



ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน ต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Limestone Powder on Threshold Chloride Content of Concrete

ทวีชัย สํารณวานิช^{1,*} และ ลีน่า ปรัก²

Taweechai Sumranwanich^{1,*} and Lyna Prak²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

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

169 Long-Hard Bangsaen Road, Saensuk, Muang, Chonburi, Thailand, 20131

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi,

39 Moo1, Klong 6, Klong Luang, Pathum Thani, Thailand, 12120

*E-mail: twc@buu.ac.th, Tel.: 081-8621-230

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูนต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน โดยใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30, 40, 50 และ 70 ใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 10 และ 15 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และระยะหุ้มเหล็กเสริม 2 เซนติเมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตและระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีปริมาณคลอไรด์วิกฤตมีน้อยลงและระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด การใช้ผงหินปูนร้อยละ 5 แทนที่วัสดุประสานในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น ระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานขึ้น และดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูงขึ้น

คำสำคัญ: ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิม; ปริมาณคลอไรด์วิกฤต; คอนกรีต; ตะกรันเตาถลุงเหล็ก; ผงหินปูน

ABSTRACT

This research aims to study the effects of ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) and limestone powder (LP) on threshold chloride content, the depassivation time of steel and compressive strength of concrete containing GGBFS and LP. The GGBFS was used as a partial replacement of binder at the replacement percentage of 30%, 40%, 50% and 70%. The LP was used to replace the binder at the replacement percentage of 5%, 10% and 15%. The water to binder ratio of 0.50 and covering depth of 2 cm were used. The results showed that the threshold chloride content and depassivation time of concrete containing GGBFS and LP was higher than that of cement-only concrete. Concrete with GGBFS had lower threshold chloride content and longer depassivation time with increasing binder replacement content by GGBFS. The use of LP at 5% binder replacement in concrete containing GGBFS gave higher compressive strength of concrete, longer depassivation time of steel and higher corrosion resistance index of steel in concrete.

Keywords: depassivation time; threshold chloride content; concrete; ground granulated blast-furnace slag; limestone powder

1. บทนำ

คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้าง แต่ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตยังเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพและนำไปสู่การวิบัติ [1-4] ในการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์นั้น ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration resistance) และปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Threshold chloride content) ของคอนกรีตถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ โดยความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตที่แทรกซึมเข้าไปสู่ผิวเหล็กเสริม ส่วนปริมาณคลอไรด์วิกฤตแสดงถึงปริมาณคลอไรด์ที่สะสมบริเวณผิวของเหล็กเสริมในคอนกรีตจนมีปริมาณมากพอที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation)

มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่เหล็ก และผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการย่อยหินนำมาแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตให้ต้านทานการเกิด

สนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ให้ดีขึ้น Yeau และ Kim [5] ได้ประเมินความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตโดยศึกษาปูนซีเมนต์สองชนิดคือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 0 ถึง 55 และพบว่าคอนกรีตซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กมีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และเมื่อใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กร่วมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ให้ความต้านทานการเกิดสนิมสูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 เอกศักดิ์และคณะ [6] พบว่า มอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูนมีความต้านทานคลอไรด์น้อยกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ แต่เมื่อใช้ผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอยแล้วกลับมีความต้านทานมากกว่า นุสรานและคณะ [7] พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยผสมร่วมกับผงหินปูนถึงร้อยละ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลาสองปี ส่วนการซ่อมแซมโครงสร้างด้วยคอนกรีตนั้น Prak และ Sumranwanich [8] พบว่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ถูกซ่อมด้วยคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ดีกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 และยังทำให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมน้อยกว่าด้วย สำหรับ

การศึกษาเกี่ยวกับปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมสำหรับคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ยังมีอยู่น้อย เช่น Gouda และ Halaka [9] ได้ศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 35 ซึ่งมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต 1.0% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แต่ยังไม่มีการศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูนต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วย โดยศึกษาทั้งปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมและกำลังอัดของคอนกรีต

