



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมใน  
คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล  
(Chloride penetration resistance and corrosion of reinforcing steel in concrete  
containing fly ash and limestone powder after exposed to marine environment)

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้  
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558  
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 177198  
สัญญาเลขที่ 125/2558

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมใน  
คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล  
(Chloride penetration resistance and corrosion of reinforcing steel in concrete  
containing fly ash and limestone powder after exposed to marine environment)

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มีนาคม 2560

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 125/2558

## Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 125/2558)

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี วัสดุประสานที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20 0.40 และ 0.60 อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05 0.10 และ 0.15 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ทำการฝังเหล็กเสริม RB12 ในตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20x20x20 ซม<sup>3</sup> ที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 1 ซม 2 ซม 5 ซม และ 7.5 ซม แล้วบ่มตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ที่ตำบลอ่างศิลา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี เมื่อครบระยะเวลา 3 ปี จึงเก็บตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากผิวหน้าคอนกรีต กำล้างอัดคอนกรีต และนำเหล็กเสริมที่ฝังไว้มาทดสอบหาพื้นที่การเกิดสนิมและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์

จากผลการทดลองพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีที่สุด สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 2 ชนิด พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหรือผงหินปูนไม่เกินร้อยละ 5 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด พบว่า การใช้สัดส่วนปริมาณเถ้าลอยสูงและผงหินปูนน้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของกำล้างอัดคอนกรีตทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมลดลง

## Abstract

This research aims to study chloride penetration resistance and corrosion of reinforcing steel in concrete exposed to marine environment for 3 years. The binders were Portland cement type 1, Portland cement type 5, pozzolan cement, fly ash and limestone powder. Fly ash to binder ratio of 0.20, 0.40 and 0.60 and limestone powder to binder ratio of 0.05, 0.10 and 0.15 were used. Water to binder ratio was varied at 0.40, 0.50 and 0.60. Reinforcing steels of RB12 were embedded in concrete cube specimens of size 20x20x20 cm at covering depths of 1, 2, 5 and 7.5 cm. Specimens were cured for 28 days before exposed in tidal zone of marine environment at Angsila, Muang, Chonburi. After 3-year exposure, the specimens were collected from site for testing the chloride content at different distance from exposed surface and the compressive strength of concrete. The embedded steels were investigated for the corrosion area and the weight loss of reinforcing steel due to chloride-induced corrosion.

From the experimental results, it was found that concrete with pozzolan cement had the highest chloride penetration resistance. For binary binder concrete, concrete with fly ash or concrete with limestone not greater than 5% had higher chloride penetration resistance than concrete with Portland cement type 1 only. For ternary binder concrete, it was found that the use of higher fly ash content and lower limestone powder content to replace cement content of concrete resulted in higher chloride penetration resistance. The increase of compressive strength of concrete resulted in higher chloride penetration resistance and lower weight loss of reinforcing steel.

## สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์	1
ขอบเขตงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
ความเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากเกลือคลอไรด์	4
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน	15
ถั่วลอย	15
ผงหินปูน	19
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย	
วัสดุที่ใช้	24
อุปกรณ์ที่ใช้	34
วิธีการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเล	35
การทดสอบหาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างทดสอบที่ เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล	40
การทดสอบหาพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการสูญเสียน้ำหนักของ เหล็กเสริม	45
การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต	48

## สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผล	
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล	49
ผลกระทบของอัตราส่วนต่อวัสดุประสาน	50
ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์	52
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน	54
ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	56
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	58
การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล	60
ผลกระทบของอัตราส่วนต่อวัสดุประสาน	60
ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์	62
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน	64
ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	66
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	68
พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล	70
ผลกระทบของอัตราส่วนต่อวัสดุประสาน	70
ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์	72
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน	74
ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	76
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	77
กำลังอัดคอนกรีตของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล	79
ผลกระทบของอัตราส่วนต่อวัสดุประสาน	79
ผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์	81
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน	82
ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	84
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	86

## สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
ภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล	88
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและชนิดปูนซีเมนต์	88
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน	90
ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	92
ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน	94
บทที่ 5 สรุปผล	
สรุปผล	96
ข้อเสนอแนะ	98
ผลผลิต	
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	
ประวัตินักวิจัย	



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบของน้ำทะเล	5
2.2	สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ	12
2.3	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618	16
3.1	องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์	27
3.2	องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย และผงหินปูน	30
3.3	ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน	31
3.4	ขนาดคละของมวลรวมละเอียด	32
3.5	ขนาดคละของมวลหยาบ	33
3.6	ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบในสภาวะแวดล้อมทะเล	36

