



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของ  
คอนกรีต  
(Effect of Temperature and Relative Humidity on Threshold Chloride Content of  
Concrete)

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้  
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559  
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 222433

สัญญาเลขที่ 142/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของ  
คอนกรีต

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

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มีนาคม 2561

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 142/2559

## Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 142/2559)

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ 30°C และ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อมที่ 30% และ 90% ต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ภายใต้วัฏจักรเปียกสลับแห้ง 1 วัน : 1 วัน และสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้น 5.0% ทำการตรวจวัดระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM G109 และ ASTM C876 ซึ่งวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามลำดับ คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 40 และ 60 คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 และ 15 และคอนกรีตที่ผสมซิลิโพลีสังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตั้งแต่ 0.40 ถึง 0.60 และทำการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 7 และ 28 วัน ก่อนทดสอบ

จากผลการทดลองพบว่า คอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 30°C ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 90% มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานกว่าคอนกรีตที่อุณหภูมิ 50°C แต่มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตต่ำกว่า และคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อม 30% ภายใต้อุณหภูมิกว่า 50°C มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมนานกว่าคอนกรีตที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% แต่มีปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ต่ำกว่าเช่นกัน หากพิจารณาดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{CD}$  ซึ่งหมายถึงระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาณคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีต โดยเมื่อ  $SI_{CD}$  มีค่าสูง จะทำให้ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานขึ้น โดยผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำมีค่า  $SI_{CD}$  มากกว่าคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูง และคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ต่ำมี  $SI_{CD}$  มากกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์สูง คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 มีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{CD}$  มากที่สุด แต่มีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน คอนกรีตที่ใช้ซิลิโพลีสังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 ที่เผชิญอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 50°C และความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อม 90% มีค่า  $SI_{CD}$  มากกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และมีกำลังอัดคอนกรีตใกล้เคียงคอนกรีตซีเมนต์ล้วน คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ที่เผชิญอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 30°C และความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อม 30% มีค่า  $SI_{CD}$  สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนด้วย



## Abstract

This research aims to study the effect of temperature and relative humidity in environment on chloride threshold content of concrete. The effect of temperature at 30°C and 50°C and the relative humidity at 30% and 90% on chloride threshold content were studied under cyclic wetting and drying cycle of 1-day wet and 1-day dry and chloride solution of 5% concentration. The depassivation time of steel was detected by measuring corrosion current density and half-cell potentials according to ASTM G109 and ASTM C876 standards, respectively. Concretes in this study were concrete containing fly ash with the replacement of 20% 40% and 60% of binder, concrete containing silica fume with the replacement of 7.5% and 15%, concrete containing synthetic zeolite with the replacement of 1% and 5% by weight. The water to binder ratios were varied from 0.40 to 0.60 and the specimens were cured for 7 and 28 days before testing chloride threshold content.

From the experimental results, it was found that concrete exposed to temperature of 30°C and constant relative humidity of 90% has longer depassivation time of steel than that of 50°C, but has lower chloride threshold content. Concrete exposed to relative humidity of 30% and constant temperature of 50°C has longer depassivation time of steel than that of 90%, but has lower chloride threshold content. When steel corrosion index,  $SI_{CD}$ , which is the depassivation time of steel in concrete per unit of chloride threshold content was considered, higher  $SI_{CD}$  results in longer depassivation time of steel. The study results showed that concrete exposed to low temperature environment has higher  $SI_{CD}$  than concrete exposed to high temperature environment. Concrete exposed to low relative humidity environment has higher  $SI_{CD}$  than concrete exposed to high relative humidity. Concrete containing fly ash with the replacement of 40% has the highest  $SI_{CD}$ , but has lower compressive strength than cement concrete. Concrete containing synthetic zeolite with the replacement of 5% exposed to temperature environment of 50°C and relative humidity environment of 90%, has higher  $SI_{CD}$  than that cement concrete, but has very closed compressive strength to cement concrete. Concrete containing silica fume with the replacement of 7.5% exposed to temperature environment of 30°C and relative humidity environment of 30%, has higher  $SI_{CD}$  than that cement concrete, and has higher compressive strength than cement concrete.

## สารบัญเรื่อง

หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญเรื่อง .....	ง
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญตาราง .....	ฐ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>5</b>
2.1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ .....	5
2.1.1 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต .....	7
2.1.2 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต .....	8
2.2 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต .....	10
2.2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤต .....	12
2.3 ผลกระทบอุณหภูมิที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีต .....	15
2.4 ผลกระทบความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีต .....	16
2.5 วัสดุปอชโซลาน .....	17
2.5.1 เถ้าลอย .....	18
2.5.2 ซิลิกาฟูม.....	19
2.5.3 ซีโอไลท์สังเคราะห์ .....	22
2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปริมาณคลอไรด์วิกฤต.....	24
2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดของคอนกรีต.....	27
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>30</b>
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ .....	30

## สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง .....	30
3.1.2 อุปกรณ์และสารเคมี .....	35
3.2 วิธีการทดลอง.....	41
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง .....	41
3.2.2 การเตรียมกล่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น .....	45
3.2.3 การทดสอบสำหรับหาระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมเหล็ก.....	51
3.2.4 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต.....	53
3.2.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.....	57
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย .....</b>	<b>58</b>
4.1 ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม .....	58
4.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ .....	58
4.1.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน .....	58
4.1.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุ ประสาน .....	60
4.1.1.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุ ประสาน .....	62
4.1.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์.....	64
4.1.2.1 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ วัสดุประสาน.....	64
4.1.2.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม แทนที่วัสดุประสาน.....	66
4.1.3 ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมทั่วไป .....	68
4.1.4 ผลกระทบเนื่องจากการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่วัสดุประสาน.....	70
4.1.4.1 ผลกระทบของเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน .....	70
4.1.4.2 ผลกระทบของซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน .....	70
4.1.4.3 ผลกระทบของซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสาน .....	72
4.1.5 ผลกระทบของระยะเวลาบ่ม.....	73
4.2 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต .....	74
4.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ .....	74

## สารบัญเรื่อง (ต่อ)

### หน้า

4.2.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน .....	74
4.2.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุ ประสาน .....	76
4.2.1.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุ ประสาน .....	78
4.2.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์.....	80
4.2.2.1 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ วัสดุประสาน .....	80
4.2.2.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม แทนที่วัสดุประสาน.....	82
4.2.3 ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมทั่วไป .....	84
4.2.4 ผลกระทบเนื่องจากการใช้วัสดุโพซโซลานแทนที่วัสดุประสาน.....	86
4.2.4.1 ผลกระทบของเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน .....	86
4.2.4.2 ผลกระทบของซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน.....	88
4.2.4.3 ผลกระทบของซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสาน .....	90
4.2.5 ผลกระทบของระยะเวลาบ่ม.....	91
4.3 การเปรียบเทียบการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต .....	93
4.3.1 ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต $SI_{DC}$ .....	104
4.3.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ.....	104
4.3.1.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ .....	105
4.3.2 ดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต $CI_{CD}$ .....	106
4.3.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ.....	106
4.3.2.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ .....	107
4.4 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีต.....	108
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของ คอนกรีต .....	108
4.4.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ใช้การแทนที่วัสดุประสาน .....	109

## สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

4.4.1.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคอนกรีตที่ใช้การแทนที่วัสดุ ประสาน .....	111
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ในคอนกรีต .....	114
4.4.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ใช้การแทนที่วัสดุประสาน .....	114
4.4.2.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ของต่อคอนกรีตที่ใช้การแทนที่ วัสดุประสาน .....	116
4.5 ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีต	119
<b>บทที่ 5 สรุปผล</b> .....	122
5.1 สรุปผล .....	122
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	123
<b>ผลผลิต</b>	
<b>บรรณานุกรม</b>	
<b>ภาคผนวก</b>	
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเนื่องจากคลอไรด์.....	6
2.2	แผนผังประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต .....	9
3.1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา .....	30
3.2	ถ้ำลอย.....	31
3.3	ซิลิกาฟูม .....	32
3.4	ซีโอไลท์สังเคราะห์.....	32
3.5	รูปร่างอนุภาค.....	33
3.6	แบบหล่อตัวอย่างทดสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต และระยะการเกิดสนิมในเหล็กเสริม.....	35
3.7	อิพ็อกซี่สำหรับเคลือบผิวเหล็กกันสนิม .....	35
3.8	ชุดทดสอบทดสอบศักย์ไฟฟ้า.....	36
3.9	สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulphate) .....	36
3.10	เกลือโซเดียมคลอไรด์บริสุทธิ์ ร้อยละ 99.99 .....	37
3.11	เครื่อง Auto titration รุ่น 785 DMP TitrinoMetrohm .....	37
3.12	เครื่องดูด (Suction apparatus).....	38
3.13	เครื่องต้ม (Hot pate).....	38
3.14	กระดาษกรองเนื้อหยาบ .....	38
3.15	กรดไนตริก (Nitric acid).....	39
3.16	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide).....	40
3.17	โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) .....	40
3.18	สารละลายมาตรฐาน 0.05 ซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) .....	40
3.19	รายละเอียดตำแหน่งเหล็กในตัวอย่างทดลอง.....	41
3.20	การประกอบแผ่น โฟม .....	45
3.21	การติดตั้งหลอดไฟภายในกล่อง .....	46
3.22	เจาะช่องด้านหน้ากล่องสำหรับวัดค่ากระแสกักกร่อนพร้อมตัวต้านทาน.....	46
3.23	เจาะช่องด้านบนกล่องสำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	46
3.24	การติดตั้งเครื่องฟั่นไอหมอกภายในกล่อง .....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25	เครื่องควบคุมอัตโนมัติ ..... 47
3.26	เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น ..... 47
3.27	ต้นแบบกล่องที่ 1 ตำแหน่งการวางตัวอย่างทดสอบในกล่องควบคุม..... 48
3.28	ต้นแบบกล่องที่ 2 และตำแหน่งการวางตัวอย่างทดสอบในกล่องควบคุม..... 50
3.29	กล่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต้นแบบที่ 2 ..... 48
3.30	ตัวอย่างที่ติดตั้งตัวต้านทาน 100 โอห์ม..... 51
3.31	การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าเครื่องเซลล์ในก้อนตัวอย่างที่ควบคุม ..... 52
3.32	การวัดค่าค่าความศักย์ไฟฟ้าในก้อนตัวอย่างคอนกรีต ..... 52
3.33	การเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึกต่างๆ .. 52
3.34	ตำแหน่งของการเจาะเพื่อเก็บตัวอย่างคอนกรีต ..... 53
3.35	ตัวอย่างผงซีเมนต์ที่ได้จากการเจาะในแต่ละชั้น ..... 55
3.36	การชั่งตัวอย่างผงคอนกรีต..... 56
3.38	การไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์ ..... 56
3.39	เครื่องทดสอบกำลังอัด..... 57
4.1	ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของ คอนกรีต ที่ระยะบ่มน้ำ 28 วัน ..... 59
4.2	ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีเกลือแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะบ่มน้ำ 28 วัน ..... 61
4.3	ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะบ่มน้ำ 28 วัน ..... 63
4.4	ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีเกลือแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะบ่มน้ำ 28 วัน ..... 65
4.5	ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อย ละ 7.5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะบ่มน้ำ 28 วัน ..... 67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.6	ผลกระทบของสิ่งแวดล้อมทั่วไปที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีเถ้าล้อยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 60 และซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 และ 15 และ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน.....	69
4.7	ผลกระทบของคอนกรีตที่ผสมเถ้าล้อยแทนที่วัสดุประสาน ที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน .....	70
4.8	ผลกระทบของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน ที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน .....	71
4.9	ผลกระทบของคอนกรีตที่ผสมซีโอ โลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสาน ที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน.....	72
4.10	ผลกระทบที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60... ..	73
4.11	ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน.....	75
4.12	ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีเถ้าล้อยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน .....	77
4.13	ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีเถ้าซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน .....	79
4.14	ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีเถ้าล้อยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน .....	81
4.15	ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% และ 90% ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน .....	83
4.16	ผลกระทบเนื่องจากสภาพแวดล้อมทั่วไป ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีวัสดุปอชโซลานแทนที่วัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน .....	85



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่อายุบ่ม 28 วัน.....	87
4.18 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 และ 15 ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่อายุบ่ม 28 วัน.....	89
4.19 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 1 และ 5 ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่อายุบ่ม 28 วัน .....	90
4.20 ผลกระทบที่ระยะบ่มต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 .....	92
4.21 ผลแสดงดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต $SI_{DC}$ ของงานวิจัยต่างๆ .....	96
4.22 ผลแสดงดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต $SI_{DDa}$ ของงานวิจัยต่างๆ .....	96
4.23 ผลแสดงดัชนีการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต $CI_{CD}$ ของงานวิจัยต่างๆ .....	97
4.24 ผลแสดงดัชนีการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต $CI_{DaD}$ ของงานวิจัยต่างๆ.....	97
4.25 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต $SI_{DC}$ .....	104
4.26 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต $SI_{DC}$ .....	105
4.27 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต $CI_{CD}$ .....	106
4.28 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต $CI_{CD}$ .....	107
4.29 ผลกระทบของอุณหภูมิ 30 °C ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะบ่มน้ำ 28 วัน.....	108

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30	ผลกระทบของอุณหภูมิ 50 °C ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 ซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 และซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และ 5 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน..... 110
4.31	ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ 30 % ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน..... 111
4.32	ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ 30 % ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 ซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 และซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน ..... 113
4.33	ผลกระทบของอุณหภูมิ 30°C ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน..... 114
4.34	ผลกระทบของอุณหภูมิ 50°C ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 ซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 และซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน..... 115
4.35	ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ 30% ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน..... 116
4.36	ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ 30% ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 ซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 และซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน ..... 118

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.37	<p>ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.4 และ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน มีระยะการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม 124 วัน ปริมาณคลอไรด์วิกฤต 1.02 % โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดของคอนกรีตก่อนทดสอบ 560.8 kg/cm<sup>2</sup> หลังทดสอบ 711.4 วัน .....</p>	118
4.38	<p>ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน มีระยะการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม 32 วัน ปริมาณคลอไรด์วิกฤต 5.2% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดคอนกรีตก่อนทดสอบ 453.9 kg/cm<sup>2</sup> หลังทดสอบ 441.4 วัน .....</p>	119
4.39	<p>ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตในคอนกรีตที่ใช้ถ้ำลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน มีระยะการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม 38 วัน ปริมาณคลอไรด์วิกฤต 2.27% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดของคอนกรีตก่อนทดสอบ 393.4 kg/cm<sup>2</sup> หลังทดสอบ 417.2 วัน .....</p>	120
4.40	<p>ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตในคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน มีระยะการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม 38 วัน ปริมาณคลอไรด์วิกฤต 1.88% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดของคอนกรีตก่อนทดสอบ 475.3 kg/cm<sup>2</sup> หลังทดสอบ 529.6 วัน .....</p>	120
4.41	<p>ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตในคอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน มีระยะการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม 102 วัน ปริมาณคลอไรด์วิกฤต 1.95% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดของคอนกรีตก่อนทดสอบ 320.0 kg/cm<sup>2</sup> หลังทดสอบ 405.5 วัน .....</p>	121

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	รายงานปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่สภาวะการทดสอบต่างๆกับ โดยนักวิจัยต่างๆ ..... 11
2.2	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C168 ..... 18
2.3	คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม, เถ้าถ่านหิน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I .....21
3.1	องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ซิลิกาฟูม และซีโอไลท์สังเคราะห์ ..... 34
3.2	ส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ซิลิกาฟูม และซีโอไลท์สังเคราะห์ ..... 42
3.3	แสดงถึงรายละเอียดการทดสอบ chloride threshold ของคอนกรีต แต่ละเงื่อนไขการทดสอบ..... 43
3.4	รายละเอียดในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในกล่องควบคุม..... 48
3.5	เกณฑ์พิจารณาแนวโน้มของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM C876.. 53
4.1	เกณฑ์การพิจารณาดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต $SI_{DC}$ และ $SI_{DAD}$ ..... 93
4.2	เกณฑ์การพิจารณาดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีต $CI_{CD}$ และ $CI_{DAD}$ ..... 94
4.3	ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต และดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต ภูวดล เกียรติกิตตินันท์ และอังกูร สีโสดา (2556) ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ..... 99
4.4	ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต และดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต พนมพร แสงจันทร์ และพัลลภ อ้นแสง (2555) ทำการศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยตะกรันเตาถลุงเหล็ก ..... 101
4.5	ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต และดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2554) ทำการศึกษาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง ..... 102
4.6	ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต และดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต อุดมพร กุลมงคล (2554) ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงและปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสม เถ้าถ่านเตาแม่เมาะและเถ้าถ่านเตาระยอง..... 103

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติ ซึ่งสิ่งแวดล้อมดังกล่าวมีผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะผลกระทบจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่มีอยู่ภายในโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าที่ทำการออกแบบไว้ ซึ่งสาเหตุที่สำคัญของการเกิดปัญหาเช่นนี้มาจากเกลือคลอไรด์เป็นสาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ซึ่งโดยมากเกลือคลอไรด์เมื่อแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตและเข้าไปสะสมที่ผิวเหล็กเสริมมากถึงระดับขีดจำกัดที่เหล็กเสริมเกินความสามารถในการต้านทานการเกิดสนิมเกินกว่าระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) ของคอนกรีตนั้น ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อจะได้ทราบถึงการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในส่วนผสมที่มีความแตกต่างกัน ทั้งวัสดุทดแทนที่นำไปใช้ทดแทน ปูนซีเมนต์บางส่วน ด้วยสภาพแวดล้อมต่างๆ มีผลกระทบต่อ การเคลื่อนตัวของคลอไรด์ที่เป็นปัญหาต่อความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีต

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีรายงานว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าระดับของปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำลงอย่างมาก ยังทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกจับยึด และ pH ลดลงด้วย ส่วนความชื้นสัมพัทธ์เมื่อมีสูงขึ้นจะทำให้ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตลดต่ำลง เนื่องจากความต้านทานของคอนกรีตเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงลดลง ซึ่งการศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีตมีอยู่น้อยมากเนื่องจากปัจจัยการควบคุมที่ทำได้ยาก ดังนั้น การศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จึงจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงกรณีที่อยู่ใกล้กับโรงงานที่ต้องใช้ความร้อนสูงในการผลิต หรือผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงมากบริเวณที่อยู่ใกล้ทะเล สมาคมคอนกรีตไทย (2548) ได้ให้นิยามเกี่ยวกับการบ่มชื้นของคอนกรีต โดยการทำให้คอนกรีตคงสภาพของปริมาณความชื้น และอุณหภูมิตลอดช่วงเวลาแรกเพื่อให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตตามที่ต้องการการบ่มจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตคอนกรีตให้ได้คุณสมบัติดังกล่าว กำลังและความทนทานของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเต็มที่เมื่อได้รับการบ่มเท่านั้น ยกเว้นกรณีที่มีความชื้นโดยรอบสูงความชื้นสัมพัทธ์สูง และอุณหภูมิเพียงพออยู่แล้วการต้องบ่มอาจไม่จำเป็น ถ้าไม่เช่นนั้นควรเริ่มการบ่มในทันทีที่สามารถบ่มคอนกรีตได้ ดังนั้นต้องการรักษาอุณหภูมิของคอนกรีตให้เพียงพอเพื่อพัฒนากำลังที่ต้องการได้ใน

อายุที่กำหนดไว้ โดยปริมาณของน้ำที่ผสมของคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วมีเพียงพอสำหรับการบ่ม อย่างไรก็ตามการสูญเสียน้ำจากการระเหยมากเกินไป อาจลดปริมาณน้ำคอนกรีตจนน้อยกว่าปริมาณน้ำที่จำเป็นสำหรับใช้พัฒนาคุณสมบัติที่ต้องการ ผลกระทบของการระเหยที่รวดเร็วจนได้รับการป้องกันด้วยการเพิ่มน้ำหรือการป้องกันการระเหยที่มากเกินไป หากป้องกันการระเหยไม่ได้ผล โดยทำให้เกิดการระเหยที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการแตกร้าวจากการหดตัวของพลาสติกและสูญเสียกำลังของคอนกรีตที่ผิว การที่มีปริมาณความชื้นที่เพียงพอต่อการบ่มทำให้อนุภาคบางส่วนของปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานบางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาให้ทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ ส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยอุณหภูมิที่ต่ำมากจะมีผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ค่อนข้างช้า และจะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงแต่ไม่เกิน  $100^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิของคอนกรีตที่ต่ำกว่า  $10^{\circ}\text{C}$  นั้นไม่เหมาะสมสำหรับการพัฒนากำลังในระยะต้น ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $5^{\circ}\text{C}$  ทำให้หน่วงการพัฒนา กำลังระยะต้นเป็นอย่างมาก และที่อุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  กำลังพัฒนาขึ้นเพียงเล็กน้อย อุณหภูมิของคอนกรีตในช่วงระยะเวลาการเริ่มแรกมีผลกระทบจากตัวแปรหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิแวดล้อมและความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ การระเหยระหว่างการผสมหรือการระเหยของน้ำที่ใช้บ่มคอนกรีตที่ผิวเป็นสำคัญในการระบายความร้อน ซึ่งเป็นผลดีแต่การระเหยนั้นจะต้องไม่มากเกินไปจนส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต หรือรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่เกิดจากอุณหภูมิในขณะที่บ่มสูง หรือการลดลงของอุณหภูมิมากเกินไป

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ปัจจุบันนิยมอย่างมากในการใช้งานคอนกรีตซึ่งข้อดีของเถ้าลอย พบว่ามีอนุภาคขนาดกลมมีความละเอียดสูงกว่าซีเมนต์ จึงทำหน้าที่อุดช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ นอกจากนั้นแล้วเถ้าลอยยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น เช่น เพิ่มคุณสมบัติในการรับแรง ความทนทาน ลดการซึมน้ำ และอื่น ๆ เถ้าลอยจากการศึกษาคุณสมบัติที่ผ่านมาพบว่าการใช้เถ้าลอยทดแทนวัสดุประสานร้อยละ 30-50 ให้ผลที่ดีที่สุด

ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่า เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่เล็กมาก ๆ จึงมีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกทำให้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก การใช้ซิลิกาฟุ้งของคอนกรีตช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต การแทรกซึมคลอไรด์ รวมถึงการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำเค็ม (น้ำทะเล) การกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีที่กล่าวมาข้างต้นลดลงเนื่องมาจากการที่โครงสร้างของ Pore ของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ้งมีขนาดเล็กลงนั่นเอง การต้านทานการแข็งตัวและละลายน้ำสลับกัน การใช้ซิลิกาฟุ้งสามารถเพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันได้ดีกว่ากรณีที่ไม่ใช้ซิลิกาฟุ้ง ซึ่งอาจเนื่องมาจากการที่ค่าซึมผ่านน้ำค่าและ โครงสร้างของ Pore ที่เล็กลง จึงทำให้น้ำที่ค้างอยู่ภายในมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของคอนกรีต

ทั่วไป จากการศึกษาคุณสมบัติที่ผ่านมาพบว่าการใช้ซิลิกาฟุ้งทดแทนวัสดุประสานร้อยละ 7.5 ให้ผลที่ดีที่สุด

ซีโอไลท์สังเคราะห์ (Zeolite) เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ในประเทศซึ่งยังพบไม่มากนัก แต่ในต่างประเทศการศึกษาวิจัยและนำซีโอไลท์สังเคราะห์มาใช้ในงานคอนกรีตอย่างมาก ซึ่งคุณสมบัติของซีโอไลท์สังเคราะห์มีผลต่อปริมาณโพลงทั้งหมดและขนาดของโพลงปิดกาลารีของเพสต์ ส่งผลให้โพลงเพิ่มมากขึ้นแต่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น จากการศึกษาคุณสมบัติของซีโอไลท์สังเคราะห์ของ ที่ผ่านมาพบว่าการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ทดแทนวัสดุประสานร้อยละ 3 ให้ผลที่ดีที่สุด

อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุปอซโซลานทดแทนมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ระยะการบ่มของคอนกรีตก็มีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ทราบถึงระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสม เช่น การบ่มสั้นกรณีหล่อในพื้นที่ และการบ่มยาวกรณีหล่อแบบสำเร็จ

ด้วยสาเหตุข้างต้นนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากจะทำการศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมวัสดุทดแทนที่แตกต่างกันเท่านั้น ดังนั้น การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงการเลือกใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ให้เหมาะสมกับงานและสภาพแวดล้อม เช่น ใถ้อลอย ซิลิกาฟุ้ง และซีโอไลท์สังเคราะห์ เพื่อหาค่าความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ต้องสัมผัส และสามารถทำนายระยะเวลาของโครงสร้างคอนกรีตได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในสิ่งแวดล้อม ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต
2. เพื่อศึกษาค่าระยะเวลาการเกิดสนิม ปริมาณคลอไรด์วิกฤต กำลังอัดอัดของคอนกรีตที่ผสมใถ้อลอย ซิลิกาฟุ้งและซีโอไลท์สังเคราะห์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาปริมาณของคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตในการจำลองสภาวะแวดล้อม ควบคุมอุณหภูมิ 30°C และ 50°C ความชื้นสัมพัทธ์ 30% และ 90%

2. ทำการศึกษาระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม ปริมาณของคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์อัตราส่วนทดแทนวัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก ใช้วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 และ 15 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนทดแทนวัสดุประสานด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ใช้การบ่มคอนกรีต 7 และ 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานร้อยละ 40 ถึง 60 โดยการจำลองสภาวะแวดล้อมโดยการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในกล่องที่ใช้แผ่นโฟมหนาขนาด 1½ นิ้ว ในการสร้างกล่องสี่เหลี่ยมขนาด 615x1220x320 มิลลิเมตร<sup>3</sup> และห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกด้านนอก ใช้หลักการของตู้พักไข่ไก่ในการทำงาน โดยการใช้หลอดไฟขนาด 25 วัตต์ จำนวน 3 หลอดเป็นการให้ความร้อน และใช้เครื่องพ่นไอน้ำออกเป็นตัวให้ความชื้น โดยใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอัตโนมัติในการตั้งค่าทำงานตามสภาวะที่ต้องการจำลอง

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

2. ทำให้ทราบค่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม ปริมาณคลอไรด์วิกฤต กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ซิลิกาฟูม และซีโอไลต์สังเคราะห์



## บทที่ 2

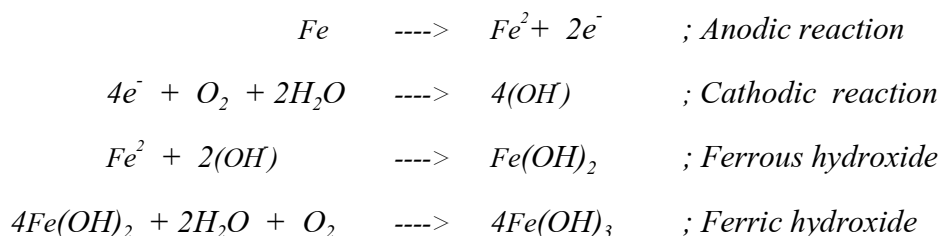
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

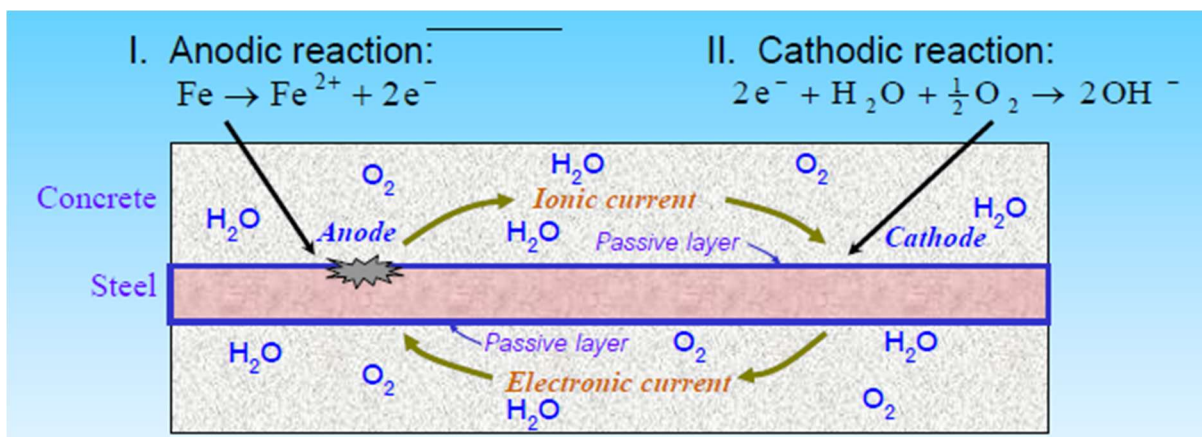
#### 2.1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์

โดยทั่วไปแล้วสารประกอบคลอไรด์จะไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กแต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไปจำเป็นต้องใส่เหล็กเสริมเข้าไปของคอนกรีตเพื่อให้รับแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตรับแรงดึงได้น้อยมาก และการที่ของคอนกรีตมีเหล็กเสริมนี้เองจึงส่งผลให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความชัดเจนและรุนแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีโดยตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมทำให้ดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ตลอดจนความสามารถในการรับแรงของเหล็กเสริมคอนกรีตต่ำลงและเป็นสาเหตุหลักที่ทำลายองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบางๆ เคลือบผิวเหล็กไว้ ฟิล์มนี้ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมเหล็กอย่างไรก็ตามอ็อกซิเจนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและก๊าซออกซิเจนตรงบริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มป้องกันอยู่เหล็กจะเป็นสนิม โดยลักษณะการทำลายของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมจริง

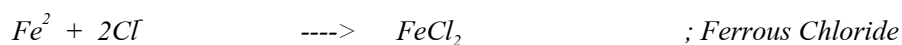
การเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมของคอนกรีต ทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น มีขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) เชื่อมกันโดยน้ำซึ่งมีคลอไรด์ในโพรงของซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ประจุไฟฟ้าบวกเฟอร์รัสไอออน  $Fe^{2+}$  ที่ขั้วบวกจะวิ่งไปสู่สื่ออิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ  $e^-$  วิ่งตามเหล็กเสริมไปยังขั้วลบ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน  $OH^-$  ซึ่งวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ  $Fe^{2+}$  ทำให้เกิด  $Fe(OH)_2$  และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจนทำให้เกิดสนิม ปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงดังสมการ





รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเนื่องจากคลอไรด์  
(ที่มา : <http://staff.buu.ac.th/~twc/research.htm>)

เมื่อออกซิเจนถูกใช้จนหมดไปน้ำก็สามารถอุปฏิกิริยาขึ้นมาใหม่ได้แต่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการเกิดที่ต่อเนื่องด้วยเหตุนี้จึงไม่เกิดการกัดกร่อนของคอนกรีตที่แห้งตลอดเวลาซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ต่ำกว่าร้อยละ 60 หรือคอนกรีตที่จมอยู่ในน้ำทะเลซึ่งไม่มีโอกาสได้สัมผัสกับอากาศ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมที่จะเกิดการกัดกร่อน อยู่ในช่วงร้อยละ 70 ถึง 80 ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่านี้ จะทำให้ออกซิเจนแพร่เข้าไปของคอนกรีตได้น้อยลงความต่างศักย์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี สามารถเกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตมีสภาพที่แตกต่างกันเช่น ส่วนหนึ่งของคอนกรีตจมในน้ำทะเลตลอดเวลา แต่อีกส่วนหนึ่งต้องสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นระยะๆ ในบางกรณีความต่างของระยะหุ้มคอนกรีตส่งผลถึงการเชื่อมต่อของสื่อไฟฟ้าเคมี มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์รวมไปถึงความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรงคอนกรีตด้วย สำหรับการกัดกร่อนในช่วงต้นฟิล์มบางจะถูกเจาะโดยคลอไรด์ไอออนจะกระตุ้นให้ผิวเหล็กเสริมกลายเป็นขี้ขาวก พื้นผิวด้านที่ไม่ถูกกระตุ้นก็จะมีสภาพเป็นขี้ขาว ดังสมการ



เนื่องจากคลอไรด์ไอออนเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ดังนั้นสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นจึงไม่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบแม้ว่าเฟอร์รัสคลอไรด์จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยา เซลล์ไฟฟ้าเคมีมีความจำเป็นต้องใช้น้ำในโพรงของคอนกรีตเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างขี้ขาวและขี้ขาวระบบโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวของคอนกรีตเป็นปัจจัยหลักที่ผลต่อการกัดกร่อน เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยน้ำที่อยู่ในโพรงเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นทำให้เหล็กเสริมเกิดการเกิดการขยายตัวปริมาตรเพิ่มขึ้นทำให้เกิดรอยแตก (Cracking) การหลุดร่อน (Spalling) ไปจนถึงคอนกรีตกับเหล็กเสริมไม่มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกัน (Delemination) ในขณะที่เกิดการกัดกร่อนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวกจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียประจุไฟฟ้าทำให้เกิดรูขนาดเล็กบนเหล็กเสริม

ความต่างศักย์เกิดจากการที่คอนกรีตมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น จากความแตกต่างของความชื้นความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรง ความแตกต่างของสภาพแวดล้อม และความแตกต่างของความหนาของคอนกรีตหุ้ม เป็นต้น เซลล์ไฟฟ้าในลักษณะนี้ของคอนกรีตเซลล์หนึ่งอาจยาว 10 มม. จนถึง 6 มม.

คอนกรีตอาจมีคลอไรด์เนื่องจากการใช้ส่วนผสมของวัสดุที่มีคลอไรด์ เช่น ใช้น้ำ ทราช หินปูนซีเมนต์ หรือสารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ปนอยู่ ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบว่ามีปริมาณคลอไรด์อยู่ในปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีต ว.ส.ท ได้กำหนดปริมาณคลอไรด์อิออนที่ละลายน้ำได้ของคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิมต้องมีค่าไม่เกินพิคัด โดยคลอไรด์อิออนของคอนกรีตอัดแรงจะกำหนดไว้ค่อนข้างต่ำคือไม่เกินร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตอัดแรงต้องใช้เหล็กเสริมที่มีกำลังสูงและการทำลายพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลกระทบต่อารรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กค่อนข้างชัดเจน ดังนั้นจึงยอมให้ปริมาณคลอไรด์ที่เข้าไปสัมผัสค่อนข้างน้อยเพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

### 2.1.1 การแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต

กระบวนการการกัดกร่อนของเหล็กเสริม เริ่มต้นเมื่อมีปริมาณคลอไรด์เพียงเล็กน้อยที่ผิวเหล็ก แต่เป็นการยากที่จะกล่าวว่า ปริมาณหรือความเข้มข้นของคลอไรด์เท่าใดที่จะกระตุ้นให้เหล็กเสริมเป็นสนิม เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยซึ่งยังไม่สามารถอธิบายให้ชัดเจนได้ยิ่งไปกว่านั้นการแพร่ของคลอไรด์เข้าไปยังซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว มีรูปแบบที่ไม่แน่นอนภายในห้องปฏิบัติการมีการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในรูปของรูปตัดตามยาว (Chloride profiles) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีป้องกันการเกิดสนิมอันเนื่องมาจากการซึมผ่านของคลอไรด์ ซึ่งจะใช้วิธีพิจารณาหาระยะหุ้มที่เหมาะสมสำหรับเหล็กเสริม

ปริมาณคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมของคอนกรีตเริ่มเป็นสนิม หรือที่เรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Threshold chloride) ซึ่งพบว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตธรรมดาามีค่าในช่วงร้อยละ 0.3-0.5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาและพบว่าจะอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-0.3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน พบว่าคอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาคส่วนผสมหลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานไปแล้วในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาค

ส่วนผสมตั้งแต่เริ่มต้น จะเกิดอัตราการกักตัวของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่มีการซึมผ่านของคลอไรด์หลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานแล้วขณะที่เกิดกระบวนการซึมผ่านคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์ที่สามารถซึมผ่านเข้าไปของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความสามารถในการต้านทานของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว การเปลี่ยนแปลงความชื้นและปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ซึ่งเป็นปัจจัยเหล่านี้เป็นผลเนื่องจากลักษณะของการแช่คอนกรีต

ในกรณีทั่วไป ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการกักคร่อน แต่คลอไรด์ทั้งหมดสามารถจำแนกออกได้ 3 ส่วน คือ Chemical bound ซึ่งรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ อีกส่วนหนึ่ง คือ Physically bound ซึ่งติดอยู่ที่โพรงของเจล (Gel pores) และส่วนสุดท้าย เรียกว่า คลอไรด์อิสระซึ่งมีอิทธิพลต่อการสามารถคงอยู่ได้ในสถานะเดิมตลอดเวลา แต่สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้ไอออนทั้งหมดอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ตามปกติคลอไรด์อิสระจะพบตามน้ำที่อยู่ในช่องว่าง (Pore water) ของคอนกรีต ถ้าคลอไรด์อิสระมีปริมาณที่มากเกินไปจนความจำเป็นคลอไรด์อิสระนั้นจะกลายสภาพไปเป็นคลอไรด์ยึดจับ เพื่อให้ไอออนอื่นๆ อยู่ในสภาวะสมดุล

### 2.1.2 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

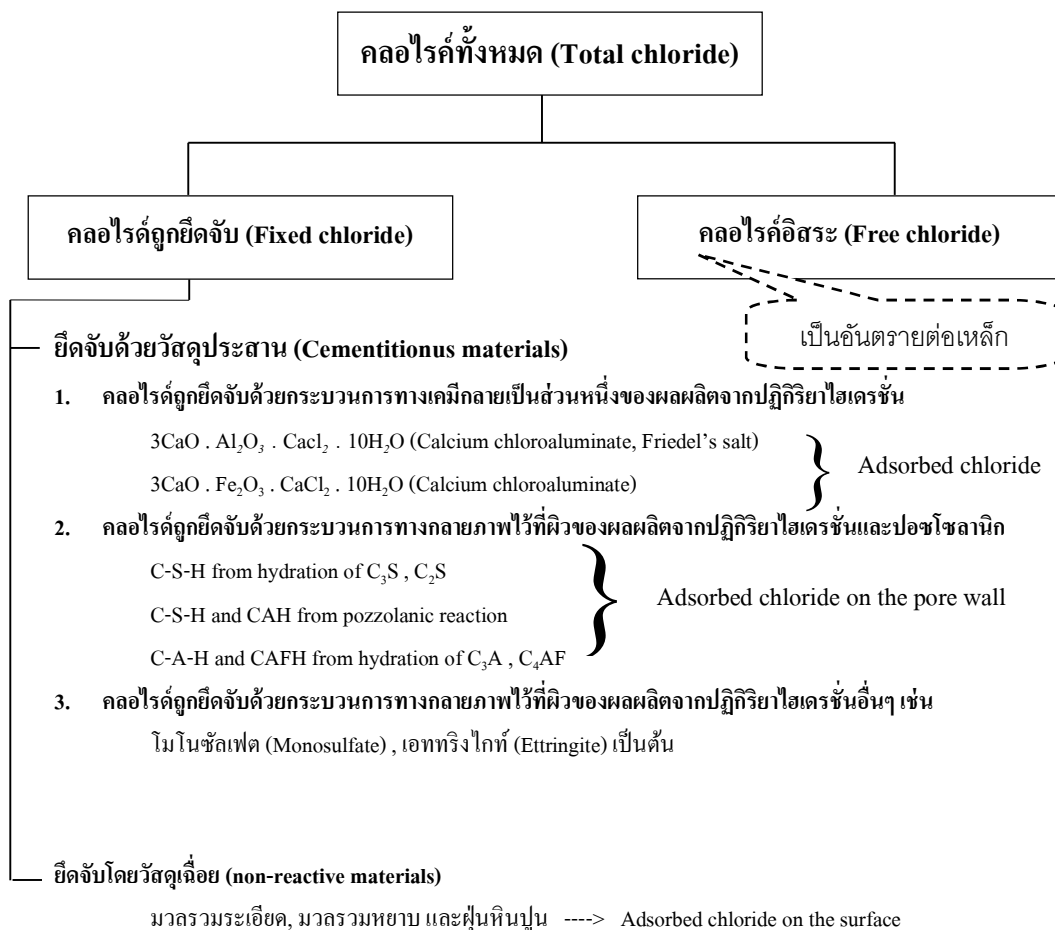
โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ คลอไรด์จะซึมผ่านเข้าไปของคอนกรีตและเกิดการสะสมในเนื้อคอนกรีต โดยคลอไรด์ที่อยู่ของคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ไอออน ซึ่งอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต (Pore solution) ซึ่งเป็นคลอไรด์ที่พร้อมทำปฏิกิริยาทำให้เกิดสนิมในเหล็กและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. คลอไรด์ที่ถูกยึดจับหรือถูกกักเก็บ (Fixed chloride) คือ เป็นคลอไรด์ซึ่งถูกจับหรือกักเก็บไว้จึงไม่สามารถไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้คลอไรด์ชนิดนี้จะถูกจับหรือกักเก็บได้ 2 แบบด้วยกันคือ การกักเก็บด้วยการดูดซับทางเคมี (Chemical absorption) จากวัสดุที่ทำปฏิกิริยา เช่น ปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานอื่นๆ และการกักเก็บด้วยการดูดซับทางกายภาพ (Physical absorption) จากวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี เช่น มวลรวม เป็นต้น การดูดซับทางกายภาพนี้ คลอไรด์จะถูกดูดซับด้วยแรงดึงดูดที่ผิว (Surface force) ส่วนการดูดซับทางเคมี คลอไรด์จะถูกจับเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ในปูนซีเมนต์กับคลอไรด์ไอออนก่อให้เกิดเป็นเกลือฟรีเดล (Fridel's salt,  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) และนอกจากนั้นคลอไรด์ยังสามารถถูกกักเก็บในโครงสร้าง C-S-H ได้ด้วย

