ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

Threshold total chloride content and depassivation time of embedded steel of concrete containing ground granulated blast-furnace slag

ลีน่า ปรัก[1] และ ทวีชัย สำราญวานิช[2,*]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี
**Corresponding author; E-mail address: twc@buu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม และกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 30, 40, 50 และ 70 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และระยะหุ้มเหล็กเสริม 2 เซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตมีค่าลดลงและระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่านานขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 30 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตสูงที่สุด ในขณะที่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานที่สุดเมื่อใช้คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 40 อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ 28 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และยิ่งลดลงเมื่อใช้ปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมากขึ้น

คำสำคัญ: ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต, ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม, คอนกรีต, ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

Abstract

This research aims to study the effect of ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) on the threshold total chloride content and depassivation time of embedded steel of concrete. GGBFS was used as partial binder replacement at the amount of 30%, 40%, 50% and 70% by weight of binder. The water to binder ratio (w/b) was kept at 0.50. The 2-cm covering depth of the embedded steel was used. The experimental results indicated that the value of threshold total chloride content and depassivation time of concrete with GGBFS was higher than that of cement concrete. The threshold total chloride content decreased, but the depassivation time of concrete increased when increasing in the cement replacement by GGBFS. The threshold total chloride content of concrete with 30% of GGBFS was the highest, while the depassivation time of steel in concrete with 40% of GGBFS was the longest. However, the compressive strength of GGBFS concrete at 28 days was lower than cement concrete. The increase of GGBFS content resulted in the decrease of compressive strength.

Keywords: threshold total chloride content, depassivation time, concrete, ground granulated blast-furnace slag,

1. บทนำ

คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้าง [1, 2] แต่ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตยังเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพและนำไปสู่การวิบัติ [3] ในการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์นั้น ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration resistance) และปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต (Threshold total chloride content) ของคอนกรีตถือเป็นข้อมูลสำคัญ โดยที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตที่เข้าไปสู่ผิวเหล็กเสริม ส่วนปริมาณคลอไรด์วิกฤตแสดงถึงปริมาณคลอไรด์ที่สะสมบริเวณผิวของเหล็กเสริมในคอนกรีตจนมีปริมาณมากพอที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม

มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulated blast-furnace slag, GGBFS) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการ

ถลุงแร่เหล็กแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตให้มีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ โดย Yeau และ Kim [4] ได้ประเมินความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตโดยศึกษาปูนซีเมนต์สองชนิด คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 0 ถึง 55 โดยพบว่า คอนกรีตซีเมนต์ที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กมีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และเมื่อใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กร่วมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ให้ความต้านทานการเกิดสนิมมากกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ต่ำกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และมีโอกาสเกิดสนิมน้อยกว่าด้วย เอกศักดิ์และคณะ [5] พบว่า มอร์ต้าร์ที่ผสมผงหินปูนมีค่าความต้านทานคลอไรด์น้อยกว่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ แต่เมื่อใช้ผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอยแล้วมีความต้านทานมากกว่า นุสราและคณะ [6] พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยผสมร่วมกับผงหินปูนถึงร้อยละ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทั้ง 0.40 0.50 และ 0.60 แต่ยังขาดการศึกษาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต และกำลังอัดคอกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 30, 40, 50 และ 70

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

Chemical Compositions (%)	Portland Cement	GGBFS
Silicon dioxide, SiO_2	19.51	34.06
Aluminum oxide, Al_2O_3	4.97	16.27
Iron oxide,Fe_2O_3	3.78	1.70
Calcium oxide, CaO	65.38	36.05
Magnesium oxide, MgO	1.08	7.38
Sulfur Trioxide, SO_3	2.16	2.16
Sodium oxide, Na_2O	0.01	0.21
Potassium oxide, K_2O	0.44	1.09
Titanium Dioxide, TiO_2	0.27	0.47
Phosphorus pentoxide P_2O_5	0.07	0.01
Loss on ignition, LOI	2.27	1.14
MnO	-	0.28
Physical Properties		
Blaine Fineness (cm^2/g)	3,550	4,600
Specific gravity	3.15	2.85

