

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก Chloride Penetration Resistance of Concrete with Wet Fly Ash

ทวีชัย สำราญวานิช^{1*} ลีนา ปรัก²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี 20131

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12120

Taweechai Sumranwanich^{1*} Lyna Prak²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, 20131

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, Pathum Thani, 12120

*Corresponding author Email: twc@buu.ac.th

(Received: November 9, 2020; Accepted: July 12, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย โดยเถ้าลอยถูกใช้แทนที่วัสดุประสานบางส่วนทั้งในรูปแบบเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งที่อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20, 40 และ 60 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 โดยการทำให้เถ้าลอยเปียกใช้อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย 0.60 ผสมเข้ากันแล้วบ่มไว้เป็นระยะเวลา 30 วัน ก่อนนำไปผสมในคอนกรีต ทำการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดและกำลังอัดคอนกรีต จากผลการทดลองพบว่าการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงที่สุด ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งร้อยละ 20 สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้ง

คำสำคัญ: ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ กำลังอัด เถ้าลอย เถ้าลอยเปียก คอนกรีต

ABSTRACT

This research aims to study the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete containing fly ash (FA). The fly ash was used as a partially replacement material of binder in the form of wet fly ash (WFA) and dry fly ash (DFA) at the percentage replacement of 20%, 40% and 60%. The water to binder ratio (w/b) was kept at the ratios of 0.50 and 0.60. To produce the WFA, FA was mixed with the water at the water to FA ratio (w/f) of 0.60, then cured for 30 days before used in the mixing of concrete. The rapid chloride penetration resistance, bulk chloride diffusion resistance and compressive strength of the concrete with WFA and DFA were conducted. From the experimental results, it was found that chloride penetration resistance of concrete containing WFA and DFA with the

percentage replacement of 40% was the highest. The chloride penetration resistance of concrete with WFA was higher than that with DFA. The compressive strength of concrete containing WFA and DFA with the percentage replacement of 20% was higher than cement-only concrete. The compressive strength of concrete with WFA was higher than that with DFA.

Keyword: chloride penetration resistance, compressive strength, fly ash, wet fly ash, concrete.

1. บทนำ

โดยทั่วไปเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จาก โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินถูกนำมาใช้ในหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น การใช้เป็นวัสดุเติมในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ การใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตเนื่องด้วยเหตุผลสองประการคือ ประการแรกเนื่องจากเถ้าลอยมีออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็ก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตและความคงทนให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สองเนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น [1] อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยที่เกิดขึ้นไม่ได้ถูกนำมาใช้ทั้งหมด เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นในบางช่วงไม่ตรงกับความต้องการใช้งาน จึงทำให้มีปริมาณเถ้าลอยมากเกินไปกว่าความต้องการ ดังนั้น เถ้าลอยส่วนที่เกินความต้องการใช้ไม่ได้ถูกจัดเก็บรักษาไว้ในโกดังหรือสถานที่เก็บที่ดี โดยถูกขนย้ายไปเททิ้งบริเวณใกล้ๆ โรงไฟฟ้าซึ่งในขั้นตอนการเททิ้งนั้นเถ้าลอยจะถูกให้ความชื้นประมาณ 15-20% กลายเป็นเถ้าลอยเปียก (Wet fly ash) เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคเถ้าลอยฟุ้งกระจายไปในอากาศ นอกจากนี้ การเก็บเถ้าลอยทิ้งไว้ในที่แจ้งเถ้าลอยต้องสัมผัสกับความชื้นจากสภาพแวดล้อมและน้ำฝนยังทำให้เถ้าลอยอยู่ในสภาพเปียกมากขึ้นอาจมีความชื้นถึง 60% ซึ่งเถ้าลอยเปียกเหล่านี้อาจถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในช่วงที่มี

ปริมาณความต้องการใช้เถ้าลอยสูง ดังนั้นสถานที่เก็บเถ้าลอยเปียกนี้ควรมีการจัดการที่เหมาะสมที่สามารถพร้อมนำมาใช้งานได้ ทั้งนี้หากสามารถนำเถ้าลอยที่ถูกกองทิ้งไว้กลับมาใช้ได้ก็จะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมาก อีกทั้งยังเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าลอยเปียกที่ถูกกองเป็นวัสดุเหลือทิ้งได้ [2]