คลอไรด์เป็นสารที่สามารถพบอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป ด้วยความเข้มข้นต่างๆ กัน คลอไรด์นั้นแปรผันตามปริมาณเกลือแร่ที่เพิ่มขึ้น น้ำธรรมชาติตามภูเขาหรือในพื้นที่สูงจะมีคลอ

ไรต์น้อย ขณะที่น้ำในแม่น้ำและน้ำใต้ดินมีคลอไรด์สูงและน้ำในทะเลจะมีปริมาณคลอไรด์อยู่ในปริมาณสูงมาก เพราะเป็นแหล่งรวมของน้ำจากที่ต่าง ๆ และมีการระเหยของน้ำตลอดเวลาจึงเกิดตะกอนเกลือปริมาณมากน้ำในธรรมชาติได้รับคลอไรด์เพิ่มขึ้นได้หลายทาง เนื่องจากความสามารถในการละลายของน้ำทำให้สามารถละลายคลอไรด์จากชั้นดินต่างๆ ละอองน้ำจากมหาสมุทรถูกพัดเข้ามาสู่แผ่นดินในสภาพของหยดน้ำเล็ก ๆ ซึ่งมีเกลืออยู่ปะจายเหล่านี้เป็นตัวทำให้ปริมาณคลอไรด์บนพื้นดินสูงขึ้นน้ำจากทะเลและมหาสมุทรไหลขึ้นตามลำน้ำที่ไหลทอดตัวลงสู่มหาสมุทรได้ โดยเฉพาะในแม่น้ำที่มีความลึกมาก ๆ น้ำทะเลมีความหนาแน่นมากกว่าจะไปไหลทวนน้ำในแม่น้ำขึ้นมาภายใต้ น้ำ-จืดที่ไหลลงทะเลจึงเกิดการผสมกันระหว่างน้ำทะเลกับน้ำจืด น้ำใต้ดินที่อยู่บริเวณใกล้ๆ กับทะเลและมหาสมุทรจะมีแรงดันของน้ำเท่ากับน้ำทะเล แต่ถ้ามีการสูดเอาน้ำใต้ดินมาใช้ในปริมาณที่มากเกินไปแล้ว จะเกิดความแตกต่างของ Hydrostatic head ทำให้น้ำทะเลมีความดันมากกว่าก็จะไหลขึ้นสู่น้ำจืด



รูปที่ 2.2 แผนผังประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ทวิชัย สำราญวานิช)

## 2.2 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

เหล็กเสริมคอนกรีตนั้นจะเกิดการกัดกร่อนในสถานะที่เป็นกรดแต่คอนกรีตมีสถานะเป็นด่างทำให้เหล็กเสริมคอนกรีตไม่ถูกกัดกร่อน ช่องว่างที่มีขนาดเล็ก (Microscopic pores) ของคอนกรีตมีความสภาพเข้มข้นของ แคลเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และ โปแตสเซียมออกไซด์ เมื่อมีน้ำเพิ่มเข้ามาของคอนกรีตก็จะช่วยสร้างสภาพความเป็นด่างให้มากขึ้น ( $\text{pH} \approx 12-13$ ) สภาพความเป็นด่างจะสร้างฟิล์ม (Passive layer) ฟิล์มนี้มีความทึบแน่นไม่สามารถซึมผ่านได้ ถ้าฟิล์มนี้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จึงสามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ได้ คลอไรด์ที่แพร่กระจายเข้ามาของคอนกรีตจะทำลายฟิล์มของเหล็กเสริม ทำให้คลอไรด์เข้าสู่เหล็กเสริมได้ง่ายขึ้น และสะสมปริมาณคลอไรด์จนมีความเข้มข้นถึงจุด ๆ หนึ่งเหล็กเสริมคอนกรีตจะเริ่มเกิดการกัดกร่อน ณ จุดนี้เรียกว่า ระดับคลอไรด์วิกฤต

Xu et al. (2011) ได้ทำการศึกษาการประเมินผลกระทบของซิลิกาฟุ้งและเถ้าลอยละเอียดในการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์สำหรับการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต คลอไรด์อิออนได้นำมาทดสอบในตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเพียงอย่างเดียวและส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และมีการนำซิลิกาฟุ้งและเถ้าลอยละเอียดทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนใช้วิธีทดสอบโดยให้ก่อนตัวอย่างอยู่ในสภาวะเปียกสลับกับแห้ง การวัดค่าโดยใช้วิธี Half-cell potential และ linear polarization ได้นำมาใช้ในการตรวจสอบการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต ค่าเกณฑ์ที่แสดงออกมาเป็นคลอไรด์อิสระหรือคลอไรด์โดยมวลรวมของสารยึดเกาะตลอดจน  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  และ  $[\text{Cl}^-]/[\text{H}^+]$  ได้ค้นพบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่มีการใช้สารผสมที่เป็นเถ้าลอยละเอียดและซิลิกาฟุ้งเป็นตัวทำให้ตัวอย่างนั้นมีความหนาแน่นหรือมีความทึบน้ำโดยเฉพะอย่างยิ่ง  $[\text{Cl}^-]/[\text{H}^+]$ , โดยไม่คำนึงถึงประเภทและอัตราส่วนผสมสารผสมเพิ่ม มีการประมาณค่าที่ 0.02 ดังนั้น,  $[\text{Cl}^-]/[\text{H}^+]$  เป็นข้อเสนอแนะที่เหมาะสมกว่ารูปแบบการแสดงผลปริมาณคลอไรด์วิกฤต

Ann and Song (2007) ได้ศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตเสริมเหล็ก สาเหตุที่สำคัญการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ เนื่องจากคลอไรด์ทำให้มีการสูญเสียเนื้อเหล็กเสริมของคอนกรีต โดยมีการศึกษาและวิจัยหัวข้อดังกล่าวเป็นอย่างดีตลอดเวลา 5 ปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาวิจัยในปัจจุบันเพื่อสรุปผลงาน โดยนำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับปริมาณคลอไรด์วิกฤต ปัจจัยที่มีอิทธิพล และเทคนิคในการตรวจสอบวัดค่า มีงานวิจัยจำนวนมากที่ตีพิมพ์เกี่ยวกับปริมาณคลอไรด์วิกฤต โดยมีรายละเอียดการทดลองที่เกี่ยวข้องจะถูกเก็บรวบรวม ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนใหญ่และการศึกษาที่ทันสมัยมากขึ้น โดยไม่ใช่แบบดั้งเดิมเพราะทำให้การรายงานผลที่ขัดแย้งกัน การประเมินผลงานวิจัยปัจจุบันเน้นความต้องการความน่าเชื่อถือสำหรับวิธีการทดสอบการปฏิบัติ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมุ่งเน้นเกี่ยวกับขั้นตอนการทดลองโดยการอภิปรายข้อดี และข้อเสียของวิธีการและการตั้งค่าโดยแสดงให้เห็นความชัดเจน

ว่าส่วนมากของการตั้งค่าที่ใช้ในการตรวจสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่สำคัญไม่เหมาะที่จะให้ผลลัพธ์ที่เป็นจริง

ตารางที่ 2.1 รายงานปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่สภาวะการทดสอบต่างๆกับ โดยนักวิจัยต่างๆ

Condition	Threshold values			Detection method	Reference
	chloride (%, cem.)	Free chloride (%, cem)	[Cl-]/[OH-]		
Pore solution			0.6	Half-cell potential	Hausmann (1967)
			0.3	Polarisation	Gouda (1970)
			8-63	Polarisation	Yonesawa (1988)
Specimen + internal Cl-	0.5-2.0			Macrocell current	Schiessk et al.(1990)
	0.079-0.19			AC impedance	Hope (1989)
	0.32-1.9			Mass loss	Treadaway (1989)
	0.78-0.93	0.11-0.12	0.16-0.26	Half-cell potential	Jang et al., (2003)
	0.45(SRPC)	0.1	0.27		
	0.90(15% PFA)	0.11	0.19		
	0.68(30% PFA)	0.07	0.21		
	0.97(30% GGBS)	0.03	0.23		
	0.35-1.00	0.14-0.22		Cl-/OH- = 0.30	Hussain (1995)
	0.227	0.364	1.5	Polarisation	Alonso (2002)
Specimen + external Cl-	0.5-1.5			Half-cell potential	Bamforth (1999)
	0.70(OPC)			Mass loss	Thomas (1996)
	0.65(15% PFA)				
	0.50(30% PFA)				
	0.20(50% PFA)				
	1.8-2.9			Polarization	Petterson (1993)
	0.5-1.4			Not mentioned	Tuutti (1993)
	0.6-1.4			Macrocell	Glass et al., (2000)
Structure	0.2-1.5			Mass loss	Vassie (1984)

Note : SRPC : sulphate resistant Portland cement, PFA : pulverised fly ash.

GGBS : ground granulated blast furnace slag, OPC : ordinary Portland cement

### 2.2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤต

#### 1) ค่า pH ภายในช่องว่างของคอนกรีต

ตัวอย่างของช่องว่างของคอนกรีตที่มีปริมาณ pH สูงกว่า 12.6 ทำให้เกิดปรากฏการณ์ portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) โดยที่ปริมาณที่สูงขึ้นนั้นสามารถสังเกตได้ในคอนกรีตที่ประกอบด้วย NaOH และ KOH ในสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นด่างสูงภายในช่องว่างคอนกรีต มีแนวทางการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาของ oxide film บนผิวหน้าของเหล็กเสริมและดังนั้นปริมาณของค่า pH ที่สูงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการยับยั้งที่เกี่ยวข้องกับการเริ่มเกิดสนิม ได้มีการตั้งข้อสังเกตเกี่ยวกับ pH ภายในช่องว่าง ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงเวลา เช่น ปรากฏการณ์ carbonation หรือการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องของวัสดุประสาน

นอกจากนี้ ในการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามีการยับยั้งการเริ่มการกัดกร่อนเนื่องจากสนิม นอกจากนี้ pH อาจส่งผลกระทบต่อที่เกี่ยวข้องกับคลอไรด์ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการลดลงของค่า pH ต่ำกว่า 12.5 เป็นผลแสดงอยู่ในส่วนของขอบเขตคลอไรด์อิสระในขณะที่อีกส่วนหนึ่งแสดงถึงค่า pH ลดลงประมาณ 12 ของขอบเขตคลอไรด์อิสระได้แสดงระยะการแตกตัวของเกลือ Friedel's salt และ C-S-H ผลที่ตามมาที่มีการลดลง Alkalinity โดยมีพื้นฐานของการทดลองด้วยเหล็กเส้นในการสังเคราะห์ช่องว่างในคอนกรีต Hausmann and Gouda ได้มีการนำเสนอปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่มีความถูกต้อง ใช้แสดงอัตราส่วนความเข้มข้น  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  งานเหล่านี้เป็นงานแรกที่แนะนำปริมาณคลอไรด์วิกฤตประมาณ 0.6 ผลลัพธ์ที่ได้มาจากการสนับสนุนภายหลัง และดูเหมือนว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้น ค่า pH ภายในช่องว่างที่มีอิทธิพลที่สำคัญกับปริมาณคลอไรด์ที่นำไปสู่การเริ่มต้นการกัดกร่อนเนื่องจากสนิม

#### 2) ความพรุนในคอนกรีต

การแสดงให้เห็นปัญหาความพรุนของก้อนตัวอย่างคอนกรีตและหลังจากการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากกระบวนการทางเคมี โดยนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบที่ความดันที่ค่อนข้างสูง ในกระบวนการนี้มักถูกใช้ในการหาค่าปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีต Ayra and Newman (1990) ดังนั้นปริมาณของคลอไรด์อิสระมีค่าสูงเกินไป แสดงให้เห็นว่ากระบวนการนี้มีปัญหาบางส่วนในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตมีอัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์ ต่ำ หรือการที่มีส่วนผสมมวลรวมหยาบหรือถ้าตัวอย่างนั้นค่อนข้างแห้ง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทราบถึงวิธีการที่ช่วยในการหาค่าเฉลี่ยของปริมาณคอนกรีตภายใต้งานวิจัย ซึ่งอาจนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ไม่มีความแน่นอนในกรณีที่มีของระดับความเข้มข้นที่สูงภายในช่องว่างคอนกรีต

#### 3) รอยต่อระหว่างเหล็กและคอนกรีต

ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้มีการทึบน้ำ (ที่มีส่วนผสมในสัดส่วนของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่สูง) โดยมักพบอยู่ระหว่างชั้นเหล็กเสริมกับคอนกรีต ชั้นนี้มีความสำคัญมากสำหรับปริมาณคลอไรด์วิกฤต ตั้งแต่มีความสำคัญกับการปรับเปลี่ยนค่า pH ภายในช่องว่าง ในขณะที่เดียวกันการอิมมิด



ด้วยน้ำในวัสดุของแข็ง อาจทำหน้าที่ขัดขวางทางกายภาพ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงบางส่วนจึงอาจมีผลต่อเหล็ก โดยการจำกัดพื้นที่ของออกซิเจนให้ลดลงเนื่องจากการบดอัดไม่สมบูรณ์หรือความสามารถในการทำงานได้ในระดับที่ลดลงของคอนกรีต ในการสังเกตช่องว่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อาจมีการนำเสนอระหว่างชั้นเหล็กกับคอนกรีต และ Mohammed and Hamada (2001) ได้พบแนวทางของการหล่อกับการพิจารณาเกี่ยวกับการปรับปรุงกำลังที่ทำให้ผลกระทบต่อการศึกษาของช่องว่าง ถ้าทำการเสริมกำลังให้มีความยืดหยุ่น นอกจากนี้ยังเป็นส่งเสริม ดังที่กล่าวข้างต้นทำให้ความหนาแน่นของชั้นอาจอ่อนตัวลงหรือช่องว่างดังกล่าวหายไป และ Yonesawa et al. (1988) มีรายงานเกี่ยวกับปริมาณคลอไรด์วิกฤตโดยมีความสำคัญลดลง ถ้าการพัฒนาความหนาแน่นของชั้นระหว่างผิวเหล็กกับคอนกรีตถูกจำกัด นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดสนิมที่มุม หรือ รอยเว้า ของ profiling Hansson and Sorensen (1990) จากผลการศึกษาล่าสุด Ann and song (2007) ค้นพบลักษณะทางกายภาพระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่เกี่ยวข้องกับปริมาณคลอไรด์วิกฤต ซึ่งมีความสำคัญมากกว่าการจับตัวของคลอไรด์หรือความจุบัพเพอร์โดยการแทรกอยู่ในซีเมนต์เฟส โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณอากาศที่กักเก็บในช่องว่างเป็นความสำคัญในฐานะการมีอิทธิพล การพิจารณาความสำคัญที่สภาพระหว่างเหล็กกับคอนกรีตที่เกี่ยวข้องกับปริมาณคลอไรด์วิกฤต มีผลกระทบต่อสภาพเหล่านี้จึงอยากที่จะที่จะหาปริมาณได้ เรื่องนี้เป็นความท้าทายในการวัดปริมาณของช่องว่างที่เต็มไปด้วยอากาศและข้อบกพร่องอื่นๆที่ระหว่างชั้นเหล็กกับคอนกรีต Angst and Vennesland (2007)

#### 4) ชนิดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การเลือกชนิดของปูนซีเมนต์มีผลทางอ้อมต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤต ตั้งแต่เริ่มมีคลอไรด์ปนเปื้อนวัสดุประสานขึ้นอยู่กับประเภทของปูนซีเมนต์ที่นำไปใช้ในการผสม ดูเหมือนว่าดัชนีของการปนเปื้อนคลอไรด์ในวัสดุประสานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สูงขึ้นอยู่กับปริมาณ  $C_3A$  Schiess and Raupach (1990) สำหรับตัวอย่าง the lower binding capacity ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ด้านทานซัลเฟต มี  $C_3A$  ต่ำ มีการแสดงให้เห็นระยะเวลาการกัดกร่อนเนื่องจากสนิมลดลงและมีการกระตุ้นให้อัตราการเกิดสนิมเพิ่มขึ้นสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่  $C_3A$  ต่ำ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มี  $C_3A$  สูง Rasheeduzzafar et al (1992) แต่ Byfors (1990) ในทางตรงกันข้ามพบว่าผลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ด้านทานการซัลเฟตได้ผลดีในเฟอร์ริก ( $C_4AF$ ) นอกจากนี้เทอร์โมไดนามิก ตลอดจนการพิจารณาหลักฐานจากการทดลองทางวิทยาศาสตร์ Nielsen (2004) ได้ข้อสรุปว่าปริมาณของอลูมินาในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีผลค่อนข้างน้อย เมื่อมีการปนเปื้อนคลอไรด์ Instead the chloride binding พบว่าเป็นมากขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของอัลคาไล เมื่อปริมาณของอัลคาไลสูงส่งผลให้เป็นการจำกัดการแทรกซึมให้ต่ำลง

### 5) การแทนที่วัสดุปอซโซลาน

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นวัสดุประสานของคอนกรีต โดยมี 2 ข้อหลักที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤต

1. มีปริมาณของ alumina สูงใน Fly ash การเพิ่มขึ้นในการปนเปื้อนคลอไรด์ในวัสดุประสาน Arya (1990) Dhir and Jones (1999)

2. ค่า PH ภายในช่องว่างของคอนกรีตลดลง Byfors (1987) Diamond (1981) เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้น GGBS โดยอุปสรรคทั่วไปทำให้เกิดข้อสรุปเกี่ยวกับผลของ Fly ash ที่เกี่ยวข้องกับปริมาณคลอไรด์วิกฤต

ดังแสดงในหัวข้อข้างต้นเป็นผลยับยั้งและการเพิ่มขึ้นการเริ่มต้นการเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสนิม ตามลำดับ ในการศึกษาเกี่ยวกับตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้นำไปทดสอบกับสถานะแวดล้อมทางทะเลโดยมีการทดสอบที่อายุ 4 ปี Thomas (1995) พบว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตมีการแทรกซึมได้ต่ำที่ขึ้นอยู่กับปริมาณการผสมเพิ่มของเถ้าลอยในคอนกรีต อีกทางเลื่อกหนึ่ง Bamforth and Chapman-Andrews (1994) and Thomas et al. (1990) มีรายงานเกี่ยวกับการเพิ่มของเถ้าลอยในคอนกรีต ไม่มีผลเกี่ยวกับปริมาณคลอไรด์วิกฤต โดยยังประมาณค่าไม่ได้การแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยมีเถ้าลอย (หรือ GBS) ผลของความพรุนที่มีความละเอียดในโครงสร้างของซีเมนต์เฟส ซึ่งส่งไปผลไปถึงตัวด้านทานที่สูงของคอนกรีตกับการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน Angst and Vennessland (2007) ไม่ได้มีอิทธิพลโดยตรงเกี่ยวกับปริมาณคลอไรด์วิกฤต แต่การเพิ่มขึ้นตัวด้านทานไฟฟ้าเคมีจะลดลงทั้งการแทรกซึมของคลอไรด์และวงจร macrocell ดังนั้นอาจมีผลให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงขึ้น

ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) การที่มีปริมาณคลอไรด์แทรกตัวอยู่ในวัสดุประสานที่ต่ำ ได้มีรายงานเกี่ยวกับ silica fume-containing ในซีเมนต์ โดยเมื่อมีการเทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไปผสมวัสดุปอซโซลาน (Page and Vennessland (1993) Arya et al (1990)) อาจเป็นส่วนหนึ่งที่มีผลมาจากการลดปริมาณของ aluminate มีขั้นตอนที่นำเสนอในวัสดุประสาน โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้มีการแทนที่บางส่วนด้วย Silica fume ( $\text{SiO}_2$  ที่ค่อนข้างบริสุทธิ์) Silica fume เป็นวัสดุที่มีความละเอียดมากและแสดงบางส่วนของวัสดุประสานในคอนกรีตนำไปสู่ความพรุนที่มีความละเอียดมาก ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มการแทรกซึมของคลอไรด์ไปยังผิวของ C-S-H เจล Angst and vennessland (2007) อย่างไรก็ตาม Larsen (1998) มีรายงานว่า C-S-H โดยเกิดจาก pozzolonic reaction ของ Silica fume กับ portlandite ( $\text{CaOH}_2$ ) อาจทำให้คุณสมบัติของวัสดุประสานมีคลอไรด์ลดลง ดังนั้น C-S-H โดยเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่ผสมกับวัสดุปอซโซลาน ค่า pH ของช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลกระทบต่อผลกระทบบโดยการเพิ่มขึ้นของ silica fume ซึ่งการนำ ( $\text{CaOH}_2$ ) ไปใช้เป็นผลในการลดลงของ alkalinity Byfors (1987) ทำให้วัสดุประสานที่มีการปนเปื้อนมีสถานะวิกฤตลดลง ตั้งแต่การละลายของ Friedel's salt ที่เพิ่มมีการลดลง pH ของช่องว่าง Page and

Vennesland (1993) ทางด้านลบเป็นผลของซิลิกาฟุ่มที่เกี่ยวข้องกับปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ได้รับ แสดงให้เห็น โดยการทดลองที่มีการศึกษาหลายการทดลอง Hansson and Sorensen (1990) Pettersson (1993) Manera (2007)

### 2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต

Mattsson (1992) โดยเป็นที่รู้กันว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินำไปสู่การลดลงการต้านทานการกัดกร่อนมีโอกาสทำให้เหล็กเสริมของคอนกรีตเกิดสนิมได้ และเป็นที่ยอมรับหรือเป็นที่เข้าใจในเหตุผลว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่การทดลองโดยตรงยังไม่มี

Hussain and Rasheeduzzafar (1993) ได้ทำการศึกษากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่มีผลเกี่ยวข้องกับคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นในของซีเมนต์เพสต์ โดยใช้คลอไรด์ผสมกับน้ำที่มีความแตกต่างกัน 3 ค่า (0.3% ,0.6% และ 1.2% โดยน้ำหนักของคอนกรีต) และตัวอย่างได้รับการบ่มที่ 180 วันที่อุณหภูมิ 20°C หรือ 70°C ขึ้นอยู่กับวิเคราะห์การขจัดช่องว่าง ดังนั้นสรุปได้ว่าปริมาณคลอไรด์อิสระสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายที่อยู่ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีปริมาณน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออน พบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นทำให้เกิดการสลายของชั้น passive film บนผิวเหล็กเสริมนั้น อาจส่งผลจากการที่ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้น Glass and Buenfeld (1995)

Jons et al. (1994) โดยรายงานทั่วไปการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินำไปสู่การลดลงการต้านทานการกัดกร่อนของสนิมของเหล็กเสริมค่าระดับของปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำลงอย่างมาก ยังทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกจับยึด และ pH ลดลงด้วยการคาดการณ์ปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีตเสริมเหล็กจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการทดลองที่ผ่านมายังไม่มีผลการทดลองผลกระทบของอุณหภูมิโดยตรง

Hanehara et al. (2001) ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอุณหภูมิที่ใช้บ่มต่อปฏิกิริยาของเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 0,10,20,40 และ 60 ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 30 และ 50 บ่มที่อุณหภูมิ 20°C และ 40°C จากการทดลองพบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์บ่มที่อุณหภูมิ 20°C เริ่มต้นที่อายุ 28 วัน และอุณหภูมิการบ่มที่ 40°C ปฏิกิริยาเริ่มต้นที่ 7 วัน ซึ่งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาร้อยละ 12 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยส่วนมากขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้บ่ม และผลกระทบของการเกิดปฏิกิริยาของเถ้าลอยมีหลายปัจจัย คือ อุณหภูมิที่ใช้บ่ม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วนการแทนที่ในซีเมนต์ และนักวิจัยได้เสนอแนะว่าการแทนที่ในซีเมนต์ที่เหมาะสมไม่ควรเกินร้อยละ 40 ของน้ำหนักวัสดุประสาน

Gastaldi and Bertolini (2013) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสแตนเลสที่ผสมนิกเกิลต่ำของคอนกรีตเหล็กเส้นสแตนเลสเสริมของคอนกรีต ซึ่งมีจุดประสงค์หลักเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับสภาพภูมิอากาศที่ร้อน ดังนั้นมีการเลือกคุณภาพของเหล็กเสริมสแตนเลสตามสภาพภูมิอากาศและอายุการใช้งาน โดยมีข้อกำหนดของปริมาณคลอไรด์วิกฤตสำหรับการเริ่มเกิดสนิม ในเนื้อหาส่วนนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่อยู่ระหว่าง 20-60°C ซึ่งเกี่ยวข้องกับความต้านทานต่อคลอไรด์ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสแตนเลสที่ผสมนิกเกิลต่ำของคอนกรีตและเพื่อเปรียบเทียบเหล็กเสริมสแตนเลสดั้งเดิมที่ยังไม่มีการปรับปรุง โดยทดสอบของคอนกรีตและแบบจำลองคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของเหลวไปยังเหล็กเสริมเพื่อประเมินระดับคลอไรด์วิกฤตที่เริ่มเกิดสนิมจากผลการศึกษาพบความต้านทานการกัดกร่อนที่ต่ำและความว่องไวต่อการกัดกร่อนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสำหรับเหล็กเสริมสแตนเลสที่ผสมนิกเกิลต่ำของคอนกรีตเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กสแตนเลสแบบดั้งเดิม

## 2.4 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต

Angst and Vennesland (2007) การเริ่มต้นการเกิดสนิมของเหล็กเสริมต้องอาศัยออกซิเจนและน้ำ โดยกระบวนการเกิดสนิมจะเกี่ยวข้องกับการลดลงของออกซิเจนและปริมาณของน้ำเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการกระจายตัวของคลอไรด์อิสระและคลอไรด์จับ การมีทั้งออกซิเจนและน้ำนั้นส่งผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเฉพาะจุด โดยกระบวนการเกิดสนิมนั้นเกี่ยวข้องกับการลดลงของแคโทดิกของออกซิเจนและน้ำ โดยถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการกระจายของคลอไรด์อิสระและคลอไรด์จับ โดยปริมาณของน้ำที่ได้จากความชื้นสัมพัทธ์ นั้นมีผลต่อความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ ซึ่งน้ำในที่นี้หมายถึง น้ำในคอนกรีตหรือปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในคอนกรีต โดยสมมติว่า ความชื้นสัมพัทธ์มีปริมาณที่มากทำให้คอนกรีตมีอัตราการสูญเสียความชื้นหรือน้ำลดลง เมื่อความชื้นสัมพัทธ์หรือน้ำภายในคอนกรีตทำให้ความเข้มข้นของเกลือลดลง แต่ถ้าคอนกรีตมีลักษณะผิวค่อนข้างแห้งส่งผลต่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น โดยปริมาณความชื้นสัมพัทธ์หรือน้ำส่งผลต่อความเข้มข้นของเกลือภายในคอนกรีต

Tuutti (1982) การแทรกซึมของออกซิเจนสามารถผ่านเข้าไปของคอนกรีตได้ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ ด้วยเหตุนี้คอนกรีตที่ค่อนข้างแห้งจะส่งผลต่อกระบวนการเกิดสนิมแบบอเล็กโทโรไลติกจะถูกจำกัด ถ้าคอนกรีตมีผิวค่อนข้างแห้งการเกิดสนิมจะไม่เกิดขึ้น แต่ถ้ามีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์หรือน้ำอาจส่งผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้

Pettersson (1992) การเคลื่อนตัวของออกซิเจนผ่านคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ และการลดลงของการเคลื่อนตัวของออกซิเจนนั้นจะสามารถสังเกตพบได้ เมื่อโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตนั้นอิ่มตัวด้วยน้ำหรือมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง เพราะว่าออกซิเจนนั้นจะทำการแพร่ผ่านอากาศได้อย่างรวดเร็วกว่าหลายเท่ากว่าการแพร่ผ่านน้ำหรือความชื้นสัมพัทธ์ โดยออกซิเจนสามารถละลายน้ำและให้ผ่านไปกับน้ำเป็นไปได้อย่าง ยิ่งไปกว่านั้นโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่จะเกิดสนิมนั้นมีตัวแปรที่สำคัญของการเริ่มเกิดสนิมจะเกี่ยวข้องกับการมีอยู่ของปริมาณออกซิเจนอิสระ โดยโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจะลดลงเมื่อออกซิเจนละลายน้ำได้น้อย ซึ่งหมายความว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตจะมีค่าสูง ถ้าเหล็กเสริมของคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำหรือปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง

Hussain (2010) ได้ศึกษาการสำรวจผลการของความชื้นความสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน อัตราการใช้ออกซิเจนที่ทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต ภายใต้สภาวะภาพ macro-cell cathodic reaction ที่เคยมีการวิจัยข้อมูลที่อยู่ในขอบเขต โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อพิจารณาเกี่ยวกับคุณสมบัติตลอดจนด้านปริมาณของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ออกซิเจนในการเกิดสนิมของคอนกรีตเสริมเหล็กคาร์บอนที่ปนเปื้อนคลอไรด์ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์เพียงพอลดจนเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมตามวัตถุประสงค์ของการเกิดสนิม โดยการแบ่งขั้วบวกและขั้วลบเหล็กเสริม ภายใต้เงื่อนไขความแตกต่างทางด้านสิ่งแวดล้อม (สภาพอากาศแห้ง การแช่น้ำ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 95% และสภาวะเปียกสลับแห้ง) และได้รับการทดสอบจากห้องปฏิบัติการภายใต้การควบคุมอย่างเข้มงวด โดยการวิเคราะห์ผลการทดสอบนี้เป็นไปได้ที่พฤติกรรมของความต้องการใช้ออกซิเจนในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตที่ปนเปื้อนคลอไรด์ภายใต้ความชื้นที่สภาพแวดล้อมแตกต่างกัน

## 2.5 วัสดุปอชโซลาน

### 2.5.1 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอย (Fly ash) คือ ขี้เถ้าที่เหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินหรือลิกไนต์ มีขนาดเล็กและละเอียดมาก ประกอบด้วยสารซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) โดยจะปลิวปนไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควันของโรงผลิตไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งถ้ามีปริมาณเถ้าปลิวมากในชั้นบรรยากาศ ก็อาจก่อให้เกิดปัญหาหมอกควันของอากาศได้ จึงได้มีการศึกษาวิจัยโดยการติดตั้งเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกก๊าซร้อนและเถ้าปลิวออกจากกัน เพื่อนำเอาเถ้าปลิวกลับมาใช้ใหม่ เช่น การนำเอาเถ้าปลิวมาใช้เป็นส่วนผสมของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในกระบวนการผลิตคอนกรีต

### ชนิดของเถ้าลอย

เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินบด มีความละเอียดสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ช่วงเปิด 75 มม.) ในปริมาณร้อยละ 70-80% โดยน้ำหนัก

ประเภทของเถ้าลอยแบ่งตามมาตรฐาน ASTM C618

1. เถ้าลอย Class F ได้จากการเผาถ่านหินประเภท แอนทราไซต์ หรือ บิทูมินัส
2. เถ้าลอย Class C ได้จากการเผาถ่านหินประเภท ซัมบิทูมินัส หรือ ลิกไนต์

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C168 (%)

คุณสมบัติ	ชนิด	
	Class F	Class C
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70	50
SO <sub>3</sub> มากที่สุด	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นมากที่สุด	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของ Na <sub>2</sub> O มากที่สุด	1.5	1.5

### คุณสมบัติของเถ้าลอย รูปร่างของอนุภาคเถ้าลอย

ความละเอียดและรูปร่างของเถ้าถ่านหิน ยังขึ้นอยู่กับกระบวนการบดถ่านหินที่จะนำไปเผา ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา กล่าวคือ ถ้าวบถ่านหินละเอียดมากขึ้นและเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผา จะทำให้ได้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงกว่า เมื่อใช้ถ่านหินที่บดหยาบกว่าหรือเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีถ่านหินปนอยู่จำนวนมาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถ่านหินที่บดละเอียดจะมีขนาดใหญ่กว่าเถ้าถ่านหินมาก ดังนั้นความละเอียดของเถ้าถ่านหินจึงขึ้นกับปัจจัยหลายประการด้วยกัน

ตัวอย่างที่พบคือ ผลการทดสอบความละเอียดของเถ้าถ่านหินจำนวน 12 ตัวอย่างที่เหมืองแม่เมาะ พบว่ามีความละเอียดในช่วง 2130 ถึง 3650 ซม.<sup>2</sup>/ก. ซึ่งถือว่ามีความแตกต่างกันค่อนข้างสูง แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องความละเอียดของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตส่วนใหญ่แล้วสอดคล้องกัน กล่าวคือ หากเถ้าถ่านหินมีความละเอียดมากขึ้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า

### ความละเอียดของเถ้าลอย

เถ้าลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งสารนี้เป็นวัสดุที่มีซิลิกา และอลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้วสารปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าสารปอซโซลานมีความละเอียดมากๆ และมีน้ำเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติยึดประสานเถ้าลอยลิกไนต์โดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ลักษณะทั่วไปเป็นรูปทรงกลม มีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มิลลิเมตร) จนถึง 150 ไมโครเมตร (0.15 มิลลิเมตร) ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.00-2.60 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ เฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ, สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C 618 ได้จัดแยกประเภทของเถ้าลอยไว้ 2 ชนิดคือ Class F และ Class C โดย Class F มีปริมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่า 70% โดยน้ำหนัก และ Class C มีปริมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ระหว่าง 50-70% โดยน้ำหนัก เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติย่อมมีเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ การที่เถ้าลอยจากแหล่งเดียวกันพบว่าเป็น Class C และ Class F เป็นเรื่องที่เป็นปกติ แม้ว่าจะเป็น Class C หรือ Class F ต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้ทั้งสิ้น

### ผลกระทบของเถ้าลอยต่ออัตราส่วนผสมคอนกรีต

ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสถานะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลักกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพิ่มฟองอากาศมากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตรงตามที่ต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่การใช้งานเถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตสามารถใช้เพื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสานหรือใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีทรงกลมจึงทำให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีขึ้น และต้องการน้ำลดลง การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้ค่ากำลังอัดที่อายุต้นของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหิน แต่จะมีค่ากำลังสูงกว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น

### 2.5.2 ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume)

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) เป็น วัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon metal และ Ferrosilicon alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง  $2000^\circ\text{C}$  ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ  $\text{SiO}$  ซึ่งต่อมาจะออกไซด์ (Oxidize) และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1  $\mu\text{m}$  และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25  $\text{m}^2/\text{g}$  (โดยวิธี Nitrogen

Absorption) ขนาดของซิลิกาฟุ้ง (0.1 mm) เป็นขนาดที่เล็กมากๆ กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่าเนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่เล็กมากๆจึงมีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ทำให้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมากปัญหาของซิลิกาฟุ้งที่พบบ่อยเมื่อใช้ของคอนกรีต คือ ต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิม สาเหตุเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆของซิลิกาฟุ้งจึงมีการใช้น้ำที่ค่อนข้างสูงในการเคลือบผิวหน้าโรงงานของ Silicon Metal and Ferrosilicon Alloy จะมีผลพลอยได้ของซิลิกาฟุ้งที่ร้อยละ 75 หรือมากกว่าจะประกอบด้วยซิลิกอนกว่าร้อยละ 85 ถึง 95 ที่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกซึ่งพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนในโรงงาน Ferrosilicon จะมีผลพลอยได้ของซิลิกอนประมาณร้อยละ 50 และพบว่าซิลิกาที่มีอยู่จะน้อยและเป็นผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟุ้งเหล่านี้ของคอนกรีตไม่คืนกเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ

### ชนิดของซิลิกาฟุ้ง

ถ้ำลอยเป็นของแข็งเม็ดกลมมีความละเอียด ซึ่งลอยขึ้นมาพร้อมกับอากาศที่ร้อน ที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่บดละเอียด (Pulverized Coal) ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และจะถูกจับด้วยเครื่องดักจับ (Precipitator) หลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังถังเก็บ ซึ่งถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงนี้ประกอบไปด้วย สารประกอบคาร์บอนและแร่ธาตุอื่น ๆ เช่น ดินดาน ดินเหนียว ซัลไฟด์ และคาร์บอนเนต เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงในเตาเผา คุณสมบัติของสาร ประกอบต่าง ๆ ในถ่านหินจะเปลี่ยนไป ทั้งทางด้านกายภาพและด้านเคมี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเตาเผา รวมทั้งวิธีการที่ทำให้เย็นตัวของถ้ำลอย ซึ่งถ้ำลอยนี้ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิกา และอะลูมินา

### คุณสมบัติทางกายภาพ รูปร่างของอนุภาคและความละเอียดของซิลิกาฟุ้ง

คุณสมบัติ ทางกายภาพของซิลิกาฟุ้งที่เห็นชัดเจนคือเป็นฝุ่นผงสีค่อนข้างดำหรือเทาหรือเทาอมขาวที่ละเอียดมาก แต่ถ้าเป็นคอนกรีตซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของ ซิลิกาฟุ้งหลายๆเม็ดเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ้งมีค่าประมาณ 2.2 ความละเอียดทดสอบโดยวิธีของเบลนมีค่าประมาณ 150,000 ซม<sup>2</sup>/ก ขณะที่ของปูนซีเมนต์มีค่าเพียง 3400 ซม<sup>2</sup>/ก ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเมื่อขยายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 mm ขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าประมาณ 15 mm เนื่องจากมีขนาดที่เล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย ดังนั้นจึงนิยมนำซิลิกาฟุ้งมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า คอนกรีตซิลิกาฟุ้ง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ้ง, ถ้ำถ่านหิน, และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถในตารางที่ 2.3



ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม, ฝ้าถ่านหิน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ I	ฝ้าถ่านหิน	ซิลิกาฟูม
ความละเอียดของเบรต (ชม <sup>2</sup> /ก)	3400	3800	150,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.4	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม หรือสีน้ำตาล	เทาดำ, เทาอมขาว

#### ผลกระทบของซิลิกาฟูมต่ออัตราส่วนผสมคอนกรีต

ผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อความสามารถในการเทและการเข้มน้ำ: เนื่องจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงมาก ดังนั้นเมื่อใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้น ซึ่งแนวทางแก้ไขในปัญหานี้คือการใช้สารลดน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษเข้าช่วยเพื่อไม่ให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตสูงจนเกินไปเพราะจะทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลงตามกฎของ Abram's ส่วนการเข้มน้ำของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมพบว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้ซิลิกาฟูม

#### การต้านทานการกัดกร่อนต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม

การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมี จากการวิจัยพบว่าการใช้ซิลิกาฟูมของคอนกรีตช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต การแทรกซึมคลอไรด์ รวมถึงการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำเค็ม (น้ำทะเล) การกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีที่กล่าวมาข้างต้นลดลงเนื่องมาจากการที่โครงสร้างของ Pore ของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กลงนั่นเองการต้านทานการแข็งตัวและละลายน้ำสลับกัน การใช้ซิลิกาฟูมสามารถเพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันได้ดีกว่ากรณีที่ไม่มีซิลิกาฟูม ซึ่งอาจเนื่องจากการที่ค่าซึมผ่านน้ำต่ำและโครงสร้างของ Pore ที่เล็กลง จึงทำให้น้ำที่ค้างอยู่ภายในมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของคอนกรีตทั่วไป

### 2.5.3 ซีโอไลท์สังเคราะห์ (Zeolite)

ซีโอไลท์สังเคราะห์คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลท์สังเคราะห์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม ( $\text{SiO}_4$  หรือ  $\text{AlO}_4$ ) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลท์สังเคราะห์เป็นผลึกแข็งเป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ  $1 \times 10^{-10}$  เมตร) นอกจากซิลิคอน(หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ใน โครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลท์สังเคราะห์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างใน โครงผลึก สามารถดื่มให้เดือดระเหยออกไปได้ ทำให้เป็นที่มาของชื่อซีโอไลท์สังเคราะห์นั่นเอง

