ผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

Effect of Temperature and Relative Humidity on Threshold Chloride Content of Concrete

อัญชนา กิจจานนท์[1] ทวีชัย สำราญวานิช[2,*] และ ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี
**Corresponding author; E-mail address: twc@buu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต โดยศึกษาอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ 30°C และ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมที่ 30% และ 90% ในการศึกษานี้ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20 และ 0.40 อัตราส่วนซิลิก้าฟูมต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.075 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 สำหรับทุกส่วนผสม จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อ ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 90% คอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 30°C มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานกว่าคอนกรีตที่อุณหภูมิ 50°C แต่มีปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตต่ำกว่า ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิคงที่ 50°C คอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อม 30% มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมนานกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อม 90% แต่มีปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ต่ำกว่าเช่นกัน หากพิจารณาดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (CRI_{DT}) พบว่า คอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำมีค่า CRI_{DT} มากกว่าคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูง และคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ต่ำมี CRI_{DT} มากกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์สูง คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 มีค่า CRI_{DT} มากที่สุด คอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 มีค่า CRI_{DT} สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

คำสำคัญ: ปริมาณคลอไรด์วิกฤต, ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิม, อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์, เถ้าลอย, ซิลิก้าฟูม

Abstract

This paper aims to study the effect of temperature and relative humidity in environment on threshold chloride content of concrete. The temperature of environment at 30°C and 50°C and the relative humidity of environment at 30% and 90% were studied. In this study, fly ash to binder ratios were kept at 0.20 and 0.40. Silica fume to binder ratio of 0.075 was used. Water to binder ratio of 0.50 was used for all mixes. From the experimental results, at constant relative humidity of 90%, concrete exposed to 30°C of temperature had longer depassivation time than concrete exposed to 50°C of temperature, but had lower threshold chloride content. At constant temperature of 50°C, concrete exposed to 30% of relative humidity had longer depassivation time than concrete exposed to 90% of relative humidity, but also had lower threshold chloride content. When steel corrosion index (CRI_{DT}) was considered, concrete exposed to low temperature environment had higher CRI_{DT} than concrete exposed to high temperature environment. Concrete exposed to low relative humidity environment had also higher CRI_{DT} than concrete exposed to high relative humidity. Concrete containing fly ash with the replacement of 40% had the highest CRI_{DT}. Concrete containing silica fume had higher CRI_{DT} than cement-only concrete.

Keywords: threshold chloride content, depassivation time, temperature, relative humidity, fly ash, silica fume

1. คำนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเลมักเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล โดยคลอไรด์จะแทรกซึมผ่านโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตไปยังบริเวณผิวของเหล็กเสริม และเมื่อมีการสะสมของคลอไรด์ที่บริเวณผิวของเหล็กเสริมจนมีค่ามากกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Threshold chloride content) ชั้นฟิล์มที่เคลือบผิวเหล็กเสริมอยู่จะถูกทำลายลง และหากมีปริมาณออกซิเจนและความชื้นที่เพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมได้ เมื่อปริมาตรของสนิมเกิดเพิ่มมากขึ้นจะดันให้เนื้อคอนกรีตเกิดการหลุดล่อนและแตกร้าวในที่สุด [1, 2]

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตอย่างมาก กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าระดับของปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำลงอย่างมาก นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกจับยึดและ pH ในคอนกรีตลดลงด้วย [3, 4] การเริ่มต้นการเกิดสนิมของเหล็กเสริมต้องอาศัยออกซิเจนและน้ำ โดยความชื้นสัมพัทธ์หรือน้ำภายในคอนกรีตจะ

ทำให้ความเข้มข้นของเกลือลดลง แต่ถ้าคอนกรีตมีลักษณะผิวค่อนข้างแห้งจะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้น [5] นอกจากนี้การแทรกซึมของออกซิเจนเข้าไปของคอนกรีตได้ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ กล่าวคือหากความชื้นสัมพัทธ์สูงส่งผลให้ออกซิเจนสามารถแทรกซึมเข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตได้ยาก ในขณะเดียวกันกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็จำเป็นต้องอาศัยความชื้นในการเกิดปฏิกิริยา หากคอนกรีตมีผิวค่อนข้างแห้งกระบวนการเกิดสนิมจะเกิดขึ้นน้อย แต่ถ้าคอนกรีตมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์หรือน้ำสูงจะส่งผลให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้ง่าย [6]