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะการแพร่ของเกลือคลอไรด์สู่คอนกรีต	6
2.2	กระบวนการดึงดูดแบบคาพิลลารีของเกลือคลอไรด์	7
2.3	กลไกการดึงดูดอออนคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต	7
2.4	กลไกของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตโดยความดันน้ำ	8
2.5	การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์	9
2.6	กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	10
2.7	ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์	14
3.1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง	25
3.2	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง	25
3.3	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า	26
3.4	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า	26
3.5	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลาน	26
3.6	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลาน	26
3.7	เถ้าลอย	28
3.8	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าลอย	28
3.9	ผงหินปูน	29
3.10	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของผงหินปูน	29
3.11	ขนาดคละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน	29
3.12	แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20x20x20 เซนติเมตร <sup>3</sup>	34
3.13	อุปกรณ์กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก	34
3.14	เหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร	34
3.15	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล	34
3.16	เครื่องผสมคอนกรีต	34
3.17	เครื่องจี้เขย่าคอนกรีต	34
3.18	แบบจำลองก้อนตัวอย่างและรายละเอียดการวางเหล็กเสริม	35
3.19	บริเวณวางตัวอย่างและตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ ได้ศาลาวัดโกมุทพัฒน์นาราม	39

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.20	เครื่องเจาะคอนกรีตขณะทำงาน และตำแหน่งเจาะเพื่อนำแท่งคอนกรีตมาทดสอบ	41
3.21	แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะออกมา และการตัดแท่งตัวอย่าง	41
3.22	ครกใช้บดตัวอย่าง และผงตัวอย่างที่ถูกบดแล้ว	41
3.23	เครื่องไคเตรทอัตโนมัติ ด้วยวิธีจุ่มยุติทางศักย์ไฟฟ้า	42
3.24	ขั้นตอนที่ 1 ของการหาพื้นที่สนิมด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop	45
3.25	ขั้นตอนที่ 2 ของการหาพื้นที่สนิมด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop	46
3.26	ขั้นตอนที่ 3 ของการหาพื้นที่สนิมด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop	46
3.27	ขั้นตอนที่ 4 ของการหาพื้นที่สนิมด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop	46
3.28	ขั้นตอนที่ 5 ของการหาพื้นที่สนิมด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop	47
3.29	ขนาดของเหล็ก	47
3.30	แท่งเหล็กที่เกิดสนิม และแผ่นกราฟที่ทำการระบายพื้นที่เกิดสนิมแล้ว	47
3.31	แท่งตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบกำลังรับแรงอัด	48
4.1	การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	51
4.2	การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน	54
4.3	การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 40 และ 60	55
4.4	การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15	57
4.5	การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 35 30 และ 25 และแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 10 และ 15	59
4.6	การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	61
4.7	การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน	63

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.8	การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้าวัดโดยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 40 และ 60 และ ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน	65
4.9	การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15	67
4.10	การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมถ้าวัดโดยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 30 และ 25 และมีผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15	69
4.11	พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	71
4.12	พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน	73
4.13	พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมถ้าวัดโดยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 30 และ 25	75
4.14	พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15	76
4.15	พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมถ้าวัดโดยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 30 และ 25 และผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15	78
4.16	กำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	80
4.17	กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตโซลาน	81
4.18	กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมถ้าวัดโดยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 40 และ 60	83
4.19	กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15	84

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.20	กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 30 และ 25 และผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15	87
4.21	รูปการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	88
4.22	รูปการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	89
4.23	รูปการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอชโซลานอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	89
4.24	รูปการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	90
4.25	รูปการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60	92
4.26	รูปการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	94

# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่ใช้กันมากเนื่องมาจากคอนกรีตมีความสามารถทนทานต่อสิ่งแวดล้อม มีราคาถูกและขั้นตอนการก่อสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก แต่เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต้องสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อย หรือตั้งอยู่บริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล คอนกรีตจะเกิดความเสียหายรุนแรงมากกว่าปกติ เนื่องจากน้ำทะเล น้ำกร่อย หรือบริเวณใกล้ชายฝั่งมีเกลือประเภทต่างๆ ละลายอยู่ ซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่ คลอไรด์ (Chloride) ซัลเฟต (Sulfate) ซึ่งส่งผลทำให้ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง เมื่อปริมาณคลอไรด์สะสมถึงบริเวณผิวเหล็กเสริมถึงขั้นวิกฤตจะทำลายชั้นออกไซด์ฟิล์ม ที่เคลือบผิวเหล็กไว้ออกไป และเมื่อความชื้นและออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิมได้ และทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูญเสียการรับกำลังไปจนเกิดการวิบัติได้ ดังนั้น แนวทางในการป้องกันปัญหาดังกล่าวคือต้องเลือกใช้คอนกรีตที่คงทนต่อการทำลายของเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีอายุการใช้งานที่ยาวนานภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้ (By products) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ตกลงมายังก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน ลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าลอย (Fly ash) ถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อน และเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปเถ้าลอยมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ลักษณะส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน (0.001 มม.) จนถึง 0.15 มม. เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสาร Pozzolan โดยมีส่วนประกอบหลักที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ อยู่ในรูปสารประกอบของ Silica และ Alumina เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ในสภาพที่มีความชื้น ในระยะแรก น้ำกับปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยา Hydration เกิดเป็นสารเชื่อมประสาน ที่แข็งตัว เช่น Calcium Silicate Hydrate , Calcium Aluminate Hydrate และเป็นสารละลาย  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  อีสระอยู่ในโพรงของเนื้อคอนกรีต (Pore solution) ต่อมาเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) กับสาร  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ส่วนนี้เกิดเป็นสารเชื่อมประสานชนิดเดียวกันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตเหลือปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  น้อยลง มีความแข็งแรงในระยะยาวเพิ่มขึ้น และมีความคงทนเพิ่มขึ้น

ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของ

หินปูน ประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>2</sub>) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO<sub>3</sub>) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive material) และมีความละเอียดสูง ซึ่งสามารถอุดโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีต จึงทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมแทรก (Filler) ช่องว่างในคอนกรีต

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล โดยพิจารณาจากการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระดับต่าง ๆ จากผิวหน้าของคอนกรีตเข้าไป ซึ่งดูจากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของคอนกรีต ทั้งนี้ค่าการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration profile) ที่ต่ำ บ่งบอกถึงส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีและมีอัตราการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำ จึงช่วยยืดระยะเวลาในช่วงปลอดการบำรุงรักษา (Maintenance-free period) รวมทั้งอายุการใช้งาน (Service life) ของโครงสร้างให้ยาวนานขึ้น นอกจากนี้ยังพิจารณาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วย โดยพิจารณาจากพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมด้วย

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนต่าง ๆ ทั้งแบบใช้วัสดุประสานสองชนิด (Binary binder) และแบบใช้วัสดุประสานสามชนิด (Ternary binder) ในสิ่งแวดล้อมทะเลไทย
2. เพื่อศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสิ่งแวดล้อมทะเลไทย
3. เพื่อศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสิ่งแวดล้อมทะเลไทย

### ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยคือศึกษาหาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสิ่งแวดล้อมทะเลไทย โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20x20x20 เซนติเมตร 3 ตัวอย่างคอนกรีตแต่ละก้อนใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 4 ค่า คือ 1 2 5 และ 7.5 เซนติเมตร เพื่อฝังเหล็กกลมผิวเรียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (RB12) ชั้นคุณภาพ SR 24 ตั้งวางไว้บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ของสิ่งแวดล้อมทะเลไทยจนครบระยะเวลา 3 ปี (โดยได้หล่อตัวอย่างและตั้งไว้ในสิ่งแวดล้อมทะเล

แล้ว) แล้วจึงเก็บมาเจาะตัวอย่างคอนกรีต เพื่อหาการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration profile) กำลังอัดของคอนกรีต (Compressive strength) ร้อยละของพื้นที่ผิวการเกิดสนิม (Corrosion of lateral surface area) และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม (Weight loss)

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนต่าง ๆ ทั้งแบบใช้วัสดุประสานสองชนิด (Binary binder) และแบบใช้วัสดุประสานสามชนิด (Ternary binder) ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลไทย
2. ทำให้ทราบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสิ่งแวดล้อมทะเลไทย
3. ทำให้ทราบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสิ่งแวดล้อมทะเลไทย



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) กล่าวว่า คลอไรด์ในเนื้อของคอนกรีตอาจมีอยู่ในคอนกรีตเองหรือมาจากภายนอกโครงสร้างคอนกรีตในช่วงเวลาที่ใช้งาน โดยคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตอยู่แล้ว อาจมาจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หิน ทราย โดยเฉพาะ หิน ทราย จากแหล่งที่อยู่ใกล้ทะเลหรือในน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ซึ่งมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาส่วนมากของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมาจากคลอไรด์ภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาพแวดล้อมทะเล จากดินหรือจากการใช้เกลือที่ใช้ในการละลายน้ำแข็ง (De-icing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว โดยทั่วไปแล้วคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมาจากน้ำทะเล ซึ่งการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยน้ำทะเลจะเกิดขึ้นเนื่องจากเกลือซัลเฟต และเกลือคลอไรด์ โดยการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างมีสาเหตุจากเกลือคลอไรด์เป็นหลัก เพราะในน้ำทะเลมีสารละลายคลอไรด์อยู่เป็นส่วนใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับซัลเฟต ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ทวิชช์ สาราณวนิช (2551) กล่าวว่า ปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine environment) เป็นปัญหาที่พบบ่อยมากในประเทศไทย โดยโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลนั้น อาจเกิดการเสื่อมสภาพได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน อาทิเช่น การกัดเซาะ การชะล้าง การตกผลึกของเกลือ การทำลายโดยเกลือซัลเฟต แต่สาเหตุหลักคือการทำลายโดยเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล ส่งผลโดยตรงต่อเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีต ทำให้เหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิม และเนื้อสนิมที่เกิดขึ้น ขยายตัวไปดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็ว และมีอายุการใช้งานสั้นกว่าที่ควร