ตามมาตรฐาน ASTM 618-19 [3] ได้จำแนกชั้นคุณภาพของเถ้าลอยเป็นสองชนิดคือ เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F (Class F fly ash) หรือเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 18 (Low CaO content) และมีผลรวมออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กมากกว่าร้อยละ 50 และเถ้าลอยชั้นคุณภาพ C (Class C fly ash) หรือเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าร้อยละ 18 (High CaO content) และมีผลรวมออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กมากกว่าร้อยละ 50 เช่นกัน ซึ่งเถ้าลอยชั้นคุณภาพ C นั้นจะมีคุณสมบัติประสาน (Cementitious properties) ด้วย กล่าวคือหากอยู่ในสภาวะเปียกเถ้าลอยชนิดนี้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้กลายเป็นของแข็ง หากต้องการนำมาใช้ในงานคอนกรีตต้องผ่านกระบวนการทำให้แห้งและบดก่อน [4] ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง จึงไม่คุ้มค่า นอกจากนี้เถ้าลอยที่แข็งตัวแล้วทำให้สูญเสียคุณสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic properties) บางส่วนไป ดังนั้น การใช้เถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณ CaO สูงจึงเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ในทางกลับกันการใช้เถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณ CaO ต่ำยังมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ในงานคอนกรีต [5], [6] อย่างไรก็ตามในปัจจุบันข้อมูลการศึกษาวิจัยการใช้ประโยชน์เถ้าลอยเปียกในงานคอนกรีตยังมีจำนวนน้อยและไม่เพียงพอ

จากที่มาของปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาคุณสมบัติความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง โดยเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ต่ำ

2. วิธีการศึกษา

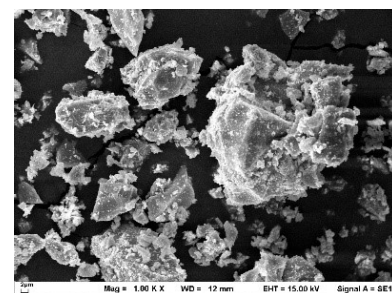
2.1 วัสดุและส่วนผสมที่ใช้

ในการศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement type I, OPC1) เป็นวัสดุประสานหลัก รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์แสดงไว้ในรูปที่ 1 ใช้เถ้าลอยระยอง (Fly ash from BLCP power plant, FA-BLCP) แทนที่วัสดุประสานบางส่วน โดยรูปร่างอนุภาคของเถ้าลอยระยองแสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งพบว่าเถ้าลอยระยองมีรูปร่างกลมและไม่แน่นอนปนกันไป นอกจากนี้ยังมีความพรุนด้วย สำหรับองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยระยองแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยพบว่า มีผลรวมปริมาณออกไซด์ของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 และมีปริมาณ CaO น้อยกว่าร้อยละ 18 อยู่ในชั้นคุณภาพ F ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 20, 40 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทั้งในรูปที่เป็นเถ้าลอยแห้ง (Dry fly ash, DFA) และเถ้าลอยเปียก (Wet fly ash, WFA) การเตรียมเถ้าลอยเปียกทำโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย (w/f) 0.60 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันแล้วบรรจุในถุงพลาสติกปิดผนึกให้แน่นเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ จากนั้นเก็บไว้ในถังพลาสติกปิดฝาเป็นเวลา 30 วัน ก่อนนำไปใช้ ทั้งนี้การใช้อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย 0.60 ก็เพื่อให้เถ้าลอยเปียกอยู่ในสถานะของสารผสมกึ่งเหลว (Slurry) ซึ่งสะดวกในการนำไปใช้ผสมคอนกรีต จากผลการศึกษาของ Nguyen et al. (2018) [2] พบว่าระดับความชื้นของเถ้าลอยเปียกไม่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตแต่อย่างใด แต่ระดับความชื้นของเถ้าลอยเปียกส่งผลต่อการยุบตัวของคอนกรีตสด โดยเมื่อปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกสูงขึ้นการยุบตัวของคอนกรีตสดก็มากขึ้น