เมื่อศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมสามารถสรุปได้ดังนี้ จากกงานวิจัยของ [7 – 8] พบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตล้วนมีค่าสูงกว่าคอนกรีตผสมซิลิก้าฟูม และในงานวิจัยของ [9] พบว่า อัตราการเกิดสนิมของคอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมสูงกว่าคอนกรีตล้วน เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูมมีความสามารถกักเก็บคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตล้วน [10, 11] กล่าวคือ การใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณของอลูมิน่าออกไซด์ (Al_2O_3) ลดลง ดังนั้นความสามารถกักเก็บคลอไรด์จึงลดลงตามไปด้วย และซิลิก้าฟูมสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดผลผลิต เช่น CSH แต่ CSH ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกอาจจะมีความสามารถกักเก็บคลอไรด์ต่ำกว่า CSH ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ [12]

ดังนั้น บทความนี้จึงทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและซิลิก้าฟูม พร้อมทั้งศึกษาระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วย

2. การทดลอง

2.1 วัสดุและส่วนผสมที่ใช้

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้เถ้าลอย (FA) และซิลิก้าฟูม (SF) แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ สำหรับองค์ประกอบทางเคมีแสดงไว้ในตารางที่ 1 ใช้มวลรวมหยาบที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70 โดยหินที่ใช้เป็นหินปูนที่มีขนาดโตสุดเท่ากับ 19 มม และมีสภาพผิวอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายบกที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 และมีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 3.01

สำหรับส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน (f/b) เท่ากับ 0.20 และ 0.40 และอัตราส่วนซิลิก้าฟูมต่อวัสดุประสาน 0.075

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)	เถ้าลอย (FA)	ซิลิก้าฟูม (SF)
SiO_2	19.51	40.68	92
Al_2O_3	4.97	22.07	0.7
Fe_2O_3	3.78	12.64	1.2
CaO	65.38	13.69	0.2
MgO	1.08	2.98	0.2
SO_3	2.16	1.72	-
Na_2O	0.01	1.53	-
K_2O	0.44	2.52	-
TiO_2	0.26	0.42	-
P_2O_5	0.07	0.15	-
LOI	2.27	1.07	-
คุณสมบัติทางกายภาพ			
ความละเอียดโดยวิธีของเบลน (ซม^2/กรัม)	3,400	4,658	150,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.20	2.20

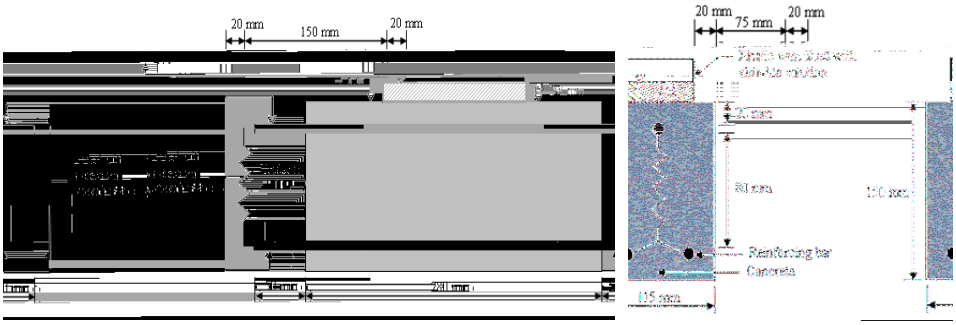
ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

Mix id	f/b	sf/b	Mix proportions (kg/m^3)					
			OPC	Fly ash	Silica fume	Water	Sand	Rock
I50	-	-	369	0	0	185	776	1025
I50-FA20	0.20	-	286	71	0	179	776	1025
I50-FA40	0.40	-	208	138	0	173	776	1025
I50-SF7.5	-	0.075	338	0	27	182	776	1025