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

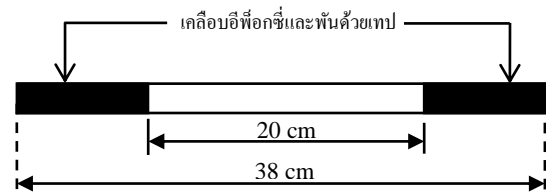
ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement type I, OPC1) เป็นวัสดุประสานหลักในคอนกรีต โดยแทนที่วัสดุประสานบางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulated blast-furnace slag, GGBFS) และแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน (Limestone powder, LP) ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูนที่มีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร และใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 3.1 โดยรายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน

| Chemical compositions (%) | OPC1 | GGBFS | LP |
|--------------------------------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 19.51 | 34.06 | 2.48 |
| Al ₂ O ₃ | 4.97 | 16.27 | 1.13 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.78 | 1.70 | 0.38 |
| CaO | 65.38 | 36.05 | 55.13 |

ตารางที่ 1 (ต่อ) องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน

| Chemical compositions (%) | OPC1 | GGBFS | LP |
|--------------------------------------|-------|-------|--------|
| MgO | 1.08 | 7.38 | 0.77 |
| SO ₃ | 2.16 | 2.16 | 0.03 |
| Na ₂ O | 0.01 | 0.21 | < 0.01 |
| K ₂ O | 0.44 | 1.09 | 0.05 |
| TiO ₂ | 0.27 | 0.47 | 0.04 |
| P ₂ O ₅ | 0.07 | 0.01 | 0.01 |
| LOI | 2.27 | 1.14 | 39.73 |
| MnO | - | 0.28 | 0.02 |
| Physical properties | | | |
| Blaine fineness (cm ² /g) | 3,550 | 4,600 | 8,840 |
| Specific gravity | 3.15 | 2.85 | 2.69 |



รูปที่ 1 รายละเอียดการเตรียมเหล็กเสริม

ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาได้ถูกควบคุมปริมาณวัสดุประสานเท่ากัน 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 30, 40, 50 และ 70 และใช้อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนร้อยละ 5, 10 และ 15 ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 2 และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 คงที่ทุกส่วนผสมคอนกรีต

2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

2.2.1 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ใช้เหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 ตามมาตรฐาน มอก.24-2548 [10] ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร

(DB12) ความยาว 38 เซนติเมตร ใช้แปรงลวดขัดทำความสะอาดผิวเหล็ก และทำการเคลือบปลายเหล็กทั้งสองด้านด้วยอีพ็อกซีและพันทับด้วยเทปพันสายไฟ โดยเหลือระยะที่ผิวเหล็กเปลือยไม่ถูกเคลือบอีพ็อกซีและพันด้วยเทป 20 เซนติเมตร รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1

ทำการหล่อตัวอย่างเป็นแท่งคอนกรีตขนาดกว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 11.5 × 28 × 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยทำการฝังเหล็กเสริมบนจำนวน 1 เส้น โดยมีระยะหุ้มคอนกรีต 2 เซนติเมตร และเหล็กเสริมล่างจำนวน 2 เส้นที่ระยะ 8 เซนติเมตร จากเหล็กเสริมบน ภายหลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบแล้วนำตัวอย่างไปบ่ม

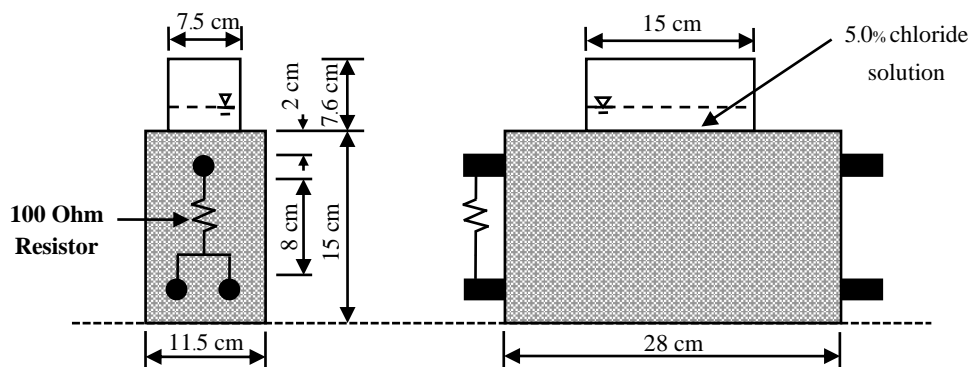
ในน้ำจืดมีอายุครบ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาติดตั้งตัวต้านทานกระแสไฟฟ้าขนาด 100 โอห์ม และติดตั้งชุดแผ่นอะคริลิคสำหรับขังสารละลายคลอไรด์ไว้ด้านบนของตัวอย่างทดลองรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2