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักของคอนกรีต โดยแทนที่วัสดุประสานบางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูนที่มีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร และใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด แสดงในตารางที่ 1

สำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากันทุกส่วนผสมที่ 400 กก/ม^3 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 30, 40, 50 และ 70 โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

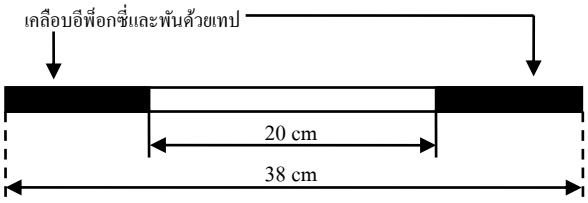
Mix id.	w/b	Mix Proportion of Concrete (kg/m^3)				
		Cement	GGBFS	Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
I50	0.50	400	-	200	747	988
I50SL30		280	120	200	743	982
I50SL40		240	160	200	742	980
I50SL50		200	200	200	740	978
I50SL70		120	280	200	736	973

2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

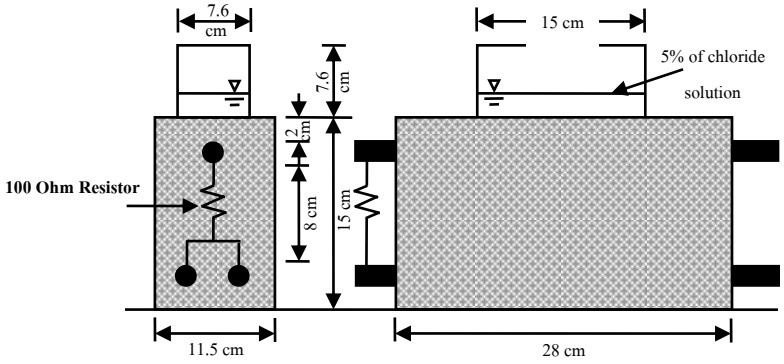
2.2.1 การทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอกนรีต และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ใช้เหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 ตามมาตราฐาน มอก.20 [7] เหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร ความยาว 38 เซนติเมตร ใช้แปรงลวดขัดทำความสะอาดเหล็ก และทำการ เคลือบปลายทั้งสองด้านด้วยอีพ็อกซี่ และพันด้วยเทปพันสายไฟดังรายละเอียดในรูปที่ 1

หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดกว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 11.5 × 28 × 15 เซนติเมตร^3 โดยฝังเหล็กเสริมบนจำนวน 1 เส้นที่ระยะหุ้มคอนกรีต 2 เซนติเมตร และเหล็กเสริมล่างจำนวน 2 เส้นที่ระยะ 8 เซนติเมตร จากเหล็กเสริมบน เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ถอดแบบแล้วนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำมาติดตั้งตัวต้านทานกระแสไฟฟ้าขนาด 100 โอห์ม และชุดแผ่นอะคริลิคสำหรับขังสารละลายคลอไรด์ไว้ด้านบน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 รายละเอียดของเหล็กข้ออ้อยที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างทดลองหาค่าคลอไรด์วิกฤต และระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

2.2.2 กำลังอัดของคอนกรีต

ใช้แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร^3 ถอดแบบหลังหล่อตัวอย่างมีอายุครบ 24 ชั่วโมง แล้วบ่มตัวอย่างในน้ำทันที แล้วทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

2.3 วัฏจักรของการเผชิญคลอไรด์

ในการทดสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต และระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ดัดแปลงมาจาก ASTM G109 [8] และ ASTM C 876 [9] โดยใช้สารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 5.0% (มวลต่อปริมาตร) ขังบนตัวอย่าง และกำหนดการเผชิญคลอไรด์เป็นแบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง 1:1 ซึ่งหมายถึงระยะเวลาที่ขังสารละลายคลอไรด์เหนือตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 1 วันจากนั้นจึงทำการเทสารละลายออกและทิ้งไว้ให้แห้งอีก 1 วัน กระทำเป็นวัฏจักรต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนเหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม โดยประเมินการเกิดสนิมด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนที่วัดคร่อมตัวต้านทานตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ใน ASTM C 876 และ ASTM G109.