บริเวณชายฝั่งทะเลหรือห่างจากทะเลไม่มากนัก มักพบปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเร็วกว่าปกติ ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งาน (Service life) ที่สั้น ทั้งนี้การเสื่อมสภาพส่วนใหญ่ของโครงสร้างสาเหตุเนื่องมาจากเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมจากนั้นเนื้อของคอนกรีตที่หุ้มอยู่เกิดการแตกร้าวหลุดร่อนเสียหาย ทำให้ต้องสูญเสียงบประมาณในการซ่อมแซมบำรุงรักษาจำนวนมาก สาเหตุที่ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่สั้น ส่วนหนึ่งเป็นเพราะผู้ที่เกี่ยวข้องในงานก่อสร้าง ขาดความรู้ความเข้าใจในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาพการทำลายที่รุนแรงของน้ำทะเล

โดยทั่วไปแหล่งที่มาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมาจากน้ำทะเล แต่ในโครงสร้างที่อยู่ต่ำกว่าน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น แม้อคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้มาก แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้นผลกระทบของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ต่ำกว่าน้ำทะเลตลอดเวลา จึงพบปัญหานี้ไม่มากนัก

ความเสื่อมสภาพของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเนื่องจากเกลือคลอไรด์

#### 1. องค์ประกอบของน้ำทะเล

การทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยน้ำทะเลเกิดขึ้นเนื่องจากเกลือซัลเฟตมากกว่าเกลือคลอไรด์ เพราะในน้ำทะเลมีสารละลายคลอไรด์อยู่เป็นส่วนใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับซัลเฟต ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำทะเล

Chemical ion contributing to sea water salinity	Concentration (in parts per thousand) in average sea water
Chloride	19.345
Sodium	10.752
Sulfate	2.701
Magnesium	1.295
Calcium	0.416
Potassium	0.390
Bicarbonate	0.145
Bromide	0.066
Borate	0.027
Strontium	0.013
Fluoride	0.001
Other	less than 0.001

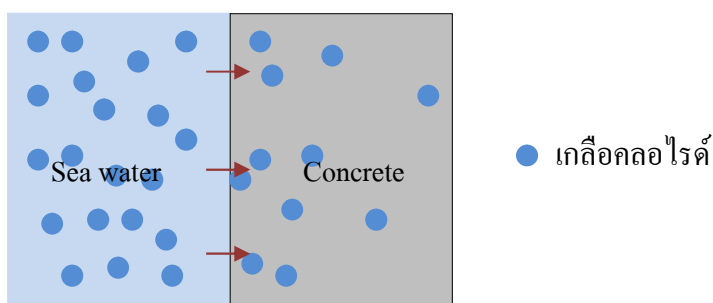
(ที่มา : Castro P., Huber M.E. (2007) Marine biology. Boston:McGraw-Hil.)

## 2. การแทรกซึมของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

เนื่องจากคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำทะเล จึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีตโดยมีผลกระทบทั้งทางตรง และทางอ้อม ซึ่งทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสื่อมสภาพลง โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่าง ๆ เช่น ความแตกต่างความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่านดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้ 4 กลไก ดังนี้

### 2.1 การแพร่ (Diffusion)

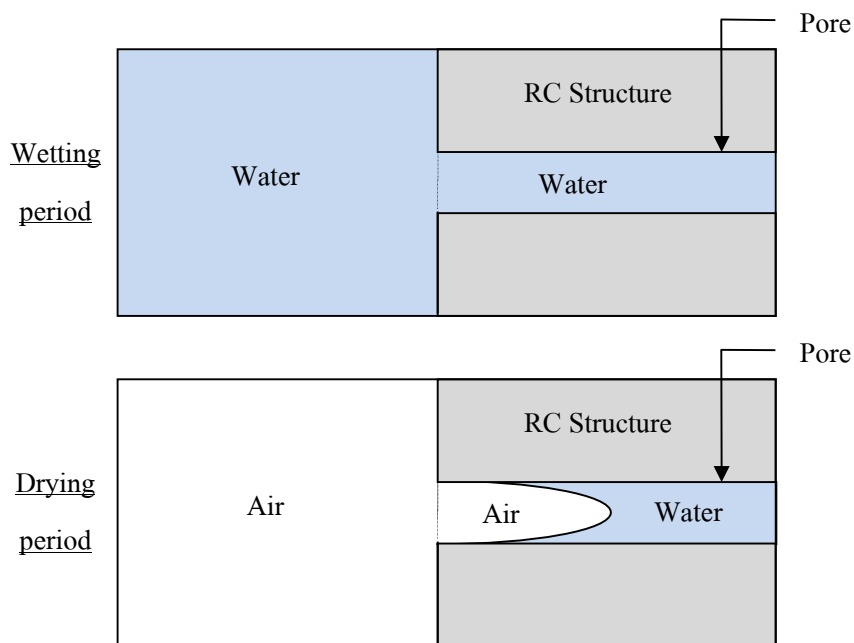
กลไกนี้มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์เข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อิ่มตัว แรงขับเคลื่อนของเกลือคลอไรด์ในกลไกนี้เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ กล่าวคือ เกลือคลอไรด์แพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อสองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทาง ณ เวลาต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ลักษณะการแพร่ของเกลือคลอไรด์สู่คอนกรีต