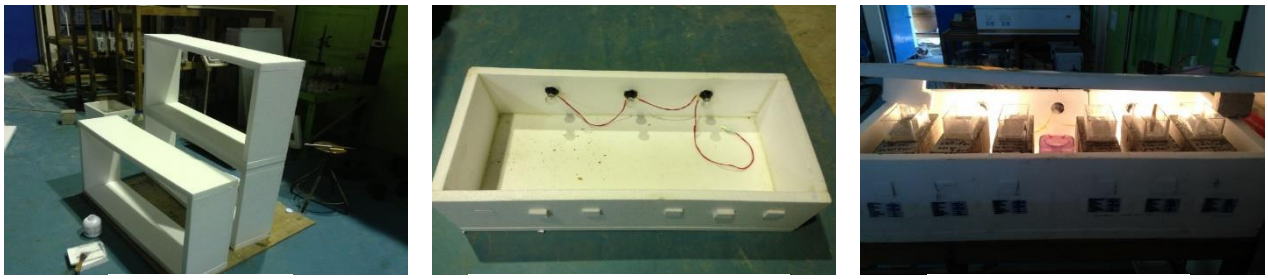
2.2 การเตรียมตัวอย่างและเงื่อนไขการทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ปริมาณคลอไรด์วิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C876 [13] และ ASTM G109 [14] โดยทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 115x150x280 มม^3 ดังรูปที่ 1 จำนวน 2 ก้อน ต่อ 1 เงื่อนไขการทดสอบ ทำการเสริมเหล็ก DB12 ยาว 380 มม จำนวน 1 เส้น บริเวณด้านบนที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม และ 2 เส้น บริเวณด้านล่างโดยห่างจากเหล็กด้านบนเป็นระยะ 80 มม กำหนดให้ปลายเหล็กทั้ง 2 ฝั่งยื่นออกจากเนื้อคอนกรีตเป็นระยะ 50 มม โดยเหล็กเสริมระยะ 90 มม ที่วัดจากปลายของเหล็กเสริมทั้ง 2 ฝั่ง จะถูกเคลือบผิวด้วยอิพ็อกซี่เพื่อยับยั้งการเกิดสนิมสนิมของเหล็กเสริม หลังจากหล่อตัวอย่างและบ่มน้ำเป็นจนครบ 28 วัน ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กถูกนำขึ้นมาติดตั้งบ่อกักเก็บสารละลายคลอไรด์บริเวณด้านบนของตัวอย่าง โดยบ่อกักเก็บสารมีขนาด 75x75x150 มม^3 จากนั้นเติมสารละลายคลอไรด์ที่ความเข้มข้นคลอไรด์ 5% ปริมาตร 400 มล ลงในบ่อกักเก็บสาร และให้คอนกรีตเผชิญคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง โดยมี 1 วันเปียก และ 1 วันแห้งสำหรับเงื่อนไขการเผชิญอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จะถูกอธิบายในหัวข้อ 2.2.2 ต่อไป และทำการติดตั้งตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม กับเหล็กทั้ง 3 เส้น จากนั้นเริ่มทดสอบระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยการตรวจสอบระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมและปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตจะทำการทดสอบดังหัวข้อที่ 2.3.1 ต่อไป



รูปที่ 1 รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม



ก) ติดตั้งแผ่นโฟม ข) ติดตั้งหลอดไฟเพื่อให้ความร้อน ค) ติดตั้งเครื่องพ่นไอหมอก



ง) ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น จ) ติดตั้งเครื่องควบคุมระบบอัตโนมัติ

รูปที่ 2 รายละเอียดการเตรียมกล่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

2.2.2 เงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ถูกควบคุมด้วยกล่องควบคุม ดังรูปที่ 2 ซึ่งกล่องควบคุมถูกสร้างโดยทำการติดตั้งแผ่นโฟมความหนา 1 ½ นิ้ว ทำเป็นกล่องขนาด 615x1220x320 มม^3 ห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกใสด้านนอก จากนั้นทำการติดตั้งหลอดไฟขนาด 25 วัตต์ จำนวน 3 หลอด เพื่อใช้เป็นตัวให้ความร้อนจำลองอุณหภูมิของคอนกรีต ทำการเจาะช่องขนาด 50x.0 มม^2 ด้านหน้ากล่องสำหรับใช้วัดค่ากระการกัดกร่อนคร่อมตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม และเจาะช่องขนาด 75x150 มม^2 บริเวณด้านบนกล่องเพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากนั้นติดตั้งเครื่องพ่นไอหมอกสำหรับจำลองความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในกล่อง สุดท้ายติดตั้งเครื่องควบคุมระบบอัตโนมัติ ซึ่งมีเซ็นเซอร์ในการกำหนดอุณหภูมิและความชื้นเพื่อให้ได้เงื่อนไขแวดล้อมที่ทำการทดสอบตามที่กำหนด สำหรับสภาวะเงื่อนไขการทดสอบถูกแสดงดังตารางที่ 3