2.2.2 กำลังอัดของคอนกรีต

ใช้แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 10 × 10 × 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรในการหล่อตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ทำการถอดแบบภายหลังจากตัวอย่างมีอายุครบ 24 ชั่วโมง แล้วบ่มตัวอย่างในน้ำจืด จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

| Mix id. | w/b | Mix proportion of concrete (kg/m ³) | | | | | |
|----------------|------|---|-------|----|-------|------------|------------|
| | | OPC1 | GGBFS | LP | Water | Sand (SSD) | Rock (SSD) |
| I50 | 0.50 | 400 | - | - | 200 | 747 | 988 |
| I50GGBFS30 | | 280 | 120 | - | 200 | 743 | 982 |
| I50GGBFS40 | | 240 | 160 | - | 200 | 742 | 980 |
| I50GGBFS50 | | 200 | 200 | - | 200 | 740 | 978 |
| I50GGBFS70 | | 120 | 280 | - | 200 | 736 | 973 |
| I50GGBFS30LP5 | | 260 | 120 | 20 | 200 | 741 | 980 |
| I50GGBFS30LP10 | | 240 | 120 | 40 | 200 | 739 | 976 |
| I50GGBFS30LP15 | | 220 | 120 | 60 | 200 | 737 | 975 |



รูปที่ 2 รายละเอียดตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

2.3 วัฏจักรของการเผชิญคลอไรด์

ในการทดสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต และระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ดัดแปลงวิธีการทดสอบจากมาตรฐาน ASTM G109 [11] และ ASTM C 876 [12] โดยใช้สารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้น 5.0% (มวลต่อปริมาตร) ชั่งบนตัวอย่าง และให้ตัวอย่างเผชิญคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Cyclic wetting and drying) ที่ 1:1 ซึ่งหมายถึงระยะเวลาที่ชั่งสารละลายคลอไรด์เหนือตัวอย่างเป็นเวลา 1 วันจากนั้นจึงทำการเทสารละลายออกและทิ้งไว้ให้แห้งอีก 1 วัน รวมเป็นเวลา 2 วันต่อหนึ่งรอบวัฏจักร ทำการทดสอบเป็นรอบวัฏจักรต่อเนื่องไปจนกระทั่งเหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม ซึ่งประเมินจากการค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนที่วัดพร้อมตัวต้านทาน ตามวิธีที่กำหนดไว้ใน ASTM C 876 และ ASTM G109

2.4 วิธีการทดลอง

2.4.1 ความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน

ทำการวัดค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนในช่วงที่เทสารละลายคลอไรด์ออกจากชุดแผ่นอะคริลิก (วัฏจักรแห้ง) โดยใช้โวลต์มิเตอร์ความละเอียด 0.01 mV วัดพร้อมตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม โดยค่ากระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากกฎของโอห์มดังสมการที่ 1

$$V=IR \quad (1)$$

โดยที่ V คือความต่างศักย์ที่วัดพร้อมตัวต้านทาน (μV) I คือกระแสไฟฟ้า (μA) และ R คือความต้านทานของตัวต้านทาน สำหรับการทดลองนี้ขนาดของตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 100 โอห์ม โดยความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน (i_{corr}) คำนวณได้จากสมการที่ 2

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

โดยที่ i_{corr} คือความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน ($\mu A/cm^2$) และ A คือพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เผชิญคลอไรด์ สำหรับการทดลองนี้พื้นที่ผิวของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ

75.398 cm^2 (พื้นที่ผิวเหล็กเสริมตำแหน่งช่วงกลางที่ไม่ได้เคลือบอีพ็อกซีและพันด้วยเทป)