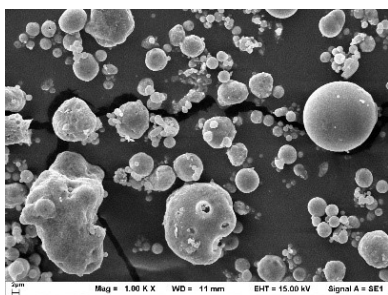
สำหรับมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีตนั้น มวลรวมละเอียด (Sand) ใช้ทรายแม่น้ำที่มีความถ่วงจำเพาะ 2.60 และโมดูลัสความละเอียด 3.10 ส่วนมวลรวมหยาบ (Rock) ใช้หินปูนย่อยที่มีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร และมีความถ่วงจำเพาะ 2.70

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยระยอง

Chemical composition (%)	OPC1	FA (BLCP)
SiO_2	19.51	64.45
Al_2O_3	4.97	20.58
Fe_2O_3	3.78	3.76
CaO	65.38	2.55
MgO	1.08	0.97
SO_3	2.16	0.18
LOI	2.27	4.01
Na_2O	0.01	0.43
K_2O	0.44	1.51
TiO_2	-	1.04
P_2O_5	-	0.16
Physical properties		
Blaine fineness (cm^2/g)	3,200	3,463
Specific gravity	3.14	2.18



รูปที่ 1 ภาพขยาย (SEM) รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์



รูปที่ 2 ภาพขยาย (SEM) รูปร่างอนุภาคของเถ้าลอย

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

ใช้แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร สำหรับการ

ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด ในขณะที่การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตใช้แบบหล่อตัวอย่างขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร³ โดยทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตตามส่วนผสมที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน (f/b) ที่ 0.20, 0.40 และ 0.60 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ 0.50 และ 0.60 ทำการถอดแบบภายหลังหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำจนครบตามระยะเวลาที่กำหนดที่ 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

Mix id.	w/b	f/b	Mix proportion of concrete (kg/m ³)					
			OPC1	WFA	DFA	Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
I50	0.50	0.00	404	-	-	202	761	965
I50WFA20		0.20	312	125	-	148	761	965
I50DFA20			312	-	78	195	761	965
I50WFA40		0.40	227	242	-	98	761	965
I50DFA40			227	-	151	189	761	965
I50WFA60		0.60	147	352	-	51	761	965
I50DFA60			147	-	220	183	761	965
I60	0.60	0.00	360	-	-	216	761	965
I60WFA20		0.20	279	110	-	169	761	965
I60DFA20			279	-	70	210	761	965
I60WFA40		0.40	204	214	-	125	761	965
I60DFA40			204	-	136	204	761	965
I60WFA60		0.60	132	307	-	89	761	965
I60DFA60			132	-	198	198	761	965

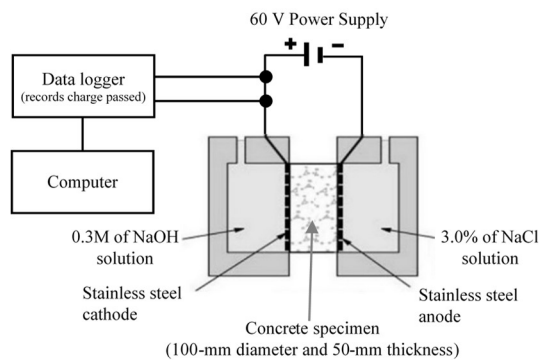
หมายเหตุ : I หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, WFA หมายถึง เถ้าลอยเปียก, DFA หมายถึง เถ้าลอยแห้ง, I50WFA20 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและแทนที่วัสดุประสานบางส่วนด้วยเถ้าลอยเปียกร้อยละ 20

2.3 ความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [7] ซึ่งเป็นการหาปริมาณประจุ

ไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน (Charge passed) โพรงช่องว่างภายในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งภายหลังที่ตัวอย่างบ่มน้ำครบตามระยะเวลาที่กำหนดที่ 28, 56 และ

91 วัน โดยเมื่อตัวอย่างครบกำหนด ก็นำตัวอย่างขึ้นมาตัดให้เป็นแผ่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 5 เซนติเมตร แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบ จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M ที่ขั้วบวก (Anode) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.0% ที่ขั้วลบ (Cathode) จากนั้นเริ่มให้ค่าศักย์ไฟฟ้า 60 V DC คร่อมตัวอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งผลที่ได้แสดงด้วยปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต มีหน่วยเป็นคูลอมป์ (Coulomb)

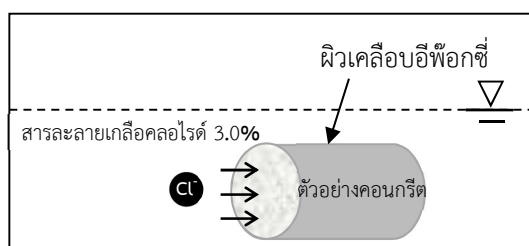


(ก) การตั้งค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

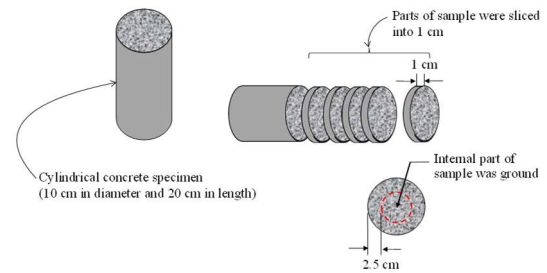


(ข) การทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 3 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง



รูปที่ 4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่
ทั้งหมด



รูปที่ 5 การตัดและเตรียมผงดตัวอย่างคอนกรีตในการหาปริมาณคลอไรด์ที่แต่ละระดับความลึก

2.4 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด (Bulk chloride diffusion test) ของคอนกรีตอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1556 [8] ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร บ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน แล้วจึงนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ จากนั้นทำการเคลือบผิวของตัวอย่างด้วยอีพ็อกซีเพื่อป้องกันไม่ให้เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไป แต่ยกเว้นด้านปลายไว้ด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อให้เกลือคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างในทิศทางเดียว หลังจากอีพ็อกซีแข็งตัวแล้วจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้น 3.0% เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ โดยอุณหภูมิตลอดช่วงการทดสอบอยู่ที่ $30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ เมื่อตัวอย่างครบระยะเวลาเผชิญคลอไรด์แล้วจึงนำตัวอย่างออกจากสารละลายเกลือคลอไรด์ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ แล้วนำตัวอย่างไปตัดเป็นแผ่นหนาชั้นละ 1 เซนติเมตร ตามความลึกจากผิวหน้าด้านที่ไม่ทาอีพ็อกซี (ด้านที่เผชิญคลอไรด์) จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างที่ตัดไปบดเป็นผงและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 โดยในการบดตัวอย่างจะเลือกเฉพาะบริเวณส่วนกลางของแผ่นตัวอย่าง เพื่อหลีกเลี่ยงเกลือคลอไรด์ที่อาจแทรกซึมจากด้านข้างได้ รายละเอียดการตัดและเตรียมผงดตัวอย่างแสดงไว้ในรูปที่ 5 จากนั้นนำผงดตัวอย่างไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Acid-soluble chloride content) ในคอนกรีตตามมาตรฐาน

ASTM C1152 [9] และนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_a) ของคอนกรีต จากสมการคำตอบกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law of diffusion equation) ดังสมการที่ 1

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (1)$$

โดยที่ $C(x,t)$ คือปริมาณคลอไรด์ที่ความลึก x ภายหลังเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา t (%) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), C_i คือปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (%) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), C_s คือปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต (%) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), erf คือเออเรอร์ฟังก์ชัน, D_a คือสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (ตารางเซนติเมตร/ปี), x คือความลึกจากผิวหน้า (เซนติเมตร) และ t คือระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