ซีโอไลท์สังเคราะห์นั้นอาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของแร่ธาตุ มีการทำเป็นเหมือนซีโอไลท์สังเคราะห์ในพื้นที่หลายแห่งของโลก หรืออาจสังเคราะห์ขึ้นได้โดยกระบวนการทางเคมีเพื่อประโยชน์ทางการค้า ซึ่งจะทำได้ซีโอไลท์สังเคราะห์ที่มีสมบัติเฉพาะเจาะจง รวมทั้งอาจมีการสังเคราะห์ซีโอไลท์สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อประโยชน์ในการศึกษาลักษณะทางเคมีของซีโอไลท์สังเคราะห์เองด้วย

ซีโอไลท์สังเคราะห์นั้นมีมากกว่า 600 ชนิด แต่สามารถแบ่งกลุ่มตามชนิดของ โครงสร้างได้ประมาณ 40 ชนิด ซึ่งความแตกต่างใน โครงสร้างนี้มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของซีโอไลท์สังเคราะห์ เช่น โครงสร้างผลึก ความหนาแน่น ขนาดของโพรง ความแข็งแรงของพันธะ เป็นต้น การจำแนกชนิดของซีโอไลท์สังเคราะห์นั้นอาศัยขนาดและรูปร่างของโพรงซีโอไลท์สังเคราะห์เป็นหลัก ซึ่งจะทำให้น้ำซีโอไลท์สังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกันไป

ลักษณะสำคัญที่ทำให้ซีโอไลท์สังเคราะห์กลายเป็นสารสารพัดประโยชน์ก็คือ โครงสร้างที่เป็นรูพรุนอย่างเป็นระเบียบของซีโอไลท์สังเคราะห์ ซึ่งอาจใช้เป็นตัวกรองสารที่ต้องการ โดยโมเลกุลที่เล็กกว่าขนาดโพรงซีโอไลท์สังเคราะห์ก็จะสามารถผ่านไปได้ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านออกมา และ โมเลกุลที่ต้องการซึ่งมีขนาดพอดีกับโพรงซีโอไลท์สังเคราะห์ก็ จะถูกกักไว้ภายในโพรง

แต่ในการประยุกต์ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ในการถักนปีโครเลียมให้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ปีโครเลียมอื่นๆ นั้น ปัจจัยสำคัญมิใช่เรื่องขนาดของโพรงซีโอไลท์สังเคราะห์อย่างเดียว แต่ยังมีสมบัติทางเคมีของอะตอมที่อยู่รอบๆ โครงสร้างผลึกที่มีส่วนทำให้เกิดผลที่ต้องการด้วย เช่น ในบางกรณีที่เราต้องการทำให้สารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ (ในกระบวนการปีโครเคมี)แตก

ออกกลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลง เพื่อให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้นั้น การแตกออกของโมเลกุลใหญ่ๆ ก็เกิดจากการที่โมเลกุลทำปฏิกิริยากับอะตอมที่อยู่รอบๆ โพรงซีโอไลท์สังเคราะห์นั่นเอง

### ชนิดของซีโอไลท์สังเคราะห์

ซีโอไลท์สังเคราะห์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ ซีโอไลท์สังเคราะห์ที่พบตามธรรมชาติ (natural or mineral zeolite) และที่สังเคราะห์ขึ้น (synthetic zeolite) ซีโอไลท์สังเคราะห์แต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ที่พบตามธรรมชาติมีมากกว่า 35 ชนิด ส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์สังเคราะห์ขึ้นมีถึงประมาณ 100 ชนิด ซีโอไลท์สังเคราะห์มี 2 ชนิด ดังนี้

1. ซีโอไลท์สังเคราะห์ที่เกิดตามธรรมชาติ (natural or mineral zeolite) ประกอบด้วย Hydrated Alumino Silicates ของ Alkaline และ Alkaline-Earth Metals ซึ่งซีโอไลท์สังเคราะห์ธรรมชาติจะมีน้ำหนักเบา เป็นแร่ที่มีความนุ่ม มีสีน้ำตาล น้ำตาลเหลืองหรือสีเขียวจาง มีลักษณะคล้ายขอล็ก ซีโอไลท์สังเคราะห์ธรรมชาติที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 3 ชนิด คือ Clinoptilolite , Chabazite และ Mordenite บางอุตสาหกรรมอาจจะใช้ Phillipsite ชนิดของซีโอไลท์สังเคราะห์ที่สำคัญคือ (วัฒนชัย, 2546)

ในสภาพธรรมชาติพบแร่ซีโอไลท์สังเคราะห์ประมาณ 50 ชนิด แต่ที่พบบ่อยและมีปริมาณค่อนข้างสูงในดินมีเพียง 9 ชนิดเท่านั้น ได้แก่ Clinoptilolite, Analcime , Chabazite , Heulandite , Mordenite , Phillipsite , Natrolite , Stilpite และ Gesmondine แร่ทั้ง 9 ชนิด ในกลุ่มนี้ Clinoptilolite และ Mordenite เท่านั้นที่พบมากในดินทั่วไป (ปริดาและคณะ, 2535)

2. ซีโอไลท์สังเคราะห์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (synthetic zeolite) เกิดจากการทำปฏิกิริยาเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Na_2O$  และ  $K_2O$  ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของซีโอไลท์สังเคราะห์ที่มีน้ำผลึกและการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดได้ตั้งแต่เป็นเจล (gelatin) จนถึงรูปที่เป็นรูพรุน (porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (sandlike) ได้แก่ Zeolite A, Zeolite Y, Zeolite F, Zeolite M เป็นต้น

ซีโอไลท์สังเคราะห์ ได้ชื่อว่าเป็น Molecular sieve เนื่องจากโมเลกุลมีช่องว่างที่สม่ำเสมอจำนวนมากซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติคล้าย sieve บนโมเลกุลที่มีช่องว่างที่สม่ำเสมอเนื่องจากซีโอไลท์สังเคราะห์มีมากมายหลายชนิดและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซีโอไลท์สังเคราะห์แต่ละชนิดจึงมีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อจะนำไปใช้งานในด้านใดจึงควรศึกษาคุณสมบัติให้เหมาะสมก่อนเพื่อให้สามารถใช้งานได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด

ปัจจุบันในต่างประเทศมีการศึกษาวิจัยและนำซีโอไลท์สังเคราะห์มาใช้ในงานคอนกรีตอย่างมาก โดยเฉพาะประเทศที่มีภูมิศาสตร์เป็นภูเขาที่มีแหล่งซีโอไลท์สังเคราะห์จากธรรมชาติมากมายและมีการนำ ซีโอไลท์สังเคราะห์มาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย

## 2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกับปริมาณคลอไรด์วิกฤต

### 1) คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

Dhir and Jones (1999) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการ low-lime เถ้าลอยสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงในการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีการปรับปรุงทั้งทางด้านความต้านทานทางกายภาพ เพื่อป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์และเกี่ยวข้องกับความจุของไอออนเหล่านี้ในระบบที่ปิด ซึ่งรวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของผลผลิตเถ้าลอย โดยลดอัตราส่วน water/binder ของคอนกรีต การวิเคราะห์ผลเถ้าลอยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติและสุดท้ายส่วนผสมที่ประกอบด้วยซิลิกาฟูมหรือ metakaolin วิธีการที่ใช้ในปัจจุบันเพื่อเป็นการแสดงให้เห็นในระดับที่สูงของการต้านทานคลอไรด์ การจัดหมวดหมู่ที่แน่นอนของสถานะที่คั่งอยู่ร่วมกับคลอไรด์ คำแนะนำสำหรับคุณสมบัติของคอนกรีตสำหรับโครงสร้างที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมเหล่านี้

Thomas (1996) ได้ทำการศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤต และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของเหล็กของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ซึ่งแช่ในน้ำทะเลอยู่ในช่วงอายุ 1 ถึง 4 ปี โดยใช้วิธีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตเพื่อหาระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤต จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น (0%, 15%, 30% และ 50%) มีผลทำให้ระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตมีค่าลดลง (0.70%, 0.65%, 0.50% และ 0.20%) แต่อย่างไรก็ดี การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยมีผลทำให้การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมีค่าลดลง

Oh and Jang (2005) ได้รับการศึกษาในระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต จากการศึกษาพบว่า การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0, 15, และร้อยละ 30 มีผลทำให้ระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตลดลงเป็น 0.93%, 0.90%, และ 0.68% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์มีผลต่อระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤต โดยในปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $C_3A$  สูง ระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตจะสูงตามไปด้วย

### 2) คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม

Kayali and Zhu (2004) ได้ทำการศึกษาคอนกรีตที่มีกำลังสูงโดยใช้ซิลิกาฟูมผสมในซีเมนต์เพื่อทำเป็นพื้นคอนกรีต โดยมีกำลังอัดที่ 70 MPa ได้รับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ และการเกิดสนิมหลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลายที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ 2 เปอร์เซ็นต์ในลักษณะเดียวกัน การใช้คอนกรีตธรรมดาที่ไม่ผสมซิลิกาฟูมมีกำลังอัดที่มีการทดสอบในบางสภาพแวดล้อม การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูงอยู่ในระดับที่ต่ำมากในทางตรงกันข้ามระดับความเข้มข้นของคลอไรด์สูงมีผลดีกว่าจากที่สังเกตความลึกของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่มีกำลัง 32 MPa สักยภาพการเกิดสนิมของคอนกรีตกำลังที่ 32 MPa เป็นไปอย่างต่อเนื่องค่าที่ได้รับเป็นค่าลบที่เกินกว่าค่าเกณฑ์ของ -350 mV (CSE) สักยภาพของคอนกรีตที่มีกำลังสูงค่อนข้างเสถียรและอยู่บริเวณใกล้เคียงที่ -200 mV (CSE) ความหนาแน่นของการเกิดสนิมที่คอนกรีตที่มีกำลังทั่วไปที่

32 MPa ค่าที่ได้มานำไปใช้ในระยะเวลาอันสั้นของคอนกรีตที่มีกำลังสูงความหนาแน่นการเกิดสนิมไม่สามารถเกิดในระยะเวลาอันสั้นของการบ่มในขณะที่ดังกล่าวการพัฒนาไม่มีผลกระทบต่อคอนกรีตธรรมดาที่มีกำลัง 32 MPa ดังนั้นสรุปได้ว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงที่มีซิลิกาฟุ่ม 10 % ป้องกันในสภาวะที่มีการเกิดสนิมสูง

Duusti et al. (2013) ได้การศึกษาหัวข้อในเรื่องนี้เป็นการตรวจสอบผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิตั้งแต่ 22°C ถึง 50°C ซึ่งมีผลต่อการแทรกซึมของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันโดยคอนกรีตมีส่วนผสมจากซิลิกาฟุ่มหรือซีโอไลต์ธรรมชาติ ผลลัพธ์ที่แสดงให้เห็นว่าการแพร่กระจายและระยะความลึกการแทรกซึมเนื่องจากคลอไรด์เพิ่มขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานแสงทำให้มีอุณหภูมิเกิดขึ้น ซึ่งเป็นข้อตกลงกับทฤษฎีของ Arrhenius คอนกรีตที่ผสมสารผสมเพิ่มมีความต้านทานต่อการแพร่ของคลอไรด์ คอนกรีตได้รับการปรับปรุงโดยใช้ซิลิกาฟุ่มและซีโอไลต์ธรรมชาติ โดยไม่คำนึงถึงอุณหภูมิเนื่องจากแสง ทำให้ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นมากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการใช้สารผสมเพิ่มทดแทนในปูนซีเมนต์บางส่วน โดยใช้ซิลิกาฟุ่มและซีโอไลต์ธรรมชาติ นอกจากนี้ซิลิกาฟุ่มมีประสิทธิภาพมากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติในการปรับปรุงการต้านทานคลอไรด์ที่ระดับเดียวกัน พลังการกระตุ้นของซีโอไลต์ธรรมชาติและซิลิกาฟุ่มของคอนกรีตทั้งหมด 20–29 kJ/mol และ 26–31 kJ/mol ตามลำดับ แต่มีค่าพลังงานต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการควบคุม (32 kJ/mol) อย่างไรก็ตาม ไม่มีแนวโน้มที่พบว่าการแทนที่ด้วยปริมาณของซิลิกาฟุ่มและซีโอไลต์ที่มีผลต่อค่าพลังงานกระตุ้นของคอนกรีต นอกจากนี้ในระดับเดียวกันมีการแทนที่ 10 % ของค่าพลังงานกระตุ้นของคอนกรีตที่มีซีโอไลต์สูงกว่าของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่ม

Manera et al. (2007) ได้ทำการศึกษาระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตล้วนและคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่ม 10% โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และเลือกใช้เหล็กเสริม 2 ชนิด คือ เหล็กเสริมแบบเรียบ (Smooth bar) และเหล็กเสริมแบบข้ออ้อย (Ribbed bar) จากการศึกษาพบว่าระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตของปูนซีเมนต์อยู่ระหว่าง 1.1-2% (โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) และสำหรับคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่ม 10% อยู่ระหว่าง 0.6-1.2% (โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) และการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมทั้งสองแบบ มีผลไม่ต่างกัน นอกจากนี้พบว่าเหล็กเสริมที่เคลือบมาจากโรงงานมีค่าการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กเสริมที่ผ่านการขัด

ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์ และ คณะ (2554) ได้ทำการศึกษาซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กกว่าผงปูนซีเมนต์มาก จึงเข้าไปอัดแน่นในช่องว่าง ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์และคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้การที่ซิลิกาฟุ่มมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบกว่าร้อยละ 90 ทำให้สามารถทำ ปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว เพิ่มปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มจะมีคุณภาพดีกว่าเพสต์ธรรมดา

### 3) คอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์

ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม โดยนำซีโอไลท์จากการสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน คววมุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.35 ศึกษาผลกระทบของซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในเพสต์ โดยวิธี *Thermal Diffractometer Gravity Analysis (TGA/DTA)*, *X-Ray Diffractometer Analysis (XRD)*, ถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง *Scanning Electron Microscope (SEM)* และทดสอบหาความพรุนโดยวิธี *Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)* ผลการทดสอบพบว่าปริมาณการแทนที่ของซีโอไลท์สังเคราะห์มีผลกระทบที่สำคัญต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ในอัตราการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงและปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น และผลของภาพถ่ายพื้นผิวของตัวอย่างด้วย SEM พบว่าเพสต์ที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์โครงสร้างของเพสต์มีความหนาแน่นขึ้น การแทนที่ซีโอไลท์สังเคราะห์ในเพสต์มีผลกระทบที่สำคัญต่อปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาปิลลารีของเพสต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ในอัตราการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์เพิ่มขึ้นแต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง และโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่โพรงคาปิลลารีขนาดกลางเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์

Canpolat et al. (2004) ได้ทำการศึกษาผลของซีโอไลท์สังเคราะห์ธรรมชาติ เถ้าถ่านหิน และเถ้าลอย เป็นวัสดุที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีคุณสมบัติด้านการเชื่อมประสานที่ได้ผ่านการทดสอบที่แตกต่างกันของการทดลองทั้งสามอย่าง วัสดุดังกล่าวได้รับการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ส่วนผสมต่างๆ และทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพจากค่าต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว การขยายตัวของปริมาตร กำลังอัดประลัย และความชื้นเหลือของมอร์ต้า ดังนั้นคุณสมบัติทางกายภาพดังกล่าวที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลของตัวอย่าง ไม่ได้ใส่วัสดุผสมเพิ่มแล้ว ปรากฏว่าการแทนที่ของวัสดุนั้นมีอิทธิพลบางอย่างต่อคุณสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์ กล่าวคือ กำลังอัดประลัยนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาแรก เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของซีโอไลท์สังเคราะห์ถึงระดับที่ 15 % แต่ปรากฏว่าเกิดการลดลงของค่ากำลังอัดประลัยเมื่อใช้ในการผสมกับเถ้าลอย เช่นเดียวกันสำหรับ ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลง เมื่อมีการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ในการแทนที่ ทั้งนี้ผลการทดลองได้รับการเปรียบเทียบกับ Turkish Standard (TS) และยังทราบว่าค่าต่างๆ ดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่าความต้องการขั้นต่ำ

Ikotun and Ekolu (2009) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพ และพฤติกรรม ทางด้านความแข็งแรง และความคงทน ของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ (PWC) และสารผสมเพิ่มที่

ผสมกันระหว่างสารที่มีคุณสมบัติเป็นด่างที่ได้รับการคัดเลือก กับซีโอไลท์สังเคราะห์สังเคราะห์ ในการวิจัยนี้ ตัวอย่างคอนกรีตได้ถูกเตรียมโดยการผสม ซีโอไลท์สังเคราะห์สังเคราะห์และ/หรือ เถ้าลอย 30% ในส่วนผสม ซึ่งซีโอไลท์สังเคราะห์สังเคราะห์ถูกใช้ที่สัดส่วน 0.6% 0.8% และ 1.0% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และที่อัตราส่วนน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 นั้น ได้ถูกทดสอบความสามารถเท่าใด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าแยก กำลังอัดประลัย การซึมผ่านของออกซิเจน การดูดซึมน้ำ และความพรุน พฤติกรรมของรูปแบบการยึดประสานกันในปฏิกิริยาไฮเดรชัน และประสิทธิภาพของสารผสมเพิ่มซีโอไลท์สังเคราะห์สังเคราะห์ ที่ถูกศึกษาโดยการใช้ Differential thermal analysis และ Thermogravimetric analysis ในปฏิกิริยาปอซโซลาน จากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าซีโอไลท์สังเคราะห์สังเคราะห์มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตเมื่อใช้สัดส่วนผสมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ที่ 0.6%-1.0% ส่วนคุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่ถูกปรับปรุงนั้น ไม่ได้คำนึงถึงการใส่ PWC ในสัดส่วนของการผสม ในขณะที่การซึมผ่านของออกซิเจนของคอนกรีตจะถูกปรับปรุงที่การใช้เถ้าลอย 30% เท่านั้น และจะพบว่าซีโอไลท์สังเคราะห์สังเคราะห์นั้นมีประสิทธิภาพมากเมื่อใช้รวมกันกับเถ้าลอย

## 2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดคอนกรีต

Bakker (1988) ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และประเภทของปูนซีเมนต์จะเป็นตัวบอกคุณภาพด้านความซึมผ่านได้ต่ำของคอนกรีตคุณภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับทำให้คอนกรีตแน่นและเงื่อนไขการบ่มความซึมผ่านได้ต่ำสำหรับคลอไรด์ของคอนกรีตผสมสารปอซโซลานิกที่บ่มอย่างดีจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมสารปอซโซลานิกที่มีส่วนผสมเหมือนกันและพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตซึ่งมี  $C_3A$  ต่ำให้ค่าต่อการต้านทานการแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

Bentz (2002) ได้ทำการศึกษาถึงปริมาณช่องว่างในเนื้อคอนกรีตที่เป็นผลกระทบจากการความชื้นสัมพัทธ์ในการบ่ม โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย กับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 จากการศึกษาพบว่าอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีผลต่อการบ่มของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย โดยพบว่าปฏิกิริยาของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้า แต่จะทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องและยาวนาน จึงต้องการการบ่มมากกว่า การบ่มคอนกรีตที่ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดความต่อเนื่องของช่องว่างของคอนกรีตหรือปริมาณช่องว่างเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำ หรือสารเคมีเช่นคลอไรด์ และคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น และส่งผลให้ความคงทนของคอนกรีตลดลง

Ozer and Ozkul (2003) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในการบ่มต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานิก เพื่อ

หากำลังของคอนกรีตที่อายุ และเงื่อนไขการบ่มที่แตกต่างกัน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอซแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยวัสดุปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ที่ทำจากหินภูเขาไฟ โดยทำการบ่มขึ้นที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ทดสอบกำลังที่อายุ 7, 14, 28, 90 และ 180 วัน ซึ่งควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ 65-75 % ค่าการยุบตัวของคอนกรีต 10-12 ซม. ออกแบบกำลังอัดที่ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 30 MPa ทรงลูกบาศก์ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการบ่มมีผลกระทบต่อคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซแลนด์และปอซโซลานซีเมนต์ แต่การบ่มที่ไม่เพียงพอจะส่งผลกระทบต่อคอนกรีตที่ใช้ปอซโซลานซีเมนต์มากกว่า สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปอซโซลานซีเมนต์จะต้องทำการบ่มขึ้นอย่างน้อย 14 วัน จึงจะมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุน้อยกว่า 2 เดือน แต่ถ้าหากบ่มขึ้นเพียงแค่ 3 วันหรือน้อยกว่านั้นกำลังอัดจะไม่สามารถเทียบเท่ากับกำลังอัดของคอนกรีตปอร์ตแลนด์ได้เลย และกำลังอัดที่อายุ 90-180 วัน คอนกรีตที่ผสมปอซโซลานจะมีกำลังอัดสูงกว่าเนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนจะเกิดการแตกร้าวจากการหดตัวแบบแห้ง เมื่อทดสอบกำลังอัดจึงได้ค่าต่ำกว่า

Goyal et al. (2008) ได้ทำการศึกษาผลของปอซโซลานต่อกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การบ่มขึ้นที่ต่างกัน โดยใช้ซิลิกาฟูมและเถ้าลอยผสมของคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.25, 0.35 และ 0.45 อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 5 และ 10 สำหรับซิลิกาฟูมและร้อยละ 30 สำหรับเถ้าลอย และอัตราส่วนการแทนที่สำหรับวัสดุประสานรวม 3 ชนิด คือ ใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ 5 กับเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 20 และใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ 10 กับเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 20 ศึกษาการบ่มที่ 5 แบบ คือ บ่มขึ้นตลอดเวลาที่อุณหภูมิ 25+2°C, บ่มในอากาศในห้องทดลอง ที่อุณหภูมิ 25+2°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50+-10% บ่มขึ้นที่ 7 วัน หลังจากนั้นบ่มในอากาศ, บ่มขึ้นที่ 28 วัน หลังจากนั้นบ่มในอากาศ และบ่มขึ้นที่ 14 วัน หลังจากนั้นบ่มขึ้นและบ่มแห้งที่ 7 วัน ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน จากผลการทดสอบพบว่าเงื่อนไขการบ่มขึ้นมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตทุกๆ ส่วนผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานจะส่งผลกระทบต่อมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช่ คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมควรบ่มขึ้นอย่างน้อย 7 วัน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยควรบ่มขึ้นให้นานขึ้น

Atis et al. (2004) ศึกษาอิทธิพลของการบ่มแห้งและการบ่มเปียกของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม โดยศึกษากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้เงื่อนไขของการบ่มแห้งและบ่มเปียก ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตล้วนที่ใช้ขนาดปูนซีเมนต์ 350, 400 และ 450 กก./ตร.ม. กับคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10, 15 และ 20 บ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 18-22 °C ทดสอบกำลังที่อายุ 28 วัน ผลทดสอบกำลังอัดที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 65% (บ่มแห้ง) พบว่าอิทธิพลของการบ่มมีผลต่อคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมและมีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% (บ่มเปียก) อยู่ 13% และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมี



อิทธิพลต่อการบ่มชื้นมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะทำให้เพิ่มช่องว่างและความพรุนของคอนกรีตมากขึ้น จึงทำให้น้ำของคอนกรีตสามารถระเหยได้เร็วขึ้น

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

สำหรับการศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตในสถานะต่างๆ ได้ดัดแปลงวิธีการทดสอบมาจากมาตรฐาน ASTM G 109 โดยมีรายละเอียดดังนี้

หล่อตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM G 109-99a ตัวอย่างมีขนาด 115x150x280 มิลลิเมตร<sup>3</sup> โดยทำการฝังแม่เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 380 มิลลิเมตร 3 เส้น ทำการเคลือบอีพ็อกซีและพันเทปพันสายไฟฟ้าไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของเหล็กเสริม บ่มตัวอย่างด้วยความชื้นเป็นเวลา 7 และ 28 วัน จากนั้นติดตั้งตัวความต้านทานไฟฟ้า 100 โอห์ม ไว้ที่ปลายเหล็กเสริมทั้ง 3 เส้น และติดตั้งชุดแผ่นอะคริลิกสำหรับขังสารละลายคลอไรด์ไว้ด้านบนของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดลองปริมาณคลอไรด์วิกฤตจะถูกจำลองสถานะสิ่งแวดล้อมของการทดสอบโดยการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยการใส่สารละลายคลอไรด์ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก ลงในชุดแผ่นอะคริลิกและทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการเทสารละลายออกและทิ้งไว้ให้แห้งอีก 24 ชั่วโมงสำหรับ ตัวอย่างที่เป็นการทดสอบในสถานะเปียกสลับแห้ง

### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

#### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม (มอก. 15-2532)

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้นิยมใช้กันมากในงานคอนกรีตโดยเหมาะกับการใช้งานที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดาใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานรากของอาคารถนนเป็นต้นในการวิจัยนี้ใช้ปูนตราช้าง (ช้างแดง)



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ปูนตราช้างแดง)

2. เถ้าลอย (Fly ash) คือขี้เถ้าที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินหรือลิกไนต์มีขนาดเล็กและละเอียดมากประกอบด้วยสารซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) โดยจะปลิวปนไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควันของโรงผลิตไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงซึ่งถ้ามีปริมาณเถ้าปลิวมากในชั้นบรรยากาศก็อาจก่อให้เกิดปัญหาภาวะของอากาศได้ จึงได้มีการศึกษาวิจัยโดยการติดตั้งเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกก๊าซร้อนและเถ้าปลิวออกจากกันเพื่อนำเอาเถ้าปลิวกลับมาใช้ใหม่เช่นการนำเอาเถ้าปลิวมาใช้เป็นส่วนผสมของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในกระบวนการผลิตคอนกรีตเป็นต้น



รูปที่ 3.2 เถ้าลอย

3. ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon metal และ Ferrosilicon alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ  $\text{SiO}$  ซึ่งต่อมาจะออกซิไดซ์ (Oxidize) และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25 มิลลิกรัม (โดยวิธี Nitrogen absorption) ขนาดของซิลิกาฟุ้ง ( $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ) เป็นขนาดที่เล็กมากๆ กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่าเนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่เล็กมากๆ จึงมีพื้นที่ผิวสูงมากและอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกทำให้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมากปัญหาของซิลิกาฟุ้งที่พบบ่อยเมื่อใช้ของคอนกรีตคือต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิมสาเหตุเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆ ของซิลิกาฟุ้งจึงมีการใช้น้ำที่ค่อนข้างสูงในการเคลือบผิวหน้า



รูปที่ 3.3 ซิลิกาฟูม

4. ซีโอไลต์สังเคราะห์ (Synthetic Zeolite) เป็นสารประกอบประเภทอะลูมิโนซิลิเกตที่มีลักษณะโครงสร้างเป็น 3 มิติอเนตรกลางเป็นโลหะที่ยึดกันด้วยแรงทางไฟฟ้าซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนของโลหะอื่นได้ประเภทสารประกอบซีโอไลต์สังเคราะห์มี 2 ชนิดคือซีโอไลต์สังเคราะห์ตามธรรมชาติและสังเคราะห์ซึ่งมนุษย์ได้นำซีโอไลต์สังเคราะห์ธรรมชาติมาใช้ในการก่อสร้างเป็นเวลานานแล้วเช่นในยุคกรีกโบราณใช้สร้างวิหารใหญ่ๆเนื่องจากซีโอไลต์สังเคราะห์มีลักษณะเป็นคอนกรีตเบาระบายความร้อนได้ดีเก็บเสียงได้ในบางประเทศที่มีภูเขาไฟสามารถพบซีโอไลต์สังเคราะห์ธรรมชาติจำนวนมากพอที่จะทำเหมืองได้แต่มีแร่อื่นปะปนสูงจึงทำให้ราคาถูกปัจจุบันซีโอไลต์สังเคราะห์ตามธรรมชาติมีจำนวนประมาณ 45 ชนิดส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์ประเภทสังเคราะห์ได้จากสารเคมีที่ผ่านขบวนการสังเคราะห์เลียนแบบธรรมชาติซึ่งจะมีความบริสุทธิ์สูงกว่าแบบธรรมชาติมากแต่ราคาแพงปัจจุบันมีจำนวนประมาณ 150 ชนิดประเทศผู้ผลิตหลักได้แก่สหรัฐอเมริกาเยอรมันนิวซีแลนด์จีนญี่ปุ่นและอินโดนีเซีย



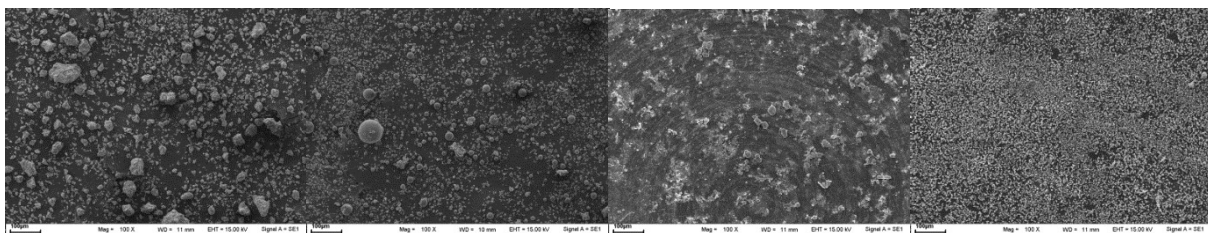
รูปที่ 3.4 ซีโอไลต์สังเคราะห์

5. น้ำ (Water) ใช้น้ำประปาจากห้องปฏิบัติการคอนกรีตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

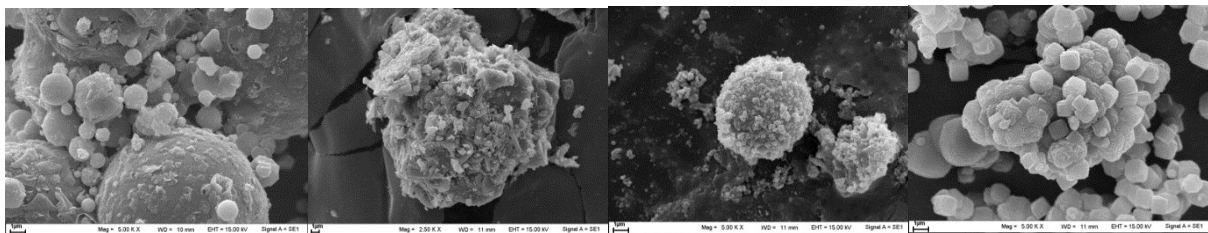
6. หิน (Coarse aggregate)

7. ทราย (Fine aggregate)

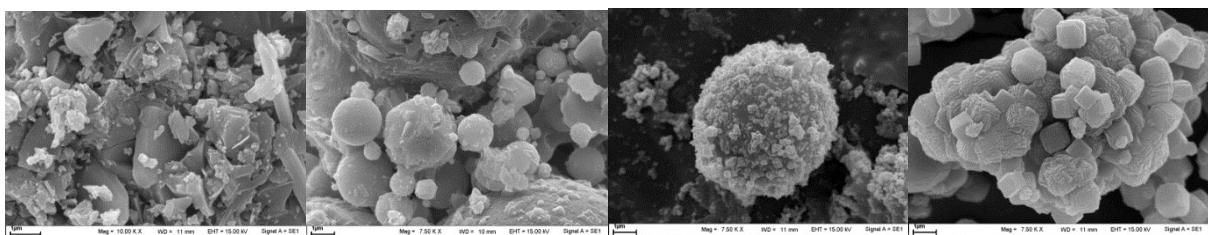
8. เหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (DB12)



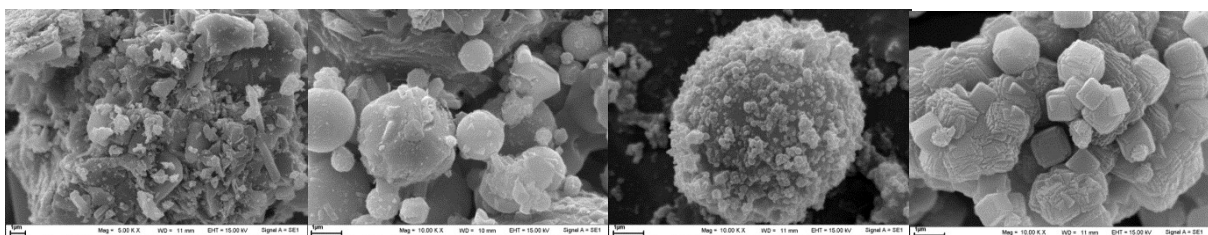
x100



x5000



x7500



x10000

ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ข) เถ้าลอย

ค) ซิลิกาฟูม

ง) ซีโอไลท์

รูปที่ 3.5 รูปร่างอนุภาค

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ซิลิกาฟุ้ง และ ซีโอไลท์สังเคราะห์

Chemical Composition (%)		Portland cement	Fly ash	Silica fume	Zeolite
		MaeMoh			
Silicon dioxide	(SiO <sub>2</sub> )	19.51	40.68	92	32.98
Aluminum oxide	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.97	22.07	0.7	27.73
Iron oxide	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.78	12.64	1.2	0.04
Calcium oxide	(CaO)	65.38	13.69	0.2	0.04
Magnesium oxide	(MgO)	1.08	2.98	0.2	-
Sulfur trioxide	(SO <sub>3</sub> )	2.16	1.72	-	0.04
Loss on Ignition	(LOI)	2.27	1.07	-	19.19
Sodium oxide	(Na <sub>2</sub> O)	0.01	1.53	-	19.86
Potassium oxide	(K <sub>2</sub> O)	0.44	2.52	-	0.04
Titanium dioxide	(TiO <sub>2</sub> )	0.26	0.42	-	-
Phosphorus pentoxide	(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.07	0.15	-	-
Manganese oxide	(MnO)	-	0.07	-	-
Strontium oxide	(SrO)	-	0.11	-	-
Vanadium.pentoxide	(V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	-	0.05	-	-
Chromium oxide	(Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-	-	-	-
Zinc oxide	(ZnO)	-	0.02	-	-
Zirconium oxide	(ZrO <sub>2</sub> )	-	0.02	-	-
Barium oxide	(BaO)	-	0.15	-	-
Arsenic oxide	(As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-	0.02	-	-

### 3.1.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบสำหรับหาผลกระทบจากปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมเหล็ก (Depassivation time) ตามมาตรฐาน ASTM G109

1. แบบหล่อคอนกรีตขนาด 280x150x115 มิลลิเมตร<sup>3</sup>
2. เหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (DB12)
3. โม่ผสมคอนกรีต
4. อีพ็อกซีกันน้ำ



รูปที่ 3.6 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต และระยะการเกิดสนิมในเหล็กเสริม



รูปที่ 3.7 อีพ็อกซีสำหรับเคลือบผิวเหล็กกันสนิม

5. แผ่นอะคริลิกสำหรับทำช่องขังสารละลายคลอไรด์ ขนาด 76x76x150 มิลลิเมตร<sup>3</sup>
6. ซิลิโคนสำหรับติดแผ่นอะคริลิก
7. เทปพันสายไฟ



8. ตัวต้านทาน 100 โอห์ม
9. ชุดบัดกรีพร้อมตะกั่ว สำหรับติดตั้งตัวต้านทาน
10. สายไฟ สำหรับติดตั้งตัวต้านทาน
11. โวลต์มิเตอร์
12. เครื่องทดสอบสัณยไฟฟ้า
13. สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulphate)
14. เกลือโซเดียมคลอไรด์บริสุทธิ์ ร้อยละ 99.99
15. น้ำกลั่น



รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบทดสอบสัณยไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulphate)





รูปที่ 3.10 เกลือโซเดียมคลอไรด์บริสุทธิ์ ร้อยละ 99.99

## 2. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบหาค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤต

1. เครื่อง Auto titration รุ่น 785 DMP TitrinoMetrohm
2. TEE-Fluorcarbon-coated magnetic stirring bar
3. เครื่องกวนแม่เหล็ก
4. เครื่องดูด (Suction apparatus)
5. เครื่องต้ม (Hot pate)
6. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)
7. แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบ



รูปที่ 3.11 เครื่อง Auto titration รุ่น 785 DMP TitrinoMetrohm



รูปที่ 3.12 เครื่องดูด (Suction apparatus)



รูปที่ 3.13 เครื่องต้ม (Hot pate)



รูปที่ 3.14 กระดาษกรองเนื้อหยาบ

8. ซ้อนตักสาร
9. บีกเกอร์ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร
10. กระจกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร
11. ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร
12. แท่งแก้วคนสาร
13. แผ่นกระเบื้องใส
14. กรวย (Buchner funnel)
15. กรดไนตริก (Nitric Acid)
16. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
17. Methyl orange indicator
18. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
19. สารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate)
20. น้ำกลั่น



รูปที่ 3.15 กรดไนตริก (Nitric acid)



รูปที่ 3.16 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)



รูปที่ 3.17 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)



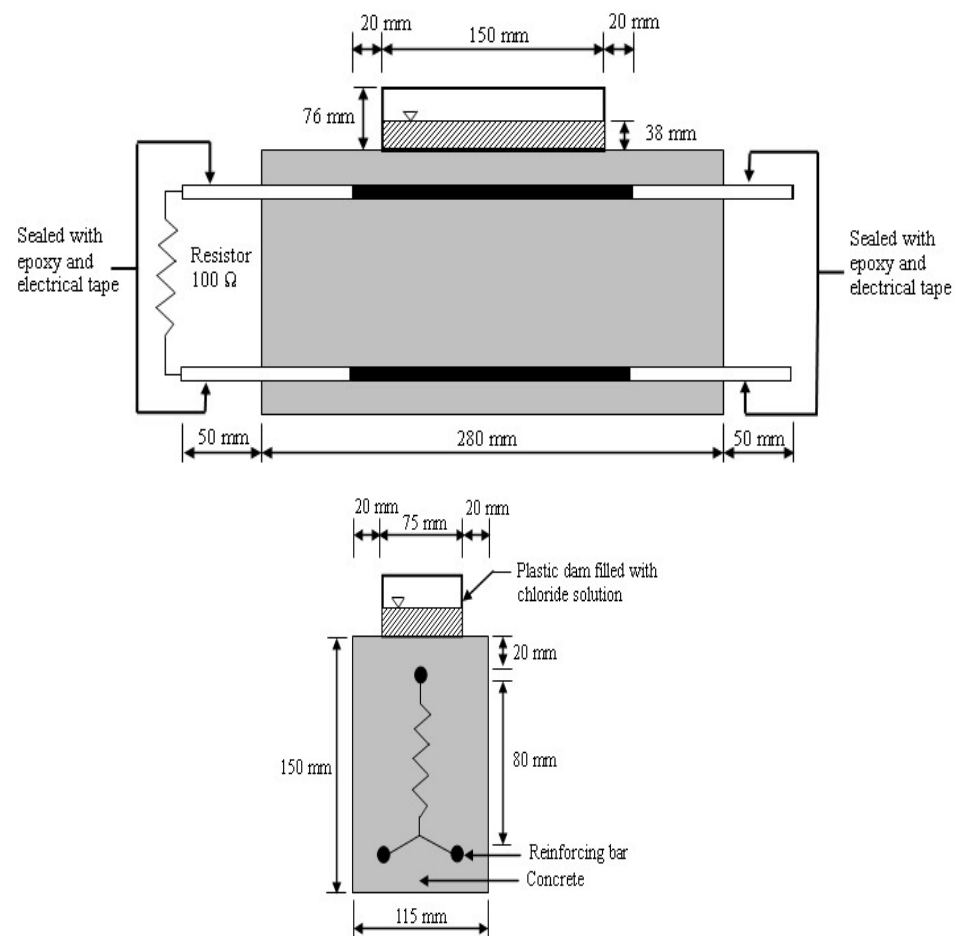
รูปที่ 3.18 สารละลายมาตรฐาน 0.05 ซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate)

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบสำหรับหาผลกระทบของปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) และระยะเวลาการเกิดสนิมของเสริมเหล็ก (Depassivation time)

หล่อตัวอย่างทดสอบตามตาราง 3.2 โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ล้วน และการแทนที่วัสดุประสานด้วยถ้ำลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ซีลิก้าฟูมร้อยละ 7.5 และ 15 ซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และ 5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ถึง 0.60 หล่อตัวอย่างทดสอบขนาด 115x150x280 มิลลิเมตร<sup>3</sup> ดังรูปที่ 3.19 หลังจากถอดแบบบ่มด้วยความชื้นเป็นเวลา 28 วัน



รูปที่ 3.19 รายละเอียดตำแหน่งเหล็กในตัวอย่างทดลอง

**การทดสอบสำหรับหาค่ากำลังอัดของคอนกรีต**

หล่อตัวอย่างทดสอบตามตาราง 3.2 โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ล้วน และการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 และ 15 ซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และ 5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ถึง 0.60 หล่อตัวอย่างทดสอบขนาด  $100*100*100$  มิลลิเมตร<sup>3</sup> หลังจากถอดแบบบ่มด้วยความชื้นเป็นเวลา 28 วัน