2.4 วิธีการทดลอง

2.4.1 ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ทำการวัดค่าในช่วงที่เทสารละลายคลอไรด์ออกจากชุดแผ่นอะคริลิค โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C 876 [9] ใช้ $Cu/CuSO_4$ เป็นขั้วอ้างอิง

2.4.2 ค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน

วัดค่าในช่วงที่เทสารละลายคลอไรด์ออกจากชุดแผ่นอะคริลิคตามมาตรฐาน ASTM G109 [8] โดยใช้โวล์มิเตอร์ความละเอียดถึง 0.01 mV วัดคร่อมผ่านตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม ค่ากระแสสามารถคำนวณหาได้จากกฎของโอห์มดังสมการที่ 1

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

โดยที่ V คือความต่างศักย์ที่วัดคร่อมตัวต้านทาน (μV) I คือ ค่ากระแส (μA) และ R คือ ค่าความต้านทานของตัวต้านทานสำหรับการทดลองนี้ขนาดของตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 100 Ohm และสำหรับค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน (i_{corr}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

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

โดยที่ i_{corr} คือ ความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน (μA/cm^2) และ A คือ พื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เผชิญคลอไรด์สำหรับการทดลองนี้พื้นที่ผิวของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 76.604 cm^2 (พื้นที่ผิวเหล็กเสริมตำแหน่งช่วงกลางที่ไม่ได้เคลือบอีพ็อกซี่ และพันด้วยเทป)

สร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนจากการทดลอง โดยพิจารณาจุดยุติของการทดลองหรือระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่เหล็กเสริม จากการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน

2.4.3 การหาค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

หลังจากตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนอย่างชัดเจน จึงทำการเจาะตัวอย่างทดลองบริเวณเหล็กเสริมและนำผงคอนกรีตที่ได้มาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ตามมาตราฐาน ASTM C1152 [10] ซึ่งแสดงอยู่ในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (% by weight of binder)

3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต

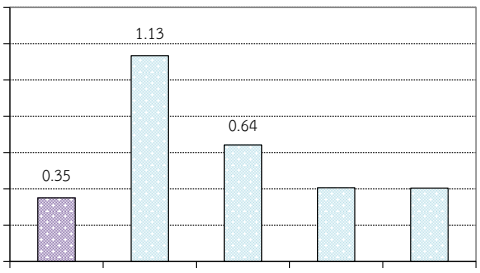
ปริมาณคลอไรด์วิกฤตนั้นถูกแสดงเป็นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ในหน่วยของร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (% by weight of binder)

จากรูปที่ 3 พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานชนิดเดียวมีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตเท่ากับ 0.35% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

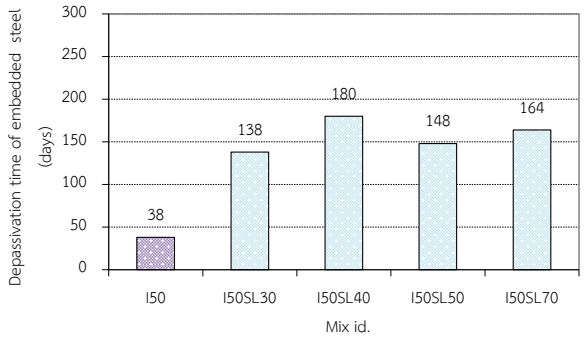
ขณะที่คอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยด้วยตระกรันเตาถลุงเหล็กบดค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก (จากร้อยละ 30 -70) อาจเนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้เกิดสาร C-S-H และ C-A-H เจลเพิ่มขึ้น คอนกรีตมีโพรงช่องว่างน้อยลง ปริมาณคลอไรด์ที่สามารถแทรกซึมไปถึงผิวเหล็กจึงมีน้อยลง แต่ปริมาณไฮดรอกซิลอิออน (OH^-) ในสารละลายโพรงช่องว่างก็ลดลงอย่างมาก เนื่องจากถูกนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่งผลให้อัตราส่วนของคลอไรด์ต่อไฮดรอกซิลอิออน (Cl^-/OH^-) ในคอนกรีตมีค่าสูงจนถึงระดับที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม [11, 12] ดังนั้นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดจึงมีค่าลดลง