### 2.2 การดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction)

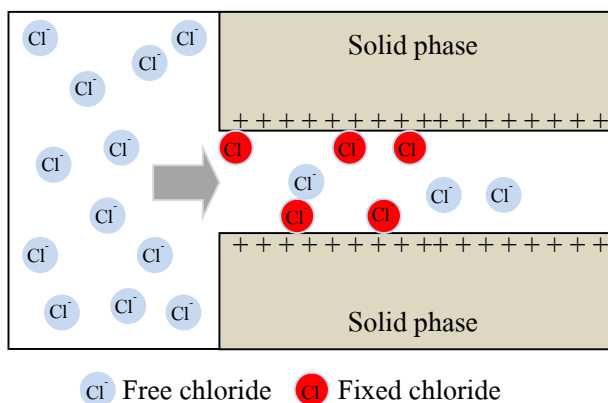
โดยการดึงดูดแบบคาพิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเล สภาวะเปียกสลับแห้ง (Wet-dry cycle) เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แล้วถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารีซึ่งกลไกนี้ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการดึงดูดแบบคาพิลลารีของคลอไรด์

### 2.3 การดึงดูดไอออน (Ion adsorption)

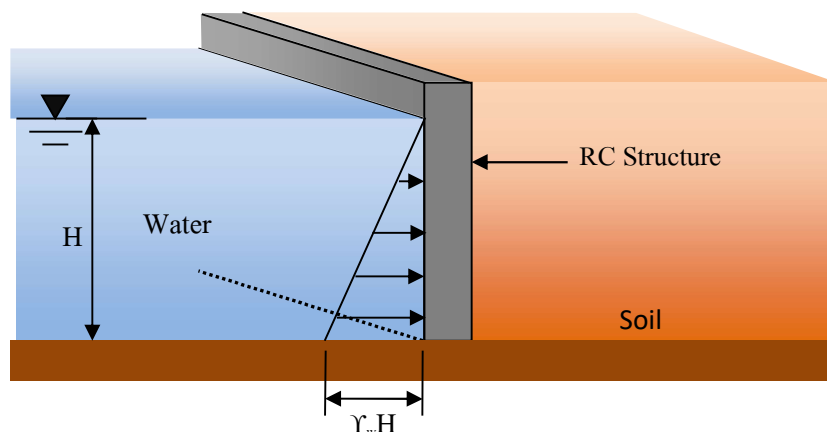
ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่น้ำทะเลตลอดเวลาพบว่า ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงกว่า ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการแพร่ได้ เพราะการแพร่ยุติลงเมื่อความเข้มข้นคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนสูงขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีต ดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีต และสะสมอยู่ในบริเวณนั้น ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กลไกการดึงดูดไอออนคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

## 2.4 แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure)

โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำเช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่าง Hydraulic head ซึ่ง Hydraulic head มีระดับความลึกมาก ทำให้มี Hydraulic pressure สูงทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ อีออนสามารถซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำ



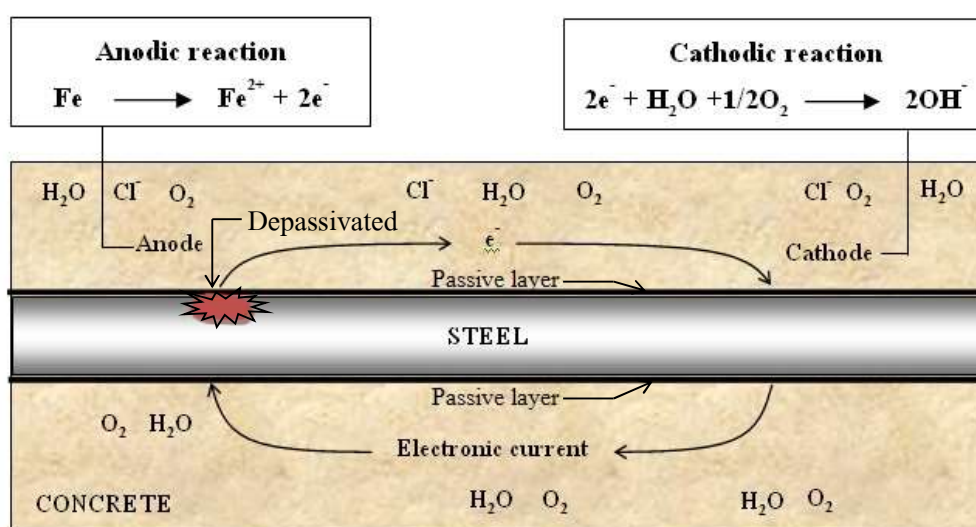
ภาพที่ 2.4 กลไกของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตโดยความดันน้ำ