2.5 กำลังอัดของคอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร³ ตามมาตรฐาน BS 1881-116 [10] โดยทำการทดสอบกำลังอัดภายหลังตัวอย่างคอนกรีตถูกบ่มน้ำจนครบตามกำหนดระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

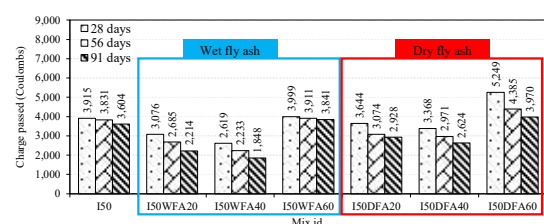
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

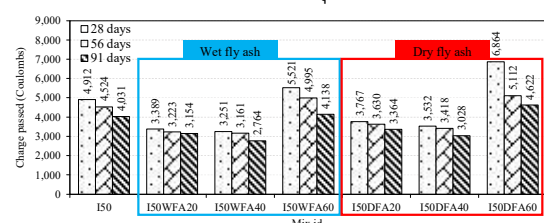
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสามารถพิจารณาได้จากปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตในหน่วยคูลอมป์ โดยหากปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านคอนกรีตยิ่งต่ำ หมายถึงคอนกรีตยิ่งมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี

จากรูปที่ 6 พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง (DFA) ร้อยละ 20 และ 40 ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน โดยปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในปริมาณสูงขึ้นถึงร้อยละ 40 เนื่องจากเถ้า

ลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด C-S-H และ C-A-H เพิ่มขึ้น อีกทั้งอนุภาคเถ้าลอยบางส่วนสามารถเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ (Filler effect) ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น โดยคอนกรีตที่มีการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 นั้นมีปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านต่ำที่สุด หรือมีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานสูงถึงร้อยละ 60 กลับทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่น้อยลงทำให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง (Dilution effect) ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจึงเกิดได้น้อยลงไปด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาบ่มพบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลงหรือความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้นจาก 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ เนื่องจากระยะเวลาบ่มที่นานขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตได้จึงน้อยลง



(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 6 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และเถ้าลอยแห้ง (DFA)

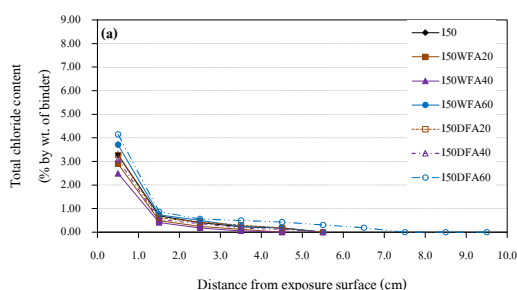
เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งจากรูปที่ 6 พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแห้ง อาจเนื่องมาจากเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะแข็งตัวแล้ว ความชื้นที่อยู่กับอนุภาคเถ้าลอยช่วยให้เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น ความพรุนลดน้อยลง คอนกรีตจึงมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้น (ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านลดลง) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) จากรูปที่ 6 พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตลดลง (ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านเพิ่มขึ้น) เมื่อ w/b สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนที่เกิดจากน้ำอิสระเหล่านั้นสูงขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ประจุไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตตามโพรงช่องว่างได้ง่ายขึ้น

3.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแบบแพร่ทั้งหมด

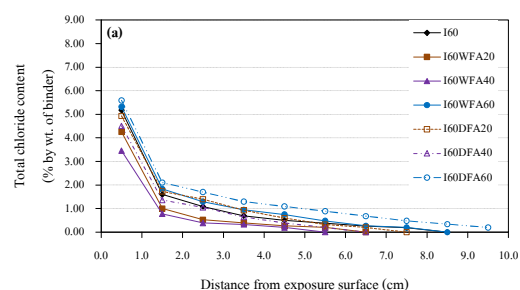
รูปที่ 7 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งภายหลังเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน โดยพบว่า ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งร้อยละ 20 และ 40 ต่ำกว่าของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานใน