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การทดสอบระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C876 [13] และ ASTM G109 [14] สำหรับปริมาณคลอไรด์วิกฤตถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1152 [15] โดยหลังจากตัวอย่างเผชิญกับสารละลายคลอไรด์ครบ 1 วัฏจักร (1 วันเปียก และ 1 วันแห้ง) ตัวอย่างจะถูกวัดระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 [13] โดยค่าที่วัดได้จะถูกพิจารณาตามเกณฑ์ดังตารางที่ 4 ในเวลาเดียวกัน ความต่างศักย์ไฟฟ้าของคอนกรีตจะถูกวัดคร่อมตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม ตามมาตรฐาน ASTM G109 [14] เพื่อใช้คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ (1) การทดลองจะสิ้นสุดลงเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และการค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว จากนั้นบันทึก

ตารางที่ 3 สภาวะเงื่อนไขการทดสอบ

Mix id	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (°C)	ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่กำหนด (%)		ช่วงอุณหภูมิที่กำหนด (°C)	
			เริ่มทำงาน	หยุดทำงาน	เริ่มทำงาน	หยุดทำงาน
I50	90	30	88	92	28	32
	90	50	88	92	48	52
	30	50	28	32	48	52
I50-FA20	90	50	88	92	48	52
I50-FA40	90	30	88	92	28	32
	90	50	88	92	48	52
	30	50	28	32	48	52
I50-SF7.5	90	30	88	92	28	32
	90	50	88	92	48	52
	30	50	28	32	48	52

ตารางที่ 4 เกณฑ์พิจารณาแนวโน้มของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM C876 [13]

ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต ($Cu/CuSO_4$)	สภาพการเกิดสนิม
มากกว่า -0.2 โวลต์ CSE	แนวโน้มร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม
ระหว่าง -0.2 ถึง -0.35 โวลต์ CSE	ไม่แน่นอน
น้อยกว่า -0.35 โวลต์ CSE	แนวโน้มร้อยละ 90 ที่จะเกิดสนิม

ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ณ วันที่ยุติการทดสอบ จากนั้นทำการทดสอบหาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต โดยเจาะและเก็บผงตัวอย่างที่ระยะทุก ๆ 5 มม จนกระทั่งถึงบริเวณผิวของเหล็กเสริม และนำผงตัวอย่างบริเวณของเหล็กเสริมทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 [15] ต่อไป

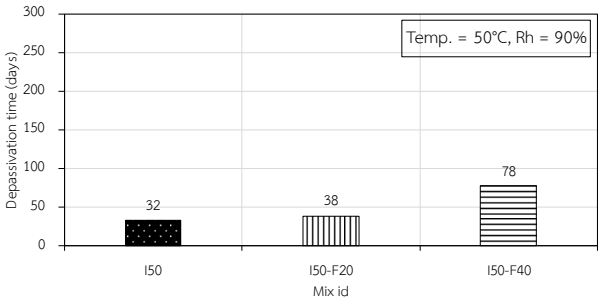
$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)
V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)
R คือ ความต้านทานที่ใช้ (โอห์ม)

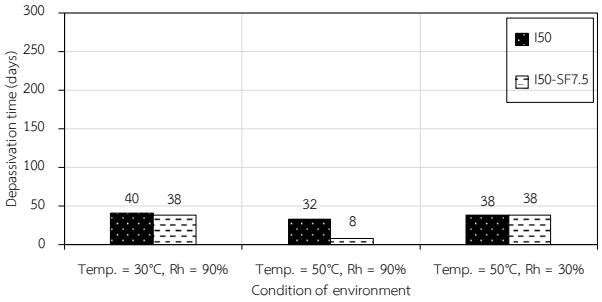
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Depassivation time)

รูปที่ 3 แสดงผลกระทบของร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยต่อระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Depassivation time) ของคอนกรีตโดยคอนกรีตใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 สำหรับสภาวะเงื่อนไขการเผชิญของคอนกรีตทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 90% จากรูปพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ส่งผลให้ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานกว่าคอนกรีตล้วน และ



รูปที่ 3 ผลกระทบของร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยต่อระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

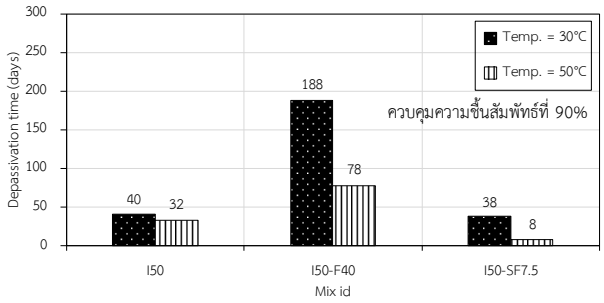


รูปที่ 4 ผลกระทบของซิลิก้าฟูมต่อระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