3.2 ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

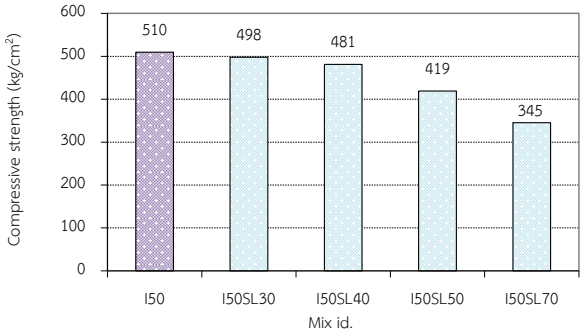
จากรูปที่ 4 พิจารณาคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเพียงอย่างเดียว พบว่า ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีต นานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียว และมีแนวโน้มนานขึ้นในขณะที่การใช้ร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเพิ่มมากขึ้น (เพิ่มจากร้อยละ 30, 40, 50 และ 70 ตามลำดับ) โดยการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 40 มีระยะเวลาการเกิดสนิมนานที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 30 แม้มีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตที่สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 40 ก็ตาม แต่สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่สูงกว่า ส่งผลให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมเร็วกว่า ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมจึงสั้นลงไปด้วย [13]



รูปที่ 3 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีต



รูปที่ 4 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม



รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่อายุ 28 วัน

3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 28 วันแสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีแนวโน้มลดลงและต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม เนื่องจากส่วนผสมที่ถูกแทนที่วัสดุประสานบางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด นั้น C-S-H ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง ส่งผลทำให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 28 วันช้าลง

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีค่ามากกว่าของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม และการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ 30% ให้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตสูงที่สุดเท่ากับ 1.13 % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

2. ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดยาวนานกว่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม

และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด 40% มีระยะเวลาการเกิดสนิมนานที่สุด

3. กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ 28 วัน มีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 111/2558 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

[1] ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2547). *ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 1.

[2] Fajardo, G.ม Valdez, P. and Pacheco, J. (2009). Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 768–74.

[3] Topu, I.B. and Boga, A. R. (2010). Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete. *Materials and Design*, 31, pp. 3358–3365, 2010.

[4] Yeau, K.Y. and Kim, E.K. (2005). An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 1391–1399.

[5] เอกศักดิ์ ฤกษมหาลิขิต, ทวีชัย สำราญวานิช, ภัควัฒน์ แสนเจริญ และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2552). ความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14*.

[6] นุสรา ขยันกิจ, ทวีชัย สำราญวานิช, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, สมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2555). ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนและเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 ปี. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17*.

[7] มอก.20-2543. เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กเส้นกลม. มาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, ประเทศไทย.

[8] ASTM G109-07 (2004). Standard test method for determining the effects of chemical admixture on corrosion of embedded steel in concrete exposed chloride environments. *Annual Book of ASTM Standards*, 3.02.

[9] ASTM C876 (2004). Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, 4.02.

[10] ASTM C1152 (2004). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standard*, 04.02.

[11] Kayyali, O.A. and Haque, M.N. (1998). Chloride penetration and the ratio of Cl^-/OH^- in the pores of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 18, pp. 895–900.

[12] Ann, K.Y. and Song, H.W. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, 49, pp. 4113–4133.

[13] ลีน่า ปรัก และ ทวีชัย สำราญวานิช (2556). ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18*.