ปริมาณสูงขึ้นถึงร้อยละ 40 เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ทำให้เกิด C-S-H และ C-A-H ซึ่งช่วยให้คอนกรีตทึบแน่นขึ้นและช่วยเพิ่มความสามารถยึดจับคลอไรด์ในคอนกรีตให้สูงขึ้นด้วย [11]-[13] อีกทั้งอนุภาคเถ้าลอยบางส่วนสามารถเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น คลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปได้ยาก โดยการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ให้ค่าปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานสูงถึงร้อยละ 60 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่น้อยลงทำให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจึงเกิดได้น้อยลงไปด้วย

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) จากรูปที่ 7 (ก) และ (ข) พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตสูงขึ้น เมื่อ w/b สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นส่งผลทำคอนกรีตมีความพรุนที่เกิดจากน้ำอิสระสูงขึ้นตามไปด้วย จึงเป็นเหตุทำให้ไอออนคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตผ่านตามโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ เมื่อคอนกรีตเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลานานขึ้น (จาก 28, 56 และ 91 วัน) ทำให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตตามระดับความลึกต่างๆ เพิ่มขึ้นตามด้วย



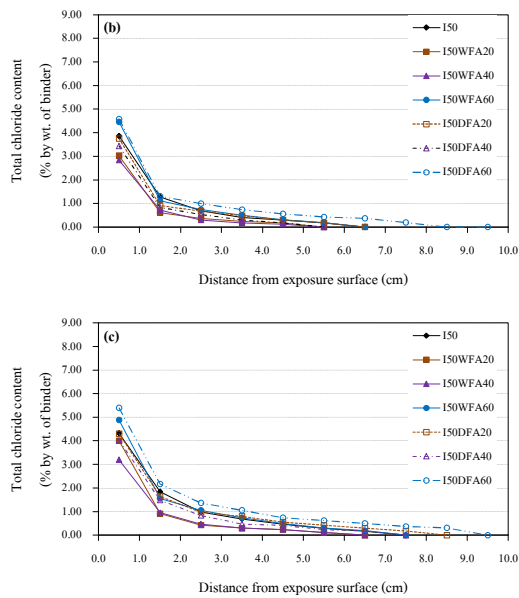
(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



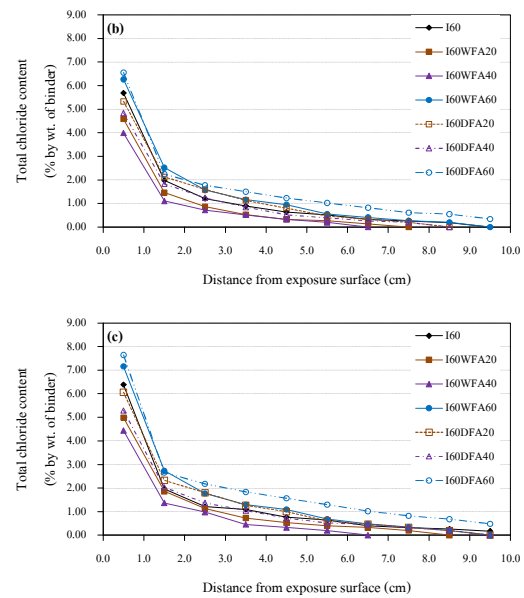
(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 7 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และเถ้าลอยแห้ง (DFA): (a) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน; (b) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน และ (c) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2564

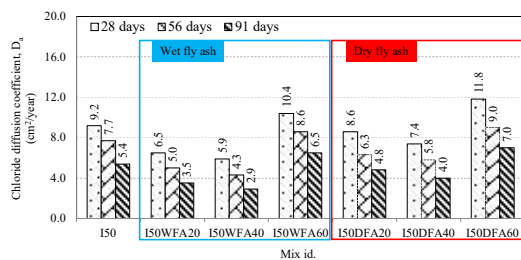


(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

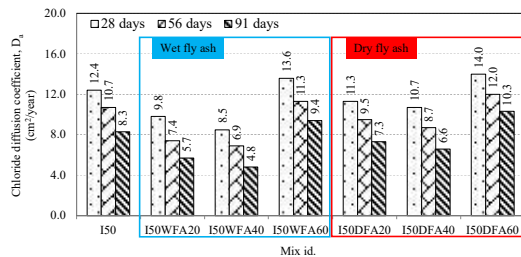


(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 7 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และเถ้าลอยแห้ง (DFA): (a) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน; (b) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน และ (c) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)