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ซิลิกาฟูม และซีโอไลท์สังเคราะห์

No.	Mix id.	Mix proportion of concrete (kg/m <sup>3</sup> )						
		Binder				water	sand (SSD)	Rock (SSD)
		Cement	Fly ash	Silica fume	Zeolite			
1.	I40	421	-	-	-	168	776	1025
2.	I50	369	-	-	-	185	776	1025
3.	I50F20	286	71	-	-	179	776	1025
4.	I50F40	208	138	-	-	173	776	1025
5.	I50F60	134	201	-	-	168	776	1025
6.	I50SF7.5	338	-	27	-	182	776	1025
7.	I50SF15	307	-	54	-	180	776	1025
8.	I50Z01	365	-	-	4	160	776	1025
9.	I50Z05	348	-	-	18	159	776	1025
10.	I60	329	-	-	-	174	776	1025

ตารางที่ 3.3 แสดงถึงรายละเอียดการทดสอบ chloride threshold ของคอนกรีต แต่ละเงื่อนไขการทดสอบ

Specimen No.	Mix id.	ระยะบ่มน้ำ (วัน)	ความชื้น (%)	อุณหภูมิ (°C)	[Cl <sup>-</sup> ] ที่ใช้ในอ่าง (%)	วัฏจักรเปียก-สลับแห้ง (วัน:วัน)
C1	I40	28	90	30	5.0	1:1
C2	I40	28	90	50	5.0	1:1
C3	I50	28	90	30	5.0	1:1
C4	I50	28	90	50	5.0	1:1
C5	I50	28	30	50	5.0	1:1
C6	I50F20	28	90	50	5.0	1:1
C7	I50F40	28	90	30	5.0	1:1
C8	I50F40	28	90	50	5.0	1:1
C9	I50F40	28	30	50	5.0	1:1
C10	I50SF7.5	28	90	30	5.0	1:1
C11	I50SF7.5	28	90	50	5.0	1:1
C12	I50SF7.5	28	30	50	5.0	1:1
C13	I50Z1	28	90	50	5.0	1:1
C14	I50Z5	28	90	50	5.0	1:1
C15	I50-00	7	ไม่ควบคุม	ไม่ควบคุม	5.0	1:1
C16	I50F60	7	ไม่ควบคุม	ไม่ควบคุม	5.0	1:1
C17	I50SF7.5	7	ไม่ควบคุม	ไม่ควบคุม	5.0	1:1
C18	I50SF15	7	ไม่ควบคุม	ไม่ควบคุม	5.0	1:1
C19	I60	7	ไม่ควบคุม	ไม่ควบคุม	5.0	1:1
C20	I60	28	ไม่ควบคุม	ไม่ควบคุม	5.0	1:1

**ความหมายของสัญลักษณ์ ดังนี้**

“C1 หรือ I”	หมายถึงคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
“SF”	หมายถึงซิลิกาฟูม
“F หรือ FA”	หมายถึงเถ้าลอยจากถ่านหิน
“Z”	หมายถึงซีโอโลต์สังเคราะห์
“I40”	หมายถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40
“I50”	หมายถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



### 3.2.2 การเตรียมกล่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต้นแบบที่ 1

ในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อมด้านนอกคอนกรีต ใช้หลักการในการสร้างกล่องควบคุมสิ่งแวดล้อม โดยพัฒนาจากหลักการของผู้ฟักไข่ (ซึ่งมีการใช้ควบคุมความร้อนและความชื้นในตัวให้เหมาะสมกับการฟักไข่) ดังนั้นในการสร้างกล่องควบคุมสิ่งแวดล้อม 1 สภาวะเงื่อนไข ต้องใช้อุปกรณ์ดังนี้

- |   |           |
|---|-----------|
| 1) กล่องโฟมประกอบ ขนาด 615x1220x320 มิลลิเมตร <sup>3</sup>                      | 1 กล่อง   |
| 2) เครื่องควบคุมการทำงานอัตโนมัติ (Controller)                                  | 1 เครื่อง |
| 3) หัววัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Temperature and relative humidity sensor) | 1 ตัว     |
| 4) หลอดไฟขนาด 25 วัตต์ (สำหรับให้อุณหภูมิ)                                      | 3 หลอด    |
| 5) เครื่องพ่นไอหมอก (สำหรับให้ความชื้น)   | 1 เครื่อง |

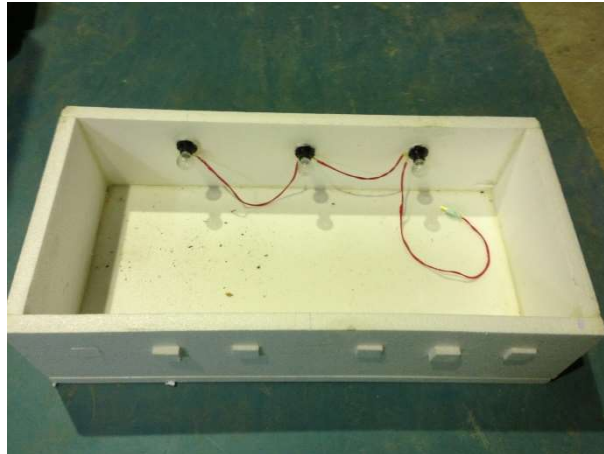
#### ขั้นตอนการติดตั้งกล่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต้นแบบที่ 1

1. ทำการติดตั้งแผ่น โฟมความหนา 1 ½ นิ้ว ทำเป็นกล่องขนาด 615x1220x320 มิลลิเมตร<sup>3</sup> ห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกใสด้านนอก



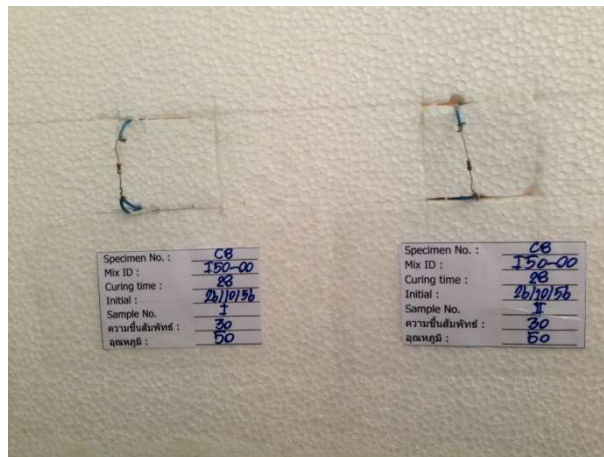
รูปที่ 3.20 การประกอบแผ่น โฟม

2. ทำการติดตั้งหลอดไฟขนาด 25 วัตต์ จำนวน 3 หลอดเพื่อเป็นตัวให้ความร้อนจำลองอุณหภูมิของคอนกรีต



รูปที่ 3.21 การติดตั้งหลอดไฟภายในกล่อง

3. ทำการเจาะช่องขนาด 50x50 มิลลิเมตร<sup>2</sup> ด้านหน้ากล่อง เพื่อวัดค่ากระแสการกักความร้อน  
คร่อมตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม



รูปที่ 3.22 เจาะช่องด้านหน้ากล่องสำหรับวัดค่ากระแสการกักความร้อนคร่อมตัวต้านทาน

4. ทำการเจาะช่องขนาด 75x150 มิลลิเมตร<sup>2</sup> ด้านบนกล่อง เพื่อไว้สำหรับวัดค่า  
ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์



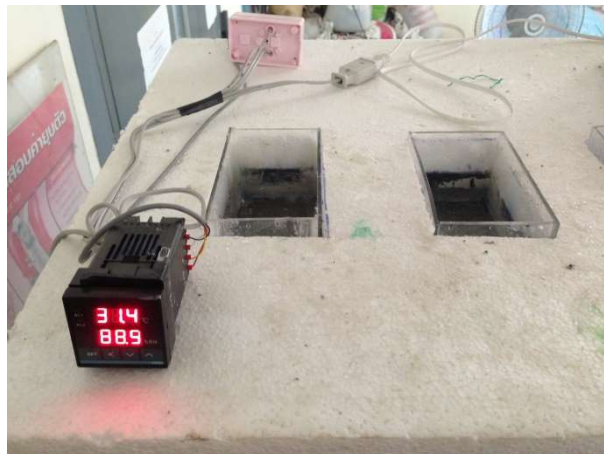
รูปที่ 3.23 เจาะช่องด้านบนกล่องสำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

5. ทำการติดตั้งเครื่องฟ่นไอหมอก เพื่อจำลองความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ



รูปที่ 3.24 การติดตั้งเครื่องฟ่นไอหมอกภายในกล่อง

6. ทำการติดตั้งเครื่องควบคุมระบบอัตโนมัติ ซึ่งมีเซ็นเซอร์ในการกำหนดอุณหภูมิและความชื้นเพื่อให้ได้สภาวะแวดล้อมที่ทำการทดสอบ



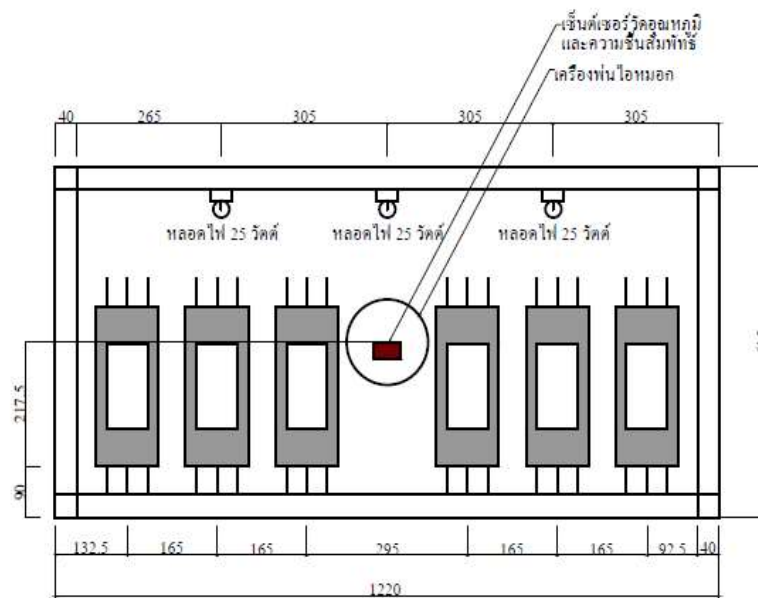
รูปที่ 3.25 เครื่องควบคุมอัตโนมัติ



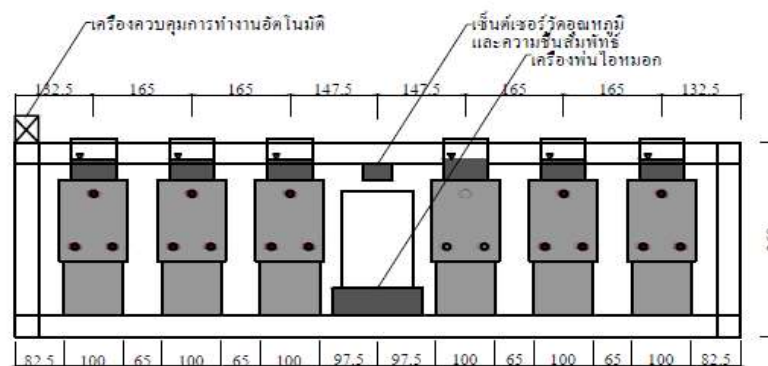
รูปที่ 3.26 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น

ตาราง 3.4 รายละเอียดในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในกล่องควบคุม

สถานะ เงื่อนไข	สถานะควบคุม	ช่วงอุณหภูมิที่กำหนด (°C)			ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
		เริ่ม ทำงาน	หยุด ทำงาน	ช่วง กว้าง	เริ่ม ทำงาน	หยุด ทำงาน	ช่วง กว้าง
1	T 30°C Rh 90%	28	32	4	88	92	4
2	T 50°C Rh 30%	48	52	4	28	32	4
3	T 50°C Rh 90%	48	52	4	88	92	4



Top view

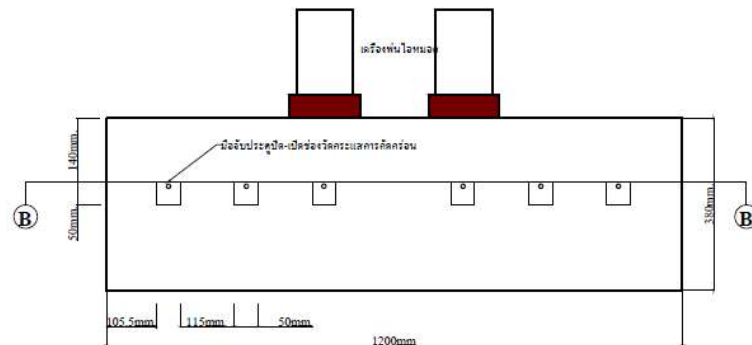


Front view

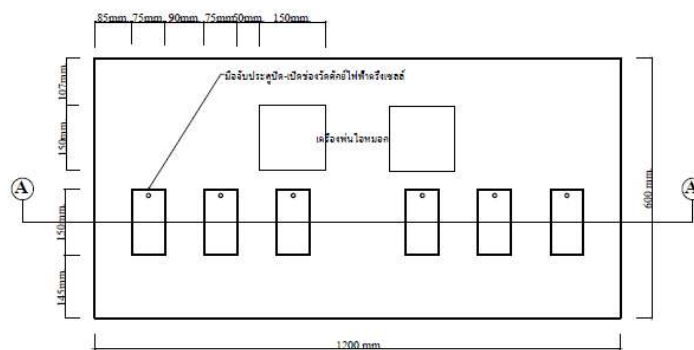
รูปที่ 3.27 ต้นแบบกล่องที่ 1 ตำแหน่งการวางตัวอย่างทดสอบในกล่องควบคุม

## การพัฒนากล่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต้นแบบที่ 2

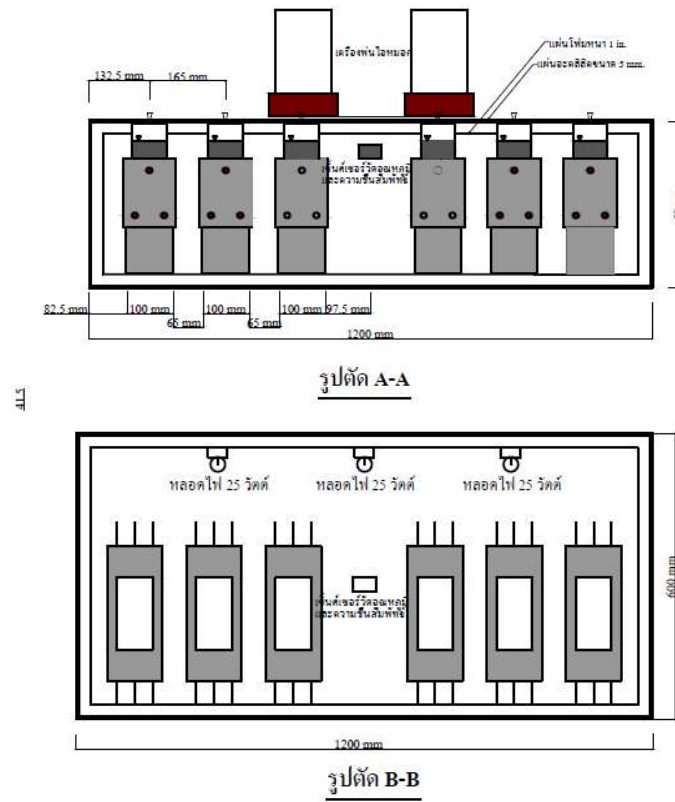
จากการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤต แต่เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของต้นแบบที่ 1 ยังมีข้อบกพร่องและยังไม่สมบูรณ์ ซึ่งภายในกล่องควบคุมต้นแบบที่ 1 โดยใช้วัสดุที่เป็นโฟมประกอบเป็นกล่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งลักษณะของโฟมมีความทึบแน่นต่ำและมีช่องว่างระหว่างเม็ดโฟม จึงส่งผลต่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่อาจมีการแลกเปลี่ยนกับสภาพแวดล้อมภายนอก และยังส่งผลต่อระบบระบายน้ำที่ภายในกล่องโฟมเนื่องจากปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในกล่องควบคุมสูง และมีอายุการใช้งานสั้น เพื่อทำให้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ติดตั้งบล็อกสำหรับการจำลองในสถานะเปียกสลับแห้ง 1:1 เพื่อให้มีการควบคุมอย่างสมบูรณ์ จึงต้องทำให้ระบบการวัดค่า และการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เป็นระบบปิดหรือมีการแลกเปลี่ยนกับสภาพแวดล้อมภายนอกให้น้อยที่สุด และเพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เป็นไปอย่างสมบูรณ์ กลุ่มของกระผมขอนำเสนอกกล่องควบคุมต้นแบบที่ 2 ที่ได้มีการศึกษาปัญหาและนำมาวิเคราะห์แก้ไขปัญหของกล่องควบคุมต้นแบบที่ 1 เพื่อนำไปสู่การพัฒนากล่องควบคุมต้นแบบที่ 2 โดยใช้วัสดุอะคริลิกเพื่อให้ระบบภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ไปอย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



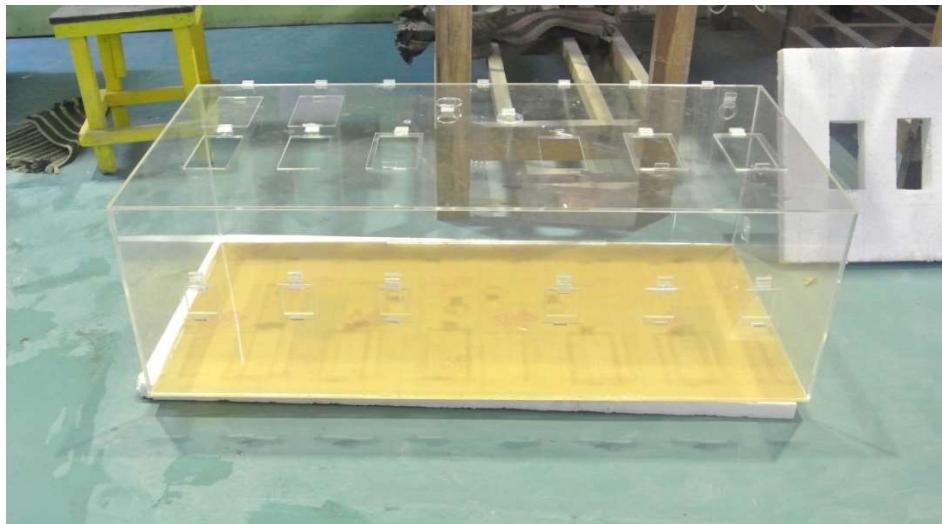
รูปด้านหน้า



รูปด้านบน



รูปที่ 3.28 ต้นแบบกล่องที่ 2 และตำแหน่งการวางตัวอย่างทดสอบในกล่องควบคุม



รูปที่ 3.29 กล่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต้นแบบที่ 2



### 3.2.3 การทดสอบสำหรับหาระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Depassivation time)

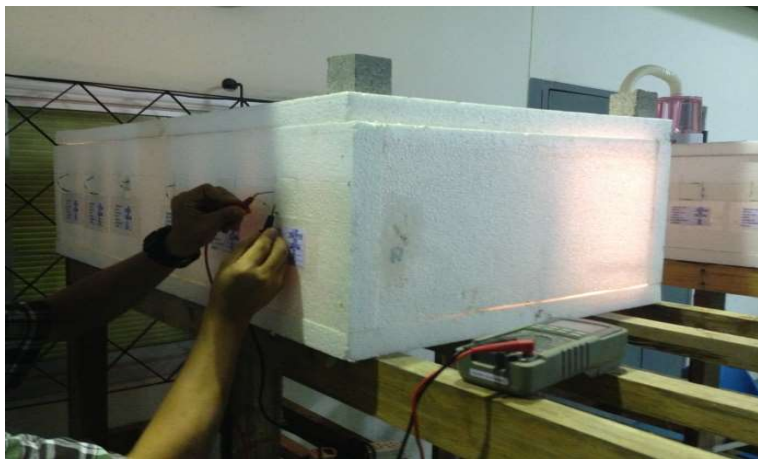
1. หลังจากตัวอย่างครบบอายุการบ่ม นำตัวอย่างมาติดตั้งตัวต้านทาน 100 โอห์ม กับเหล็กเสริมด้านใดด้านหนึ่ง
2. ทำการติดตั้งแผ่นอะคริลิกสำหรับเป็นช่องขังสารละลายคลอไรด์ ขนาด 76x76x150 มิลลิเมตร แล้วนำตัวอย่างไปใส่ไว้ในกล่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
3. เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักปริมาตร 400 มิลลิลิตร ลงในชุดแผ่นอะคริลิกและทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นจึงทำการดูดสารละลายออกและทิ้งไว้ให้แห้งอีก 24 ชั่วโมงสำหรับตัวอย่างที่เป็นการทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง
4. เมื่อทำการดูดสารละลายออกจึงทำการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potentials) และการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน 100 โอห์ม
5. พิจารณาจุดยุติของการทดลองหรือระยะเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าพร้อมกันจึงยุติการทดลอง
6. ทำการเจาะตัวอย่างทดลองและนำผงคอนกรีตที่ได้จากผิวเหล็กเสริมมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ตามความลึกจากผิวของคอนกรีตเข้าไปถึงเนื้อเหล็กเสริม



รูปที่ 3.30 ตัวอย่างที่ติดตั้งตัวต้านทาน 100 โอห์ม



รูปที่ 3.31 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในก้อนตัวอย่างที่ควบคุม

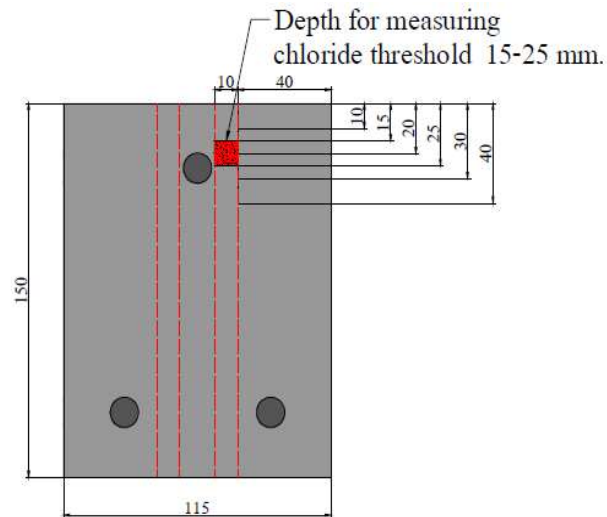


รูปที่ 3.32 การวัดค่าค่าความศักย์ไฟฟ้าในก้อนตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 3.33 การเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ระยะ  
ความลึกต่างๆ





รูปที่ 3.34 ตำแหน่งของการเจาะเพื่อเก็บตัวอย่างคอนกรีต

#### การทดสอบความหนาแน่นกระแสกัดกร่อน (Corrosion current density)

ทำการวัดค่าความศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างในช่วงที่เทสารละลายคลอไรด์ออกจากชุดแผ่นอะคริลิกโดยปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM G109 ทำการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองและนำไปคำนวณหาค่ากระแสของการเกิดสนิมตามสมการ

$$V = IR \quad (3.1)$$

ทั้งนี้ V คือความต่างศักย์ไฟฟ้า (มิลลิโวลต์), I คือกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์) และ R คือความต้านทาน (โอห์ม)

ตารางที่ 3.5 เกณฑ์พิจารณาแนวโน้มของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM C876

ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	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

### 3.2.4. การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีต

#### 1) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต

คลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) หรือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณดังนี้ (ตามมาตรฐาน ASTM C1152 และมาตรฐาน C114)

1. นำสารซีเมนต์ที่บดเป็นผงมาจำนวนประมาณ 5 กรัมโดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml

2. เติมน้ำกลั่นลงไป ในบีกเกอร์ที่มีซีเมนต์บดเป็นผงไว้แล้วจนถึงขีด 100 ml แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกที่เจือจางในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 ml ตามลงไปทันที

3. ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่มีตัวอย่างด้วยการต้มให้เดือดอย่าให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (hot plate) แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

4. ประกอบเครื่องดูด (suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่างล้างบีกเกอร์ด้วยกลั่นจำนวนเล็กน้อยถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกันโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วกันโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่นทิ้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml

5. สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ววางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TEF-fluorocarbon coated magnetic stirring bar ลงไปแช่ electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชนกับ electrode เริ่มการกวนช้าๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ลงในหรืออยู่นเหนือสารละลาย

6. เครื่อง Auto titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของของตัวอย่างเมื่อถึงจุด (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดที่ยุติปฏิกิริยา

7. จุดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็นร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% chloride by weight of concrete)

#### 2) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีต

คลอไรด์ที่ละลายน้ำ (Water-solution chloride) หรือคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณดังนี้ (ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 และมาตรฐาน C 144)

1. นำสารซีเมนต์ที่บดเป็นผงมาจำนวนประมาณ 5 กรัมโดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml

2. นำไปต้มให้เดือด 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

3. ประกอบเครื่องดูด (suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่างล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อยถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกันโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วกันโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่นปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml

4. เติมสารละลายกรดไนตริกที่เจือจางในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 ml และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 ml ลงในสารละลายที่ผ่านการกรองปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระเบื้องแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือดอย่าให้เดือดนานเกิน 2 ถึง 3 นาทีจากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (hot plate)

5. สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ววางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TEF-fluorocarbon coated magnetic stirring bar ลงไปแช่ electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode เริ่มการกวนช้าๆวางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ลงในหรืออยู่เหนือสารละลาย

6. เครื่อง Auto titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของของตัวอย่างเมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดยุติปฏิกิริยา

7. จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็นร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% chloride by weight of concrete)



รูปที่ 3.35 ตัวอย่างผงซีเมนต์ที่ได้จากการเจาะในแต่ละชั้น



รูปที่ 3.36 การชั่งตัวอย่างผงคอนกรีต



รูปที่ 3.37 การเติมกรดไนตริกที่เจือจาง 1:1



รูปที่ 3.38 การไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์

### 3.2.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

1. ตัวอย่างครบอายุการบ่ม 28 วัน นำตัวอย่างไปทดสอบ
2. ตัวอย่างคอนกรีตหลังเผชิญกับสภาวะแวดล้อม นำตัวอย่างไปทดสอบ



รูปที่ 3.39 เครื่องทดสอบกำลังอัด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

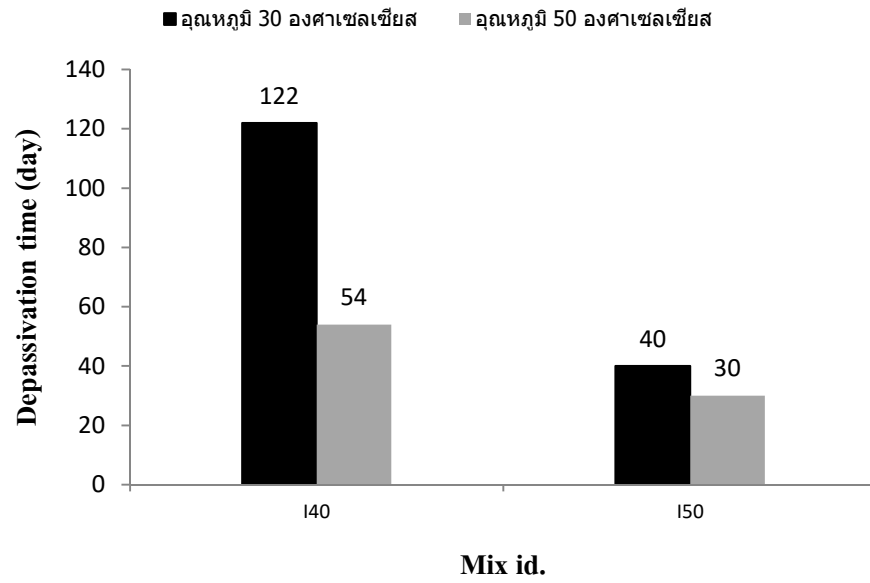
#### 4.1 ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

##### 4.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ

##### 4.1.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตล้วน

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม Depassivation time ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C และ 50°C และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.4 และ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 และ 0.5 โดยเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30°C และ 50°C พบว่าที่อุณหภูมิ 30°C มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตยาวนานกว่าที่อุณหภูมิ 50°C เนื่องมาจากอุณหภูมิสูงปริมาณคลอไรด์อิสระสูงขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายที่อยู่ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีปริมาณน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออน พบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นทำให้เกิดการสลายของชั้น passive film บนผิวเหล็กเสริมนั้น อาจเป็นผลจากการที่ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้น Glass and Buenfeld (1995) และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินำไปสู่การลดลงการต้านทานการกัดกร่อนมีโอกาสทำให้เหล็กเสริมของคอนกรีตเกิดสนิม Mattsson (1992)

และที่อุณหภูมิ 30°C และ 50°C พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.4 มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตยาวนานกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 สาเหตุเนื่องมาจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ เป็นการลดความพรุนในเนื้อคอนกรีตจึงส่งผลให้มีความต้านทานการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ อาจเกิดจากคอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยมีระยะเวลาการเกิดสนิม ยาวกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มาก เมื่อมีระยะเวลาการบ่มขึ้นที่เพียงพอในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลต่ออนุภาคของปูนซีเมนต์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ความพรุนของคอนกรีตลดลง



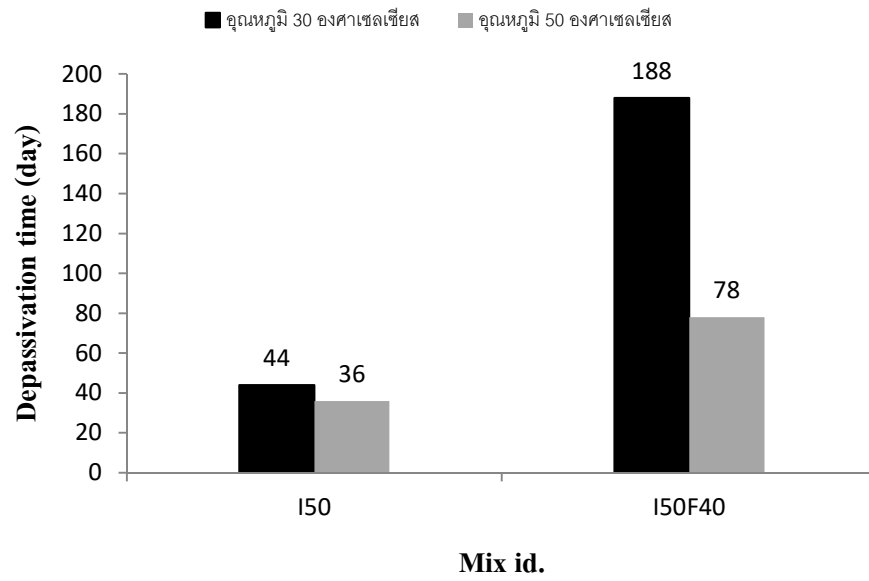
รูปที่ 4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่ระยะบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.1.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบค่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม Depassivation time ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีเถ้าลอยที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ควบคุมอุณหภูมิที่  $30^{\circ}\text{C}$  และ  $50^{\circ}\text{C}$  และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน พบว่าที่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต เท่ากับ (180 วัน) นานกว่าเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  เท่ากับ (76 วัน) อาจเกิดจากเมื่ออุณหภูมิสูงจะทำให้ผิวหน้ามีการสูญเสียน้ำ ทำให้เกิดการหดตัวที่ผิวหน้าคอนกรีต และเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (micro cracking) ที่ผิวหน้าคอนกรีต ซึ่งทำคลอไรด์แทรกซึมผ่านเข้าไปยังเหล็กเสริมได้เร็ว และเมื่ออุณหภูมิสูงทำให้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทุกๆ รอบของสภาพเปียกสลับแห้งและแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้เหล็กเสริมคอนกรีตเกิดสนิมได้ ที่อุณหภูมิสูงปริมาณคลอไรด์อิสระสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายที่อยู่ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีปริมาณน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออน พบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นทำให้เกิดการสลายของชั้น passive film บนผิวเหล็กเสริมนั้น อาจเป็นผลจากการที่ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้น Glass and Buenfeld (1995) และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินำไปสู่การลดลงการต้านทานการกัดกร่อนมีโอกาสทำให้เหล็กเสริมของคอนกรีตเกิดสนิม Mattsson (1992)

และที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  และ  $50^{\circ}\text{C}$  คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต นานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากเถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในเถ้าลอยส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานทำกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งจะเพิ่มการประสานระหว่างเพสต์และมวลรวม ทำให้คอนกรีตมีอัตราการแทรกซึมลดลง การแทนที่ปูนซีเมนต์เถ้าลอยหรือตะกรันเหล็ก ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์เพิ่มขึ้น เพราะว่าทำให้เกิด C-A-H มากขึ้น Harald and Justnes (1998)





รูปที่ 4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีถ้ำลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะบ่มน้ำ 28 วัน

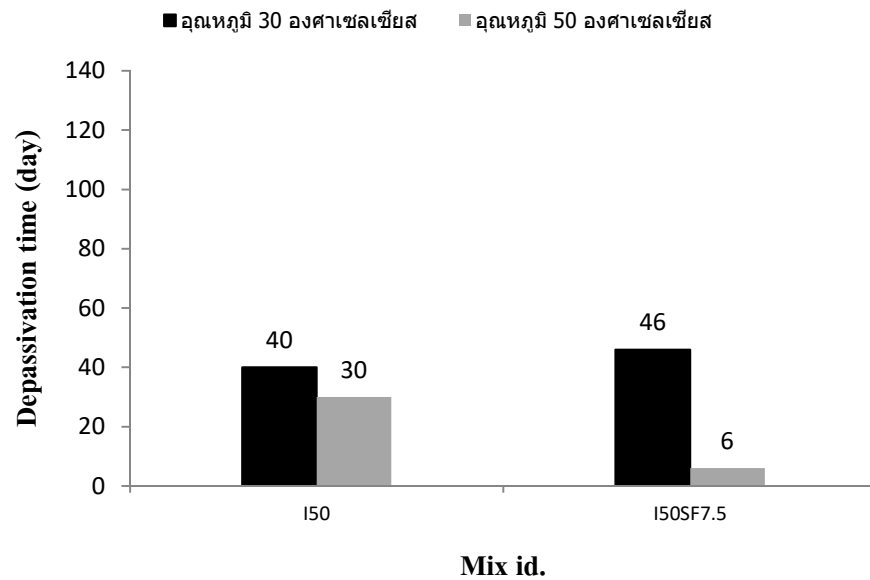
#### 4.1.1.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบค่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม Depassivation time ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีซิลิกาฟุ่มที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C และ 50°C และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน พบว่า ที่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ที่อุณหภูมิ 30 °C มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต เท่ากับ (46 วัน) มีระยะยาวนานกว่าที่อุณหภูมิที่ 50 °C มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต เท่ากับ (6 วัน) อาจเกิดจากที่อุณหภูมิสูงทำให้คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มซึ่งมีอนุภาคนาขนาดเล็กเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก ทำให้เกิดความร้อนภายในของคอนกรีตค่อนข้างสูง เมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิที่สูงทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำก่อให้เกิดการหดตัว และเกิดรอยแตกกว้างขนาดเล็ก (micro crack) ทำให้การซึมผ่านคลอไรด์ในอุณหภูมิสูงได้เร็ว อุณหภูมิสูงปริมาณคลอไรด์อิสระสูงขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายที่อยู่ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีปริมาณน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออน พบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นทำให้เกิดการสลายของชั้น passive film บนผิวเหล็กเสริมนั้น อาจเป็นผลจากการที่ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้น Glass and Buenfeld (1995) และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินำไปสู่การลดลงการต้านทานการกัดกร่อนมีโอกาสทำให้เหล็กเสริมของคอนกรีตเกิดสนิม Mattsson (1992)

และที่อุณหภูมิ 30°C คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่ม มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตเท่ากับ (46 วัน) มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากซิลิกาฟุ่ม มีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ร้อยละ 90 ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งจะเพิ่มการประสานระหว่างเฟสและมวลรวม ทำให้คอนกรีตมีอัตราการแทรกซึมลดลง และซิลิกาฟุ่มจะมีอนุภาคนาขนาดเล็กจะช่วยอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีตได้ดี

แต่ที่อุณหภูมิ 50°C คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่ม มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตเท่ากับ (6 วัน) มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตสั้นกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนที่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมเท่ากับ (40 วัน) เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดปริมาณคลอไรด์อิสระสูงขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายที่อยู่ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีปริมาณน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออน พบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นทำให้เกิดการสลายของชั้น passive film บนผิวเหล็กเสริมนั้น อาจเป็นผลจากการที่ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้น Glass

and Buenfeld (1995) และค่าปริมาณการกักเก็บคลอไรด์ของซิลิกาฟุ่มลดลง การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม จะทำให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ในซีเมนต์ลดลง Harald and Justnes(1998)



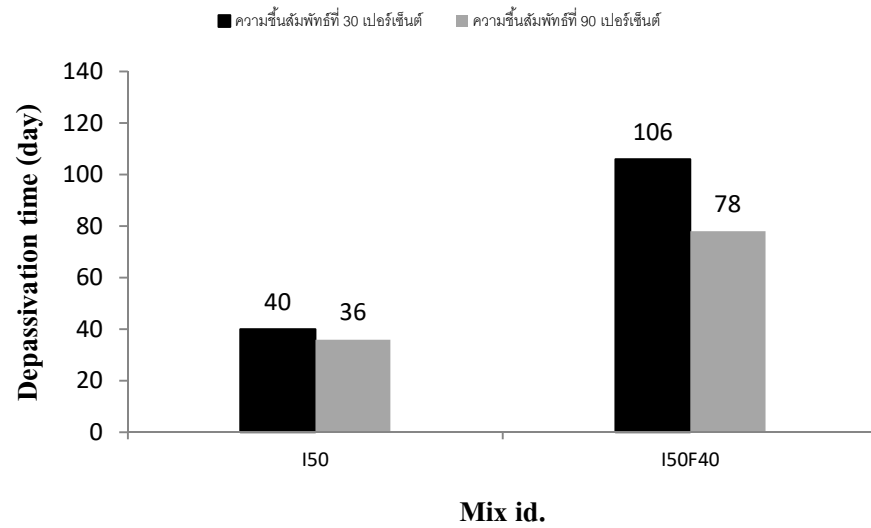
รูปที่ 4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.1.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์

##### 4.1.2.1 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบค่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม Depassivation time ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีเถ้าลอยที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% และ 90% ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน พบว่าที่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต เท่ากับ (104 วัน) นานกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% ที่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมต่อเหล็กเสริมของคอนกรีต เท่ากับ (76 วัน) เนื่องจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคอนกรีต จำเป็นต้องอาศัยน้ำและออกซิเจน ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงจึงส่งผลให้เกิดการแพร่ในลักษณะที่เป็นก๊าซ การแพร่ของน้ำผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้เร็วกว่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ คอนกรีตที่ค่อนข้างแห้งส่งผลต่อกระบวนการเกิดสนิมแบบอิเล็กโทรไลติกจะถูกจำกัดลง และคอนกรีตที่มีผิวค่อนข้างแห้งการเกิดสนิมจะไม่เกิดขึ้น แต่ถ้ามีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์หรือน้ำจึงส่งผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ Angst And Vennesland (2007)

และที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% และ 90% คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต นานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากเถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในเถ้าลอยส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานทำกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งจะเพิ่มการประสานระหว่างเพสต์และมวลรวม ทำให้คอนกรีตมีอัตราการแทรกซึมลดลง การแทนที่ปูนซีเมนต์เถ้าลอยหรือตะกรันเหล็ก ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์เพิ่มขึ้น เพราะว่าทำให้เกิด C-A-H มากขึ้น Harald and Justnes (1998)