## 3. การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

ปริมาณของคลอไรด์เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการผุกร่อนเป็นสนิมของเหล็กเสริม และถ้าหากมีปริมาณคลอไรด์ในปริมาณที่มากพอในระหว่างการผสมคอนกรีตมีผลทำให้ Passivity film ไม่สามารถเกิดขึ้นได้

ภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งที่ได้คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca(OH)}_2$  ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง ทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีต เมื่อแข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง ค่า pH ประมาณ 12.5-13.5 ความเป็นด่างของคอนกรีตช่วยป้องกันเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีตไว้ โดยเกิดชั้นฟิล์มบางๆ ของ  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  เคลือบผิวเหล็กไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็ก จึงไม่เกิดสนิมขึ้น สภาพเช่นนี้เรียกว่า “Passivity” อย่างไรก็ตามคลอไรด์จากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตจนถึงชั้นของเหล็กเสริม และทำลายชั้นฟิล์มดังกล่าว ประกอบกับมีน้ำหรือความชื้น และก๊าซออกซิเจนภายในคอนกรีต ทำให้กระบวนการเกิดสนิมจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นเป็นลักษณะของเซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวของเหล็กเสริม สาเหตุจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมคอนกรีต ความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นสารละลายเกลือภายในช่องว่างคอนกรีต ฯลฯ ทำให้เกิดสภาพขั้วบวกและขั้วลบ (Cathode and Anode) เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าโดย

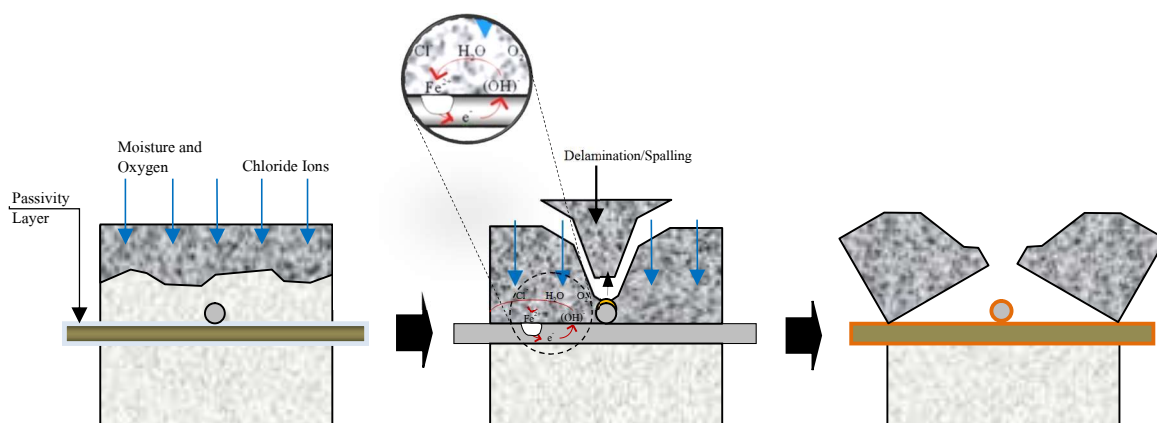
สารละลายของเกลือคลอไรด์ในช่องว่างคอนกรีตเป็นสิ่งอิเล็กโทรไลต์ให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่านปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของกระบวนการเกิดสนิมเริ่มที่ขั้วบวก (Anode) เหล็กแตกตัวเป็นเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) เข้าสู่สภาพสารละลาย ส่วนอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) วิ่งผ่านไปตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้วลบ (Cathode) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic reaction) จากนั้นอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาอะโนดิกไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic reaction) และเมื่อ  $\text{Fe}^{2+}$  รวมตัวกับ  $(\text{OH})^-$  เกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) ซึ่งออกซิไดร์ต่อไปเป็นไฮดรตเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) หรือสนิมเหล็กในที่สุด ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์ (ที่มา : ทวีชัย สาราญวานิช, 2551)