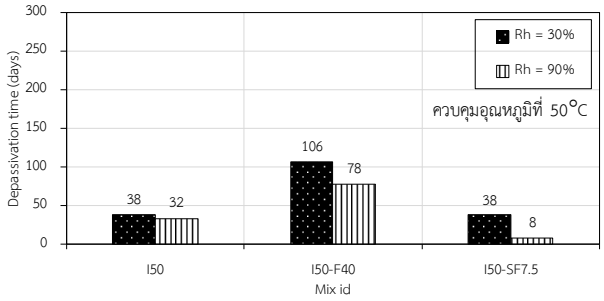
ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานขึ้นเมื่อใช้ร้อยละการแทนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ [16 - 21] โดยเถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม เท่ากับ 78 วัน ซึ่งมีระยะเวลานานที่สุด เมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 ที่มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมเท่ากับ 38 วัน และคอนกรีตล้วนเท่ากับ 32 วัน เนื่องจากเถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นแคลเซียมซิลเกรตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งผลผลิตดังกล่าวทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ผลผลิตที่เกิดขึ้นสามารถดูดซับคลอไรด์ไว้ที่ผิวได้ ด้วยเหตุนี้คลอไรด์อิสระที่แทรกซึมเข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตจึงลดลงตามไปด้วย ในขณะเดียวกันอนุภาคของเถ้าลอยที่เล็กและกลมสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น การแทรกซึมคลอไรด์จึงลดลงส่งผลให้ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่นานขึ้น [10, 22, 23]

รูปที่ 4 แสดงผลกระทบของการใช้ซิลิก้าฟูมต่อระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Depassivation time) ของคอนกรีต จากรูปพบว่า ทุกเงื่อนไขสิ่งแวดล้อม คอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูมมีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมเท่ากับหรือต่ำกว่าคอนกรีตล้วน ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ [9] เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูมมีความสามารถกักเก็บคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตล้วน [10, 11] กล่าวคือ การใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณของอลูมิน่าออกไซด์ (Al_2O_3) ลดลง ดังนั้นความสามารถกักเก็บคลอไรด์จึงลดลงตามไปด้วย และซิลิก้าฟูมสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดผลผลิต เช่น CSH แต่ CSH ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกอาจจะมีความสามารถกักเก็บคลอไรด์ต่ำกว่า CSH ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ

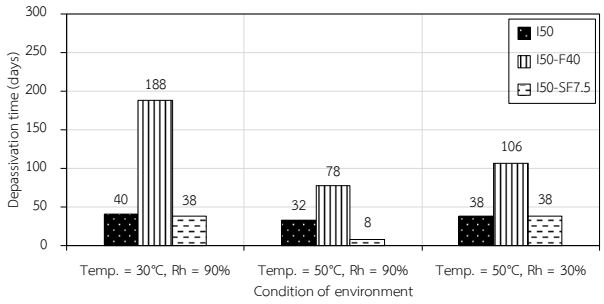
ปูนซีเมนต์ [12] ดังนั้นเมื่อความสามารถกักเก็บคลอไรด์ต่ำกว่า ทำให้มีปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะแทรกซึมเข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตสูง นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิก้าฟูมทำให้ $Ca(OH)_2$ ลดลง ซึ่งการลดลงของ $Ca(OH)_2$ ทำให้ความเป็นด่าง (pH) ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตลดลงด้วย [24] ซึ่งการลดลงของ pH ทำให้ชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่เคลือบผิวเหล็กเสริมขาดเสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมจึงสั้นลงตามไปด้วย



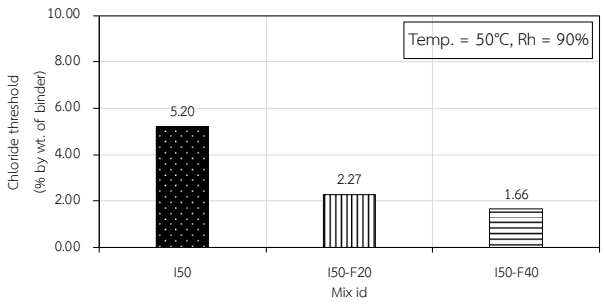
รูปที่ 5 ผลกระทบของวัสดุปอซโซลานต่อระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม



รูปที่ 6 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม



รูปที่ 7 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม



รูปที่ 8 ผลกระทบของร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

รูปที่ 5 แสดงผลกระทบของการใช้เถ้าลอยและซิลิก้าฟูมต่อระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต จากรูปพบว่า ทุกเงื่อนไขสิ่งแวดล้อม คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีระยะเวลาเริ่มเกิด สนิมของเหล็กเสริมสูงที่สุด รองลงมาเป็นคอนกรีตล้วน และคอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูม ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิต่อระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมดังรูปที่ 6 พบว่า ที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 90% คอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิ 30°C มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานกว่าคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิ 50°C เนื่องจากอุณหภูมิสูงส่งผลให้ปริมาณคลอไรค์อิสระสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของไฮดรอกซิลอิออนในสารละลายที่อยู่ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีปริมาณน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างคลอไรค์อิออนต่อไฮดรอกซิลอิออนพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างคลอไรค์อิออนต่อไฮดรอกซิลอิออนสูงขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างคลอไรค์อิออนต่อไฮดรอกซิลอิออน (Cl^-/OH^-) จะบ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่เพิ่มมากขึ้น [25] และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินำไปสู่การลดลงของความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริม หรืออาจกล่าวได้ว่าเหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสนิมสูง

เมื่อพิจารณาผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมดังรูปที่ 7 พบว่า ที่ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 50°C ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 30% มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 90% เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจำเป็นต้องอาศัยน้ำและออกซิเจน ดังนั้นความชื้นสัมพัทธ์สูงจึงส่งผลให้มีน้ำในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการการกัดกร่อนสูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ดังนั้นคอนกรีตที่เผชิญกับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจึงมีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์สูง [5]

3.2 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

รูปที่ 8 แสดงผลกระทบของร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต โดยคอนกรีตใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 สำหรับสภาวะเงื่อนไขการเผชิญของคอนกรีตทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 90% จากรูปพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำกว่าคอนกรีตล้วน และปริมาณคลอไรด์วิกฤตลดลงเมื่อใช้ร้อยละการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ [16 - 21] โดยเถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 มีปริมาณคลอไรด์วิกฤต เท่ากับ 0.70 ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งมีปริมาณน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 ที่มีปริมาณคลอไรด์วิกฤตเท่ากับ 2.27 ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และคอนกรีตล้วนเท่ากับ 5.20 ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้เกิดสาร CSH เจลเพิ่มขึ้น คอนกรีตมีโพรงช่องว่างน้อยลง ปริมาณคลอไรด์ที่สามารถแทรกซึมไปถึงผิวเหล็กจึงมีน้อยลง แต่ปริมาณไฮดรอกซิลอิออน (OH^-) ในสารละลายโพรงช่องว่างก็ลดลงอย่างมากเช่นกัน เนื่องจากถูก

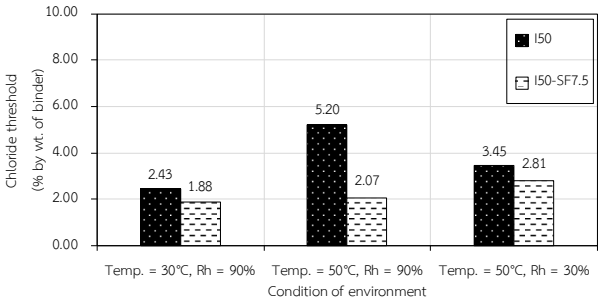
นำมาใช้ในการทำปฏิกริยาปอซโซลานิก [26] ส่งผลให้อัตราส่วนของคลอไรด์ต่อไฮดรอกซิลอิออน (Cl^-/OH^-) ในคอนกรีตมีค่าสูงจนถึงระดับที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม [16] ดังนั้นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยจึงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียว [24, 27]

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้ซิลิก้าฟูมต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ดังรูปที่ 9 พบว่า ทุกเงื่อนไขสิ่งแวดล้อม คอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูมมีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมเท่ากับหรือต่ำกว่าคอนกรีตล้วน ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ [8, 9] เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูมมีความสามารถกักเก็บคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตล้วน [10, 11] กล่าวคือ การใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณของอลูมิน่าออกไซด์ (Al_2O_3) ลดลง ดังนั้นความสามารถกักเก็บคลอไรด์จึงลดลงตามไปด้วย และซิลิก้าฟูมสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดผลผลิต เช่น CSH แต่ CSH ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกอาจจะมีความสามารถกักเก็บคลอไรด์ต่ำกว่า CSH ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ [12] ดังนั้นเมื่อความสามารถกักเก็บคลอไรด์ต่ำกว่า ทำให้มีปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะแทรกซึมเข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตสูง นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิก้าฟูมทำให้ $Ca(OH)_2$ ลดลง ซึ่งการลดลงของ $Ca(OH)_2$ ทำให้ความเป็นด่าง (pH) ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตลดลงด้วย ซึ่งการลดลงของ pH ทำให้ชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่เคลือบผิวเหล็กขาดเสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้ปริมาณคลอไรด์วิกฤตจึงลดลงตามไปด้วย [24]

