วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 32, ฉบับที่ 2 เม.ย.–มิ.ย. 2565
The Journal of KMUTNB., Vol. 32, No. 2, Apr.–Jun. 2022

บทความวิจัย

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด

ศิระ อาทมาท และ ทวีชัย สำราญวานิช*
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1862 1230 อีเมล: twc@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.06.002
รับรับเมื่อ 7 พฤษภาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 10 กรกฎาคม 2563 ตอบรับเมื่อ 29 กรกฎาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 7 มิถุนายน 2564
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน โดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 อัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาเท่ากับ 0.10, 0.20 และ 0.30 ทำการควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดที่ 10 ± 1 เซนติเมตร ตัวอย่างคอนกรีตถูกบ่มในน้ำหรือบ่มอากาศจนอายุ 28 วัน ก่อนเริ่มทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดการบ่ม จากการผลการทดลองพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตมากที่สุด และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่นานที่สุด นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีกำลังอัดสูงที่สุดที่อายุ 28 วัน และคอนกรีตที่บ่มน้ำมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมและกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่บ่มอากาศ

คำสำคัญ: ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม คอนกรีต เหล็กเสริม เถ้าลอย เถ้าก้นเตา

การอ้างอิงบทความ: ศิระ อาทมาท และ ทวีชัย สำราญวานิช, "ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 2, หน้า 366–374, เม.ย.–มิ.ย. 2565.

Research Article

Threshold Total Chloride Content, Depassivation Time of Reinforcing Steel, and Compressive Strength of Concrete with Fly Ash and Partial Replacement of Fine Aggregate by Bottom Ash

Sira Arttamart and Taweechai Sumranwanich*
Faculty of Engineering, Burapha University, Chon Buri, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1862 1230, E–mail: twc@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.06.002
Received 7 May 2020; Revised 10 July 2020; Accepted 29 July 2020; Published online: 7 June 2021
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This paper aims to study threshold total chloride content, depassivation time of reinforcing steel and compressive strength of concrete with fly ash and bottom ash as partial replacement of fine aggregate. Ordinary Portland cement was used as a main cementitious material. The ratio of fly ash for replacement cementitious materials was 0.30 and the replacement ratio of fine aggregates by bottom ash was 0.10, 0.20, and 0.30. The slump of fresh concretes was controlled at 10 ± 1 centimeter. Specimens were cured in tap water or air until 28 days before starting the test in order to study the influence of curing type. From the experiment results, it was found that concrete mixed with 30% replacement of binder by fly ash and 10% replacement of fine aggregate by bottom ash had the highest threshold total chloride content and the longest depassivation time of reinforcing steel. Moreover, it was found that concrete containing 10% replacement of fine aggregate by bottom ash had the highest compressive strength at 28 days. Concretes cured in water had higher threshold total chloride content, depassivation time and compressive strength than concretes cured in air.

Keywords: Threshold Total Chloride Content, Depassivation Time, Concrete, Reinforcing Steel, Fly Ash, Bottom Ash

Please cite this article as: S. Arttamart and T. Sumranwanich, "Threshold total chloride content, depassivation time of reinforcing steel, and compressive strength of concrete with fly ash and partial replacement of fine aggregate by bottom ash," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 2, pp. 366–374, Apr.–Jun. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมทางทะเลเกิดการเสื่อมสภาพและความเสียหายเนื่องจากเหล็กเสริมภายในของโครงสร้างเกิดสนิมเนื่องจากเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลแทรกซึมเข้าไปสะสมในคอนกรีตที่ตำแหน่งผิวเหล็กเสริมมากเกินกว่าระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต (Threshold Chloride Content) มีงานวิจัยที่ศึกษาปัญหาดังกล่าวเพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานภายใต้สิ่งแวดล้อมทางทะเลยาวนานขึ้น โดยมุ่งปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยการใช้วัสดุปอซโซลานต่างๆ เพื่อเพิ่มความทึบแน่นของคอนกรีตให้มากขึ้น [1] นอกจากนี้ก็มีการใช้เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้ามาใช้แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพความคงทนของคอนกรีต โดยเถ้าลอยมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกาและอะลูมินาออกไซด์ ที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานนิก (Pozzolanic Reaction) กับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตมากขึ้น อีกทั้งยังมีการนำกากวัสดุอีกชนิดหนึ่งจากการเผาถ่านหิน คือ เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) มาใช้ โดยมีอนุภาคที่ใช้ใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด และมีความพรุน (Porosity) ที่สูงจึงสามารถเก็บกักน้ำไว้ภายในได้ (Water Retainability) ทำให้เถ้าก้นเตาถูกใช้เป็นวัสดุบ่มภายใน (Internal Curing Material) ของคอนกรีตได้ โดยการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดก็เพื่อเพิ่มความสามารถในบ่มภายในคอนกรีต และจากผลการศึกษาที่ผ่านมาทั้งในห้องปฏิบัติการ [2], [3] และในสิ่งแวดล้อมทะเล [4] เกี่ยวกับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาพบว่า เมื่อใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 โดยปริมาตรของทราย ทำให้คอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำลง อีกทั้งยังทำให้คอนกรีตมีกำลังที่สูงขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยร่วมกับเถ้าก้นเตาต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต และกำลังอัดของคอนกรีต โดยศึกษาคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยปริมาตรมวลรวมละเอียด ทำการควบคุมความสามารถในการทำงานได้ (ค่าการยุบตัว) ของคอนกรีตสดเท่ากัน