สนิมที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากกว่าเนื้อเหล็กเดิมหลายเท่า ซึ่งอาจมากถึง 6 เท่า ส่งผลให้เกิดการขยายตัว และดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย โดยระยะทางที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีอาจยาวถึง 10 มิลลิเมตร จนถึงมากกว่า 6 เมตร ทำให้สนิมอาจเกิดต่างบริเวณกับจุดที่เกิดการเกิดสนิมของเนื้อเหล็ก และเมื่อเหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนจากสนิมมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเกิดการแตกร้าวไปตามแนวของเหล็กเสริม (Splitting crack) จนหลุดล่อน (Spalling) ออกมาโดยชั้นของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอาจหลุดกะเทาะออกมาเป็นบริเวณกว้าง ถ้าหากเหล็กเสริมเกิดสนิมอย่างรุนแรง นอกจากนี้สภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงอย่างเช่น ในน้ำทะเล เหล็กเสริมอาจถูกเกิดสนิมเป็นรอยลึกขนาดใหญ่ที่เรียกว่า “Pitting corrosion” ซึ่งทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงอย่างมาก และอาจเป็นอันตรายต่อการรับกำลังของโครงสร้าง คลอไรด์จากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้หลายวิธี เช่น การดูดซึมเนื่องจากแรง Capillary suction การ

แพร่คลอไรด์ไอออนจากภายนอกที่มีความเข้มข้นสูงกว่าภายใน และการซึมผ่านเนื่องจากแรงดันของน้ำ โดยความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการซึมผ่านของคลอไรด์เป็นสำคัญ คลอไรด์เมื่อซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตถูกจับยึดไว้โดยทางเคมีและทางกายภาพ (Chemical and Physical binding) และบางส่วนของคลอไรด์ที่ไม่ถูกจับยึดเป็นคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ความต่างของคอนกรีตลดลง และทำให้เหล็กเกิดสนิม



ภาพที่ 2.6 กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

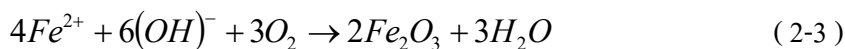
กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต จากภาพที่ 2.6 เริ่มต้นจากคลอไรด์ในสภาพแวดล้อมแทรกซึมเข้าไปเนื้อคอนกรีตและสะสมที่ผิวของเหล็กเสริมจนมากพอจนถึงระดับวิกฤตจนทำให้ฟิล์มบาง ๆ ที่ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Passive film) ถูกทำลาย ประกอบกับมีความชื้น และออกซิเจนเพียงพอทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrolysis) ขึ้น ดังสมการต่อไปนี้



โดยเหล็กแตกตัวเป็นไอออน ( $Fe^{2+}$ ) เข้าสู่สภาพสารละลาย และอิเล็กตรอนวิ่งไปตามผิวเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic reaction) ต่อจากนั้นเกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกไปรวมตัวกับน้ำ และออกซิเจนที่บริเวณเดียวกันหรือบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน ดังสมการต่อไปนี้



ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic process) หลังจากนั้นปฏิกิริยาการเกิดสนิมเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



Funahashi (1990) กล่าวว่า การเกิดสนิมแบ่งได้เป็นสองขั้นตอนคือ 1) Initial period ( $t_0$ ) เริ่มเมื่อคลอไรด์ไอออนซึมผ่านเข้าไปสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤตหลังจากนั้นคือ 2) Propagation period ( $t_1$ ) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กขึ้นอย่างต่อเนื่อง

1. Initial period หรือ ระยะเวลาช่วงแรก ( $t_0$ ) หมายถึง ระยะเวลาตั้งแต่ห่อคอนกรีตเสร็จจนถึงเวลาที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วงนี้คลอไรด์ไอออนแทรกซึมเข้ามาสะสมในเนื้อคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริมจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต โดยปริมาณของคลอไรด์อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.20 – 1.33 กก/ม<sup>3</sup> หรือตั้งแต่ 75 – 1175 ppm ของคอนกรีต นอกจากนั้นออกซิเจน และน้ำสามารถซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปยังเหล็กเสริมได้เช่นกัน ซึ่งระยะเวลาช่วงแรก ( $t_0$ ) นี้จะใช้เวลานานหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ เช่น ความสามารถซึมผ่านของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต และความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น

2. Propagation period หรือ ระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง ( $t_1$ ) หมายถึง ช่วงระยะเวลาของการพัฒนาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต กล่าวคือ เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งโครงสร้างเกิดการวิบัติหรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งาน กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น ทำให้เหล็กเสริมบริเวณขั้วลบลูกเกิดสนิมทำให้เหล็กเสริมมีขนาดหน้าตัดเล็กลง และเหล็กเสริมบริเวณขั้วบวกเกิดเป็นสนิม ซึ่งสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากขึ้น จนดันให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่กะเทาะออก เมื่อเกิดสนิมเพิ่มมากขึ้น คอนกรีตหลุดร่อนออกเป็นชั้น ๆ ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เป็นผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนี้สูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด ทั้งนี้อัตราการพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมรอบ โครงสร้างนั้น ๆ