2.4.2 ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

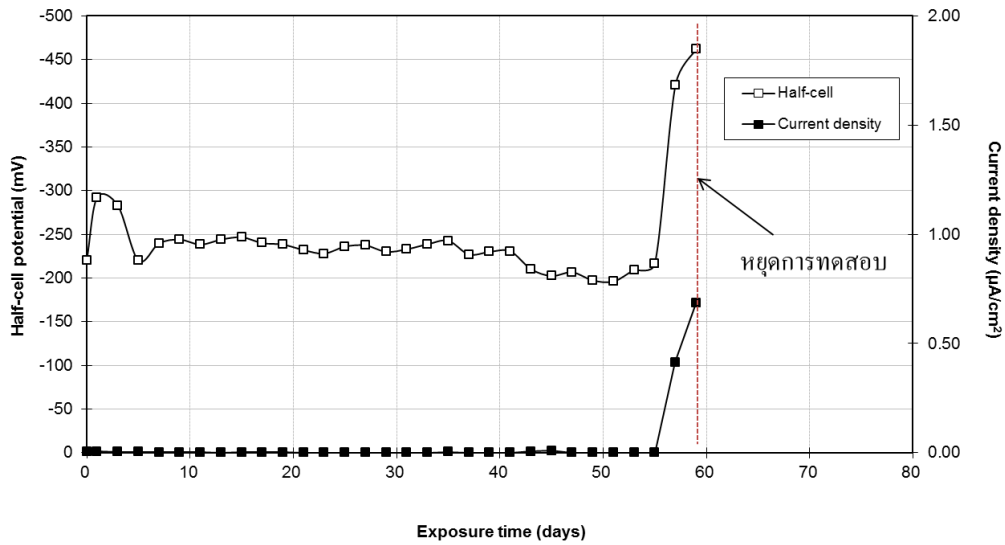
ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในช่วงเวลาหลังจากเทสารละลายคลอไรด์ออกจากชุดแผ่นอะคริลิก โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C 876 ใช้ $Cu/CuSO_4$ เป็นขั้วอ้างอิง บันทึกค่าที่วัดได้อย่างน้อย 3 ค่าเพื่อคำนวณเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย

2.4.3 เกณฑ์การพิจารณาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

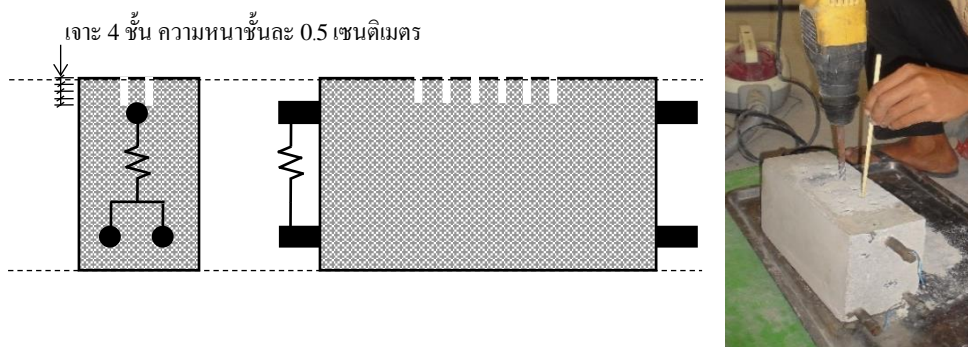
สำหรับการพิจารณาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมว่าเกิดขึ้นเมื่อใดนั้น ในการศึกษานี้ได้พิจารณาจากจุดยุติการทดสอบซึ่งก็คือระยะเวลาที่ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนอย่างฉับพลันต่อเนื่องอย่างน้อยสองวัฏจักรเปียกสลับแห้ง โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนเทียบกับเวลา ดังตัวอย่างกราฟที่แสดงไว้ในรูปที่ 3 ซึ่งจุดยุติของการทดสอบคือระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตนั่นเอง

2.4.4 ปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีต

ภายหลังจากตัวอย่างคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนอย่างฉับพลัน จึงทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีตบริเวณด้านบนเหนือเหล็กเสริมบนตามระดับความลึกจากผิวด้านบนลงไปทีละชั้น แต่ละชั้นหนา 0.5 เซนติเมตร เป็นระยะ 2 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นนำผงคอนกรีตแต่ละชั้นมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1152 [13] ซึ่งแสดงผลปริมาณคลอไรด์ในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (% by weight of binder) โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตสำหรับการศึกษานี้ก็คือน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ระดับความลึกตั้งแต่ 1.5 ถึง 2.0 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ชิดกับผิวบนของเหล็กเสริมด้านบนของตัวอย่างคอนกรีต ที่ทำให้เหล็กเสริมด้านบนภายในตัวอย่างคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมนั่นเอง



รูปที่ 3 ตัวอย่างจุดยุติของการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน



รูปที่ 4 รายละเอียดการเจาะคอนกรีตเพื่อตรวจสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 ปริมาณคลอไรด์วิกฤต