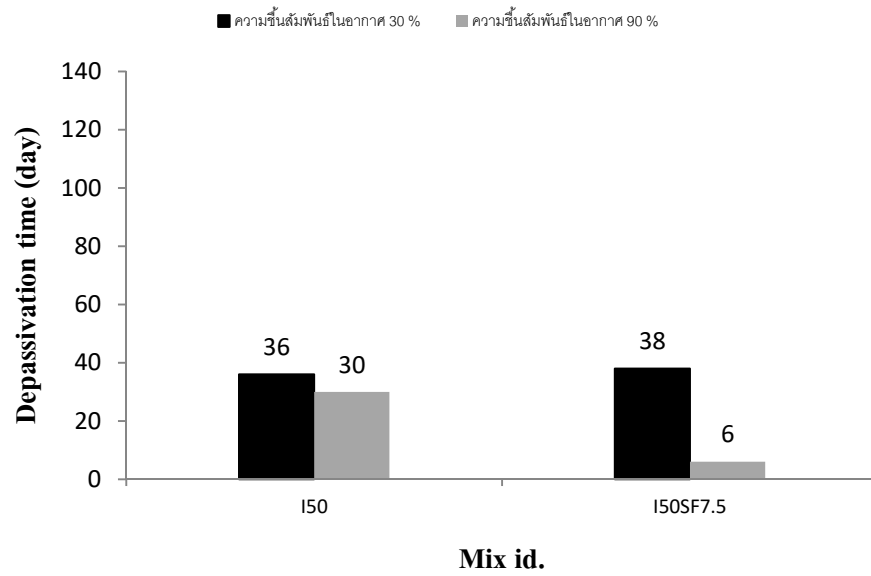
รูปที่ 4.4 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีถ้ำลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.1.2.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบค่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม Depassivation time ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีซิลิกาฟุ่มที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 30% และ 90% และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสาน เท่ากับ (38 วัน) มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมมากกว่า ความชื้นสัมพัทธ์ 90 % ที่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตเท่ากับ (6 วัน) เนื่องจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคอนกรีตจำเป็นต้องอาศัยน้ำและออกซิเจน ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงจึงส่งผลให้เกิดการแพร่ในลักษณะที่เป็นก๊าซ การแพร่ของน้ำผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้เร็วกว่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ คอนกรีตที่ค่อนข้างแห้งส่งผลต่อกระบวนการเกิดสนิมแบบอเล็กโทโรไลติกจะถูกจำกัดลง และคอนกรีตที่มีผิวค่อนข้างแห้งการเกิดสนิมจะไม่เกิดขึ้น แต่ถ้ามีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์หรือน้ำจึงส่งผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ Angst And Vennesland (2007)

และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่ม มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตเท่ากับ (38 วัน) มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากซิลิกาฟุ่ม มีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 90 ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งจะเพิ่มการประสานระหว่างเพสต์และมวลรวม ทำให้คอนกรีตมีอัตราการแทรกซึมลดลง และซิลิกาฟุ่มจะมีอนุภาคขนาดเล็กจะช่วยอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีตได้ดี

แต่ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่ม มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตเท่ากับ (6 วัน) มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตสั้นกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนที่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมเท่ากับ (30 วัน) อาจเนื่องมาจากความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง และคอนกรีตมีการควบคุมอุณหภูมิคงที่  $50^\circ\text{C}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดปริมาณคลอไรด์อิสระสูงขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายที่อยู่ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีปริมาณน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออน พบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นทำให้เกิดการสลายของชั้น passive film บนผิวเหล็กเสริมนั้น อาจเป็นผลจากการที่ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้น Glass and Buenfeld (1995) และค่าปริมาณการกักเก็บคลอไรด์ของซิลิกาฟุ่มลดลง การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม จะทำให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ในซีเมนต์ลดลง Harald and Justnes(1998) และคอนกรีตมีความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงจึงเกิดการแพร่ได้อย่างรวดเร็ว

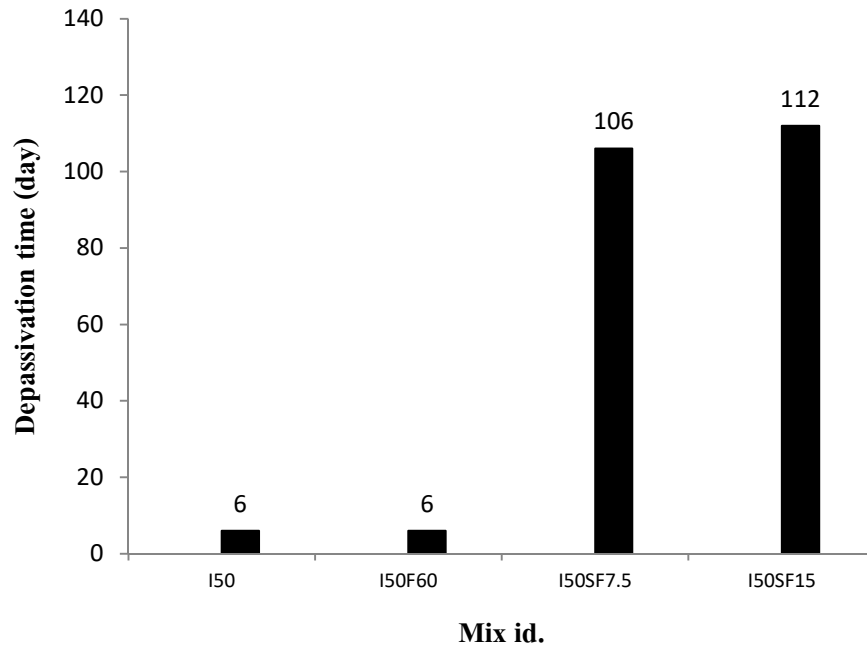


รูปที่ 4.5 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.1.3 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั่วไป

จากรูปที่ 4.6 พิจารณาระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตที่อัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่ 6 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 60% มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม 6 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม 7.5% มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม 106 วัน และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม 15% มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม 112 วัน ที่ระยะบ่ม 28 วัน ภายใต้สภาวะแวดล้อมทั่วไป โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย 60% มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่สั้นกว่า อาจเกิดจากคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ลดลงและคอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง มีผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่สั้นกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย โดยการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานจะเกิดในช่วงหลังเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิกต้องอาศัยต่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นจึงอาจทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในช่วงอายุต้นมีคุณสมบัติในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง ดังนั้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลให้ปริมาณ  $C_3A$  ลดลง โดย  $C_3A$  จะคอยดักจับคลอไรด์อิสระที่แทรกซึมทำให้คอนกรีตมีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่ยาวนานขึ้น แต่เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 7.5% ส่งผลทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม อาจอาจเกิดจากคุณสมบัติของซิลิกาฟูมมีอนุภาคที่ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งไวต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและส่งผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ดีขึ้นและมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นสูง ความพรุนลดลง ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่นานมากขึ้น อาจอาจเกิดจากอนุภาคของซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่น ลดการแทรกซึมของคลอไรด์ และเมื่อมีการแทนที่ซิลิกาฟูมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ดีขึ้นตามไปด้วย ซึ่งซิลิกาฟูมเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งช่วงต้นและในระยะยาวได้





รูปที่ 4.6 ผลกระทบของสิ่งแฉะล้นทิ้งที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีถั่วส้อยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 60 และซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 และ 15 และ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะบ่มน้ำ 28 วัน

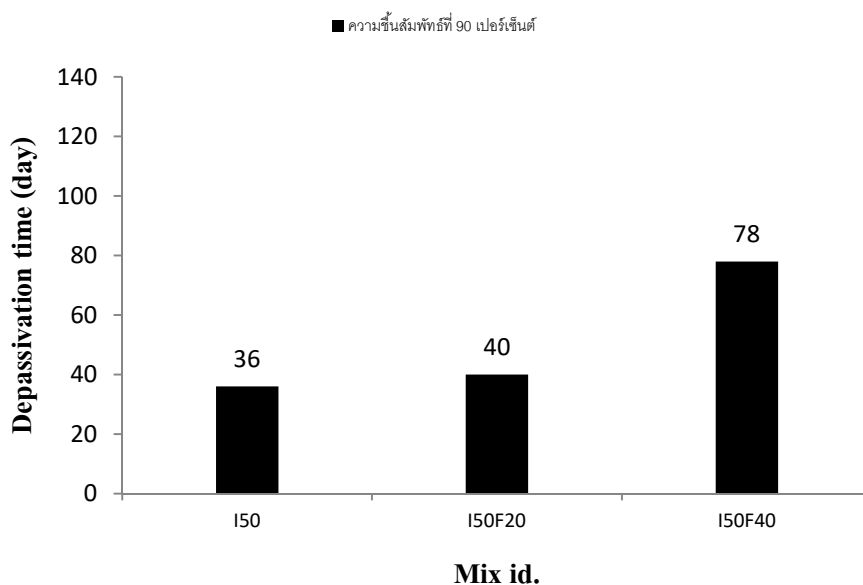
หมายเหตุ อุณหภูมิ 28-34°C ความชื้นสัมพัทธ์ 85-90%

#### 4.1.4 ผลกระทบเนื่องจากการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่วัสดุประสาน

##### 4.1.4.1 ผลกระทบคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบค่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

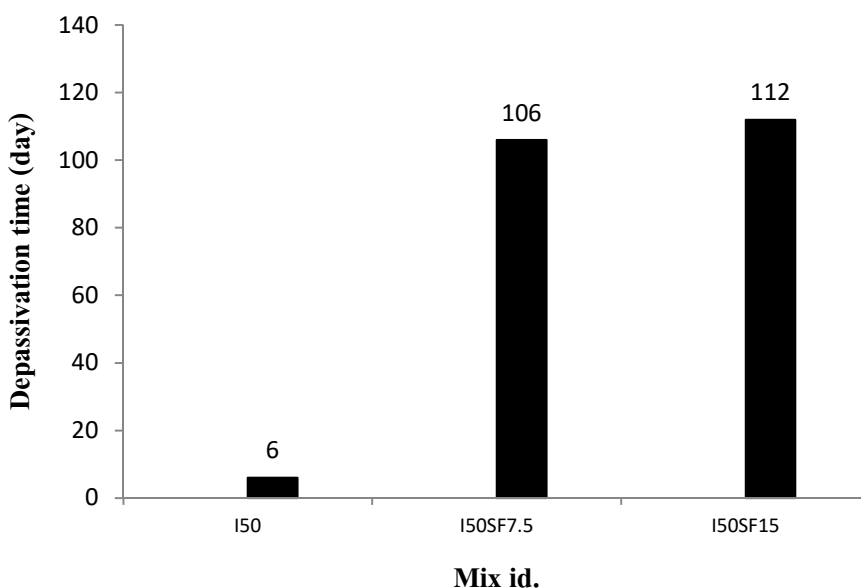
Depassivation time ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีเถ้าลอยที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 ควบคุมอุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 90% ใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน พบว่า เถ้าลอยที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต เท่ากับ (78 วัน) ซึ่งนานที่สุด เมื่อเทียบกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตของเถ้าลอยที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วน ซึ่งมีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต เท่ากับ (40 วัน) และ (36 วัน)ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากเถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในเถ้าลอยส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานทำกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งจะเพิ่มการประสานระหว่างเฟสและมวลรวม ทำให้คอนกรีตมีอัตราการแทรกซึมลดลง จึงทำให้มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่นานกว่า



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่ระยะบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.1.4.2 ผลกระทบคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน

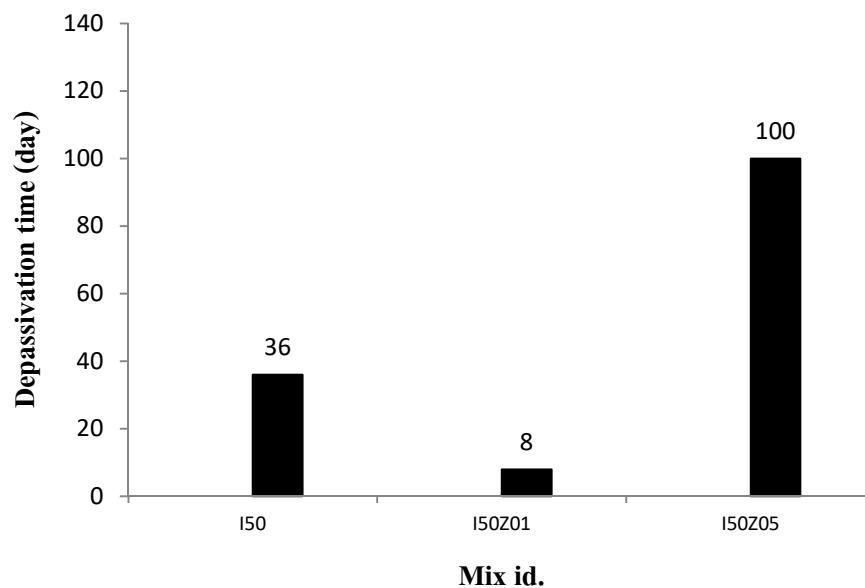
จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบค่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม Depassivation time ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 ควบคุมอุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 90% ใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน พบว่า ซิลิกาฟูมที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 15 จะมีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต เท่ากับ (112 วัน) ซึ่งนานที่สุด เมื่อเทียบกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตของซิลิกาฟูมที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วน ที่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต เท่ากับ (106 วัน) และ (6 วัน) ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากซิลิกาฟูม มีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 90 ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งจะเพิ่มการประสานระหว่างเฟสและมวลรวม ทำให้คอนกรีตมีอัตราการแทรกซึมลดลง และซิลิกาฟูมจะมีอนุภาคขนาดเล็กจะช่วยอุดโพรงช่องว่างในคอนกรีตได้ดีจึงทำให้มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่นานกว่า



รูปที่ 4.8 ผลกระทบของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่ระยะบ่มน้ำ 7 วัน

#### 4.1.4.3 ผลกระทบคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสาน

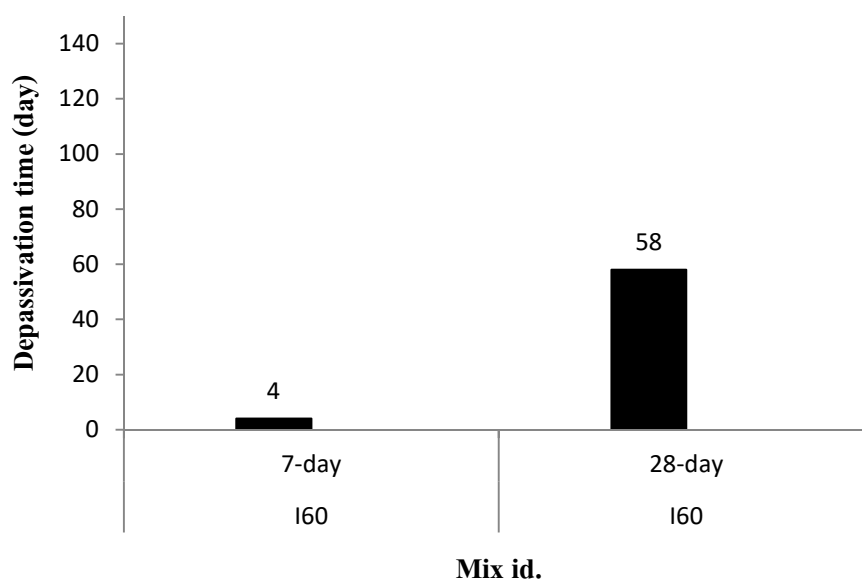
จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบค่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม Depassivation time ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีซีโอไลท์สังเคราะห์ที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 1 และ 5 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน พบว่าเมื่อพิจารณาระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตแทนที่มีซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 1 และ 5 มีค่าเท่ากับ (8 และ 100 วัน ตามลำดับ) เมื่อพิจารณาแทนที่มีซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 มีค่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนที่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตเท่ากับ (36 วัน) อาจเกิดจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์มีขนาดอนุภาคเล็ก เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อลดการเยิ้ม น้ำ ลดการแยกตัว ลดการซึมผ่าน ทำให้คอนกรีตมีการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง การแทนที่ซีโอไลท์สังเคราะห์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นในซีเมนต์เพสต์ทำให้ปริมาณโพรงทั้งหมดสูงขึ้นแต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ ทำให้ขนาดโพรงลดลง ส่งผลให้เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นขึ้น ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (2550)



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสาน ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่ระยะบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.1.5 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบค่า Depassivation time ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน พบว่าที่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ระยะการบ่ม 7 วัน มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต เท่ากับ (4 วัน) สั้นกว่าที่ระยะการบ่มที่อายุ 28 วัน เท่ากับ (58 วัน) ซึ่งมีความแตกต่างกันมาก สาเหตุอาจเกิดจากน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตและอัตราการซึมผ่านของคอนกรีต คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อมีระยะเวลาบ่มที่นานขึ้น ความพรุนของคอนกรีตจะลดลงทำให้การซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นไปได้ยากขึ้น จึงทำให้ค่า Depassivation time ที่ระยะการบ่มที่ 28 วัน มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับ ระยะการบ่มที่ 7 วัน



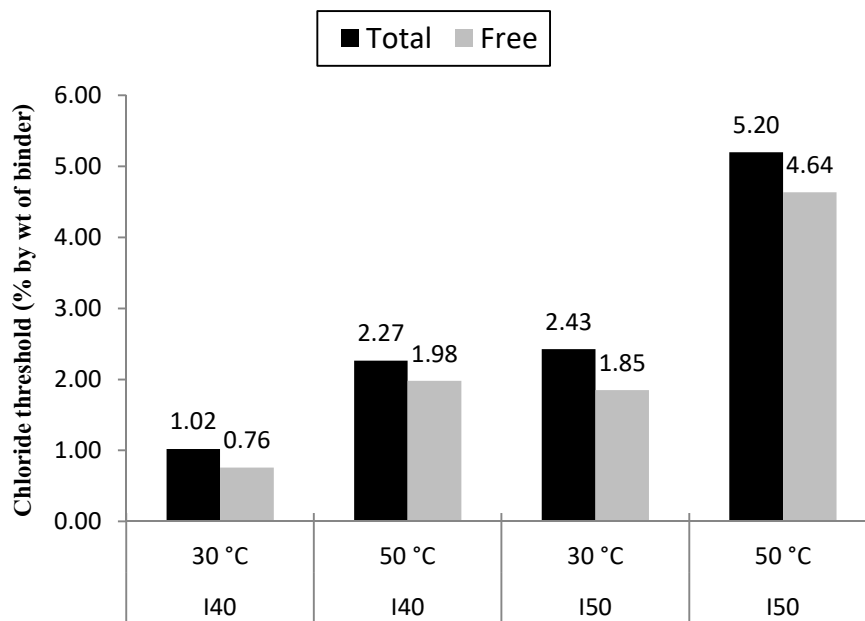
รูปที่ 4.10 ผลกระทบที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

## 4.2 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

### 4.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ

#### 4.2.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

จากรูปที่ 4.11 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต (Total chloride threshold) และปริมาณคลอไรด์อิสระวิกฤต (Free chloride threshold) ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C และ 50°C และใช้อัตราส่วนผสมผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.4 และ 0.5 มีอายุการบ่มที่ 28 วัน จากการทดสอบทำการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 โดยควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ 30°C และ 50°C โดยค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่อุณหภูมิ 50°C มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ควบคุมอุณหภูมิ 30°C แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่สั้นกว่าคอนกรีตที่อุณหภูมิ 30°C และเมื่อทำการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 โดยควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ 30°C และ 50°C โดยค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่อุณหภูมิ 50°C สูงกว่าคอนกรีตที่ควบคุมอุณหภูมิ 30°C แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานกว่าคอนกรีตที่ควบคุมอุณหภูมิ 30°C ซึ่งอาจเกิดจากอุณหภูมิที่ 50°C ทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (micro crack) ในเนื้อคอนกรีต และที่อุณหภูมิ 50°C มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงอาจส่งผลกระทบต่อเพิ่มขึ้นของเกลือคลอไรด์ให้มีค่าสูงมากขึ้น ส่งผลต่อการเกิดการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในปริมาณที่มากขึ้นและยังทำให้การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เป็นไปอย่างรวดเร็ว โดย Hussain and Rasheeduzzafar (1993) ได้กล่าวว่าปริมาณคลอไรด์อิสระสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายที่อยู่ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีปริมาณลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออนพบว่ามีความเข้มข้นอย่างมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นทำให้เกิดการสลายของชั้น passive film บนผิวเหล็กเสริมนั้น อาจส่งผลกระทบจากการที่ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตสูงกว่าอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเท่ากัน แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่สั้นกว่า ซึ่งอาจเกิดจากอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น ส่งผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นและยังส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของด่างบริเวณผิวเหล็ก โดยเสถียรภาพของด่างมีผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต เมื่อเสถียรภาพของด่างต่ำส่งผลทำให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำ และทำให้ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมสั้นลง

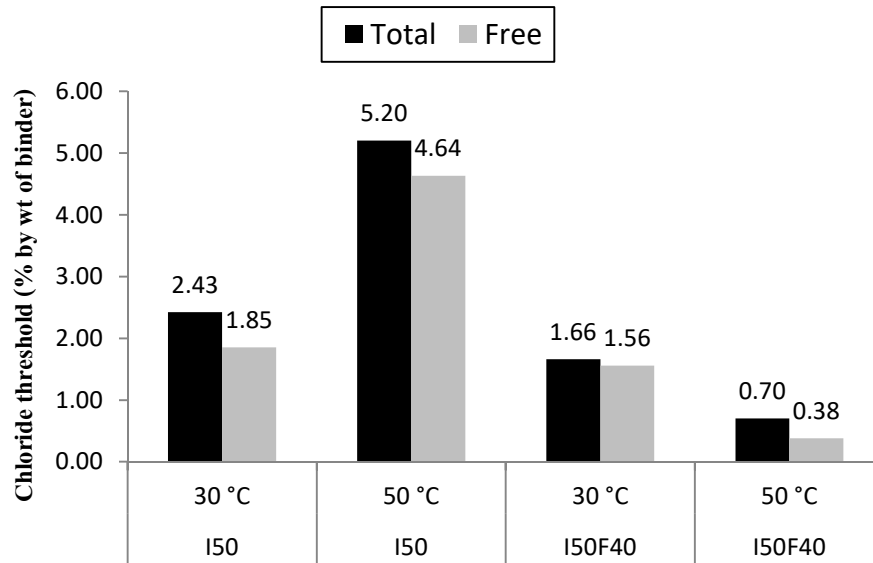


รูปที่ 4.11 ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ที่ระยะบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.2.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.12 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต (Total chloride threshold) และปริมาณคลอไรด์อิสระวิกฤต (Free chloride threshold) ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C และ 50°C โดยใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 และที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 40 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน จากการทดสอบเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ 30°C และ 50°C โดยมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ควบคุมที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมสั้นกว่าคอนกรีตที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ 30°C และ 50°C คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ควบคุมอุณหภูมิ 30°C แต่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่สั้นกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ควบคุมอุณหภูมิ 30°C ซึ่งอาจเกิดจากอุณหภูมิที่ 50 °C ทำให้เกิดรอยแตกกว้างขนาดเล็ก (micro crack) ในเนื้อคอนกรีต และที่อุณหภูมิ 50°C มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงอาจส่งผลกระทบต่อเข้มข้นเกลือคลอไรด์ให้มีค่าสูงมากขึ้น ส่งผลต่อการเกิดการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในปริมาณที่มากขึ้นและยังทำให้การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เป็นไปอย่างรวดเร็ว โดย Mattson, (1992) ได้กล่าวไว้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีโอกาสทำให้เหล็กเสริมของคอนกรีตเกิดสนิมได้ และเป็นที่ยอมรับหรือเป็นที่เข้าใจในเหตุผลว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะไปลดความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤตจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิสูงมีผลต่อความต้านทานที่ลดลง ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่ลดลง แต่ยังไม่มีการทดลองเป็นเพียงสมมติฐานที่มีการยอมรับเท่านั้น และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 40 แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่สั้นกว่า โดยอาจเกิดจากอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 40 อาจส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น การแทรกซึมของคลอไรด์จึงมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นและยังส่งผลต่อเสถียรภาพของด่างบริเวณผิวเหล็ก โดยเสถียรภาพของด่างมีผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต



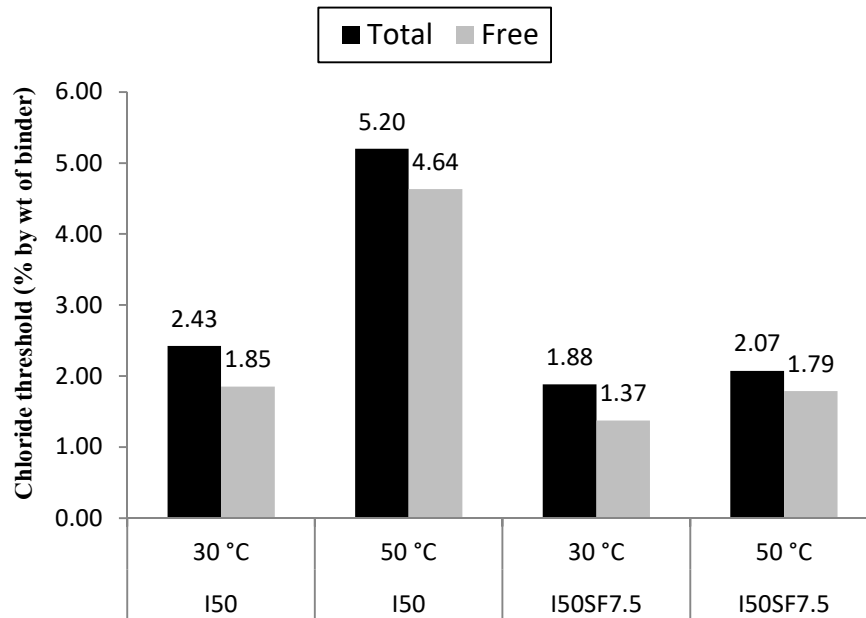


รูปที่ 4.12 ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.2.1.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.13 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต (Total chloride threshold) และปริมาณคลอไรด์อิสระวิกฤต (Free chloride threshold) ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C และ 50°C ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 ที่มีอายุปม 28 วันจากการทดสอบเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ 30°C และ 50°C โดยมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ควบคุมที่อุณหภูมิ 50°C มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมสั้นกว่าคอนกรีตที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 โดยควบคุมที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 30°C และ 50°C คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ควบคุมอุณหภูมิ 30°C แต่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่สั้นกว่าคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมที่ควบคุมอุณหภูมิ 30°C ซึ่งอาจเกิดจากอุณหภูมิที่ 50°C ทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (micro crack) ในเนื้อคอนกรีต และที่อุณหภูมิ 50°C มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงอาจส่งผลกระทบต่อเข้มข้นเกลือคลอไรด์ให้มีค่าสูงมากขึ้น ส่งผลต่อการเกิดการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในปริมาณที่มากขึ้นและยังทำให้การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เป็นไปอย่างรวดเร็ว โดย Hussain and Rasheeduzzafar, (1993) ได้กล่าวว่าปริมาณคลอไรด์อิสระสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายที่อยู่ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีปริมาณลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออนพบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นทำให้เกิดการสลายของชั้น passive film บนผิวเหล็กเสริมนั้น อาจส่งผลจากการที่ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 และที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักอัตราส่วนร้อยละ 7.5 ที่อุณหภูมิเท่ากัน โดยคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูมมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่นานกว่า อาจเกิดจากคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็ว เกิดความร้อนสูง ส่งผลการแตกร้าวของคอนกรีตและความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ แต่เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์วิกฤตคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม อาจเกิดจากคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูมทำให้คอนกรีตมีความพรุนลดลงและความสามารถในการดักจับคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม โดย Al-Amoudi et al. (2007) มีรายงานผลของการศึกษาการดำเนินการที่จะประเมินคุณสมบัติของตัวอย่างหล่อซีเมนต์คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมซิ

ลิทัวม โดยบ่มภายใต้สภาพอากาศร้อน มีการประเมินผลกระทบของขนาดตัวอย่างและวิธีการบ่ม เพื่อลดการหดตัวแบบพลาสติกและการหดตัวแบบแห้ง ความสำคัญของการใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์และการบ่มที่ดีสำหรับการหลีกเลี่ยงการแตกร้าวอาจเกิดจากการหดตัวแบบพลาสติกและการหดตัวแบบแห้ง โดยเฉพาะภายใต้สภาพอากาศร้อน

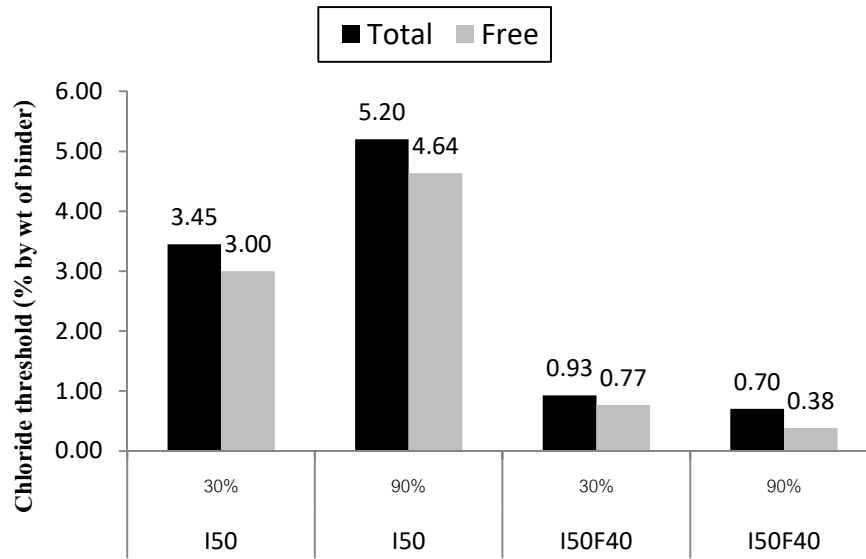


รูปที่ 4.13 ผลกระทบของอุณหภูมิต่างๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

## 4.2.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์

### 4.2.2.1 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.14 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต (Total chloride threshold) และปริมาณคลอไรด์อิสระวิกฤต (Free chloride threshold) ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% และ 90% ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 โดยใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 40 มีอายุบ่มที่ 28 วัน จากการทำการทดสอบเปรียบเทียบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันที่ 30% และ 90% จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 90% มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่สั้นกว่า และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 โดยใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันที่ 30% และ 90% จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 30% มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 90% แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานกว่าคอนกรีตที่ควบคุมความชื้น 90% เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% คอนกรีตจะมีลักษณะค่อนข้างแห้ง การแทรกซึมเป็นไปได้ช้ากว่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่ 90% และหากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยมีเถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักอัตราส่วนร้อยละ 40 ที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากัน โดยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากัน แต่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมสั้นกว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90 % อาจเกิดจากความเสถียรภาพของด่างมีผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ภายในของคอนกรีต ซึ่งความเสถียรภาพของด่างส่งผลต่อการเกิดสนิมเหล็กเสริมภายในของคอนกรีต ซึ่งเถ้าลอยเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลไอออน (Shehata & Thomas, 1999) ส่งผลทำให้อัตราส่วนผสมไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออน (Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>) ของคอนกรีตสูงจนถึงระดับที่ทำให้เหล็กเสริม (Kayyail & Haque, 1988; Ann & Song, 2007) แม้ว่าปริมาณที่เข้าไปในเหล็กเสริมจะมีปริมาณที่น้อยลงอาจเกิดจากคอนกรีตแน่นขึ้นก็ตาม

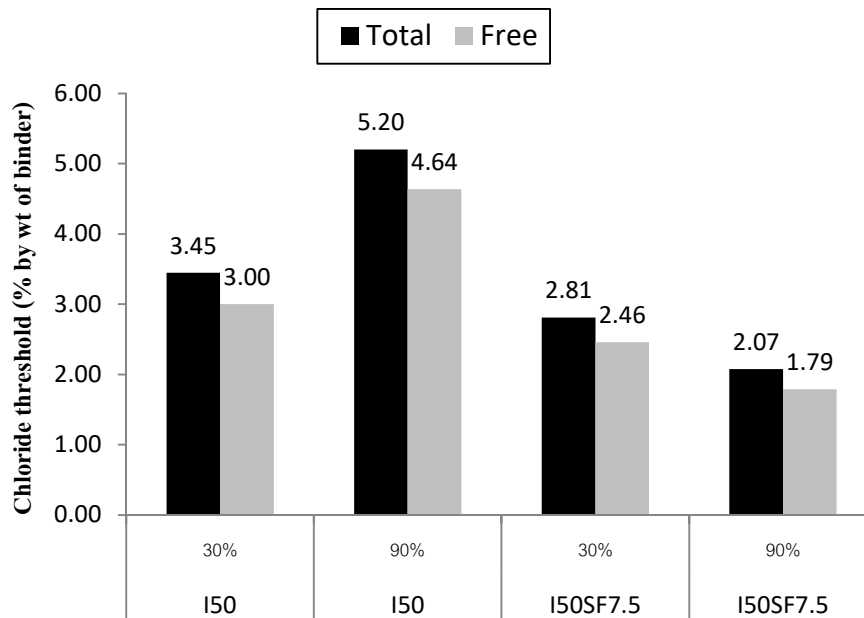


รูปที่ 4.14 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.2.2.3 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.15 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต (Total chloride threshold) และปริมาณคลอไรด์อิสระวิกฤต (Free chloride threshold) ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% และ 90% ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราร้อยละ 7.5 มีอายุบ่มที่ 28 วัน จากการทำการทดสอบเปรียบเทียบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันที่ 30% และ 90 % จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 90% มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 30% แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมสั้นกว่า และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันที่ 30% และ 90% จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 90% และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานกว่าคอนกรีตที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 90% อาจเกิดจากคอนกรีตที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30 % มีผลทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่น คอนกรีตมีความพรุนต่ำ ส่งผลต่อการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงและความเสถียรภาพของด่างมีผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตถึงแม้คอนกรีตมีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมต่ำก็ตาม ซึ่งความเสถียรภาพของด่างที่สูงก็ทำให้คอนกรีตมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่สูง แต่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมต่ำ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 และ อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่เท่ากัน จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วน แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วน อาจเกิดจากคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติดีขึ้น เช่น ลดการซึมผ่านของคลอไรด์ มีความทึบแน่น กำลังสูง และอุณหภูมิที่ เป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเร็วขึ้น และส่งผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม เมื่อพิจารณาที่ปริมาณคลอไรด์วิกฤตคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม อาจเกิดจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งความละเอียดมีผลต่อการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตในช่วงต้นดีกว่าคอนกรีต ไม่ผสมซิลิกาฟูม แต่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในช่วงหลัง เพราะการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างผลึกภายในของคอนกรีตมีความอ่อนแอกว่าหรือมีความพรุนมากกว่า ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมต่ำและเมื่อมีซิลิกาฟูมที่แทนที่ 50°C วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ความชื้นสัมพัทธ์ 90% เท่ากัน โดยพิจารณาระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีค่านานกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม อาจเกิดจากคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติดีขึ้น เช่น ลดการซึม

ผ่านของคลอไรด์ มีความทึบแน่น กำลังสูง และอุณหภูมิที่ เป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเร็วขึ้นและส่งผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม เมื่อพิจารณาที่ปริมาณคลอไรด์วิกฤตคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม อาจเกิดจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งความละเอียดมีผลต่อการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตในช่วงต้นดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม แต่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในช่วงหลัง เพราะการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างผลึกของคอนกรีตมีความอ่อนแอกว่า หรือมีความพรุนมากกว่า และเมื่อมีซิลิกาฟูมที่แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ความชื้นสัมพัทธ์ 90%เท่ากัน โดยพิจารณาระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูมมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม อาจเกิดจากคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงและส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นและความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ลดลง เมื่อพิจารณาที่ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม อาจเกิดจากการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันและส่งผลต่อปริมาณต่าง ซึ่งต่างจะช่วยป้องกันการเกิดสนิมที่เหล็กเสริมซึ่งส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่สูงของคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม

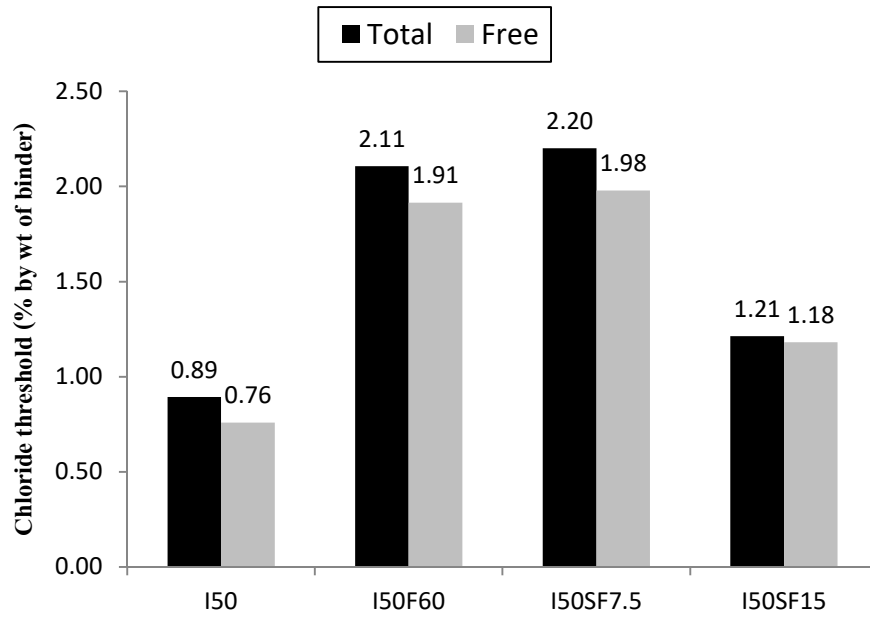


รูปที่ 4.15 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% และ 90% ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.2.3 ผลกระทบเนื่องจากสภาพแวดล้อมทั่วไป

จากรูปที่ 4.16 พิจารณาค่าคลอไรด์วิกฤตที่อัตราส่วนผสมผสมที่แตกต่างกัน โดยที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและคลอไรด์อิสระวิกฤตเท่ากับ 0.89, 0.76 % โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 60 % มีค่าคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและคลอไรด์อิสระวิกฤตเท่ากับ 2.11%, 1.91 % โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม 7.5 % มีค่าคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตทั้งหมดและคลอไรด์อิสระเท่ากับ 2.20%, 1.98 % โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และที่อัตราส่วนผสมผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม 15% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยมีค่าคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและคลอไรด์อิสระวิกฤตเท่ากับ 1.21%, 1.18 % โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน ภายใต้สภาพแวดล้อมทั่วไป เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย 60 % ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยทำให้มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย อาจเกิดจากคุณสมบัติของเถ้าลอยช่วยในการรักษาเสถียรภาพบริเวณผิวเหล็กเสริมที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนจากสนิมได้ถึงแม้มีระยะเวลาเกิดสนิมสั้น จึงทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 7.5 % โดยทั่วไปซิลิกาฟูมเป็นวัสดุปอซโซลานที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ซึ่งผลทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่น ความพรุนลดลง โพรงช่องว่างมีขนาดเล็กลง เพราะอนุภาคขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ของซิลิกาฟูมจะไปแทรกตัวอยู่ช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมได้ดีขึ้นและส่งผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่สูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 15% เมื่อการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมในปริมาณที่เพิ่มอาจทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น แต่การเสถียรภาพบริเวณผิวเหล็กเสริมลดลง อาจทำให้คอนกรีตมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 7.5% แม้ว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมทำให้คอนกรีตมีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่นานขึ้น แต่มีเสถียรภาพบริเวณเหล็กเสริมลดลง อาจส่งผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ต่ำลงได้



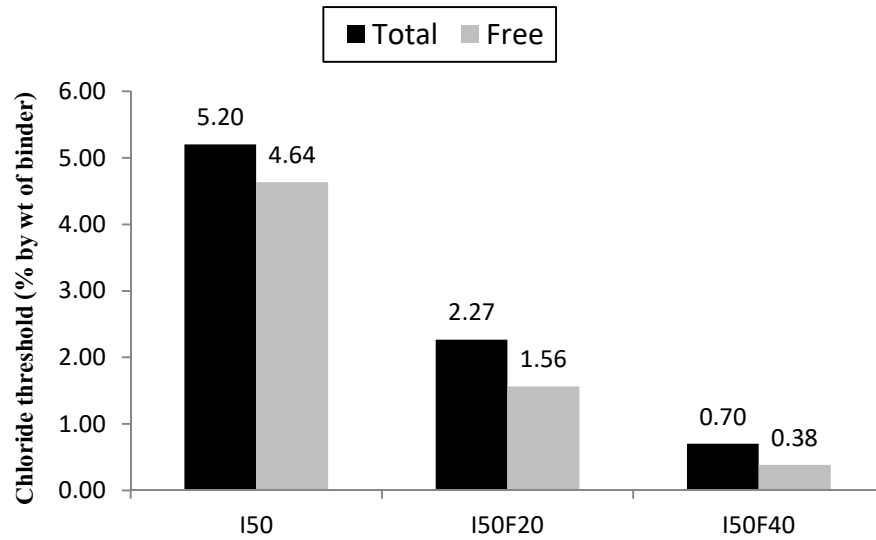


รูปที่ 4.16 ผลกระทบเนื่องจากสภาพแวดล้อมทั่วไป ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีวัสดุปอซโซลานแทนที่วัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน

#### 4.2.4 ผลกระทบเนื่องจากการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่วัสดุประสาน

##### 4.2.4.1 ผลกระทบของเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน

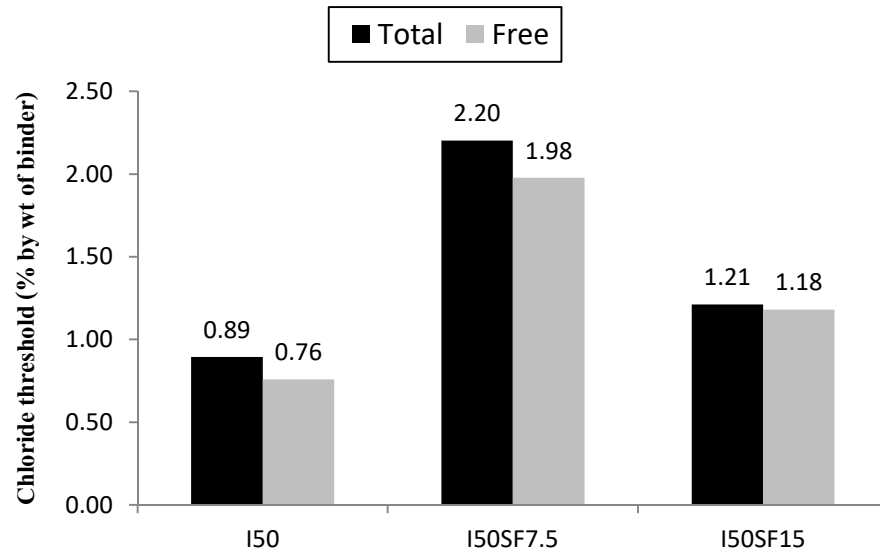
จากรูปที่ 4.17 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต (Total chloride threshold) และปริมาณคลอไรด์อิสระวิกฤต (Free chloride threshold) ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 90% ลงที่ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 ที่มีอายุบ่มที่ 28 วัน พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อคอนกรีตมีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน แต่มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมมากขึ้นเมื่อมีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ C-S-H ช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลง มีความทึบแน่นมากขึ้น ด้านทานการแทรกซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีขึ้นและผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เพราะอนุภาคของเถ้าลอยไปแทรกตัวระหว่างช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ ซึ่งลดปริมาณคลอไรด์วิกฤตจำนวนที่มากสามารถซึมเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้ โดย สุวิมล สัจจาณิชย์ และ คณะ จากการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยของคอนกรีต ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ในทุกอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานทั้งในสถานะแช่ปกติ และการเร่งเป็ยกลับแห้ง โดยที่อัตราส่วนส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานสูงมีผลต่อการแทรกซึมที่เกิดขึ้นได้เร็วกว่า เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนต่ำกว่าและการใช้เถ้าลอยยังมีผลดีต่อการลดการผุกร่อนของเหล็กเสริม แม้ว่าผลกระทบของสัดส่วนเถ้าลอยยังไม่ชัดเจนนัก โดยสองปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อการป้องกันการเกิดสนิมสำหรับคอนกรีตทั้งที่ผสมเถ้าลอยและไม่ผสมเถ้าลอย และอีกงานวิจัยหนึ่งของ Haraldjustnes, (1998) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือตะกรันเหล็ก ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถกักเก็บคลอไรด์เพิ่มขึ้น เพราะว่าทำให้เกิด C-S-H มากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ของคอนกรีตสูงขึ้น



รูปที่ 4.17 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ถ้ำลอมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่อายุบ่ม 28 วัน

#### 4.2.4.2 ผลกระทบของซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสาน

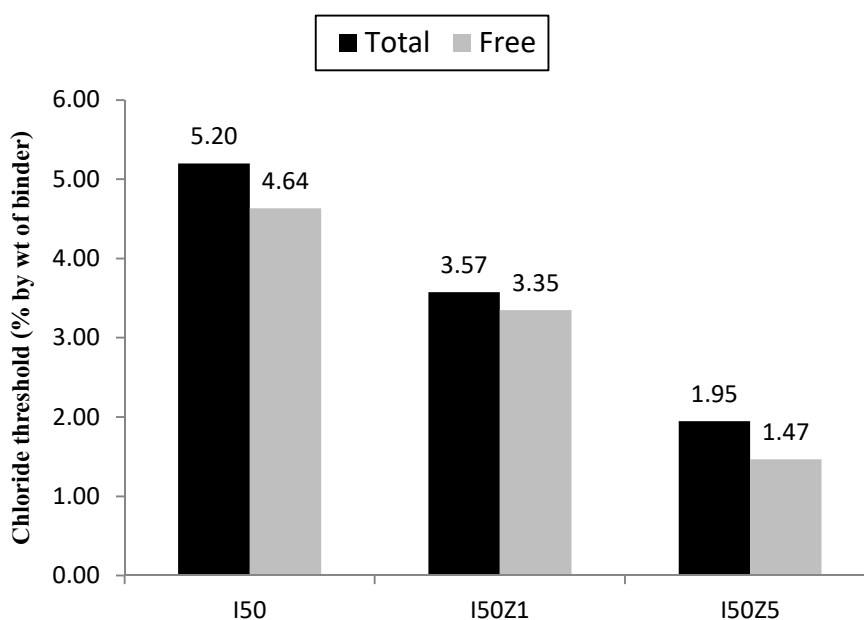
จากรูปที่ 4.18 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต (Total chloride threshold) และปริมาณคลอไรด์อิสระวิกฤต (Free chloride threshold) ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 90% คงที่ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 ที่มีอายุบ่มที่ 28 วัน พบว่าที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 และ 15 จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 15 และคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วน อาจเกิดจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้ปริมาณของ  $C_3A$  ลดลง โดย  $C_3A$  จะมีหน้าที่ในการดักจับคลอไรด์อิสระที่แทรกซึมในคอนกรีตที่ส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมได้ ดังนั้นเมื่อมีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่เหมาะสม จะส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ความพรุนลดลง ความทึบแน่นเพิ่มมากขึ้น และอนุภาคของซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งไวต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและส่งผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตมีความทึบแน่นสูง ความพรุนลดลง ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่นานมากขึ้น ซึ่งซิลิกาฟูมเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีปริมาณซิลิกาและอลูมินาค่อนข้างสูง ส่งผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งช่วงต้นและในระยะยาวได้ โดยขนาดที่เล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์จะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคของคอนกรีต และส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่สูงขึ้นได้ มาตรฐาน ASTM C618 ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหนักหรือพื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน (อ้างถึงใน ปริญญาจินดา ประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)



รูปที่ 4.18 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 และ 15 ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่อายุบ่ม 28 วัน

#### 4.2.4.3 ผลกระทบของซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.19 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต (Total chloride threshold) และปริมาณคลอไรด์อิสระวิกฤต (Free chloride threshold) ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความคุม อุณหภูมิที่ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 90% คงที่ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 ที่มี อายุบ่มที่ 28 วัน พบว่าที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่ บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 1 และ 5 จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตมี ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 7.5 และ 15 มีปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ และเมื่อคอนกรีตมีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำลง เนื่องจากอนุภาคของซีโอไลท์สังเคราะห์มีลักษณะที่มีความพรุนสูง เมื่อมีปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มสูงขึ้น โคนทั่วไปซีโอไลท์สังเคราะห์ จะทำให้คอนกรีตมีขนาดเฉลี่ยรูพรุนขนาดใหญ่มีขนาดที่เล็กลง แต่ทำให้รูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ได้อย่างรวดเร็วและมีผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ต่ำลง เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง และมีปริมาณ  $C_3A$  โดย  $C_3A$  มีหน้าที่ในการดักจับปริมาณคลอไรด์อิสระที่แทรกซึมในคอนกรีต เมื่อมีปริมาณลดลงส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการเกิดสนิมลดลง ส่งผลต่อการเกิดสนิมเหล็กเสริมของคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ต่ำด้วย

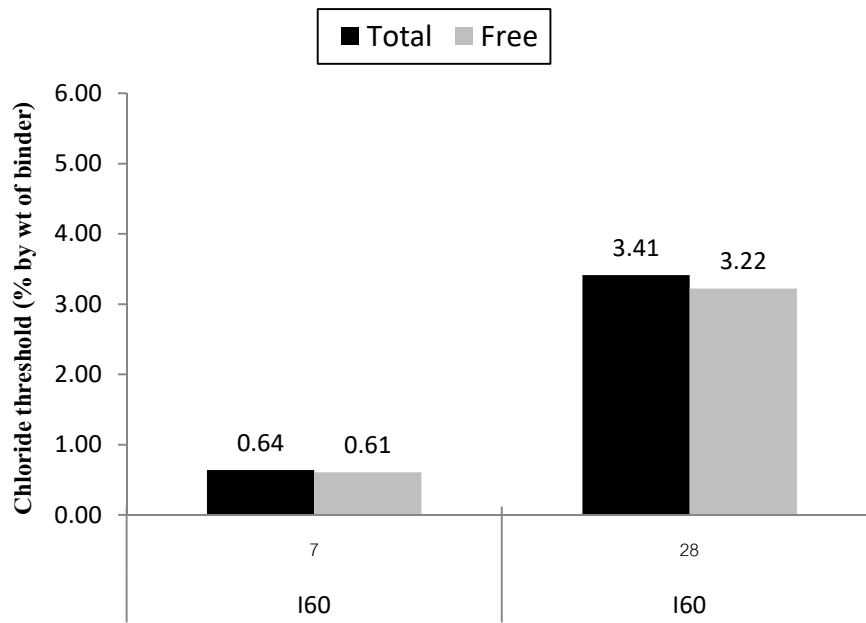


รูปที่ 4.19 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 1 และ 5 ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่อายุบ่ม 28 วัน

#### 4.2.5 ผลกระทบของระยะเวลาบ่ม

##### 4.2.5.1 ผลกระทบต่ออัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

จากรูปที่ 4.20 แสดงผลของการทดสอบค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.6 มีอายุบ่มที่ 7 และ 28 วัน พบว่าค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันมาก สาเหตุอาจเกิดจากน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและความสามารถต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ได้ และส่งผลต่อความทึบแน่นของคอนกรีตมากขึ้น เมื่อมีอายุบ่มที่นานขึ้น ความพรุนของคอนกรีตจะลดลงทำให้การซึมผ่านของเกลือคลอไรด์เป็นไปได้ยากขึ้น จึงทำให้ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับอายุบ่มที่ 7 วัน โดย Petterson et al., (1996) ได้กล่าวไว้ว่า การเคลื่อนตัวของออกซิเจนผ่านคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ และการลดลงของการเคลื่อนตัวของออกซิเจนผ่านคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ และการลดลงของการเคลื่อนตัวของออกซิเจนนั้นจะสามารถสังเกตพบได้ เมื่อโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตนั้นอึดตัวด้วยน้ำหรือปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง เพราะว่ออกซิเจนนั้นจะทำการแพร่ผ่านอากาศได้อย่างรวดเร็วกว่าหลายเท่าเปรียบเทียบกับการแพร่ผ่านน้ำหรือความชื้นสัมพัทธ์ โดยออกซิเจนสามารถละลายน้ำและให้ผ่านไปกับน้ำเป็นไปได้ยาก ยิ่งไปกว่านั้น โอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เกิดสนิมนั้นมีตัวแปรที่สำคัญของการเริ่มเกิดสนิมจะเกี่ยวข้องกับการมีอยู่ของออกซิเจนอิสระ โดยโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจะลดลงเมื่อออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ซึ่งหมายความว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตจะมีค่าสูง ถ้าเหล็กเสริมของคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อึดตัวไปด้วยน้ำหรือปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นผลจากรายงานของ Patterson et al โดยถ้ามีออกซิเจนและมีปริมาณน้ำที่เพียงพอ อาจส่งผลทำให้เหล็กเสริมของคอนกรีตเกิดสนิมได้ง่าย โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่อึดตัวด้วยน้ำหรือมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของคอนกรีตจะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตในสภาวะเปียกสลับแห้งสรุปได้ว่า เมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สูงส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงและมีระยะเวลาการเกิดสนิมที่นานขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะไปลดความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤตจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิสูงมีผลต่อความต้านทานที่ลดลง ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่ลดลง



รูปที่ 4.20 ผลกระทบที่ระยะบ่มต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60



### 4.3 การเปรียบเทียบการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต

จากผลการทดลองที่แสดงข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตสูง แต่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าน้อยลง ดังนั้นปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่มากเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถทำให้ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้นเสมอไป นอกจากนี้ในการศึกษานี้ พบว่า

เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมสูงขึ้น ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสั้นลง และปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำลง เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมสูงขึ้น ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสั้นลง และปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่ำ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอดัชนีเพื่อชี้วัดการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต โดยพิจารณาออกเป็น 2 ดัชนี ดังนี้

1) ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Steel corrosion resistance index , SI) แบ่งเป็น 2 ดัชนีย่อย ได้แก่

1.1) ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$  หมายถึง ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาณคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีต ดังสมการที่ 4.1

$$SI_{DC} = \frac{DT}{CTL} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $SI_{DC}$  คือ ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (day / % by wt of binder)  
 $DT$  คือ ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม (day)  
 $CTL$  คือ ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต (% by wt of binder)

1.2) ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DDa}$  หมายถึง ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ดังสมการที่ 4.2

$$SI_{DDa} = \frac{DT}{Da} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $SI_{DaD}$  คือ ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (day\*year /  $cm^2$ )  
 $Da$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ( $cm^2$  / year)  
 $DT$  คือ ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม (day)

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การพิจารณาดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$  และ  $SI_{DaD}$

ดัชนี	คุณสมบัติในความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต
$SI_{DC}$ มีค่ามาก	ดี
$SI_{DaD}$ มีค่ามาก	ดี

2) ดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต (Chloride resistance index , CI) แบ่งเป็น 2 ดัชนีย่อย ได้แก่

2.1) ดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$  หมายถึง ปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่อหนึ่งหน่วยระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังสมการที่ 4.3

$$CI_{CD} = \frac{CTL}{DT} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $CI_{CD}$  คือ ดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต (% by wt of binder / day)  
 $CTL$  คือ ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต (% by wt of binder)  
 $DT$  คือ ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม (day)

2.2) ดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{DaD}$  หมายถึง อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังสมการที่ 4.4

$$CI_{DaD} = \frac{Da}{DT} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $CI_{DaD}$  คือ ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีต ( $cm^2 / day \cdot year$ )  
 $Da$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ( $cm^2 / year$ )  
 $DT$  คือ ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม (day)

ตารางที่ 4.2 เกณฑ์การพิจารณาดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีต  $CI_{CD}$  และ  $CI_{DaD}$

ดัชนี	คุณสมบัติในความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต
$CI_{CD}$ มีค่าน้อย	ดี
$CI_{DaD}$ มีค่าน้อย	ดี

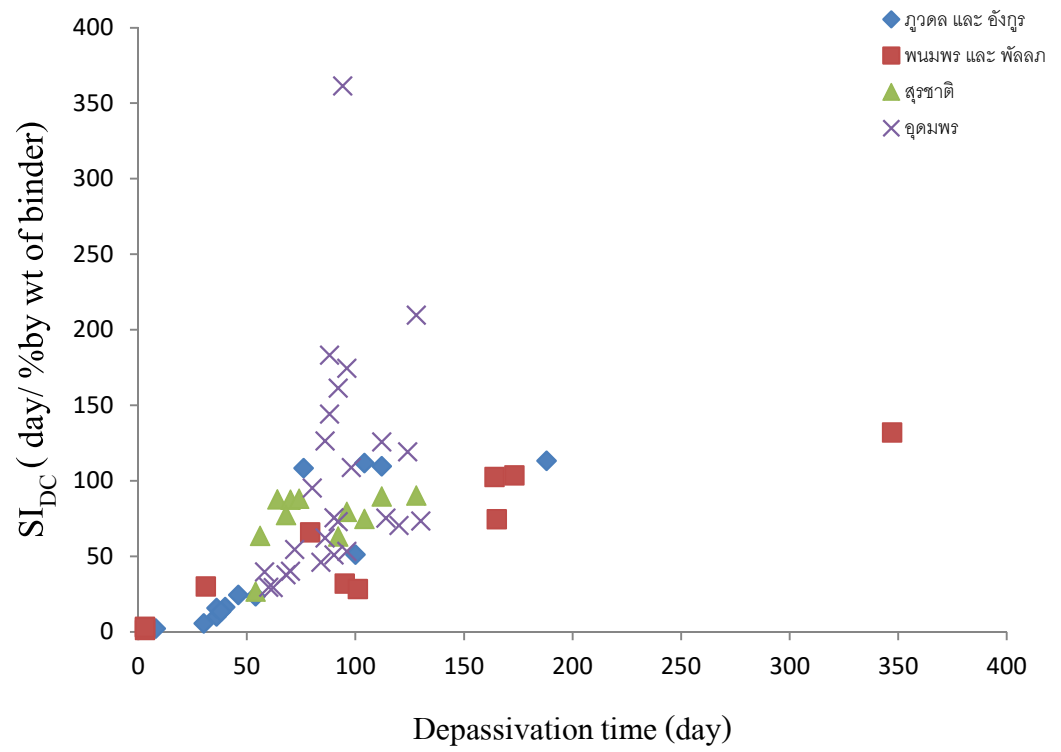
จากการศึกษางานวิจัยของ ภูวคณ เกียรติกิตตินันท์และอังกรู สีโสภา (2556), พนมพร แสงจันทร์ และพัลลภ อ้นแสง(2555) , สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2554) และอุดมพร กุลมงคล (2554) จะแสดงผลของค่าดัชนีต่างๆ ดังนี้

เมื่อพิจารณาดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$  หมายถึง ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาณคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีต โดยที่เมื่อดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีต โดยระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้น บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตและคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 4.21

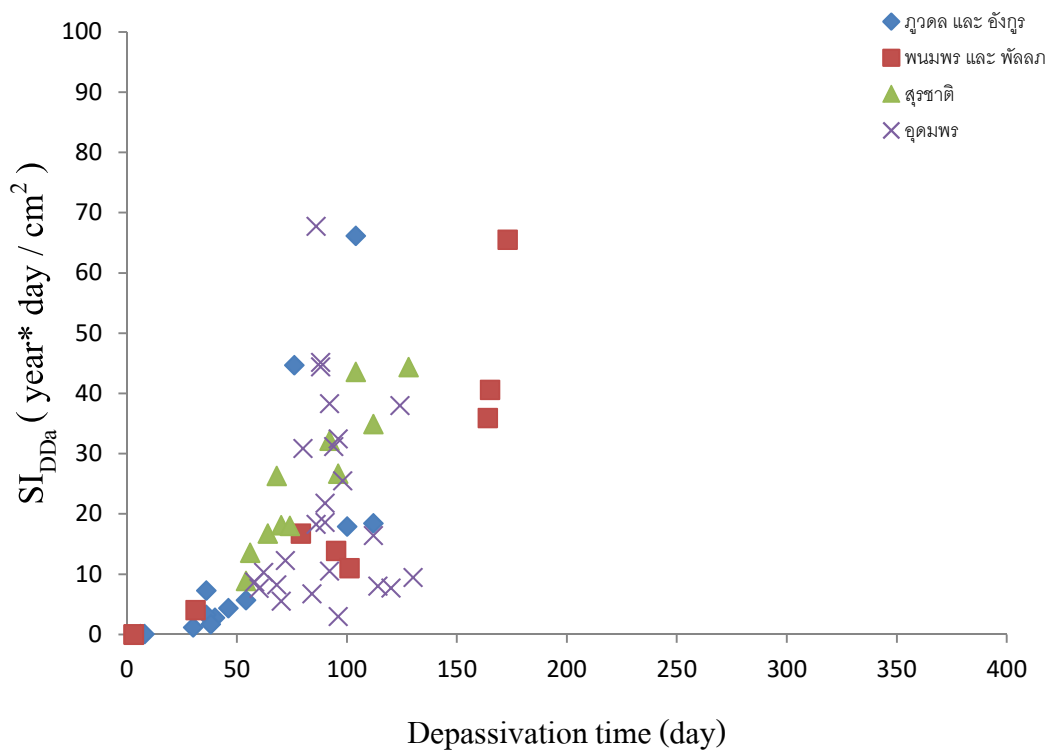
และเมื่อพิจารณาดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DDa}$  หมายถึง ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต โดยที่เมื่อดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีต โดยระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้น และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดต่ำลง บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตและคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 4.22

และเมื่อพิจารณาดัชนีการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$  หมายถึง ปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่อหนึ่งหน่วยระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยที่เมื่อดัชนีการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีต โดยระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้น บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตและคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 4.23

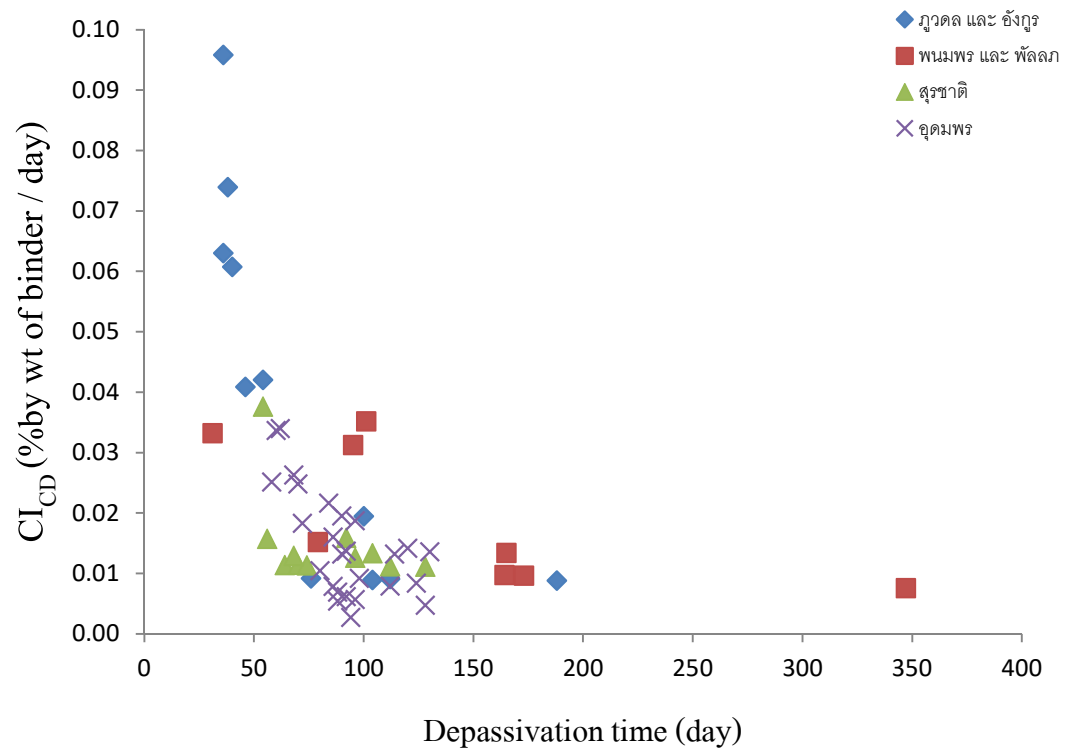
และเมื่อพิจารณาดัชนีการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{DaD}$  หมายถึง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต จะแสดงผลประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต โดยที่เมื่อดัชนีการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีต โดยระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้น และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดต่ำลง บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตและคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 4.24



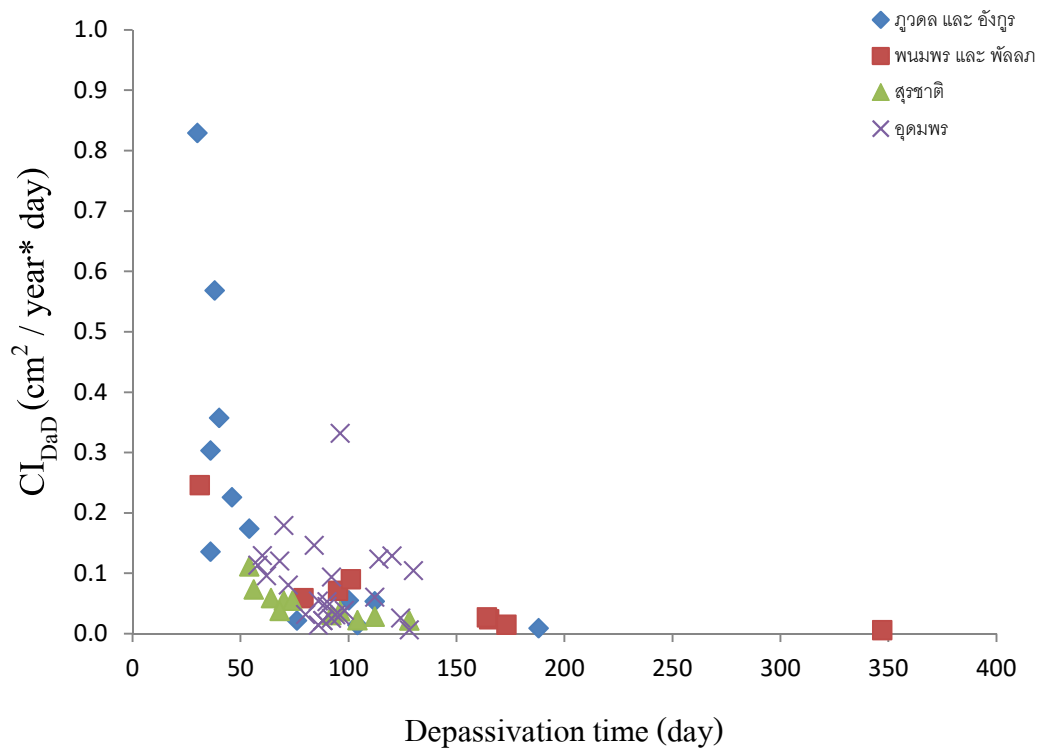
รูปที่ 4.21 ผลแสดงดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต SI<sub>DC</sub> ของงานวิจัยต่างๆ



รูปที่ 4.22 ผลแสดงดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต SI<sub>DDa</sub> ของงานวิจัยต่างๆ



รูปที่ 4.23 ผลแสดงดัชนีการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$  ของงานวิจัยต่างๆ



รูปที่ 4.24 ผลแสดงดัชนีการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{DaD}$  ของงานวิจัยต่างๆ

จากการศึกษาผลกระทบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤต ดังตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต หมายถึง ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมต่อหนึ่งหน่วยปริมาณคลอไรด์วิกฤต ( $SI_{DC}$ ) ซึ่งบ่งบอกคุณสมบัติของคอนกรีตที่ดีภายใต้การควบคุม และค่าดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต หมายถึง ปริมาณคลอไรด์วิกฤตต่อหนึ่งหน่วยระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีต ( $CI_{CD}$ ) จะแสดงผลชี้วัดการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมได้ดีที่สุด

และหากพิจารณาจากการศึกษางานวิจัยของพนมพร แสงจันทร์ และพัลลภ อ้นแสง(2555) ดังตารางที่ 4.4, สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2554) ดังตารางที่ 4.5 และอุดมพร กุลมงคล (2554) ดังตารางที่ 4.6 พบว่าการแสดงผลชี้วัดการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตได้ดีที่สุด ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต หมายถึง ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมต่อหนึ่งหน่วยปริมาณคลอไรด์วิกฤต ( $SI_{DC}$ ) และค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต หมายถึง ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมต่อหนึ่งหน่วยสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ( $SI_{DDa}$ ) โดยค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่ามาก ส่งผลต่อคุณสมบัติความต้านทานของคอนกรีตที่ดีขึ้น ดังแสดงตารางที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีต โดยระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้น บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตและคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตที่ดีขึ้น

ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต และค่าดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต ภูวดล เกียรติกิตตินันท์ และอังกูร สีโสภา (2556)  
 ทำการศึกษา ผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

Specimen No.	Mix id.	ระยะบ่มน้ำ (วัน)	ความชื้น (%)	อุณหภูมิ (°C)	DT (Day)	CTL (% by wt of binder)	D <sub>a</sub> (cm <sup>2</sup> /year)	Resistance Index				Check			
								SI <sub>DC</sub>	SI <sub>DDa</sub>	CI <sub>CD</sub>	CI <sub>DaB</sub>	SI <sub>DC</sub>	SI <sub>DDa</sub>	CI <sub>CD</sub>	CI <sub>DaB</sub>
1	I40-00	28	90	30	112	1.02	6.07	109.80	18.464	0.009	0.054	✓	✗	✓	✗
2	I40-00	28	90	50	54	2.27	9.43	23.789	5.726	0.042	0.175	✗	✓	✗	✗
3	I50-00	28	90	30	40	2.43	14.31	16.461	2.795	0.061	0.358	✓	✗	✓	✗
4	I50-00	28	90	50	30	5.2	24.89	5.769	1.206	0.173	0.830	✓	✓	✓	✓
5	I50-00	28	30	50	36	3.45	4.90	10.435	7.340	0.096	0.136	✓	✗	✓	✗
6	I50F20	28	90	50	36	2.27	10.93	15.859	3.294	0.063	0.304	✓	✗	✓	✗
7	I50F40	28	90	30	188	1.66	1.76	113.25	107.086	0.009	0.009	✓	✓	✓	✓
8	I50F40	28	90	50	76	0.7	1.70	108.57	44.733	0.009	0.022	✗	✗	✗	✗
9	I50F40	28	30	50	104	0.93	1.57	111.82	66.174	0.009	0.015	✗	✗	✗	✗
10	I50SF7.5	28	90	30	46	1.88	10.42	24.468	4.416	0.041	0.226	✗	✗	✗	✗
11	I50SF7.5	28	90	50	6	2.07	53.17	2.899	0.113	0.345	8.861	✓	✓	✓	✓
12	I50SF7.5	28	30	50	38	2.81	21.61	13.523	1.758	0.074	0.569	✓	✓	✓	✗
13	I50Z1	28	90	50	8	3.57	84.66	2.241	0.094	0.446	10.583	✓	✓	✓	✓
14	I50Z5	28	90	50	100	1.95	5.57	51.282	17.966	0.020	0.056	✗	✗	✗	✗
												9	7	10	4

✓ หมายถึง ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่สอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม

✗ หมายถึง ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ไม่สอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม

ตารางที่ 4.4 ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต และค่าดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต พนมพร แสงจันทร์ และพัลลภ อ้นแสง (2555)

ทำการศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยตะกรันเตาถลุงเหล็ก

Specim No.	Mix id.	ระยะบ่ม (วัน)	Depassivation time	CTL (% by wt of	D <sub>a</sub> (cm <sup>2</sup> /year	Resistance Index				Check			
						SI <sub>DC</sub>	SI <sub>DDa</sub>	CI <sub>CD</sub>	CI <sub>DaB</sub>	SI <sub>DC</sub>	SI <sub>DD</sub>	CI <sub>CD</sub>	CI <sub>Da</sub>
1	I40	7	347	2.63	2.26	131.939	153.757	0.008	0.007	✓	✓	✓	✓
2	I50	7	165	2.21	4.06	74.661	40.644	0.013	0.025	✓	✓	✓	✓
3	I60	7	31	1.03	7.64	30.097	4.059	0.033	0.246	✓	✓	✓	✓
4	I60	28	95	2.97	6.82	31.987	13.922	0.031	0.072	✗	✗	✗	✗
5	I60	56	101	3.55	9.16	28.451	11.029	0.035	0.091	✗	✗	✗	✗
6	I50F30	7	3	0.89	108.95	3.371	0.028	0.297	36.316	✓	✓	✓	✓
7	I50F30	28	164	1.6	4.56	102.500	35.958	0.010	0.028	✓	✓	✓	✓
8	I50F30	56	173	1.67	2.64	103.593	65.533	0.010	0.015	✓	✓	✓	✓
9	I50F50	7	3	2.63	660.58	1.141	0.005	0.877	220.192	✓	✓	✓	✓
10	I50F50	28	3	1.06	69.35	2.830	0.043	0.353	23.118	✓	✓	✓	✓
11	I50F50	56	79	1.2	4.71	65.833	16.770	0.015	0.060	✗	✗	✗	✗
										8	8	8	8

✓ หมายถึง ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่สอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม

✗ หมายถึง ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ไม่สอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม



ตารางที่ 4.5 ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต และค่าดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต สุรชาติ ฤกษ์ไหรา (2554) ทำการศึกษาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์พอสต์ที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง

Specimen No.	Mix id.	ระยะป่นน้ำ (วัน)	DT (day)	CTL (% by wt of binder)	D <sub>a</sub> (cm <sup>2</sup> /year)	Resistance Index				Check			
						SI <sub>DC</sub>	SI <sub>DDa</sub>	CI <sub>CD</sub>	CI <sub>DaD</sub>	SI <sub>DC</sub>	SI <sub>DDa</sub>	CI <sub>CD</sub>	CI <sub>DaD</sub>
1	C100	28	54	6.04	2.03	26.601	8.934	0.038	0.112	✓	✓	✓	✓
2	C70FA-MM30	28	96	3.59	1.21	79.339	26.720	0.013	0.037	✗	✓	✗	✓
3	C50FA-MM50	28	64	3.81	0.73	87.671	16.801	0.011	0.060	✗	✓	✗	✗
4	C70FA-H30	28	112	3.21	1.25	89.600	34.940	0.011	0.029	✓	✗	✓	✗
5	C50FA-H50	28	70	3.85	0.8	87.500	18.172	0.011	0.055	✗	✓	✗	✓
6	C70FA-B30	28	92	2.86	1.46	63.014	32.186	0.016	0.031	✗	✓	✗	✗
7	C50FA-B50	28	56	4.12	0.88	63.636	13.599	0.016	0.074	✗	✓	✓	✓
8	C70FA-HM30	28	128	2.88	1.42	90.141	44.401	0.011	0.023	✓	✓	✓	✓
9	C50FA-HM50	28	74	4.09	0.84	88.095	18.075	0.011	0.055	✗	✗	✗	✗
10	C70FA-BM30	28	104	2.39	1.39	74.820	43.590	0.013	0.023	✗	✗	✗	✗
11	C50FA-BM50	28	68	2.58	0.88	77.273	26.368	0.013	0.038	✗	✗	✗	✓
										3	6	4	8

✓ หมายถึง ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่สอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม

✗ หมายถึง ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ไม่สอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม

ตารางที่ 4.6 ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต และดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต อุดมพร กุลมงคล (2554) ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสม แก้วกันเตาแม่เมาะและแก้วกันเตาระยอง

Specimen No.	Mix id.	ระยะบ่มน้ำ (วัน)	DT (Day)	CTL (% by wt of binder)	D <sub>a</sub> (cm <sup>2</sup> /year)	Resistance Index				Check			
						SI <sub>DC</sub>	SI <sub>DDa</sub>	CI <sub>CD</sub>	CI <sub>DaD</sub>	SI <sub>DC</sub>	SI <sub>DD</sub>	CI <sub>CD</sub>	CI <sub>DaD</sub>
1	C100	28	62	2.11	6.00	29.384	10.339	0.034	0.097	✓	✗	✓	✗
2	C1FAMM30	28	90	1.19	4.83	75.630	18.626	0.013	0.054	✗	✗	✗	✗
3	C1FAB30	28	128	0.61	0.88	209.836	146.202	0.005	0.007	✗	✓	✗	✓
4	C1FABM30	28	88	0.48	1.95	183.333	45.188	0.005	0.022	✗	✗	✗	✗
5	C1FAH30	28	92	1.26	8.70	73.016	10.573	0.014	0.095	✗	✗	✗	✗
6	C1FAHM30	28	96	0.55	2.96	174.545	32.487	0.006	0.031	✗	✗	✗	✗
7	C1BAMM10	28	60	2.02	7.80	29.703	7.688	0.034	0.130	✓	✗	✓	✗
8	C1BAB10	28	58	1.46	6.61	39.726	8.781	0.025	0.114	✓	✗	✗	✗
9	C1BABM10	28	80	0.84	2.59	95.238	30.895	0.011	0.032	✗	✗	✗	✗
10	C1BAH10	28	84	1.82	12.34	46.154	6.807	0.022	0.147	✓	✗	✓	✗
11	C1BAHM10	28	68	1.79	8.23	37.989	8.263	0.026	0.121	✓	✗	✗	✗
12	C1BAMM30	28	70	1.74	12.56	40.230	5.571	0.025	0.179	✓	✗	✓	✗
13	C1BAB30	28	72	1.32	5.85	54.545	12.306	0.018	0.081	✓	✗	✗	✗
14	C1BABM30	28	86	0.68	1.27	126.471	67.807	0.008	0.015	✗	✗	✗	✗
15	C1BAH30	28	90	1.76	4.12	51.136	21.836	0.020	0.046	✗	✗	✗	✗
16	C1BAHM30	28	86	1.38	4.69	62.319	18.321	0.016	0.055	✗	✗	✗	✗
17	C1FAMM30BAMM10	28	94	0.26	3.01	361.538	31.242	0.003	0.032	✗	✗	✗	✗
18	C1FAMM30BAH10	28	112	0.89	6.80	125.843	16.466	0.008	0.061	✗	✗	✗	✗
19	C1FAH30BAMM10	28	98	0.90	3.84	108.889	25.525	0.009	0.039	✗	✗	✗	✗
20	C1FAH30BAB10	28	96	1.80	31.94	53.333	3.006	0.019	0.333	✗	✗	✗	✗

Specimen No.	Mix id.	ระยะบ่มหน้า (วัน)	DT (Day)	CTL (% by wt of binder)	D <sub>a</sub> (cm <sup>2</sup> /year)	Resistance Index				Check			
						SI <sub>DC</sub>	SI <sub>DDa</sub>	CI <sub>CD</sub>	CI <sub>DaD</sub>	SI <sub>DC</sub>	SI <sub>DD</sub>	CI <sub>CD</sub>	CI <sub>DaD</sub>
21	C1FAH30BABM10	28	130	1.77	13.65	73.446	9.523	0.014	0.105	✗	✗	✗	✗
22	C1FAH30BAH10	28	120	1.70	15.52	70.588	7.734	0.014	0.129	✗	✗	✗	✗
23	C1FAH30BAHM10	28	114	1.51	14.13	75.497	8.068	0.013	0.124	✗	✗	✗	✗
24	C1FAH30BAH30	28	124	1.04	3.26	119.231	38.048	0.008	0.026	✗	✗	✗	✗
25	C1FAMM20LP10BAMM10	28	88	0.61	1.98	144.262	44.465	0.007	0.022	✗	✗	✗	✗
26	C1FAH20LP10BAH10	28	92	0.57	2.40	161.404	38.372	0.006	0.026	✗	✗	✗	✗
										7	1	4	1

- ✓ หมายถึง ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่สอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม
- ✗ หมายถึง ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ไม่สอดคล้องกับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม

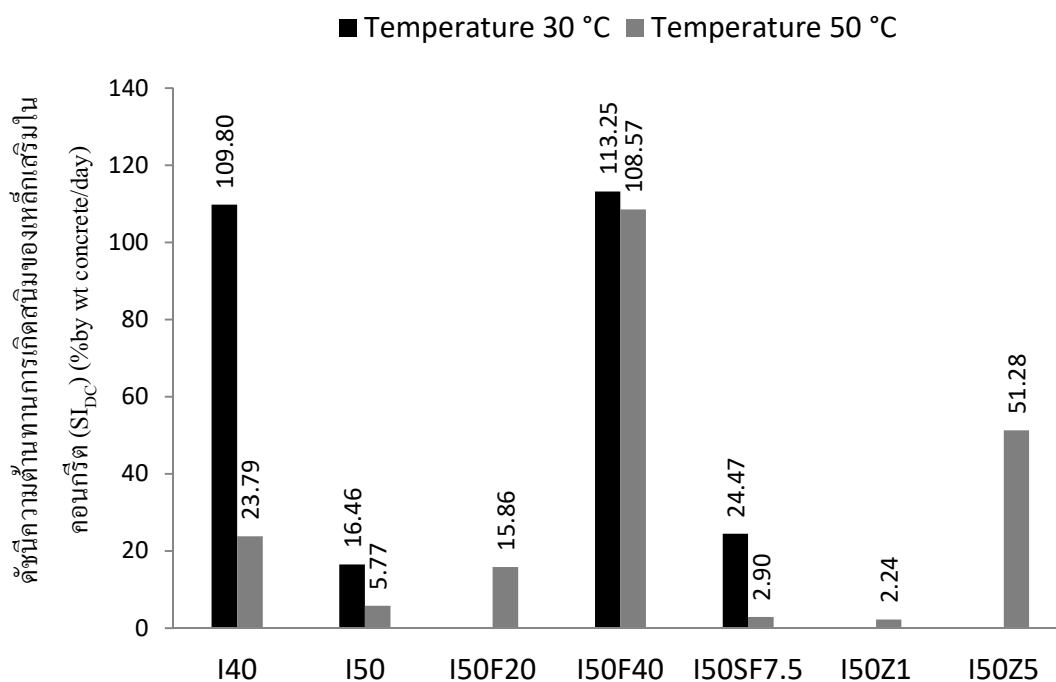
### 4.3.1 ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต $SI_{DC}$