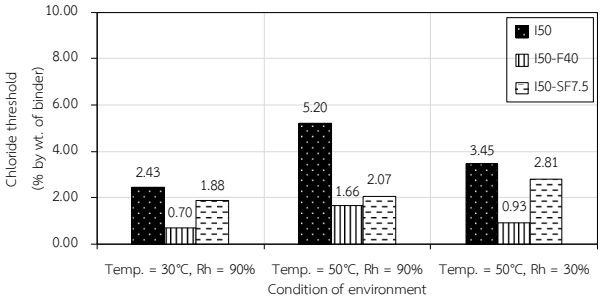
เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยและซิลิก้าฟูมต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ดังรูปที่ 10 พบว่า ทุกเงื่อนไขสิ่งแวดล้อม คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำที่สุด รองลงมาเป็นคอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูม และคอนกรีตล้วน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตดังรูปที่ 11 พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 90% ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่อุณหภูมิ 50°C มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ควบคุมอุณหภูมิ 30°C แต่มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมสั้นกว่าคอนกรีตที่อุณหภูมิ 30°C เนื่องจากที่อุณหภูมิ 50°C อาจทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro crack) ในเนื้อคอนกรีต และที่อุณหภูมิ 50°C มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงอาจส่งผลกระทบต่อเข้มข้นของคลอไรด์ให้มีค่าสูงมากขึ้น ส่งผลต่อการเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ในปริมาณที่มากขึ้นและยังทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์เป็นไปอย่างรวดเร็ว กล่าวคือปริมาณคลอไรด์อิสระสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และความเข้มข้นของไฮดรอกซิลอิออนในสารละลายที่อยู่ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยเมื่อพิจารณาเป็นอัตราส่วนระหว่างคลอไรด์อิออนต่อไฮดรอกซิลอิออน (Cl^-/OH^-) ก็มีค่าสูงขึ้นมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม [19]

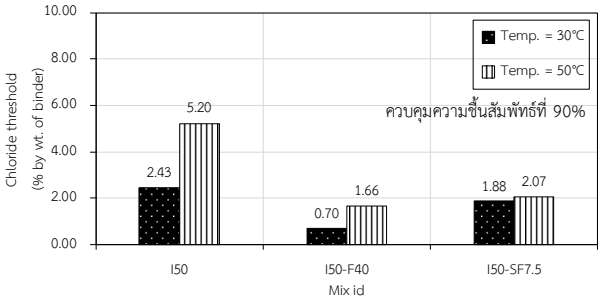
เมื่อพิจารณาผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตดังรูปที่ 12 พบว่า คอนกรีตที่ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 50°C ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 30% มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 90% แต่มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมสูงกว่า เนื่องจาก



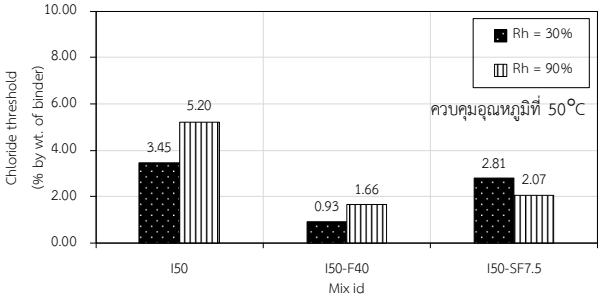
รูปที่ 9 ผลกระทบของซิลิก้าฟูมต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต



รูปที่ 10 ผลกระทบของวัสดุปอซโซลานต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต



รูปที่ 11 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

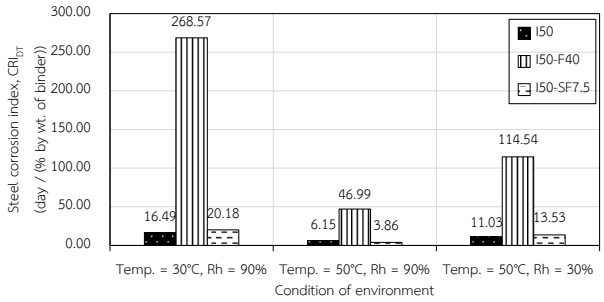


รูปที่ 12 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

ความชื้นสัมพัทธ์สูงจึงส่งผลให้มีน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจึงทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตได้สูง ดังนั้นคอนกรีตที่เผชิญกับความชื้นสัมพัทธ์สูงจึงมีปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

