>
- Yenginar, Y., & Olgun, M. (2024). Physical, Mechanical, and Microstructural Characteristics of Fly Ash Replaced Cement Deep Mixing Columns. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 83(309), 1-24. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03800-z>