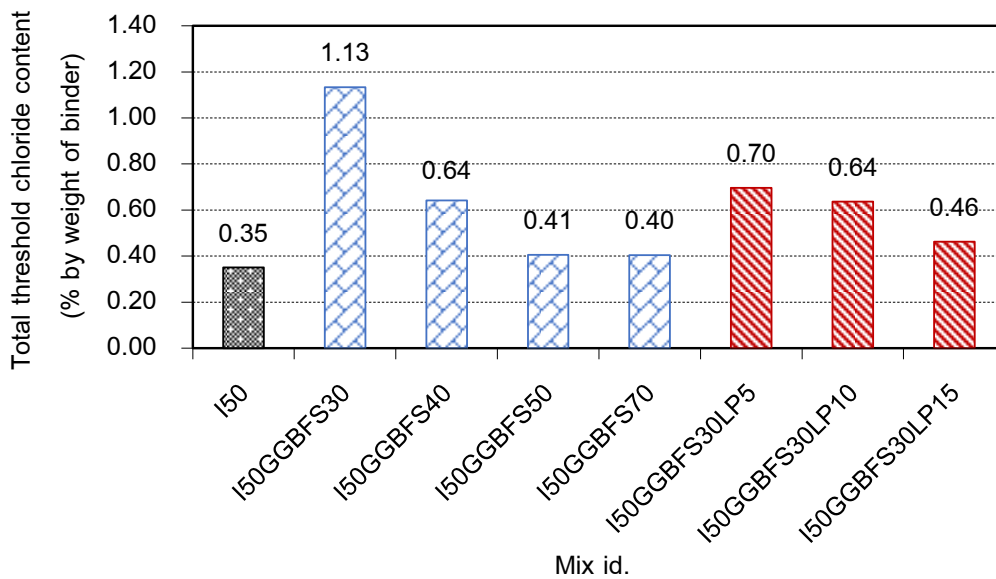
ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตถูกแสดงในรูปของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในหน่วยของร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (% by weight of binder) โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานชนิดเดียวมีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตเท่ากับ 0.35% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ขณะที่คอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานบางส่วนด้วยตะกั่วเตาถลุงเหล็กบดมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสมและค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกั่ว

เตาถลุงเหล็กในปริมาณเพิ่มขึ้น (จากร้อยละ 30, 40, 50 และ 70) อาจเนื่องจากตะกั่วเตาถลุงเหล็กบดทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้เกิดสาร C-S-H เจลเพิ่มขึ้น คอนกรีตมีโพรงช่องว่างน้อยลง ปริมาณคลอไรด์ที่สามารถแทรกซึมไปถึงผิวเหล็กจึงมีน้อยลง แต่ปริมาณไฮดรอกซิลไอออน (OH⁻) ในสารละลายโพรงช่องว่างก็ลดลงอย่างมาก เนื่องจากถูกนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่งผลให้อัตราส่วนของคลอไรด์ต่อไฮดรอกซิลไอออน (Cl⁻/OH⁻) ในคอนกรีตมีค่าสูงจนถึงระดับที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม [14, 15] ดังนั้นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกั่วเตาถลุงเหล็กบดจึงมีค่าลดลง (ปูนซีเมนต์ลดลง) ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

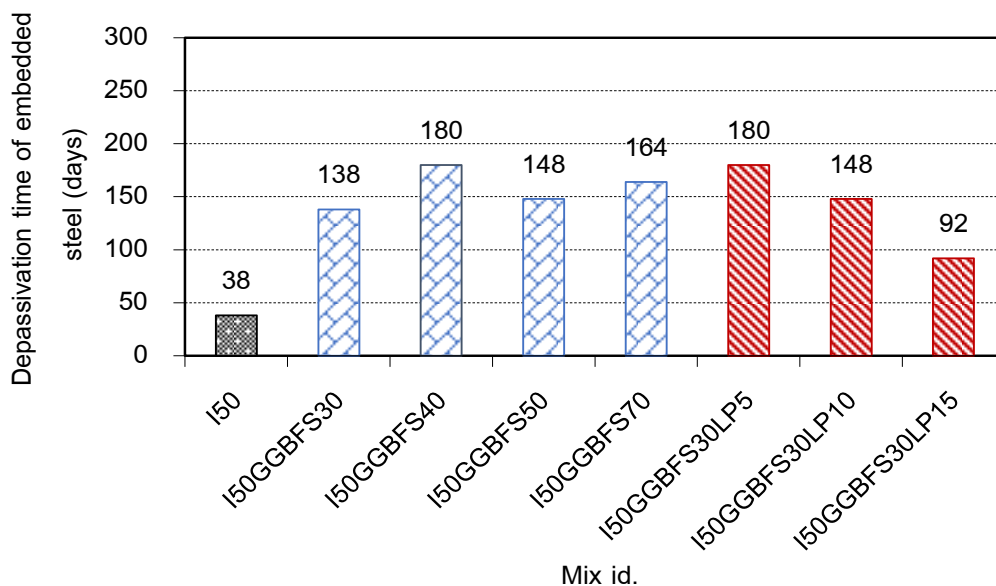
ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 30 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.13% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน รองลงมาเป็นคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 40, 50 และ 70 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.64%, 0.41% และ 0.40% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูน โดยใช้ร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดคงที่ (ที่ร้อยละ 30) และร้อยละ

แทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเพิ่มขึ้น (จากร้อยละ 5, 10 และ 15) ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตเท่ากับ 0.70%, 0.64% และ 0.46% โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ ซึ่งมากกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน แต่มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดอย่างเดียวกับที่ร้อยละ 30



รูปที่ 5 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีต



รูปที่ 6 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตจากการศึกษานี้กับค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตตามที่ระบุไว้ในมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1332-55 [16] พบว่า ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดในการศึกษานี้มีแนวโน้มสูงกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างเห็นได้ชัด โดยพิจารณาเปรียบเทียบที่การแทนที่วัสดุประสานที่เท่ากันร้อยละ 30 และ 50 พบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีค่า 1.13% และ 0.41% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยตาม มยผ. 1332-55 มีค่า 0.35% และ 0.30% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมผงหินปูนร่วมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีแนวโน้มสูงกว่าค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมผงหินปูนตาม มยผ. 1332-55 เช่นกัน โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5, 10 และ 15 มีค่า 0.70%, 0.64% และ 0.46% โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมผงหินปูนไม่เกินร้อยละ 15 ตาม มยผ. 1332-55 มีค่า 0.45% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนพบว่า ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่ได้จากการศึกษานี้ต่ำกว่าค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนใน มยผ. 1332-55 เนื่องจากความแตกต่างของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้ โดยการศึกษาใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 แต่ใน มยผ. 1332-55 ได้ระบุไว้ในข้อจำกัดว่า ใช้สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตั้งแต่ 0.30 ถึง 0.60 ไม่ใช้สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานหนึ่ง ๆ โดยเฉพาะ

3.2 ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

จากรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเพียงอย่างเดียว พบว่า ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุ

ประสานหลักเพียงอย่างเดียว และมีแนวโน้มมากขึ้นในขณะที่การใช้ร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเพิ่มมากขึ้น (เพิ่มจากร้อยละ 30, 40, 50 และ 70 ตามลำดับ) โดยการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 40 มีระยะเวลาการเกิดสนิมนานที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 30 แม้จะมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 40 ก็ตาม แต่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าสูงกว่า [17] ส่งผลให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมเร็วกว่า ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมจึงสั้นลงตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ถูกแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน พบว่า ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ผงหินปูนมากขึ้น (เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 15) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเพียงอย่างเดียวที่ร้อยละ 30 นั้น พบว่า ส่วนผสมที่ใช้ผงหินปูนที่ 5% และ 10% มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมสูงกว่า เนื่องจากผงหินปูนสามารถช่วยลดความพรุนของคอนกรีตลง โดยอนุภาคขนาดเล็กของผงหินปูนทำหน้าที่ช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างในคอนกรีต (Filler effect) ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น เกลือคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น ส่งผลให้โอกาสที่เกลือคลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปจนถึงบริเวณผิวเหล็กเสริมนานขึ้น