(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 8 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และเถ้าลอยแห้ง (DFA)

เพื่อให้การพิจารณาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น การพิจารณาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

จึงถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_c) ของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 8

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 8 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งร้อยละ 20 และ 40 ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในปริมาณสูงขึ้นถึงร้อยละ 40 ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างเถ้าลอยกับ Ca(OH)_2 ที่ช่วยเพิ่มความสามารถยึดจับคลอไรด์และความทึบแน่นในคอนกรีตให้สูงขึ้น รวมถึงอนุภาคเถ้าลอยบางส่วนสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต อีออนคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปได้ยาก โดยการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานสูงถึงร้อยละ 60 กลับทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่น้อยลงทำให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกลดลง อีออนคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้า

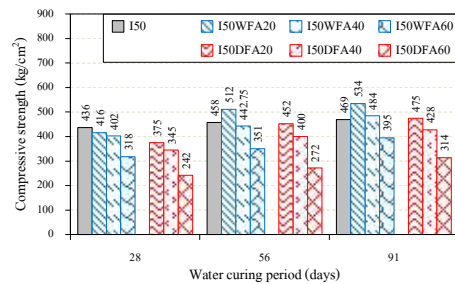
ไปในคอนกรีตได้ง่าย อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตมีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้นจาก 28, 56 และ 91 วัน ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดลง

จากรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกนั้นต่ำกว่าของคอนกรีตที่แทนที่ใช้เถ้าลอยแห้ง อาจเนื่องจากความชื้นที่อยู่กับอนุภาคเถ้าลอยช่วยให้เถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถยึดจับคลอไรด์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตจึงลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น เมื่อ w/b สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นส่งผลทำคอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นเป็นเหตุทำให้ไอออนคลอไรด์สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปตามโพรงช่องว่างเหล่านั้นได้ง่ายขึ้น

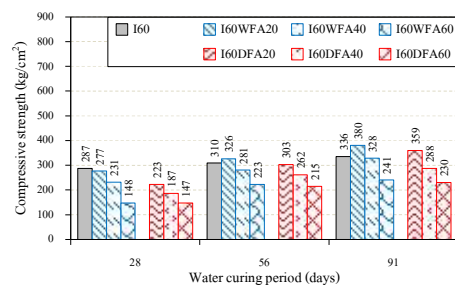
3.3 กำลังอัด

จากรูปที่ 9 ซึ่งแสดงกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้งเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง) ลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น (เพิ่มจากร้อยละ 20 ถึง 60) เมื่อพิจารณาที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกและคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม อย่างไรก็ตาม เมื่ออายุบ่มน้ำเพิ่มขึ้น กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งร้อยละ 20 สูงกว่าของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้เถ้าลอยเป็นร้อยละ 40 และ 60 กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ยกเว้นคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกร้อยละ 40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 พบว่า กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เพิ่มสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนเนื่องจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 ได้สารประกอบ C-S-H และ C-

A-H ซึ่งมีเป็นสารยึดประสาน อย่างไรก็ตามหากใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในปริมาณสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อปริมาณของ Ca(OH)_2 กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์น้อยลง Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็น้อยลง [14]-[17] ทำให้สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างเถ้าลอยกับ Ca(OH)_2 ลดลงด้วย



(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 9 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และเถ้าลอยแห้ง (DFA)

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งจากรูปที่ 9 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแห้งในทุกๆ อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสาน อาจเนื่องจากความชื้นที่อยู่กับอนุภาคเถ้าลอยสามารถช่วยให้เถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้ การใช้เถ้าลอยเปียกผสมคอนกรีตทำให้เกิดการผสมสองครั้ง (Double mixing) ของน้ำในส่วนผสมคอนกรีต แบ่งเป็น 1) น้ำที่ผสมกับเถ้าลอย และ 2) น้ำที่ผสมกับส่วนผสมคอนกรีต ซีเมนต์เฟสของเถ้าลอยเปียกจึงสามารถจับยึดกับมวลรวมได้ดี ทำให้เกิดความ