3.3 ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (CRI_{DT})

ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (CRI_{DT}) หมายถึง ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาณคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีต ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) โดยยิ่งค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต



รูปที่ 13 ผลกระทบของวัสดุปอซโซลานต่อ CRI_{DT}

(CRI_{DT}) สูง แสดงว่าคอนกรีตนั้นมีคุณสมบัติความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูง

$$CRI_{DT} = \frac{DT}{CTL} \qquad (2)$$

เมื่อ CRI_{DT} คือ ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (day / % by wt. of binder)
DT คือ ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม (day)
TCC คือ ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต (% by wt. of binder)

เมื่อพิจารณาดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (CRI_{DT}) ดังรูปที่ 13 พบว่า ทุกเงื่อนไขสิ่งแวดล้อม คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมี CRI_{DT} สูงที่สุด หรืออาจกล่าวได้ว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีคุณสมบัติความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสูงที่สุด รองลงมาเป็นคอนกรีตผสมซิลิก้าฟูม และคอนกรีตล้วน ตามลำดับ หากพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิ พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% คอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิ 30°C มีค่า CRI_{DT} สูงกว่าคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิ 50°C และเมื่อพิจารณาผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์พบว่า ที่อุณหภูมิ 50°C คอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 30% มีค่า CRI_{DT} สูงกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 90%

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 30°C ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 90% มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานกว่าคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 50°C แต่มีปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำกว่า เมื่อพิจารณา CRI_{DT} พบว่า คอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิ 30°C มีค่า CRI_{DT} สูงกว่าคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิ 50°C

2. คอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 30% ภายใต้อุณหภูมิคงที่ 50°C มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 90% แต่มีปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำกว่า แต่เมื่อพิจารณา CRI_{DT} พบว่า คอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 30% มีค่า CRI_{DT} สูงกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 90%

3. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานที่สุด และมีระยะเวลานานขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมและคอนกรีตล้วน แต่เมื่อพิจารณา CRI_{DT} พบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอย มีค่า CRI_{DT} สูงที่สุด รองลงมาเป็นคอนกรีตผสมซิลิก้าฟูม และคอนกรีตล้วน ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 142/2559 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

[1] ทวีชัย สำราญวานิช และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล. (2561). *การเสื่อมสภาพโครงสร้างคอนกรีต*. บริษัท จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์ จำกัด.

[2] Tangtermsirikul, S. (2003). *Durability and mix design of concrete (1st edition)*. Pathum Thani: Thammasat University, Rangsit Campus.

[3] Jones, M.R., Dhir, R.K. and Gill, J.P. (1994). Concrete surface treatment: Effect of exposure temperature on chloride diffusion resistance. *Cement and Cement Research*, 25(1), pp. 197-208.

[4] Gastaldi, M. and Bertolini, L. (2014). Effect of temperature on the corrosion behaviour of low-nickel duplex stainless steel bars in concrete. *Cement and Concrete Research*, 56, pp. 52-60.

[5] Angst, U., Elsener, B., Larsen, C.K. and Vennesland, Q. (2009). Critical chloride content in reinforced concrete - A review. *Cement and Concrete Research*, 39, pp. 1122-1138.

[6] Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.

[7] Pettersson, K. (1995). Chloride threshold value and the corrosion rate in reinforced concrete. *Proc. Of the Nordic Semina, Lund*, pp. 257-266.

[8] Manera, M., Vennesland, Q. and Bertolini, L. (2008). Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume. *Corrosion Science*, 50, pp. 554-560.

[9] Page, C.L. and Havdahl, J. (1985). Electrochemical monitoring of corrosion of steel in microsilica cement pastes. *Materials and Structures*, 18, pp. 41–47.

[10] Arya, C., Buenfeld, N.R. and Newman, J.B. (1990). Factors influencing chloride-binding in concrete. *Cement and Concrete Research,* 20, pp. 291–300.

[11] Page, C.L. and Vennesland, Ø. (1983). Pore solution composition and chloride binding capacity of silica fume-cement pastes. *Materials and Structures*, 19, pp. 19–25.

[12] Larsen, C.K. (1998). *Chloride binding in concrete*. Thesis, Report No 1998:101, Norwegian University of Science and Technology, NTNU.

[13] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2000). ASTM C876, Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete.

[14] American Society for Testing and Materials