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

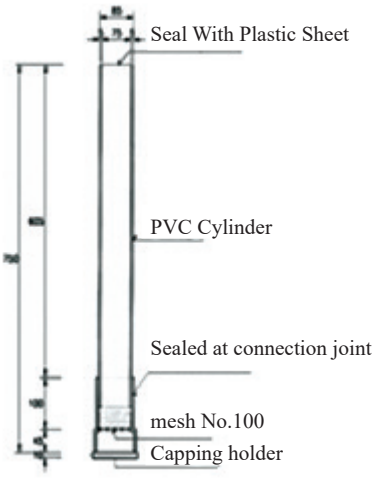
2.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (I) เป็นวัสดุประสานหลักของคอนกรีต ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (F) แทนที่วัสดุปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (BA) ซึ่งมีความสามารถเก็บกักน้ำร้อยละ 37.77 แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยปริมาตร ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา และตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ ทำการถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1 วัน โดยแบ่งคอนกรีตเป็น 2 ชุด ได้แก่ คอนกรีตบ่มน้ำและคอนกรีตที่บ่มอากาศจนคอนกรีตมีอายุครบ 28 วัน เพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างการบ่มน้ำและการบ่มอากาศ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

Chemical Compositions (%)	Cement (I)	Fly Ash (F)	Bottom Ash (BA)
SiO_2	19.51	39.4	36.29
CaO	65.38	19.19	20.84
$Al2O_3$	4.97	17.93	19.96
Fe_2O_3	3.78	12.92	14.56
MgO	1.08	2.99	1.96
SO_3	2.16	3.03	0.96
LOI	2.27	0.17	1.36
Physical properties			
Specific gravity	3.15	2.29	1.78
Water retainability (%)	-	-	37.77

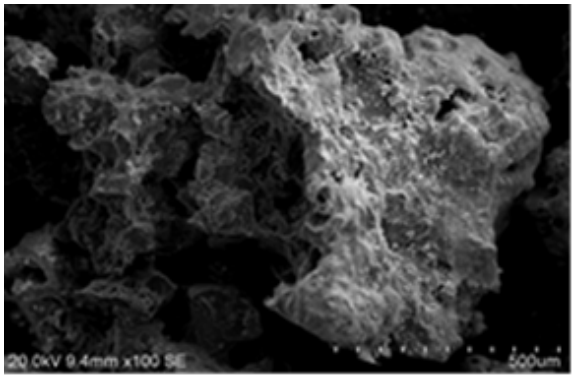
อย่างไรก็ตาม วิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ของมวลรวมละเอียด เช่น ทรายไม่สามารถ



รูปที่ 1 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถเก็บกักน้ำของเถ้าก้นเตา

ใช้กับเถ้าก้นเตาได้ เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและมีแรงเสียดทานพื้นผิวสูงแม้ในสภาวะที่แห้ง ดังนั้นจึงใช้ค่าความสามารถเก็บกักแทนค่าการดูดซึม โดยความสามารถเก็บกักน้ำหมายถึง ปริมาณน้ำที่เติมเต็มช่องว่างในวัสดุพรุนรวมทั้งน้ำที่ถูกยึดจับไว้ที่ร่องพื้นผิวของวัสดุพรุนภายใต้แรงโน้มถ่วง โดยในการทดสอบหาค่าความสามารถเก็บกักน้ำและความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตา ทดสอบตามวิธีของ Kasemchaisiri และ Tangtermsirikul [5] โดยรูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ในการทดสอบความสามารถในการเก็บกักน้ำของเถ้าก้นเตา และรูปที่ 2 แสดงภาพขยายของอนุภาคเถ้าก้นเตา ซึ่งจะเห็นได้ว่าเถ้าก้นเตามีผิวขรุขระ และมีรูพรุนมากจึงสามารถเก็บกักน้ำได้ภายใน และบริเวณผิวหน้าได้

สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดทุกส่วนผสมเท่ากันที่ 10 ± 1 เซนติเมตร ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา [2]–[4] ที่ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากัน เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูง และสามารถกักเก็บน้ำไว้ภายในและที่ผิวขรุขระของอนุภาคเถ้าก้นเตา เมื่อทำการผสมคอนกรีต น้ำบางส่วนภายในอนุภาคเถ้าก้นเตาสามารถออกมาเป็นน้ำอิสระในส่วนผสม ทำให้ค่ายุบตัวของคอนกรีตสูงขึ้น ดังนั้นจึงควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดทุกส่วนผสมให้เท่ากันแทน ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 2 ภาพขยายของอนุภาคเถ้าก้นเตา

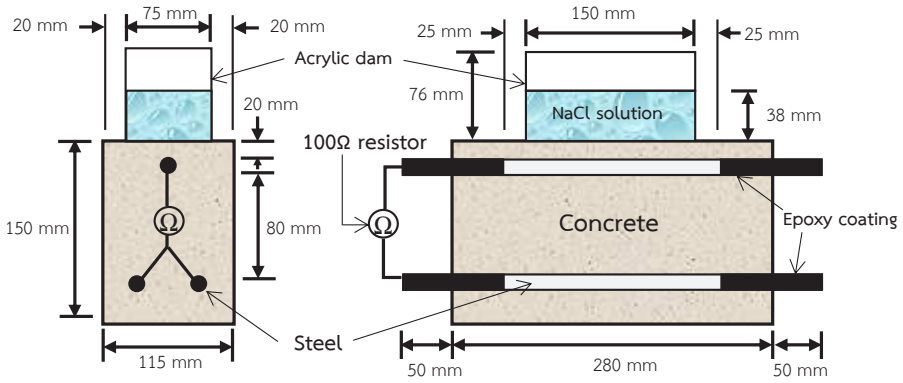
ตารางที่ 2 รายละเอียดส่วนผสมคอนกรีต

Mix id	w/b	Mix proportions of concrete (kg/m^3)					
		Binders		BA	Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
		I	F				
I55	0.55	388	-	-	197	760	994
I55BA10	0.50	388	-	53	195	686	1,024
I55BA20	0.48	388	-	60	186	618	1,038
I55BA30	0.47	388	-	90	182	554	1,044
I55F30	0.55	261	112	-	188	760	994
I55F 30BA10	0.50	261	112	53	185	688	1,027

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต และระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต

นำเหล็กเสริมแบบข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร ความยาว 38 เซนติเมตร มาขัดทำความสะอาดผิวเหล็กโดยรอบ หลังจากนั้น เคลือบอิพ็อกซีที่บริเวณปลายเหล็กทั้ง 2 ด้าน แล้วใช้เทปพันสายไฟพันโดยรอบบริเวณที่เคลือบอิพ็อกซี ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 115 × 150 × 280 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยใช้เหล็กเสริมที่เตรียมไว้ข้างต้นวางบริเวณด้านบน 1 เส้น ที่ระยะหุ้ม 2 เซนติเมตร และบริเวณด้านล่าง 2 เส้น ที่ระยะ 8 เซนติเมตร จากผิวด้านล่างของเหล็กเสริมด้านบน ดังแสดง



รูปที่ 3 รายละเอียดของตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ในรูปที่ 3 ถอดแบบเมื่ออายุครบ 1 วัน แล้วแบ่งตัวอย่างไปบ่มน้ำ (Water-cured) และบ่มอากาศ (Air-cured) จนมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้นติดตั้งตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม เชื่อมต่อเหล็กเสริมด้านบนและด้านล่าง ติดตั้งชุดอะคริลิกด้านบนเพื่อทำเป็นอ่างขังสารละลายคลอไรด์ต่อไปในการทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต ทำโดยใช้การดัดแปลงวิธีในมาตรฐาน ASTM G109 [5] โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5.0% (มวลต่อปริมาตร) ขังบนตัวอย่างเหนือบริเวณเหล็กเสริมบน และให้ตัวอย่างคอนกรีตเผชิญคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Cyclic Wetting and Drying) แบบ 3 : 1 (เปียก : แห้ง) คือ ขังสารละลายเหนือตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นเทสารละลายออกปล่อยให้ผิวหน้าตัวอย่างคอนกรีตแห้ง 1 วัน ทำเป็นวัฏจักรแบบนี้ไปจนกระทั่งเหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม จึงหยุดการทดสอบแล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตต่อไป