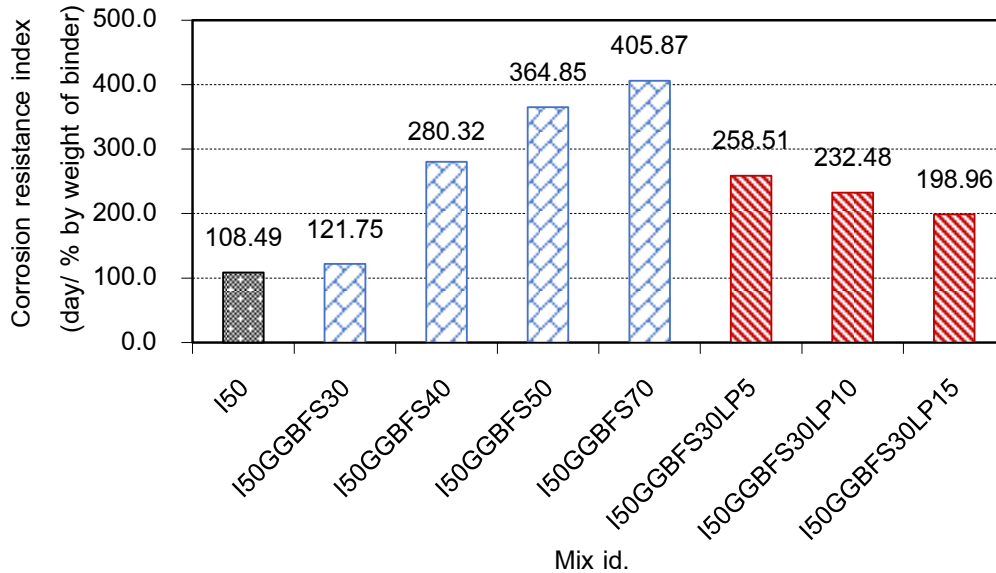
3.3 ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

จากผลการศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมข้างต้น ผู้แต่งจึงได้เสนอค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Corrosion resistance index, CRI) ในคอนกรีต โดยหมายถึง ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Depassivation time, DT) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Threshold chloride content, TCC) ของคอนกรีต ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3) โดยเมื่อค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูง แสดงว่า

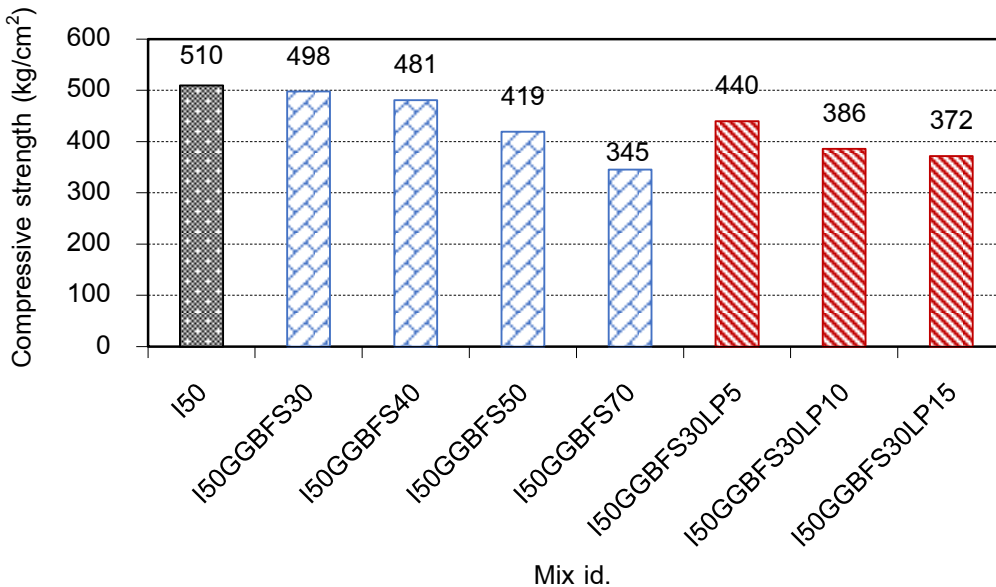
คอนกรีตนั้นมีคุณสมบัติความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมาก

โดยที่ CRI คือ ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (day / % by wt. of binder), DT คือ ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม (day), TCC คือ ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต (% by wt. of binder)

$$CRI = \frac{DT}{TCC} \quad (3)$$



รูปที่ 7 ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต



รูปที่ 8 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

จากรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาค่า CRI พบว่าคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเพียงอย่างเดียวมีค่า CRI สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว หรือกล่าวอีกนัย

หนึ่งว่าคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีคุณสมบัติความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และเมื่อใช้ตะกรันเตาถลุง

เหล็กบดในปริมาณที่มากขึ้นค่า CRI สูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนผสมในคอนกรีต พบว่าคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนมีค่า CRI สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวและคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเพียงอย่างเดียวในร้อยละที่เท่ากัน (ร้อยละ 30) อย่างไรก็ตาม ค่า CRI มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ผงหินปูนในปริมาณเพิ่มมากขึ้น