#### 4.3.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.25 พบว่า เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  จะพบว่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตของคอนกรีต  $SI_{DC}$  มากกว่าที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  และหากพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานพบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$  มากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านทานการเกิดสนิมดีกว่า

พิจารณาการใช้การแทนที่วัสดุประสาน พบว่า ที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 มีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$  มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลัก นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านทานการเกิดสนิมดีกว่า

และพิจารณาที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ถ้าล้อยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 คอนกรีตผสมซีโอโลทสังเคราะห์ร้อยละ 5 มีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$  มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลัก นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านทานการเกิดสนิมดีกว่า



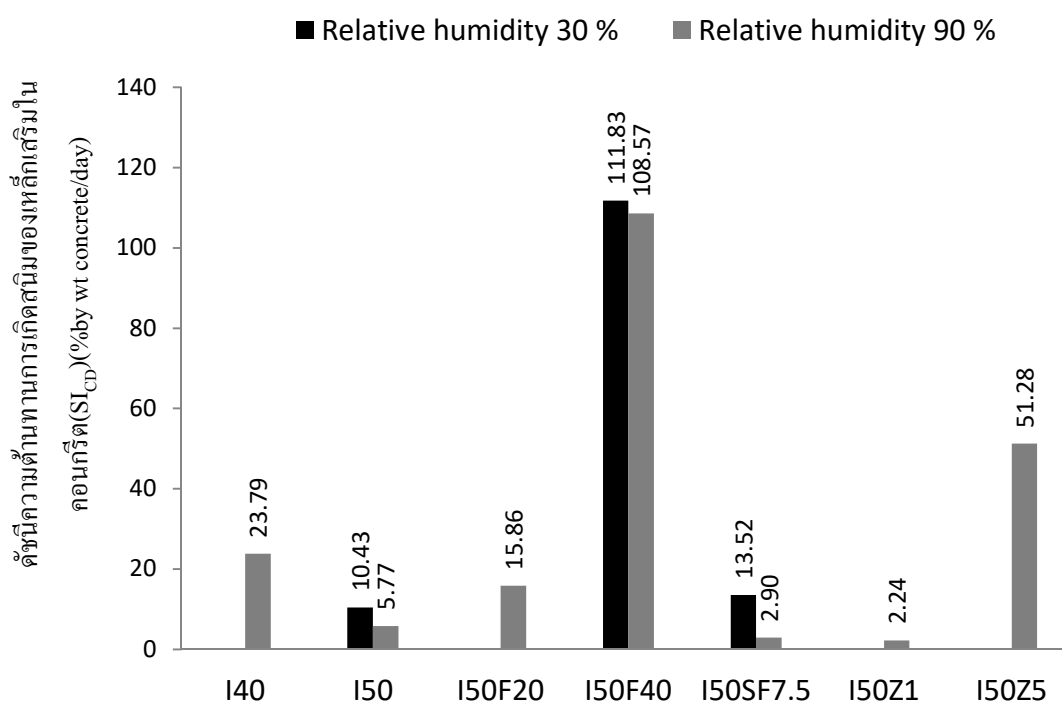
รูปที่ 4.25 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$

#### 4.3.1.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์

จากรูปที่ 4.26 พบว่า เมื่อพิจารณาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% จะดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$  มากกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และหากพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานพบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$  มากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านทานการเกิดสนิมดีกว่า

พิจารณาการใช้การแทนที่วัสดุประสาน พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% คอนกรีตผสมถั่วลอจหรือยลละ 40 มีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$  มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลัก นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านทานการเกิดสนิมดีกว่า

และพิจารณาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% ถั่วแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 และ 20 คอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 5 ตามลำดับ มีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$  มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลัก นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านทานการเกิดสนิมดีกว่า



รูปที่ 4.26 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลต่อดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต  $SI_{DC}$

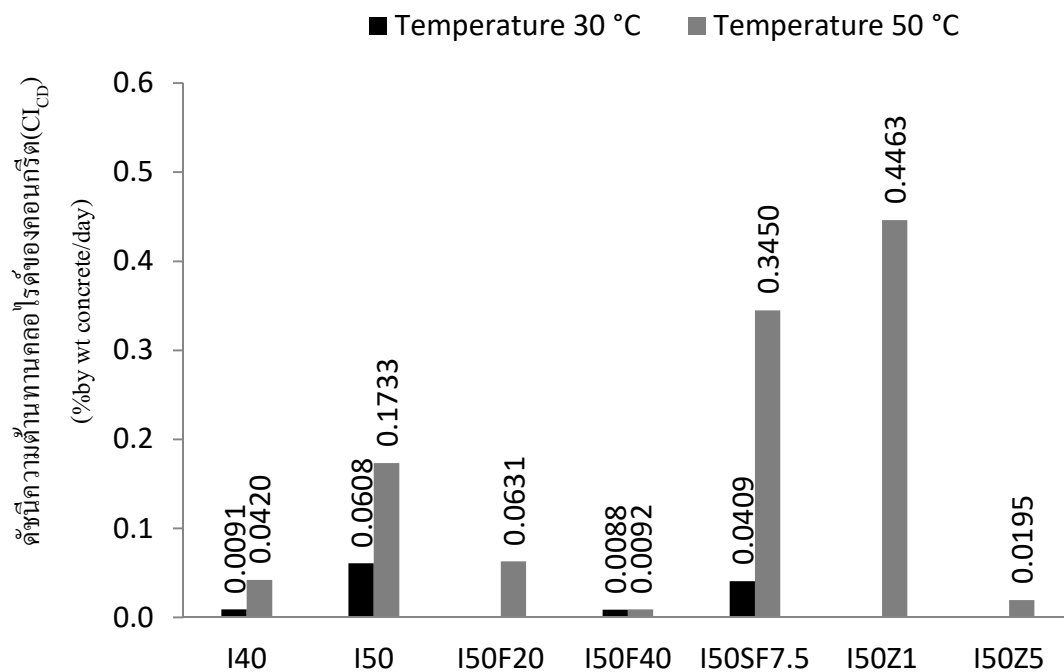
### 4.3.2 ดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต $CI_{CD}$

#### 4.3.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.27 พบว่า เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  จะพบว่า มีดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$  น้อยกว่าที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  และหากพิจารณาอัตราส่วนผสมต่อวัสดุประสานพบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$  น้อยกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่า

พิจารณาการใช้การแทนที่วัสดุประสาน พบว่า ที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  คอนกรีตผสมซิลิกาฟุ้งร้อยละ 7.5 มีดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$  น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลัก นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่า

และพิจารณาที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ถ้าแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 และ 20 คอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 5 ตามลำดับ มีดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$  น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลัก นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่า



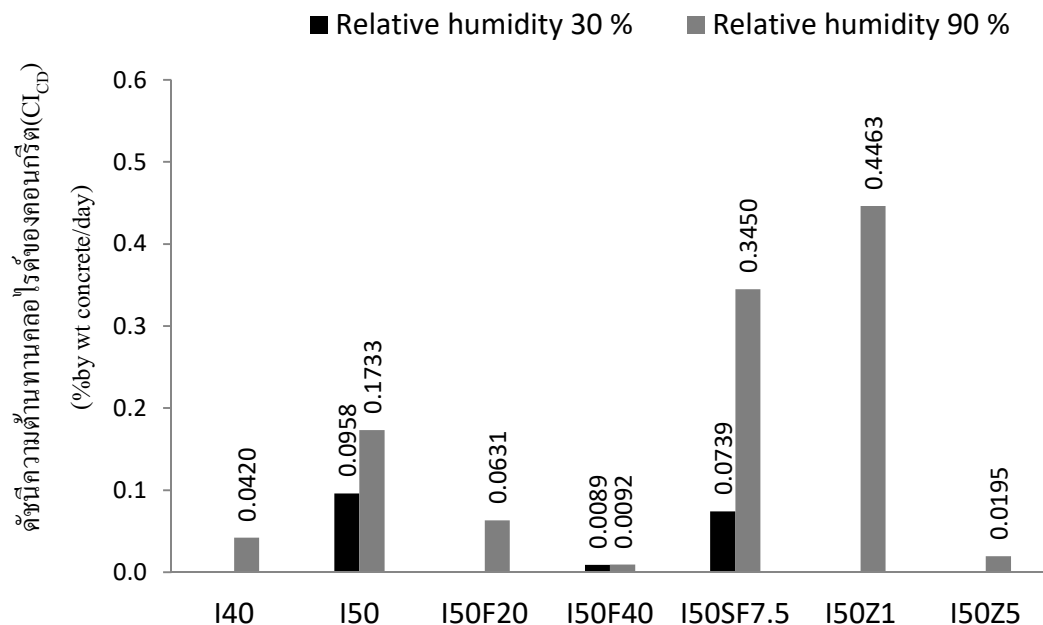
รูปที่ 4.27 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$

#### 4.3.2.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์

จากรูปที่ 4.28 พบว่า เมื่อพิจารณาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% จะดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$  น้อยกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และหากพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$  น้อยกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่า

พิจารณาการใช้การแทนที่วัสดุประสาน พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 มีดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$  น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลัก นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่า

และพิจารณาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% ถ้าแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 และ 20 คอนกรีตผสมซีไอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 5 ตามลำดับ มีดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$  น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลัก นั้นแสดงว่ามีประสิทธิภาพความต้านคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่า



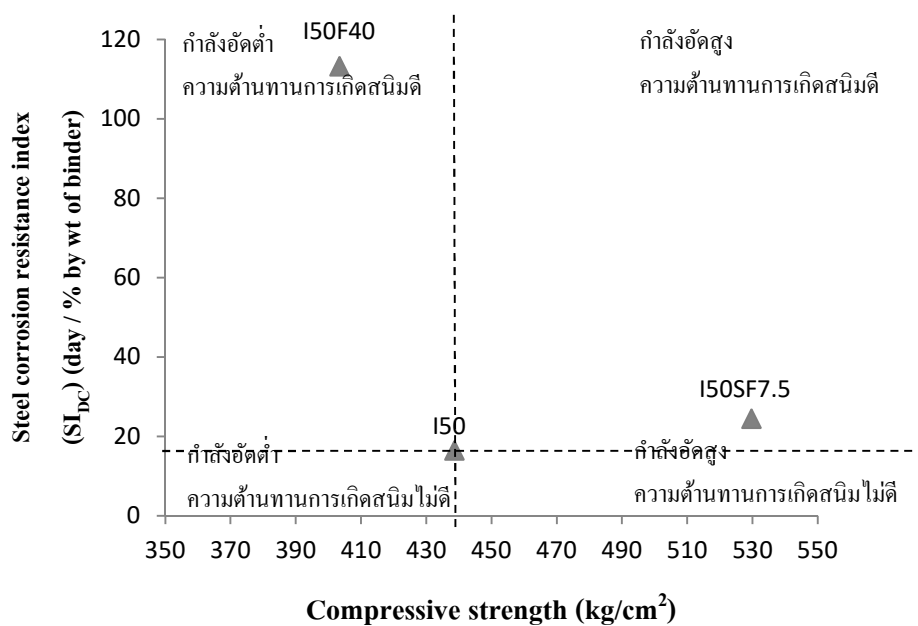
รูปที่ 4.28 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อดัชนีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต  $CI_{CD}$

#### 4.4 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดคอนกรีตที่และคุณสมบัติของคอนกรีต

##### 4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีต

##### 4.4.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ใช้การแทนที่วัสดุประสาน

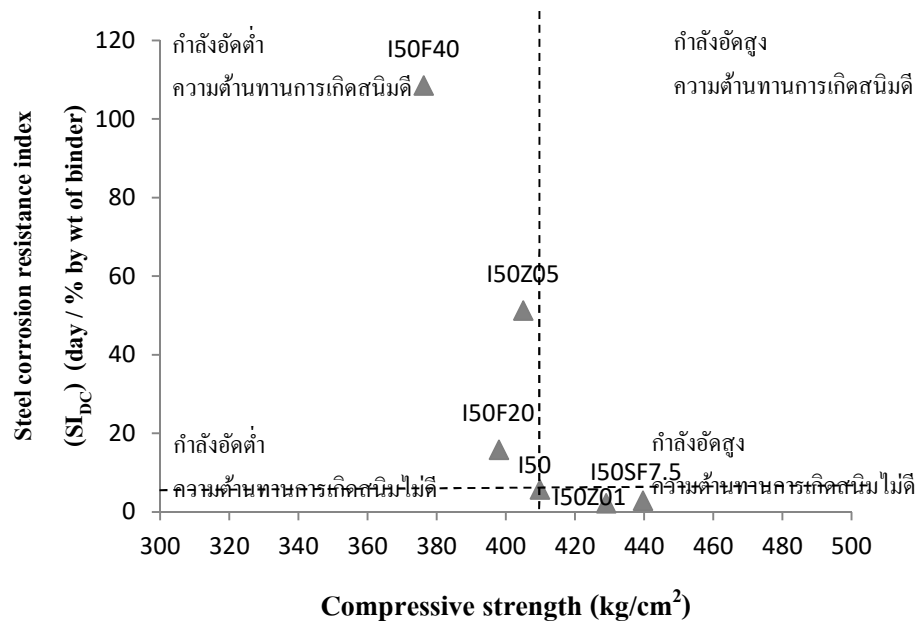
จากรูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Compressive strength) กับค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Steel corrosion resistance index) จากการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 ที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 มีกำลังอัดและมีค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน อาจเกิดจากอุณหภูมิที่ 30°C มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำส่งผลต่ออัตราการสูญเสียน้ำในขณะบ่มที่ลดลง ทำให้เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องและทำให้อุณหภูมิของปูนซีเมนต์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.29 ผลกระทบของอุณหภูมิ 30°C ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน



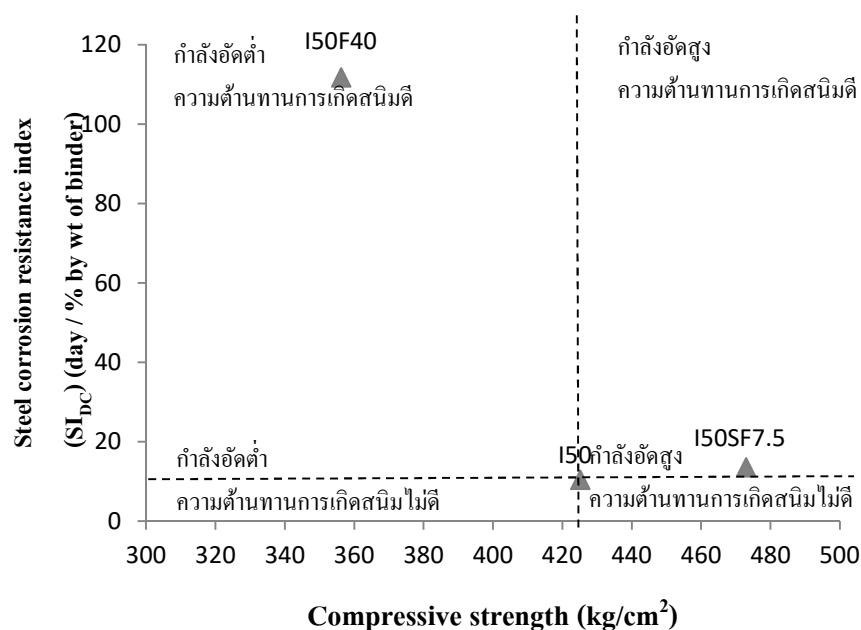
จากรูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Compressive strength) กับค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Steel corrosion resistance index) จากการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 มีกำลังอัดสูง แต่มีค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำ และเนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ จึงไปต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้คอนกรีตมีกำลังที่เพิ่มอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และกำลังอัดเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 โดยมีค่าต่ำลง เมื่อมีปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้คอนกรีตมีความพรุนลดลง ความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ และอุณหภูมิที่ 50°C มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงอาจส่งผลต่อรอยแตกร้าวขนาดเล็กภายในคอนกรีต จึงส่งผลต่อกำลังอัดลดลง เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 1 และ 5 โดยคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 1 มีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 5 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน แต่มีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิที่ 50°C ส่งผลต่อรอยแตกร้าวขนาดเล็กภายในคอนกรีต และมีอัตราการสูญเสียน้ำสูง ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดไม่สมบูรณ์ ทำให้ความทึบแน่นลดลง ความพรุนเพิ่มขึ้น อาจส่งผลต่อความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตลดลงและคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้โพรงช่องว่างขนาดกลางเฉลี่ยเพิ่มขึ้น แต่มีโพรงช่องว่างขนาดใหญ่ลดลง อาจส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อมีปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



รูปที่ 4.30 ผลกระทบของอุณหภูมิ 50°C ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 ซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 และซีไอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และ 5 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

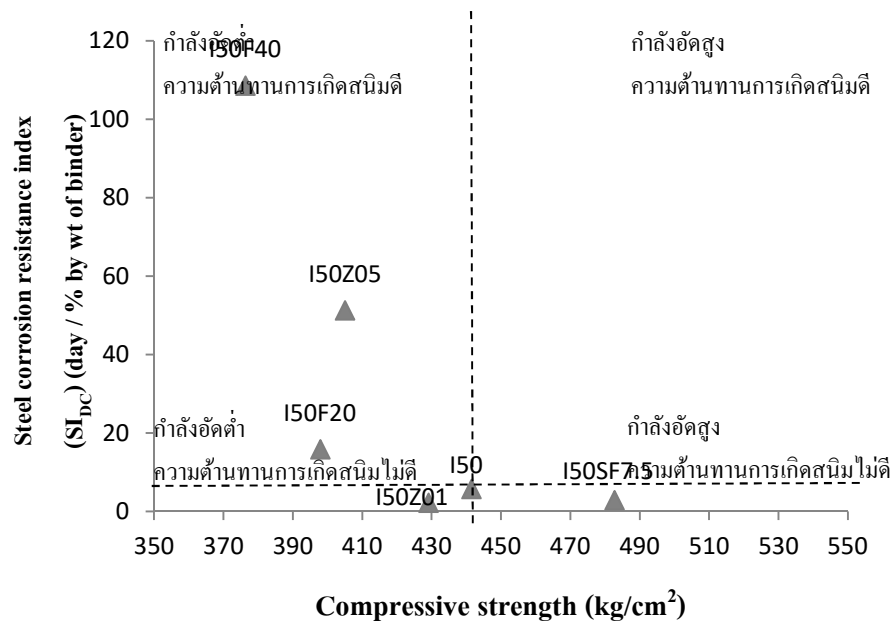
#### 4.4.1.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคอนกรีตที่ใช้การแทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Compressive strength) กับค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Steel corrosion resistance index) จากการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 โดยมีกำลังอัดสูง แต่มีค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำ และเนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ จึงไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้คอนกรีตมีกำลังที่เพิ่มอย่างรวดเร็ว แต่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% การทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกไม่ต่อเนื่องและไม่สมบูรณ์ ส่งผลต่อความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ไม่ดี เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และเมื่อพิจารณาคอนกรีตใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 มีกำลังอัดต่ำ แต่มีค่าดัชนีความต้านทานคลอไรด์สูง เนื่องจากการปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% ที่ใช้ในการบ่มไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก จึงผลต่อกำลังอัดลดลง ความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูง เพราะว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์สูง เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วน



รูปที่ 4.31 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ 30 % ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ซิลิกาฟุ้งร้อยละ 7.5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะบ่มน้ำ 28 วัน

รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Compressive strength) กับค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Steel corrosion resistance index) จากการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 โดยมีกำลังอัดสูง แต่มีค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำ โดยความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% ส่งผลต่อปริมาณความชื้นที่บ่มไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก อาจทำให้ปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องและสมบูรณ์ ส่งผลต่อความต้านทานด้านทานการเกิดสนิมลดลง และเนื่องจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ จึงไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้คอนกรีตมีกำลังที่เพิ่มอย่างรวดเร็ว และเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 โดยมีกำลังอัดต่ำลง เมื่อมีปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้คอนกรีตมีความพรุนลดลง ความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการต้านทานการเกิดสนิมเนื่องจากการความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% ซึ่งมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกไม่สมบูรณ์ จึงทำให้กำลังต่ำลง แต่มีดัชนีค่าความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูง บ่งบอกถึงคอนกรีตมีความสามารถในการเกิดสนิมได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 1 และ 5 โดยคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อกำลังที่ลดลง แต่มีค่าดัชนีความต้านทานสูงขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์เพิ่มขึ้น แต่มีค่าดัชนีเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ในปริมาณที่สูงขึ้น เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% ซึ่งมีปริมาณความชื้นในขณะบ่มไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่อเนื่องและสมบูรณ์ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน

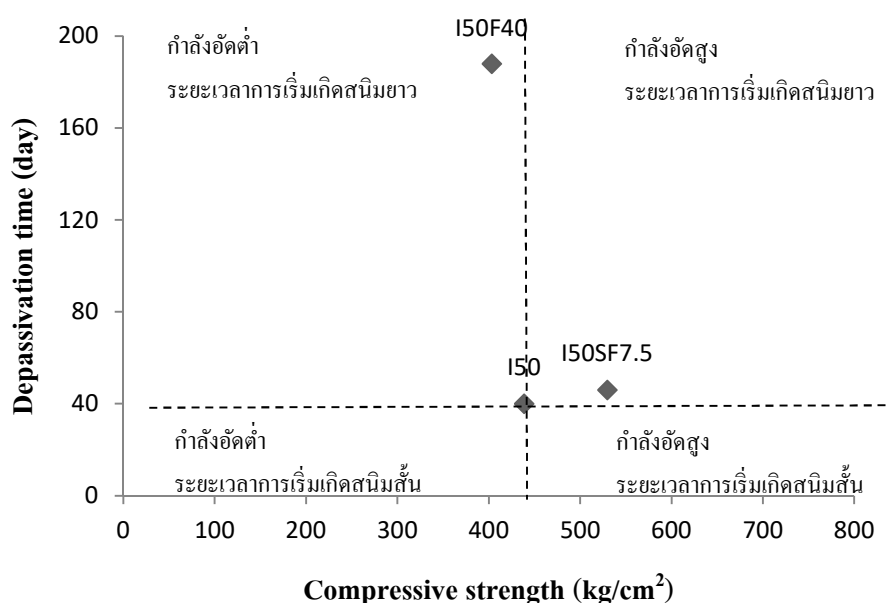


รูปที่ 4.32 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ 90 % ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 ซีลีกำฟูมร้อยละ 7.5 และซีโอล์ท์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

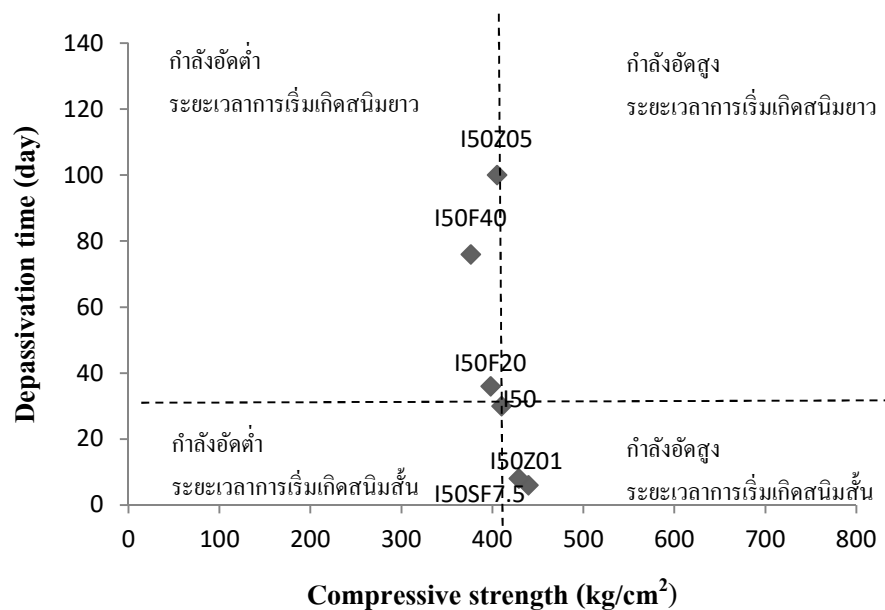
##### 4.4.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ใช้การแทนที่วัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Compressive strength) กับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม (Depassivation time) จากการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 ที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 มีกำลังอัดสูง และมีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกส่งผลต่อการต้านทานแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มสูงขึ้น เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ จึงไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้คอนกรีตมีกำลังที่เพิ่มอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.33 ผลกระทบของอุณหภูมิ 30 °C ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

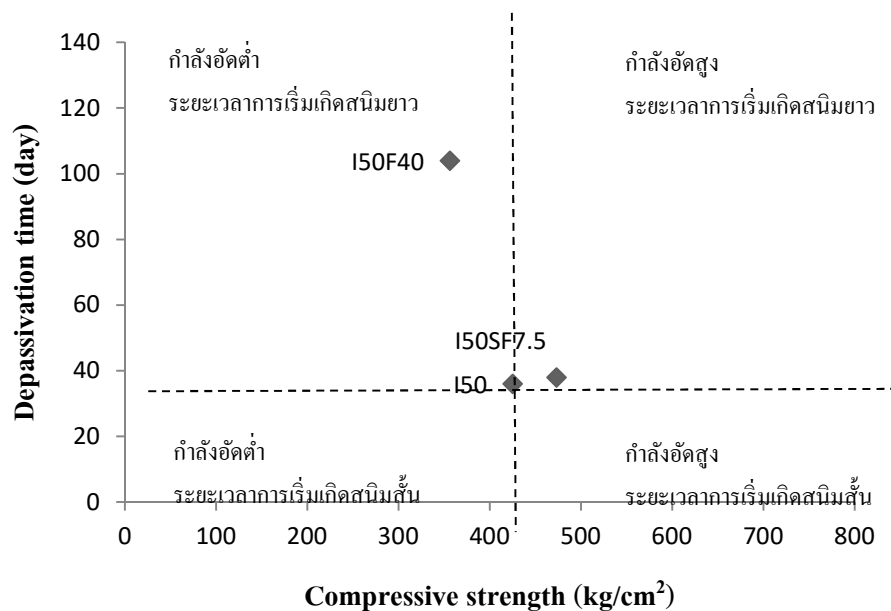
จากรูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Compressive strength) กับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม (Depassivation time) จากการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 มีกำลังอัดสูง แต่มีค่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมต่ำ เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากอุณหภูมิที่ 50°C มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง ส่งผลต่อรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่ผิวหน้าคอนกรีต ทำให้เกิดการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ได้ง่ายขึ้น และเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 กำลังอัดต่ำลง แต่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้นเมื่อมีปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากอุณหภูมิที่สูง ส่งผลต่อการสูญเสียความชื้นในขณะที่บ่มสูงและส่งผลต่อรอยแตกร้าวขนาดเล็กภายในคอนกรีต ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ลดลง และเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 1 และ 5 ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 5 นานกว่าคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วน อาจเนื่องจากอุณหภูมิสูงส่งผลทำให้คอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์มีกำลังอัดที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



รูปที่ 4.34 ผลกระทบของอุณหภูมิ 50°C ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 ซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 และซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.4.2.2 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคอนกรีตที่ใช้การแทนที่วัสดุประสาน

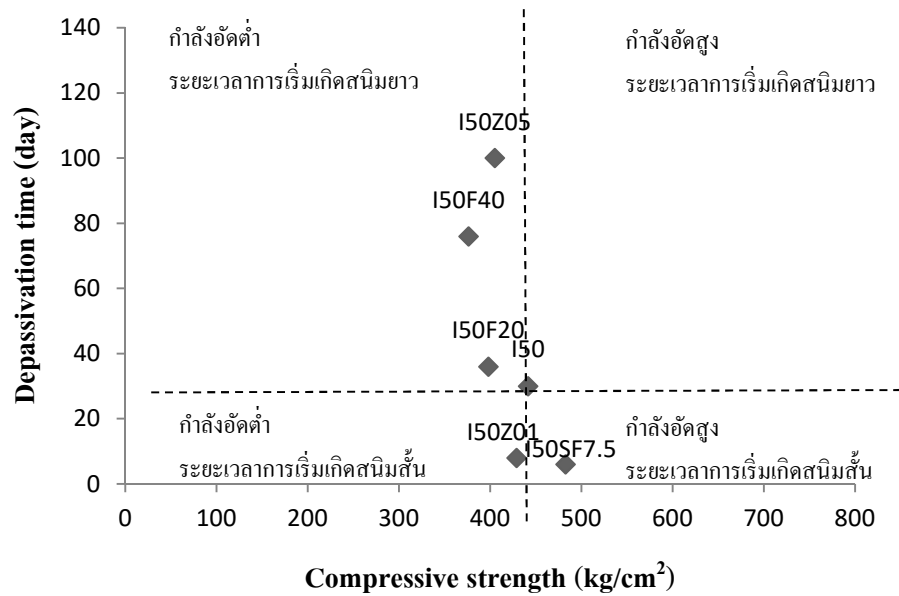
จากรูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Compressive strength) กับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม (Depassivation time) จากการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 มีกำลังอัดที่สูงขึ้น และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้น อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ 30% ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ และเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ส่งผลทำให้มีกำลังอัดที่ต่ำลง แต่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้น เนื่องการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตที่มีความทึบแน่นลดลง ความพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต แต่จะทำให้คอนกรีตนั้นทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานคลอไรด์สูงขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



รูปที่ 4.35 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ 30 % ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะบ่มน้ำ 28 วัน



จากรูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Compressive strength) กับระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม (Depassivation time) จากการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ซึ่งมีกำลังอัดสูง และมีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่สั้นลง อาจเนื่องมาจากที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% มีปริมาณความชื้นค่อนข้างต่ำ ส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัดที่เพิ่มขึ้น และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมสั้นลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกไม่ต่อเนื่องและสมบูรณ์ส่งผลต่อความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตลดลง เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และเมื่อพิจารณาที่คอนกรีตที่ใช้ถ้ำลอยแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 20 และ 40 เมื่อคอนกรีตมีปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อกำลังอัดลดลง แต่มีผลต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่นานขึ้น เนื่องจากมีปริมาณการแทนที่ด้วยถ้ำลอยเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความพรุนสูง ความทึบแน่นลดลง ส่งผลต่อกำลังอัดที่ต่ำลง แต่เมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง ส่งผลต่อความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต ทำให้เหล็กเสริมคอนกรีตมีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่นานขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 1 และ 5 มีกำลังอัดต่ำ แต่คอนกรีตที่ผสมซีไอไลท์ร้อยละ 5 มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานกว่าคอนกรีตที่ผสมซีไอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องอนุภาคของซีไอไลท์สังเคราะห์มีความพรุนสูง เมื่อมีปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีความพรุนสูง ซึ่งทำให้ขนาดเฉลี่ยของโพรงช่องขนาดใหญ่ลดลง แต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงช่องว่างเล็กเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลง แต่เมื่อปริมาณการแทนที่สูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง ทำให้ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมยาวนานขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



รูปที่ 4.36 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ 90 % ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 และ 40 ซีลีกำฟูมร้อยละ 7.5 และซีโโไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 1 และ 5. ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะบ่มน้ำ 28 วัน

#### 4.5 ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีต

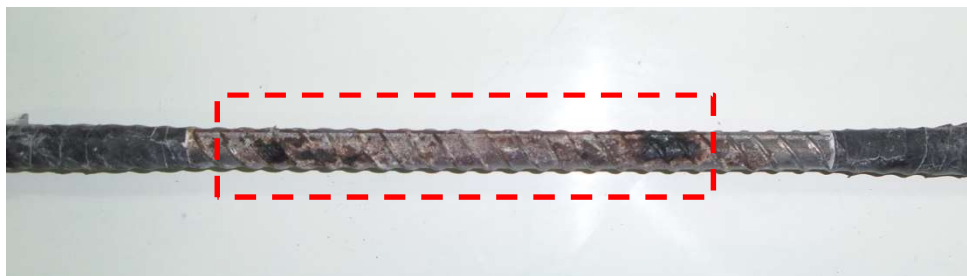
แสดงภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจากการทดสอบหาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสการเกิดสนิม และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แสดงว่าเหล็กเป็นสนิม จึงทำการทุบตัวอย่างคอนกรีตเพื่อตรวจสอบว่าเกิดสนิมของเหล็กเสริมจริงหรือไม่ ซึ่งพบว่าเกิดสนิมขึ้นจริง สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า



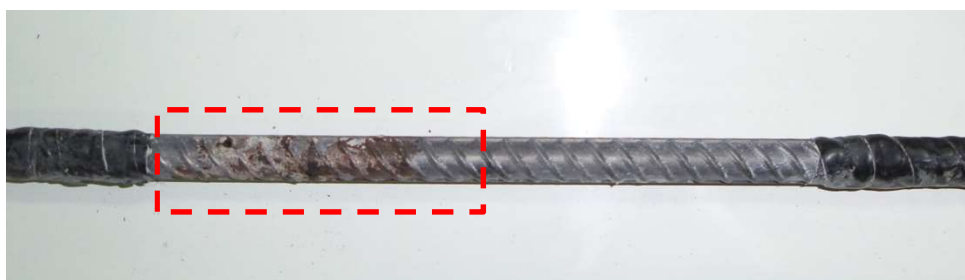
รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.4 และ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน มีระยะการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม 124 วัน ปริมาณคลอไรด์วิกฤต 1.02% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดคอนกรีตก่อนทดสอบ 560.8 kg/cm<sup>2</sup> หลังทดสอบ 711.4 kg/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน มีระยะการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม 32 วัน ปริมาณคลอไรด์วิกฤต 5.2% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดคอนกรีตก่อนทดสอบ 453.9 kg/cm<sup>2</sup> หลังทดสอบ 441.4 kg/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตในคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 ความคุมอุณหภูมิที่ 50 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน มีระยะการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม 38 วัน ปริมาณคลอไรด์วิกฤต 2.27% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดคอนกรีตก่อนทดสอบ 393.4 kg/cm<sup>2</sup> หลังทดสอบ 417.2 kg/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.40 ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตในคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ความคุมอุณหภูมิที่ 30 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 90 % และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน มีระยะการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม 38 วัน ปริมาณคลอไรด์วิกฤต 1.88% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดคอนกรีตก่อนทดสอบ 475.3 kg/cm<sup>2</sup> หลังทดสอบ 529.6 kg/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตในคอนกรีตที่ใช้ซีโอโลइटสังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน มีระยะการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม 102 วัน ปริมาณคลอไรด์วิกฤต 1.95% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดคอนกรีตก่อนทดสอบ 320.0 kg/cm<sup>2</sup> หลังทดสอบ 405.5 kg/cm<sup>2</sup>

## บทที่ 5

### 5.1 สรุปผล

1. คอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 30°C ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 90% มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานกว่าคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 50°C คอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 30% ภายใต้อุณหภูมิคงที่ 50°C มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 90%

2. คอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมสูงขึ้นระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมสั้นลง แต่มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่สูงขึ้น และคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมสูงขึ้นระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมสั้นลง แต่ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่สูงเช่นเดียวกัน จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้นำเสนอดัชนีเพื่อชี้วัดการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต โดยใช้ดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งหมายถึงระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาณคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีต โดยที่ค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องมาจากผลของระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมที่นานขึ้น จะบ่งบอกถึงคุณสมบัติความความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ดี

3. คอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 30°C มีค่าดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 50°C และคอนกรีตที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% มีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ 90% จะบ่งบอกถึงคุณสมบัติความความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ดี

4. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลักอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 จะมีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูง และมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลักอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.50

5. การใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.50 ในคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และเผชิญความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมจะมีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลักอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.40 แต่กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

6. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 ในคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 50°C และเผชิญความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม 90% จะมีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตที่สูงกว่า และมีกำลังอัดของคอนกรีตใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลักอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.50

7. การใช้คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 7.5 ในคอนกรีตที่เผชิญอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 30°C และเผชิญความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม 30% จะมีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตที่สูงกว่า และมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลักอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ 0.50

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ซิลิกาฟูมทดแทนวัสดุประสานร้อยละ 7.5 ให้กำลังอัดที่ดี แต่เมื่อเผชิญอุณหภูมิที่สูงกลับมีดัชนีความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำ ซึ่งอาจเป็นเพราะอุณหภูมิสูงมีผลต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกในซิลิกาฟูมได้ไม่สมบูรณ์ หรืออาจส่งผลต่อเสถียรภาพความเป็นด่างในคอนกรีต จึงทำให้ฟิล์มถูกทำลายได้ง่าย ดังนั้นจึงควรศึกษาการยึดจับปริมาณคลอไรด์หรือความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนที่อยู่ในโพรงช่องว่างคอนกรีตลดน้อยลงซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพของฟิล์ม

2. เนื่องจากการทดลองหาผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ในครั้งนี้ ได้ศึกษาอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ 50 °C จึงอาจมีผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงมากกว่าผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์สูง ดังนั้นจึงควรศึกษาผลกระทบความแตกต่างของความชื้นสัมพัทธ์ภายใต้อุณหภูมิต่ำ เช่น 30 °C ซึ่งจะให้ผลทดสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่เผชิญความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

## ผลผลิต (Output)

ผลงานตีพิมพ์

มีแผนเผยแพร่ผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ



## บรรณานุกรม

- กิริติ เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี. (2554). *ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล*. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 21 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2554.
- ชัย จาคูพิทักษ์กุล และ วิรัชชาติ ตั้งจิรภัทร. (2556). *การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ทวีชัย ตำราญวานิช. (2550). *เอกสารประกอบการสอนความคงทนของคอนกรีต*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ธีรดี ศรีจันทร์ และ บุรฉัตร นัตวีระ. (2554). *การศึกษาผลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ชนิดของปูนซีเมนต์และวัสดุประสานร่วมต่างกัน*. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 34 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2554. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต).
- ธีรวัฒน์ สีนศิริ และคณะ. (2550). *ผลกระทบของซีไอไลต์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2-4 พฤษภาคม, โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2557). *เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง)*. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พนมพร แสงจันทร์ และพัลลภ อันแสง. (2555). *ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยตะกรันเตาถลุงเหล็ก*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- สุรชาติ ฤกษ์โหรา. (2554). *ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- อุดม พรกุลมงคล. (2554). *ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสม เถ้าก้นเตาแม่เมาะและเถ้าก้นเตาระยอง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ASTM C1202, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration". *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, 2000.

- ASTM C876, Standard Test Method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete  
*Annual Book of ASTM Standards.*
- ASTM G109, Standard Test Method for determining the effects of chemical admixture on the corrosion of embedded steel in concrete exposed chloride environments *Annual Book of ASTM Standards.*
- ASTM C1152, Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, 2000.
- ASTM C114, "Standard Test Method for Chemical Analysis of hydraulic Cement ." *Annual Book of ASTM Standards*, 2005
- ASTM C1218, Standard Test Method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, 2000.
- Appa Rao, G. (2001). Development of strength with age of mortars containing silica fume. *Cement and Concrete Research* 31 (pp.1141-1146).
- Atis, C.D. et al., (2004). Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete. *Building and Environment* 40 (pp.1678-1683).
- Ann and song. (2007). Chloride threshold value level for corrosion of steel in concrete  
Original Research Article. *Corrosion Science* 11 (pp.4113-4133).
- Angst and Vennesland. (2007). *Critical chloride content in reinforced concrete. A review.*  
*Cement and Concrete Research* 39 (pp.1122-1138).
- Bents, D.P. (2000). Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials II. Multi-scale modeling of concrete diffusivity. *Cement and Concrete Research* 30 (pp.1121-1129).
- Bertolini, L. et al., (2008). Effects of cathodic prevention on the chloride threshold for steel corrosion in concrete. *Electrochimica Acta* 54 (pp.1452-1463).
- Cabrera, J.G. Claisse, P.A. & Hunt, D.N. (1994). A statistical analysis of the factors which contribute of the corrosion of steel in Portland cement and silica fume concrete.  
*Construction and Building Material. Vol. 9, No. 2, (pp.105-113)*
- Dotto, J.M.R. et al., (2004). Influence of silica fume addition on concrete physical properties and on corrosion behavior of reinforcement bars. *Cement & Concrete Composites* 26 (31-39).
- Dhir and Jones. (1999). Development of chloride-resisting concrete using fly ash. *Fuel* 78 (pp.137-142).