แข็งแรงบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสกับมวลรวม (Interfacial transition zone, ITZ) กำลังอัดจึงสูงขึ้น [2] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลกระทบของ w/b พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อ w/b สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นส่งผลทำคอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในคอนกรีตในด้านความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 60 คอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งอย่างชัดเจน คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงสูงที่สุด

2. สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 60 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งอย่างเห็นได้ชัด โดยที่สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีค่าต่ำที่สุด

3. กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 ให้กำลังอัดของคอนกรีตในระยะยาวสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน นอกจากนี้ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งอย่างชัดเจน

4. ความสามารถต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งเนื่องจากความชื้นที่อยู่กับอนุภาคเถ้าลอยเปียกช่วยให้เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดียิ่งขึ้น รวมทั้ง

จากผลการผสมสองครั้ง (Double mixing) ของน้ำทำให้ซีเมนต์เฟสยึดจับมวลรวมได้แข็งแรงขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 157/2560 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Saengsoy, T. B. T. Nguyen, and S. Tangtermsirikul, "A study on basic properties of mortar made with wet fly ash," in *proc. of the 6th Int. Conf. of ACF*, Seoul, Korea, 2014, pp. 949-955.
- [2] T. B. T. Nguyen, W. Saengsoy and S. Tangtermsirikul, "Effect of initial moisture of wet fly ash on the workability and compressive strength of mortar and concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 183, pp. 408-416, September 2018.
- [3] American Society for Testing and Materials, 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.
- [4] R. Cheerarot and C. Jaturapitakkul, "A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement," *Wast. Manag.*, vol. 24(7), pp. 701-709, March 2004.
- [5] S. A. Haldivi and A. R. Kambekar, "Experimental study on combined effect of fly ash and pond ash on strength and

- durability of concrete,” *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4(5), pp. 81–86, May 2013.
- [6] B. Andrew and P. G. Aceves, “The use of non-commercial fly ash in roller compacted concrete structures,” in *World of Coal Ash Conf.*, Denver, CO, USA, 2011, pp. 1-4.
- [7] American Society for Testing Materials, ASTM 1202-97, Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [8] American Society for Testing and Materials, ASTM 1556, Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [9] American Society for Testing and Materials, ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [10] British Standard, BS 1881-116, Method for determination of compressive strength of concrete cubes, 1983.
- [11] T. Sumranwanich and S. Tangtermsirikul, “A model for predicting time-dependent chloride binding capacity of cement-fly ash cementitious system,” *Mat. Struct.*, vol. 37(6), pp. 387–396, July 2004.
- [12] J. Liu, G. Ou, Q. Qiu, X. Chen, J. Hong and F. Xing, “Chloride transport and microstructure of concrete with/without fly ash under atmospheric chloride condition,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 493–501, August 2017.
- [13] L. Prak, T. Sumranwanich and S. Tangtermsirikul, “Time-dependent model for predicting chloride binding capacity of concrete with crystalline material,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 33(2), pp. 04020473, February 2021.
- [14] I. Sirisawat, W. Saengsoy, L. Baingam, P. Krammart and S. Tangtermsirikul, “Durability and testing of mortar with interground fly ash and limestone cements in sulfate solutions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 39-46, August 2014.
- [15] J. Feng, J. Sun and P. Yan, “The influence of ground fly ash on cement hydration and mechanical property of mortar,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2018, pp. 1–7, May 2018.
- [16] L. Wang, K. Uji and A. Ueno, “Evaluation on reaction efficiency coefficient of fly ash based on threshold value of effective replacement ratio,” *Cement Sci. Con. Tech.*, vol. 71(1), pp. 645–652, March 2018.
- [17] L. Prak and T. Sumranwanich, “Chloride binding capacity and water absorption of mortar containing fly ash, limestone powder, and expansive additive,” *J. Eng. RMUTT*, vol. 18(2), pp. 133-144, December 2020.