3.4 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูนเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 28 วันแสดงไว้ในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนมีแนวโน้มลดลงและต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม เนื่องจากส่วนผสมที่ถูแทนที่วัสดุประสานบางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และผงหินปูนนั้น C-S-H ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ส่งผลทำให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 28 วันช้าลง

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูนต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนสูงกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

ร้อยละ 30 ให้ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงที่สุดที่ 1.13% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

2. ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนนานกว่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 40 มีระยะเวลาการเกิดสนิมนานที่สุด

3. กำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนที่ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงและต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม

4. การใช้ผงหินปูนร้อยละ 5 แทนที่วัสดุประสานในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงขึ้น ระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานขึ้นและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูงขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 122/2559 และขอขอบคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และศูนย์เทคโนโลยีการก่อสร้างและการจัดการจราจร (CONTRA) มหาวิทยาลัยบูรพา และศูนย์แห่งความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวัสดุศาสตร์ การก่อสร้างและเทคโนโลยีการบำรุงรักษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความสนับสนุนในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C. Cement, Pozzolan and Concrete. 7th edition, Thailand Concrete Association, Bangkok, 2012.
- [2] Sumranwanich, T. and Tangtermsirikul, S. Concrete Structure Deterioration. Charansanitwong Printing, Bangkok, 2018.

- [3] Fajardo, G., Valdez, P. and Pacheco, J. Corrosion of Steel Rebar Embedded in Natural Pozzolan Based Mortars Exposed to Chlorides. *Construction and Building Materials*, 2009; 3: 768-74.
- [4] Topu, I. B. and Boga, A. R. Effect of Ground Granulate Blast-Furnace Slag on Corrosion Performance of Steel Embedded in Concrete. *Materials and Design*, 2010; 31: 3358-65.
- [5] Yeau, K.Y. and Kim, E.K. An Experimental Study on Corrosion Resistance of Concrete with Ground Granulate Blast-Furnace Slag. *Cement and Concrete Research*, 2005; 35: 1391-99.
- [6] Rerkmahalikhit, A., Sumranwanich, T., Sancharoen, P. and Tangtermsirikul, S. Chloride Resistance of Portland Cement Mortar with Fly Ash, Limestone Powder and Expansive Additives. The 14th National Convention on Civil Engineering, May 13-15, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2009.
- [7] Khayankij, N., Sumranwanich, T., Sancharoen, P. and Tangtermsirikul, S. Chloride Penetration Resistance of Concrete with Limestone Powder and Fly Ash Exposed to Marine Environment for 2 Years. The 17th National Convention on Civil Engineering, May 9-11, Centara Convention Center Hotel, Udorn-Thani, Thailand, 2012.
- [8] Prak, L. and Sumranwanich, T. Investigation of Chloride Penetration and Steel Corrosion in Repaired Concrete After Exposure to Marine Environment of Thailand. *Journal of Engineering, RMUTT*, 2020; 18(1): 165-73.
- [9] Gouda, V.K. and Halaka, W.Y. Corrosion and Corrosion Inhibition of Reinforcing Steel: II. Embedded in Concrete. *British Corrosion Journal*, 1970; 5(5): 204-08.
- [10] Thai Industrial Standard. TIS.24-2548 Steel Bars for Reinforced Concrete: Deformed Bars. Thailand Industrial Standards Institute, Bangkok, 2005.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM G109 Standard Test Method Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments. ASTM International, West Conshohocken, 2013.
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM C876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, 2004.
- [13] American Society for Testing and Materials. ASTM C1152 Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. ASTM International, West Conshohocken, 2004.
- [14] Kayyali, O. A. and Haque, M. N. Chloride Penetration and the Ratio of Cl^-/OH^- in the Pores of Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, 1988; 18: 895-900.
- [15] Ann, K.Y. and Song, H.W. Chloride Threshold Level for Corrosion of Steel in Concrete. *Corrosion Science*, 2007; 49: 4113-33.
- [16] DPT 1332-55 Concrete Work Standards when Considering the Durability and Service Life. DPT Standard, Department of Public Works and Town & Country Planning of Thailand, Phayathai, Bangkok.
- [17] Prak, L. and Sumranwanich, T. Chloride Resistance of Concrete Containing Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Limestone Powder. The 18th National Convention on Civil Engineering, May 8-10, Chiang Mai, Thailand, 2013.