- Glass and Buenfeld. (1995). The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science* 39 (pp.1001-1013).
- Gastaldi and Bertolini., (2013). Effect of temperature on the corrosion behaviour of low-nickel duplex stainless steel bars in concrete. *Cement and Concrete Research* 56 (pp.52-60).
- Houssam Toutanji, A. Ziad Bayasi. (1998). Effect of curing procedures on properties of silica fume concrete. *Cement and Concrete Research* 29 (497-501).
- Ha-Won Song et al., (2009). Estimation of the permeability of silica fume cement concrete. *Construction and Building Materials* 24 (pp.315-321).
- Hanehara et al., (2001). Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste. *Cement and Concrete Research* 31 (pp.31-39).
- 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, Vol, 25 No. 1*,
- Jafar Sobhani., & Meysam Najimi. (2013). Electrochemical impedance behavior and transport properties of silica fume contained concrete. *Construction and Building Materials* 47 (pp.910-918).
- Ki Yong Ann, Ha-won Song. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science* 49 (pp.4113-4133)
- Kayali, O. & Zhu, B. (2004). Corrosion performance of medium-strength and silica fume high-strength reinforced concrete in a chloride solution. *Cement & Concrete Composites* 27 (pp.117-124).
- Linhua Jiang et al., (2012). Influence of chloride salt type on threshold level of reinforcement corrosion in simulated concrete pore solution. *Construction and Building Materials* 30 (pp.516-521).
- Marco Manera, Oystein Vennesland. & Luca Bertolini. (2007). Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume. *Corrosion Science* 50 (pp.554-560).
- Milan Kouril, Pavel Novak. & Martin Bojko. (2009). Threshold chloride concentration for stainless steel activation in concrete pore solution. *Cement and Concrete Research* 40 (pp.431-436).

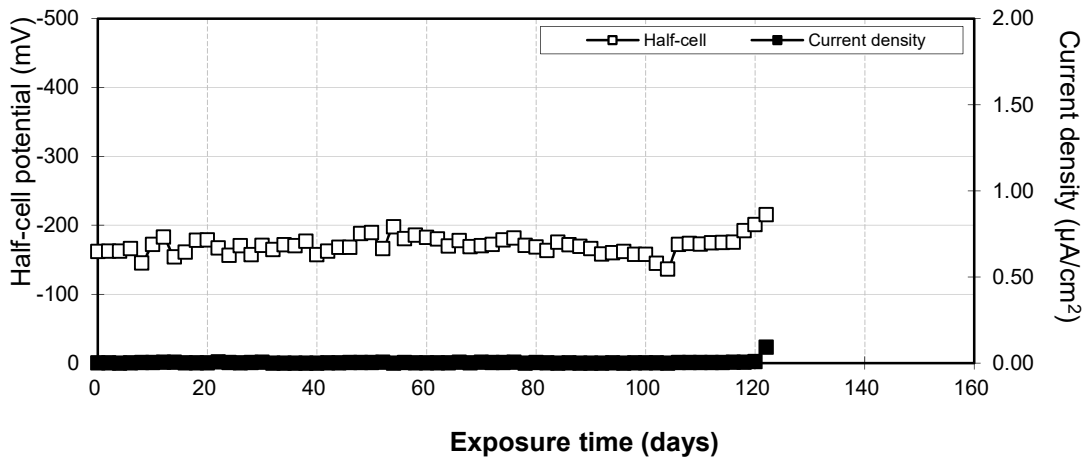
- Mammoliti, L., Hansson, C.M., Hope, B.B. (1999). Corrosion inhibitors in concrete Part II: Effect on chloride threshold values for corrosion of steel in synthetic pore solutions. *Cement and Concrete Research* 29 (pp.1583-1589).
- Mohammad Shekarchi, Aliraza Rafiee, and Hamed Layssi. (2009). Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates. *Cement & Concrete Composites* 31 (pp.769-775).
- Mohamed Al-Mehthel et al., (2008). Performance of generic and proprietary corrosion inhibitors in chloride-contaminated silica fume. *cement concrete* 23 (pp.1769-1774).
- Mohammad Iqbal Khan., & Rafat Siddique. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resource, Conservation and Recycling* 57 (pp.30-35).
- Mohammed and Hamada. (2001). A discussion of the paper "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar" by C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote, and P. Castro. *Cement and Concrete* 31 (pp.835-838).
- Raja Rizwan Hussain. (2010). Effect of moisture variation on oxygen consumption rate of corroding steel in chloride contaminated concrete. *Cement & Concrete Composites* 33(pp.154-161).
- Raja Rizwan Hussain., & Tetsuya Ishida. (2010).Enhanced electro-chemical corrosion model for reinforced concrete under severe coupled action of chloride and temperature. *Construction and Building Material* 25 (pp.1305-1315).
- Rasheeduzzafar et al., (1992). Effect of cement composition on chloride binding and corrosion of reinforcing steel in concrete. *Cement and Concrete Research* 21 (pp.777-794).
- Saleen, M. Shameem, M. Hussain, S.E. & Maslehuddin, M. (1996). Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. *Construction and Building Material*, vol. 10, No. 3, (pp.209-214).
- Ozer and Ozkul. (2003). The influence of initial water curing on the strength development of ordinary portland and pozzolanic cement concretes. *Cement and Concrete Research* 34 (pp.13-18).

Ueli, M. Angst et al., (2011). Chloride induced reinforcement corrosion: Electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold value. *Corrosion Science* 53 (pp.1451-1464).

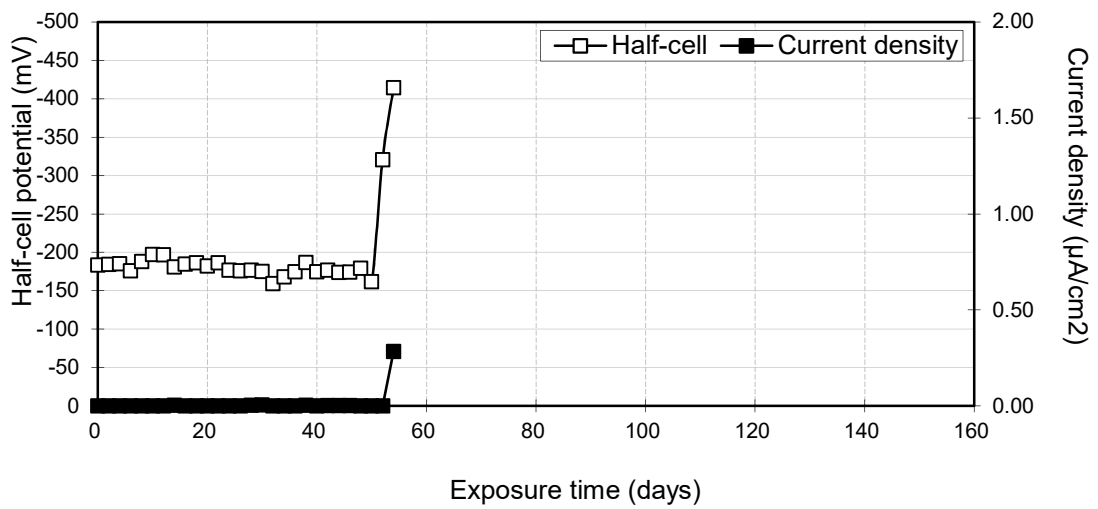
Xu et al., (2011). Influence of CaCl<sub>2</sub> and NaCl from different sources on chloride threshold value for the corrosion of steel reinforcement in concrete. *Construction and Building Material* 25 (pp.663-669).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม  
ของเหล็กเสริม

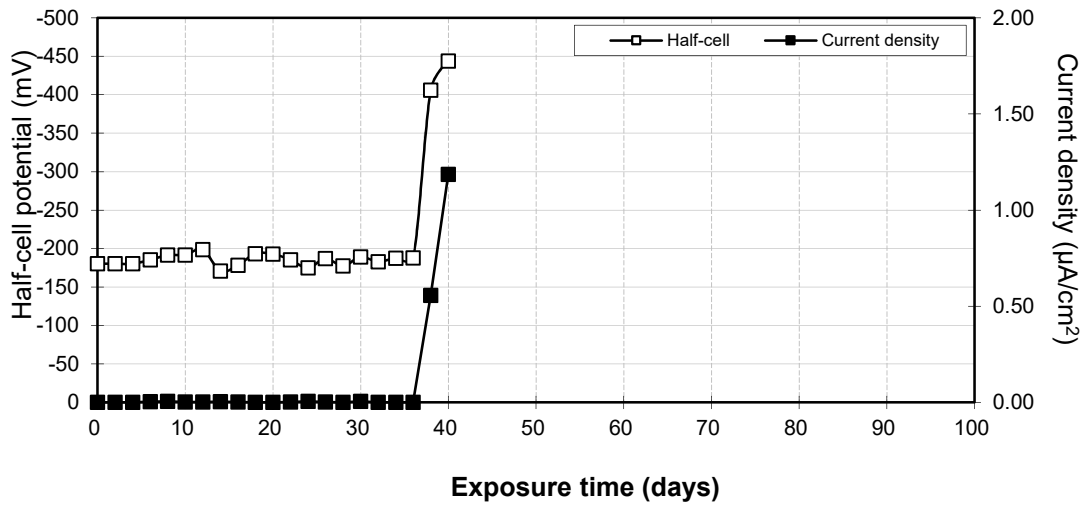


รูปที่ ก-1 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I40 ควบคุมอุณหภูมิ 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

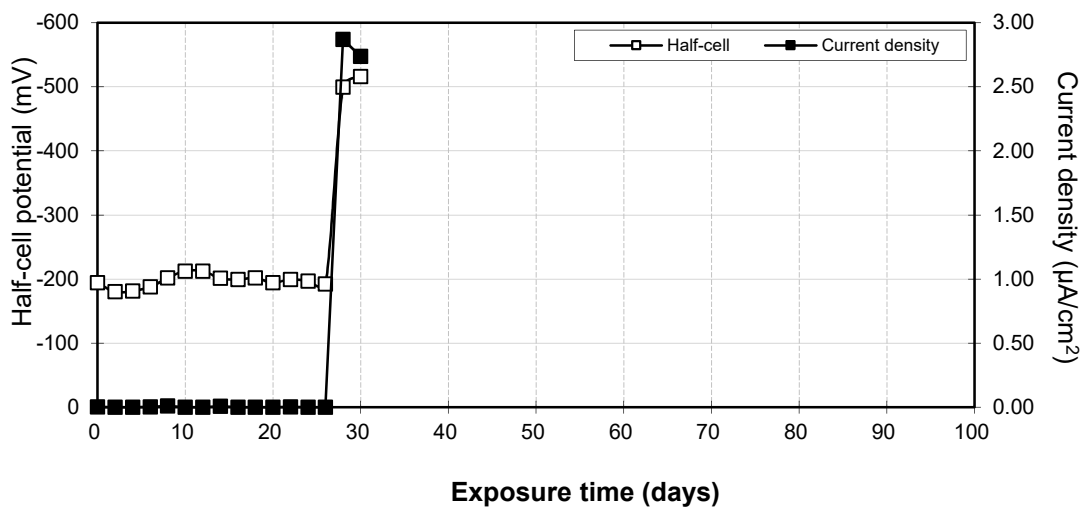


รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I40 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

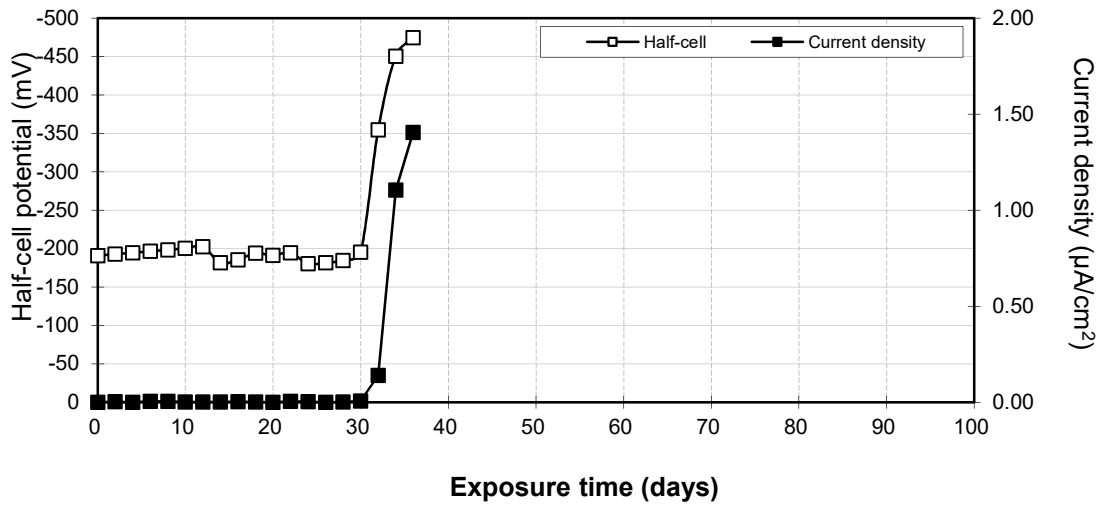




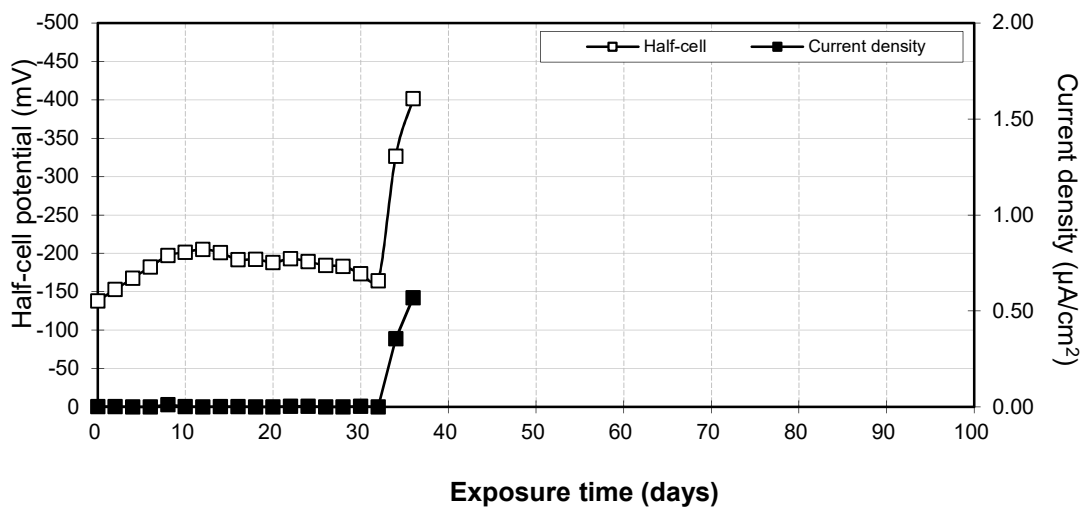
รูปที่ ก-3 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50 ควบคุมอุณหภูมิ 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



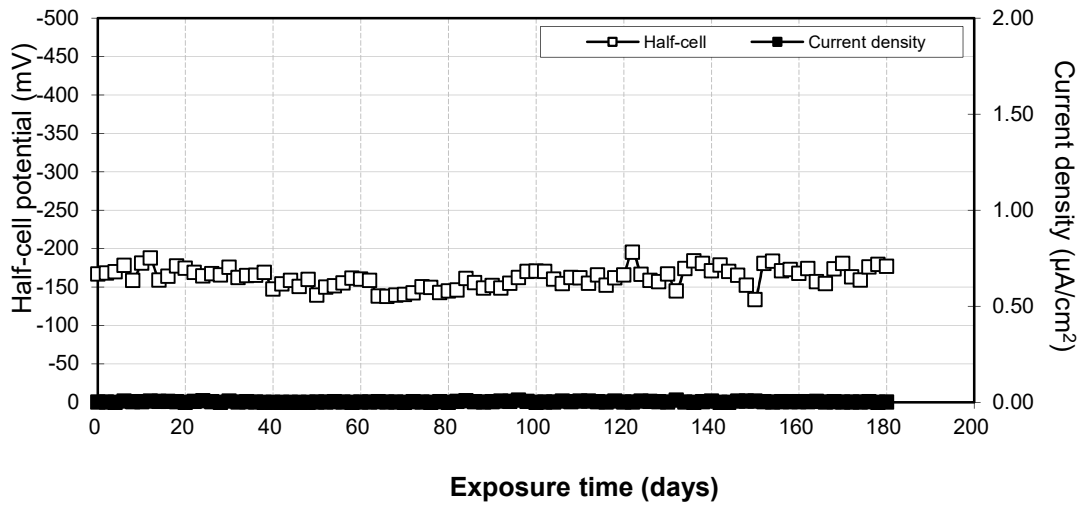
รูปที่ ก-4 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



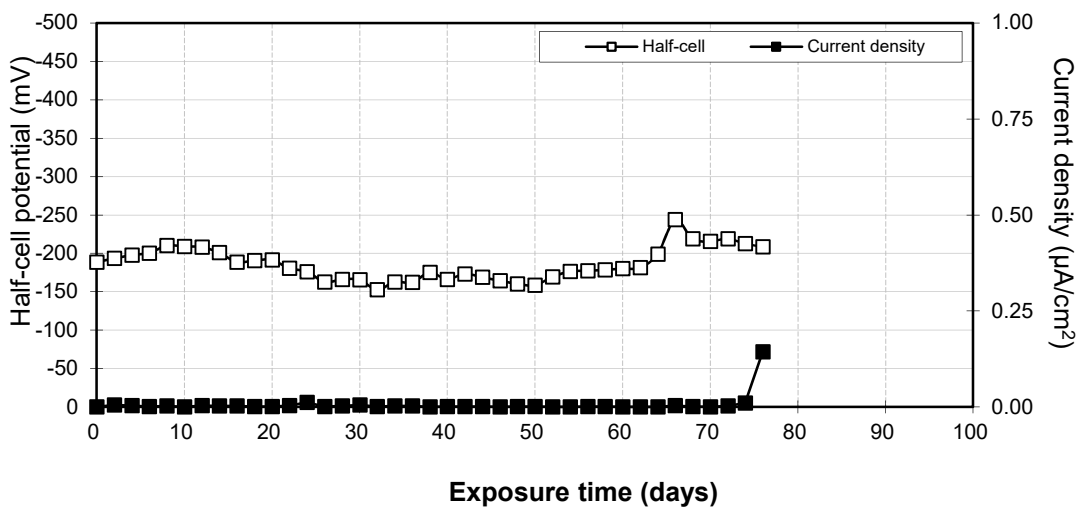
รูปที่ ก-5 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 30% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



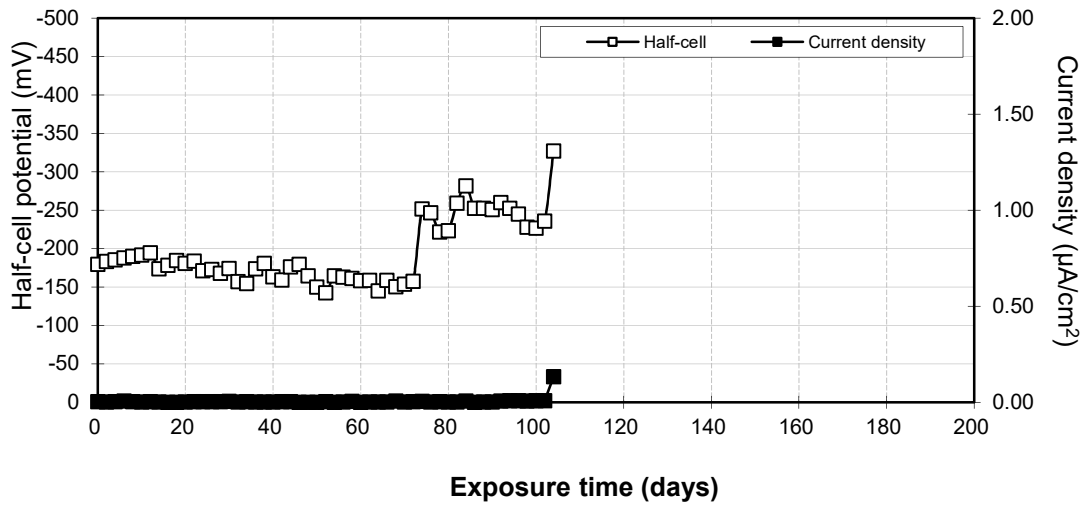
รูปที่ ก-6 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50-F20 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



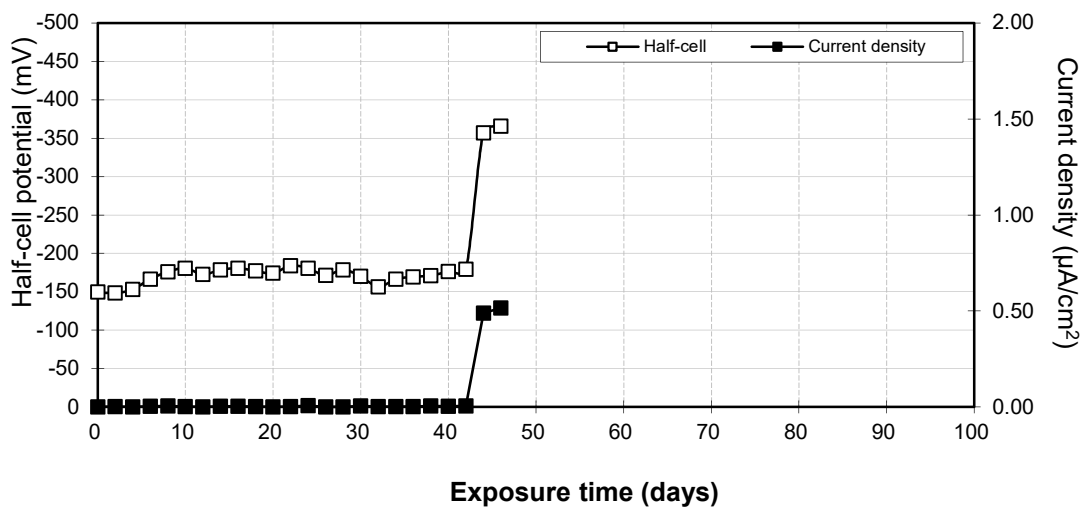
รูปที่ ก-7 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50-F40 ควบคุมอุณหภูมิ 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



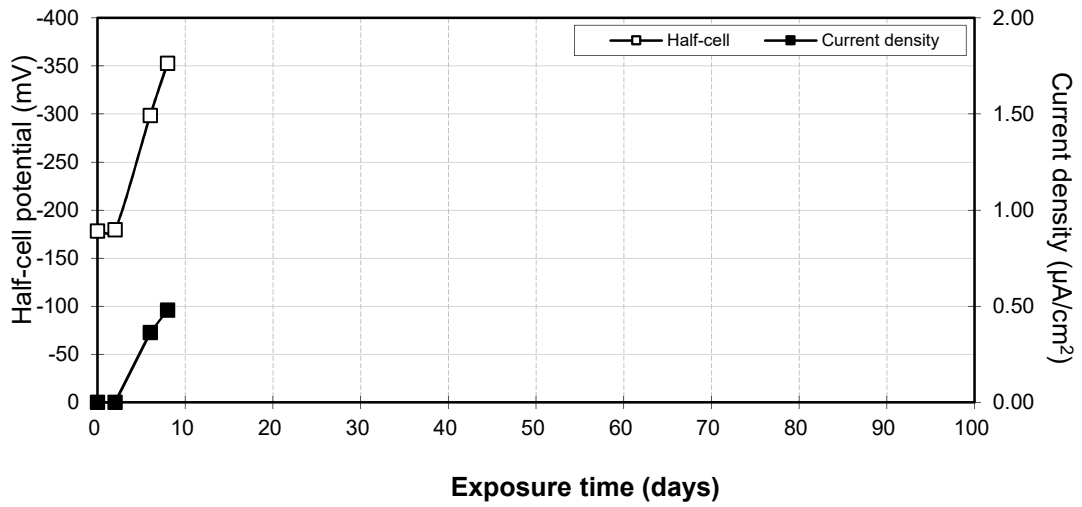
รูปที่ ก-8 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50-F40 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



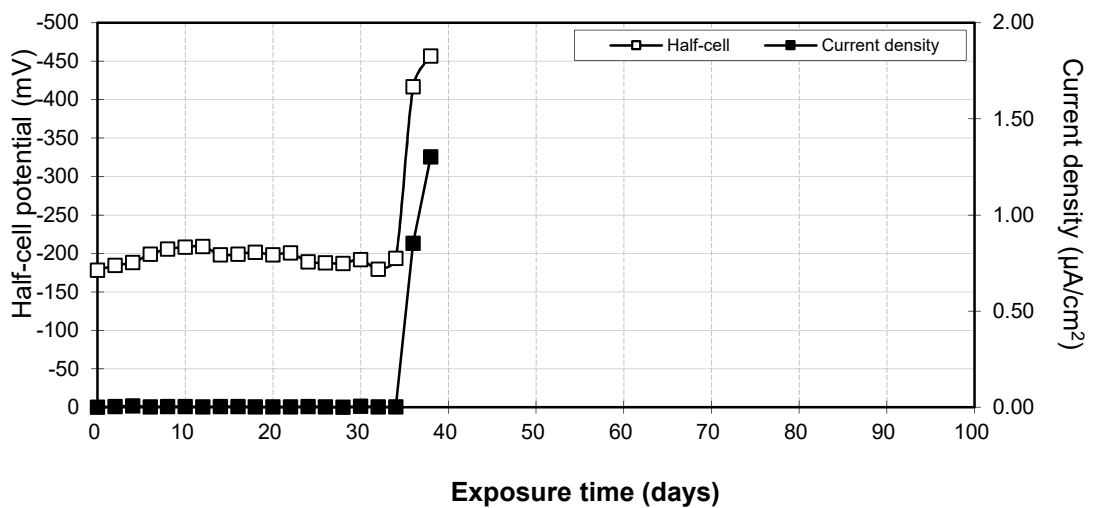
รูปที่ ก-9 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดขึ้น  
ของเหล็กเสริม ของ I50F40 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 30%  
ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



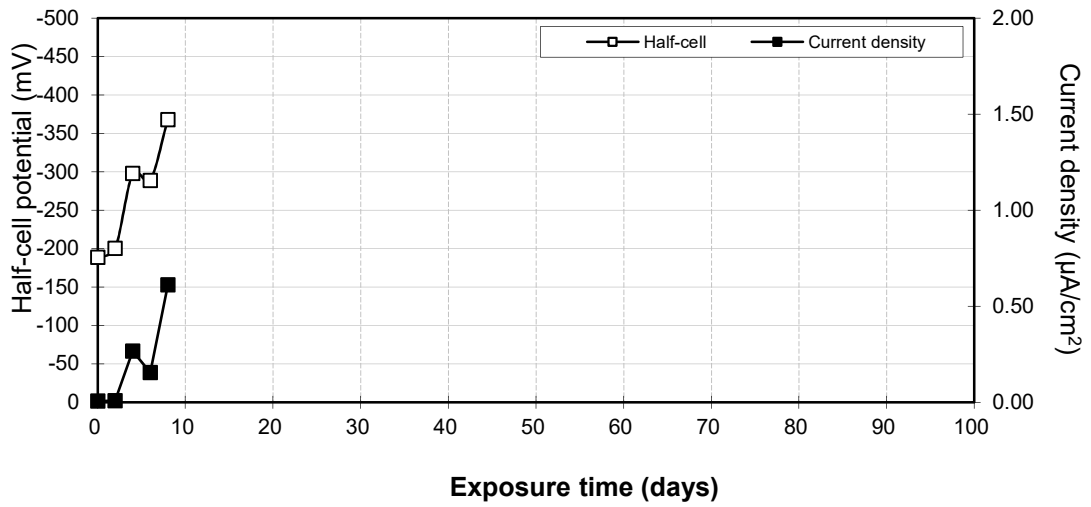
รูปที่ ก-10 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิด  
สนิมของเหล็กเสริม ของ I50SF7.5 ควบคุมอุณหภูมิ 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90%  
ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



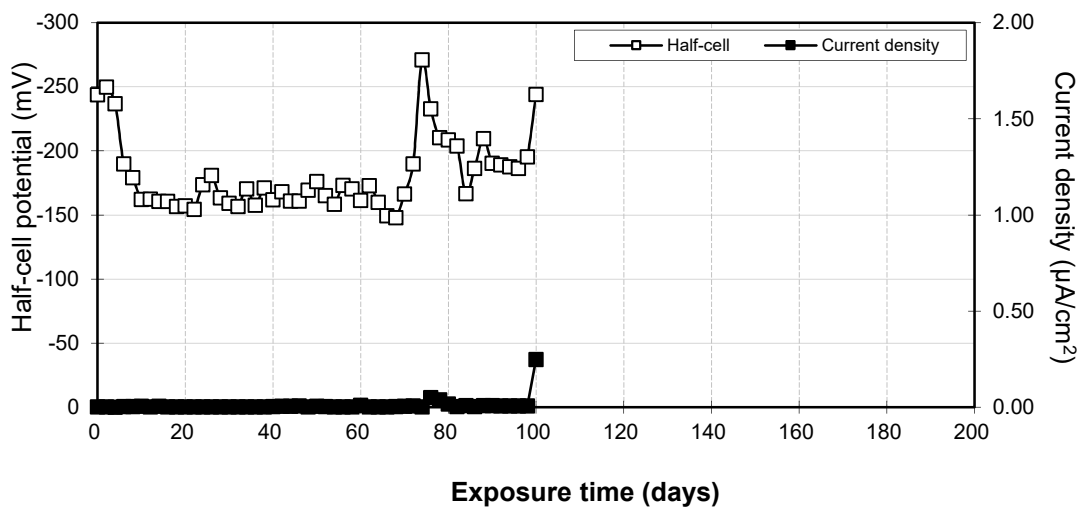
รูปที่ ก-11 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50SF7.5 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



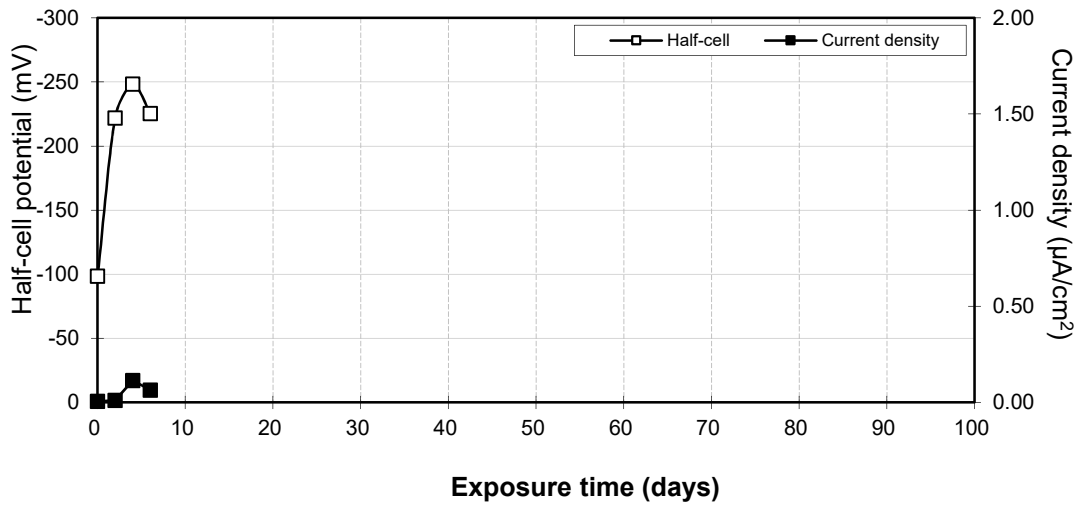
รูปที่ ก-12 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50SF7.5 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 30% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



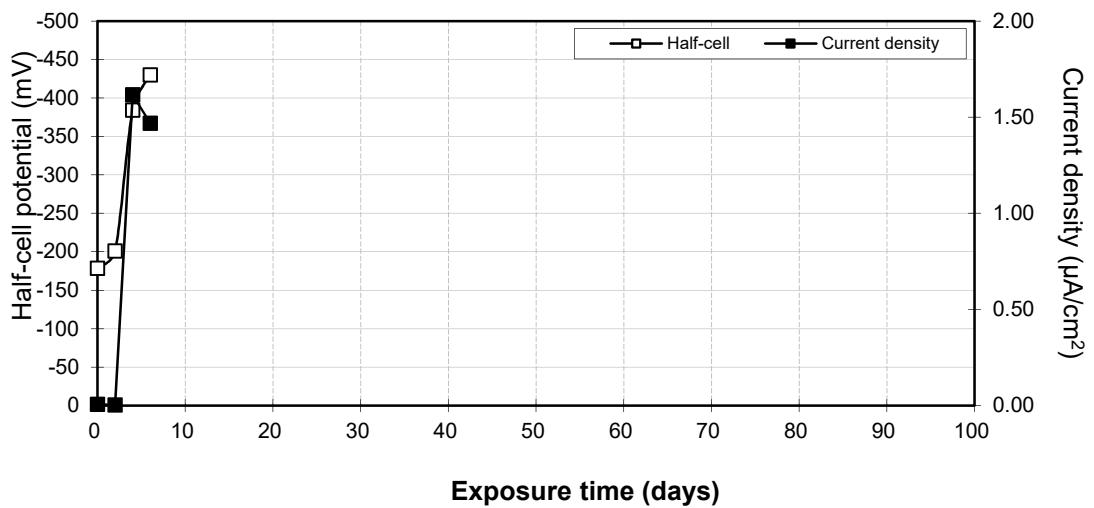
รูปที่ ก-13 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50Z1 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



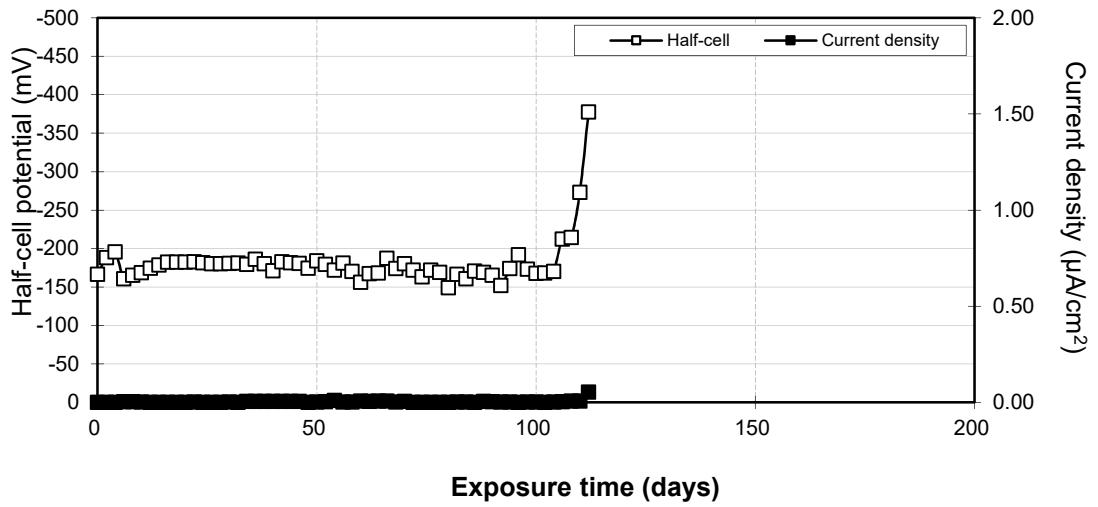
รูปที่ ก-14 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50Z5 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



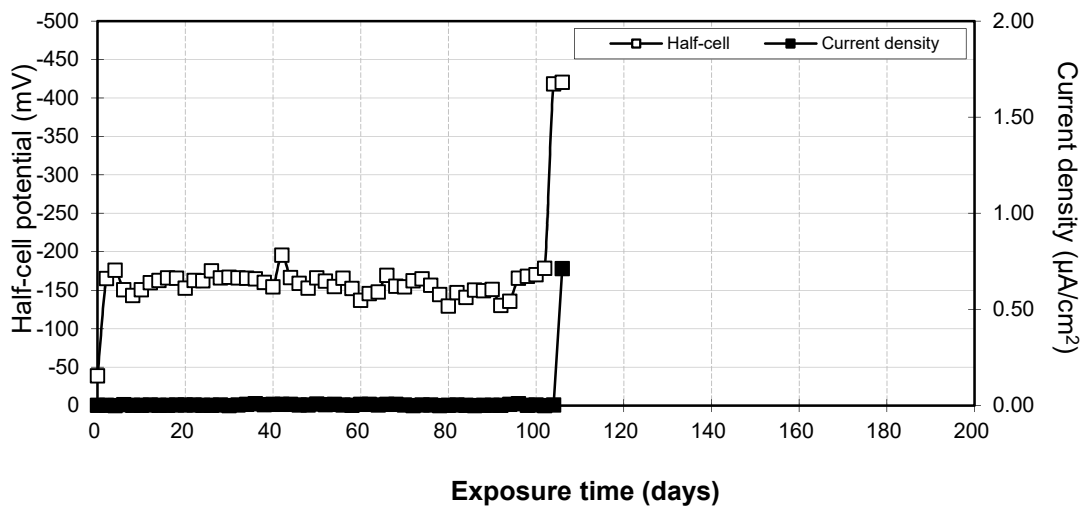
รูปที่ ก-15 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50 ไม่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



รูปที่ ก-16 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50F60 ไม่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

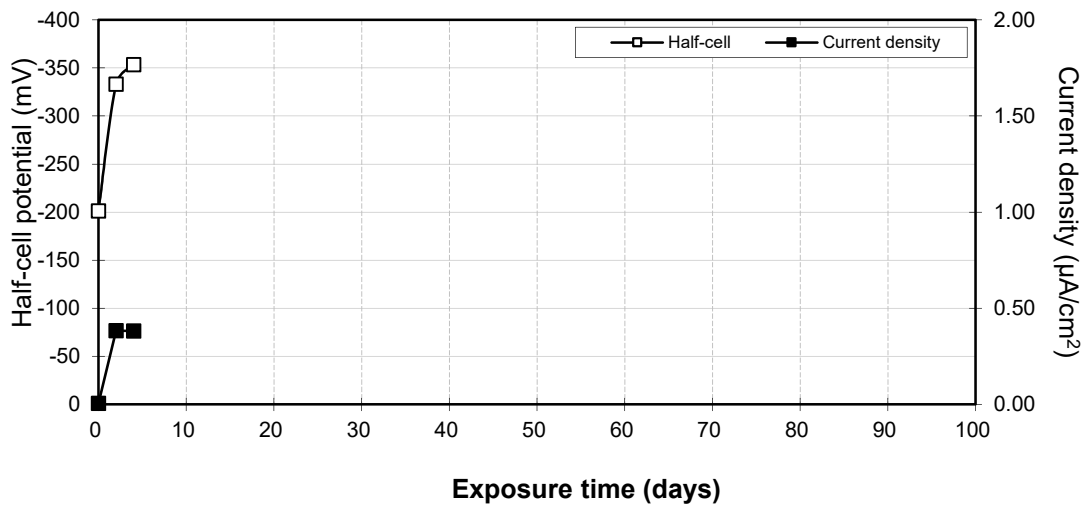


รูปที่ ก-17 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50SF7.5 ไม่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

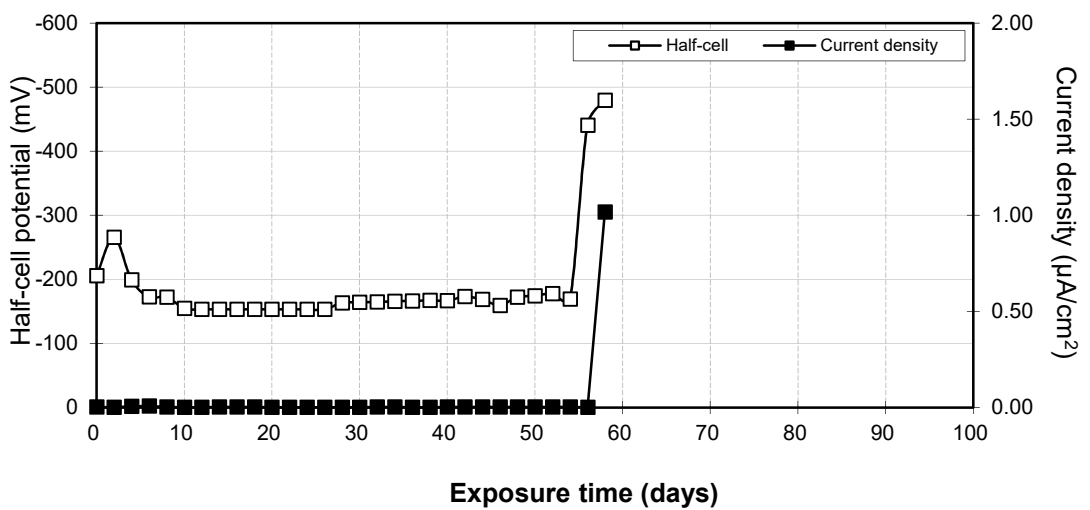


รูปที่ ก-18 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ของ I50SF15 ไม่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน





รูปที่ ก-19 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิด  
 สนิมของเหล็กเสริม ของ I60 ไม่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ระยะเวลาการ  
 บ่ม 7 วัน



รูปที่ ก-20 ความสัมพันธ์ Half-cell potential และ Current density และระยะเวลาการเริ่มเกิด  
 สนิมของเหล็กเสริม ของ I60 ไม่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ระยะเวลาการ  
 บ่ม 28 วัน