2.2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ใช้แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10 × 10 × 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยถอดแบบหลังจากตัวอย่างมีอายุครบ 24 ชั่วโมง แบ่งตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำและบ่มอากาศ จากนั้นทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 การทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ในการทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมในหัวข้อ 2.2.1 มาทดสอบวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C 876 [6] โดยใช้ $Cu/CuSO_4$ เป็นขั้วอ้างอิงทุกๆ รอบตอนสิ้นสุดวัฏจักรเปียกก่อนเริ่มต้นวัฏจักรแห้ง

2.3.2 การทดสอบค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน

ในการทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมในหัวข้อ 2.2.1 มาทดสอบวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมตัวความต้านทานที่ติดตั้งไว้ตามมาตรฐาน ASTM G109 [7] ทุกๆ รอบ เมื่อสิ้นสุดวัฏจักรเปียกก่อนเริ่มต้นวัฏจักรแห้ง โดยใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความละเอียด 0.01 mV ซึ่งสามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้จากกฎของโอห์ม ดังสมการที่ (1)

$$I = V/R \quad (1)$$

โดยที่ V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมตัวต้านทาน (โวลต์) I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) และ R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (ในการศึกษานี้ใช้ขนาด 100 โอห์ม)

สำหรับค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน (i_{corr}) หาได้จากสมการที่ (2)

$$i_{corr} = I/A \quad (2)$$

โดยที่ i_{corr} คือ ความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน และ A คือ พื้นที่ผิวเหล็กเสริมที่ต้องเผชิญคลอไรด์ (ในกรณีนี้มีพื้นที่ 75.398 ตารางเซนติเมตร)

2.3.3 การทดสอบค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต

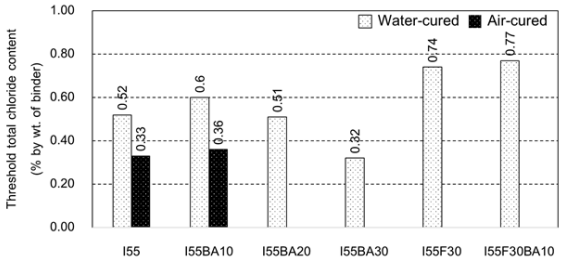
เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว แสดงว่าเวลานี้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมแล้ว (Depassivation Time) ให้หยุดทดสอบแล้วนำตัวอย่างคอนกรีตมาเจาะตรงบริเวณที่ขังสารละลายตามระดับความลึกจากผิวหน้าด้านบนลงไปทีละชั้น ความหนาชั้นละ 1 เซนติเมตร นำผงคอนกรีตที่เจาะได้มาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride Content) ต่อไปตามมาตรฐาน ASTM C1152 [8] โดยแสดงในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (% by Weight of Binder) ของคอนกรีต ทั้งนี้ค่าปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีตที่ตำแหน่งระดับผิวเหล็กเสริมคือค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต (Threshold Total Chloride Content) ของคอนกรีตนั่นเอง

3. ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดทุกส่วนผสมเท่ากัน เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ภายใน และบริเวณผิวของเถ้าก้นเตา ซึ่งหากควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แล้วใช้เถ้าก้นเตาในส่วนผสมคอนกรีต น้ำบางส่วนที่กักเก็บไว้ในเถ้าก้นเตาสามารถออกมาเป็นน้ำอิสระในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของส่วนผสมคอนกรีตไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำการควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตแทน โดยพิจารณาจากคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าก้นเตา (I55) มีค่ายุบตัวที่ 10 เซนติเมตร จึงควบคุมส่วนผสมคอนกรีตอื่นๆ ให้มีค่ายุบตัว 10 ± 1 เซนติเมตรด้วย โดยการปรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลง

3.1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีต

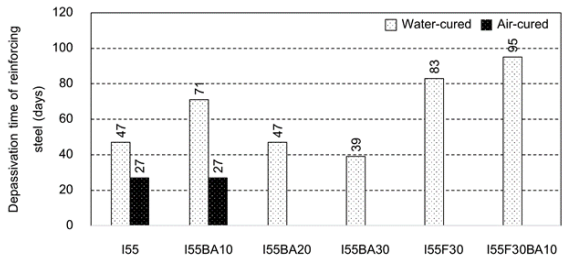
ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตแสดงอยู่ในรูปของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสานในคอนกรีต จากรูปที่ 4 พบว่า คอนกรีตที่บ่มน้ำโดยใช้ปูนซีเมนต์ล้วนนั้นมีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตที่ 0.52% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แต่เมื่อใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 แทนที่มวลรวมละเอียดพบว่า ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตมีค่าสูงขึ้น แต่พบว่า เมื่อใช้เถ้าก้นเตาที่ปริมาณมากขึ้น (ร้อยละ 20 และ 30) ทำให้คอนกรีตมีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตลดลงตามลำดับ อันเนื่องจากการใช้เถ้าก้นเตาในคอนกรีตนั้นทำให้คอนกรีตมีวัสดุบ่มภายในแทรกตัวอยู่ ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ภายในคอนกรีตเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้นเนื่องจากมีความชื้นจากเถ้าก้นเตา [9] แต่หากการใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณมากเกินไป ส่งผลให้ภายในคอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ส่งผลให้ภายในคอนกรีตมีความพรุนสูงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yüksel และคณะ [10] ที่บ่งชี้ว่าหากมีการใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณที่สูงขึ้น คอนกรีตจะมีความพรุนมากขึ้นเช่นกัน



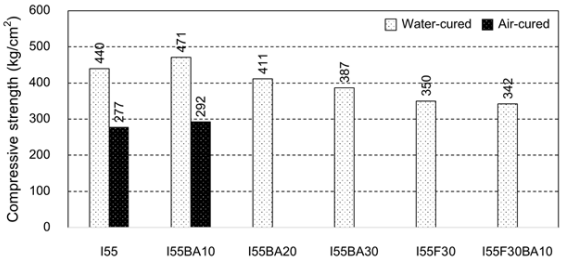
รูปที่ 4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีต

เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะคอนกรีตที่บ่มในอากาศเหมือนกันพบว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าก้นเตา คือที่ร้อยละ 0.36 และ 0.33 ตามลำดับ เนื่องมาจากภายในเถ้าก้นเตามีอนุภาคเถ้าลอยแทรกตัวอยู่ด้วย ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เช่นกัน ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้นและมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานนั้นพบว่า การใช้เถ้าลอยปริมาณร้อยละ 30



รูปที่ 5 ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต



รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

มีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม และมีค่าสูงที่สุดที่ 0.77% โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเมื่อใช้ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 เนื่องจากเถ้าลอยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและเกิดผลผลิต C-S-H และ C-A-H มากขึ้น ประกอบกับการใช้เถ้าก้นเตาซึ่งมีความสามารถในการเก็บกักน้ำเพื่อเป็นวัสดุบ่มภายในคอนกรีตช่วยให้คอนกรีตมีความต้านทานการเกิดสนิมมากขึ้น อีกทั้งภายในของเถ้าก้นเตายังมีเม็ดเถ้าลอยแทรกอยู่ ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิกได้ ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตจึงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการบ่มระหว่างการบ่มน้ำและบ่มอากาศของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มอากาศ เนื่องจากน้ำจากภายนอกคอนกรีตช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เพียงพอ และต่อเนื่อง และไม่มีการสูญเสียความชื้นให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอก อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเฉพาะคอนกรีตที่บ่มอากาศพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมไม่ผสมเถ้าก้นเตา เพราะความสามารถในการเป็นวัสดุบ่มภายในที่ดีของเถ้าก้นเตา

3.2 ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

จากรูปที่ 5 พบว่า คอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่บ่มน้ำมีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ 47 วัน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่ 71 วัน แต่เมื่อใส่เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณเพิ่มขึ้น คอนกรีตมีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมสั้นลง เนื่องจากการใช้เถ้าก้นเตาที่สูงเกินไปทำให้ภายในของคอนกรีตมีความพรุนมาก [10] ส่งผลให้คลอไรด์สามารถเข้าไปได้ง่ายขึ้น จึงทำให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมได้เร็ว

สำหรับผลกระทบของการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานพบว่า การใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 ในคอนกรีตช่วยให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีความต้านทานการเริ่มเกิดสนิมที่นานขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้นและต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ทำให้มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานที่สุดที่ 95 วัน ซึ่งนอกจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยแล้ว การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถการบ่มจากภายในคอนกรีตเอง ทำให้การปฏิกิริยาต่อเนื่องและสมบูรณ์มากขึ้น ทั้งนี้พบว่าการบ่มอากาศทำให้คอนกรีตมีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่สั้นกว่าคอนกรีตที่บ่มน้ำอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากการบ่มอากาศอาจทำให้การทำปฏิกิริยาต่างๆ เกิดไม่สมบูรณ์ทั้งหมดเนื่องจากคอนกรีตมีความชื้นที่ไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยา

3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 6 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ที่บ่มน้ำมีกำลังอัดที่มากที่สุดคือ 471 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อ

ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดเพิ่มขึ้นกำลังอัดกลับมีค่าลดลง นอกจากนี้ การใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ลดลงและต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hussain และคณะ [11] เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยต้องใช้ระยะในการทำปฏิกิริยานานขึ้น

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการบ่มน้ำ และบ่มอากาศของคอนกรีตต่อกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่บ่มน้ำอายุ 28 วัน มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มอากาศ เนื่องจากคอนกรีตสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างต่อเนื่อง และเมื่อพิจารณาเฉพาะคอนกรีตที่บ่มอากาศพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นภายในเถ้าก้นเตาช่วยทำให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์ขึ้น

4. สรุป

จากการศึกษาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีค่าสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 ร่วมกับใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตสูงที่สุดคือ 0.77% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

2) คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 มีแนวโน้มทำให้ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้น และนานที่สุดเมื่อใช้ร่วมกับการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30

3) คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 มีกำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่อายุ 28 วัน

4) คอนกรีตที่บ่มน้ำมีปริมาณคลอไรด์วิกฤต ระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงกว่าคอนกรีตที่บ่มอากาศ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้าง และบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และขอขอบคุณทุนการศึกษาสำหรับผู้แต่งที่ 1 จากศูนย์แห่งความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวัสดุศาสตร์ การก่อสร้างและเทคโนโลยีการบำรุงรักษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

[1] C. S. Poon, S. C. Kon, and L. Lam, “Compressive strength chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 20, no. 1, pp. 858–865, 2006.

[2] U. Kunmongkol, T. Sumranwanich, P. Choktaweekarn, and S. Tangtermsirikul, “Rapid chloride penetration resistance of concrete containing fly ash and bottom ash from Mae Moh and Rayong,” in *proceedings The 17th National Convention on Civil Engineering*, Udon Thani, Thailand, 2012 (in Thai).

[3] S. Arttamart, T. Sumranwanich, P. Sancharoen, and T. Chuosavasdi, “Chloride penetration resistance and compressive strength of concrete with fly ash and partial replacement of fine aggregate by bottom ash,” in *proceedings The 1st KU SRC Annual Conference*, Chonburi, 2016 (in Thai).

[4] S. Namjan, T. Sumranwanich, and W. Saengsoy, “Chloride penetration resistance and compressive strength of concrete with bottom ash as partially sand replacement under marine environment,” in *proceedings The 11th Annual Concrete Conference*, Nakhon Ratchasima, 2016 (in Thai).

[5] R. Kasemchaisiri and S. Tangtermsirikul, "A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 6, pp. 1322–1334, 2007.

[6] *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, American Society for Testing and Materials, ASTM C876, 2009.

[7] *Standard Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixture on Corrosion of Embedded Steel in Concrete Exposed Chloride Environments*, American Society for Testing and Materials, ASTM G109, 2013.

[8] *Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*, American Society for Testing and Materials, ASTM C1152, 2012.

[9] K. Hussain, P. Choktaweekarn, W. Saengsoy, T. Srichan, and S. Tangtermsirikul, "Effect of cement types, mineral admixtures, and bottom ash on the curing sensitivity of concrete," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 20, no. 1, pp. 94–105, 2013.

[10] I. Yüksel, T. Bilir, and Ö. Özkan "Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate," *Building and Environment*, vol. 42, no. 7, pp. 2651–2659, 2007.

[11] K. Hussain, P. Choktaweekarn, and S. Tangtermsirikul "Effect of bottom ash and mineral admixtures on the curing sensitivity of concrete," *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand*, vol. 22, no. 4, pp. 25–33, 2011 (in Thai).