Bakke (1988) กล่าวว่า ในกรณีที่คอนกรีตปนเปื้อนคลอไรด์ตั้งแต่เริ่มผสม การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเกิดขึ้นทันที ส่วนกรณีสัมผัสกับเกลือที่ละลายในน้ำทะเล ปริมาณของคลอไรด์เพิ่มขึ้นตามเวลาและอาจนำไปสู่สถานะที่คอนกรีตไม่สามารถปกป้องเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมได้อีกต่อไป ค่า pH ของคอนกรีตบริเวณที่หุ้มรอบเหล็กเสริมสามารถบอกได้ว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตมีโอกาสเกิดสนิมได้มากน้อยเพียงใด ดังแสดงในตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ (Shamsad, 2003)

ค่า pH ของคอนกรีต	สภาพของสนิมภายในเหล็กเสริมคอนกรีต
ต่ำกว่า 9.5	เริ่มเกิดสนิมเล็กน้อยที่ผิว (Passive film ยังไม่ถูกทำลาย)
8.0	Passive film ถูกทำลาย
ต่ำกว่า 7.0	เหล็กเสริมเกิดสนิมอย่างรุนแรง

#### 4. ประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

เกลือคลอไรด์ในคอนกรีตมี 2 ประเภท ได้แก่ คลอไรด์ที่ถูกจับยึด และคลอไรด์อิสระ

1. คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คือ คลอไรด์ในคอนกรีตที่ถูกยึดจับ โดยกลไก ดังต่อไปนี้ คือ

1.1. Chemical binding เป็นคลอไรด์ที่ถูกจับยึด โดยผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration products) ของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  โดยอยู่ในภาพที่ของ  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Friedal's salt) หรือ  $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Calcium chloroferrite) ตามลำดับ

1.2. Physical binding เป็นคลอไรด์ที่ถูกจับยึดด้วยลักษณะ และแรงทางกายภาพ โดยคลอไรด์ถูกยึดจับด้วยแรงยึดเหนี่ยวไว้ที่ผิว (Surface force) หรือโพรงของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกจับยึดอยู่บนผิวของวัสดุเนื้อเยื่อ เช่น ทราช หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้เป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

2. คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่าง (Pore solution) ของคอนกรีต โดยคลอไรด์อิสระเป็นคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้น หากสามารถจับยึดคลอไรด์อิสระนี้ไว้ สามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเริ่มเหล็กออกไปได้

#### 5. ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ในคอนกรีต

ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ (Chloride binding capacity) ของคอนกรีต หมายถึง ความสามารถของคอนกรีตในการยึดจับคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีตให้เป็นคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตนั้น ซึ่งการยึดจับคลอไรด์อาจเกิดจากการยึดจับทางเคมี (Chemical binding) หรือคลอไรด์อาจถูกยึดจับทางกายภาพ (Physical binding) ทั้งนี้คอนกรีตแต่ละส่วนผสมมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ ปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อายุการบ่ม และระยะเวลาการเผชิญเกลือคลอไรด์ด้วย เป็นต้น หากคอนกรีตชนิดใดมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ได้สูงส่งผลดี

ต่อคอนกรีตในการป้องกันปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจากเกลือคลอไรด์ เนื่องจากลดปริมาณคลอไรด์อิสระที่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตให้น้อยลง

## 6. ปัจจัยที่มีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตมีผลต่อปริมาณคลอไรด์ที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีต โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ ได้แก่

### 6.1 ระยะเวลาของคอนกรีตหุ้มผิวเหล็กเสริม

อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ขึ้นอยู่กับความพรุน และระยะของคอนกรีตหุ้มผิวเหล็กเสริม ความพรุนของคอนกรีตคือ ปริมาณรูพรุนที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต ถ้ารูพรุนน้อย ไม่ต่อเนื่องกัน ทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำ ส่งผลให้อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง

Neville (1995) กล่าวว่า ระยะของคอนกรีตหุ้มมากเท่าใด เวลาที่ใช้จนกระทั่งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระดับของผิวเหล็กเสริมถึงค่าวิกฤตมากขึ้น ซึ่งระยะของคอนกรีตหุ้มผิวมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของคอนกรีต หากคุณภาพของคอนกรีตดีก็สามารถลดระยะของคอนกรีตหุ้มผิวลงได้

Soroka (1993) กล่าวว่า ระยะที่ใช้จนกระทั่งคลอไรด์ มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 0.4 ที่ระยะหนึ่งวัดจากผิวของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้นเมื่อความพรุนของคอนกรีตลดลงหรือระยะที่มีปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่เวลาหนึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่มต่างส่งผลต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์คือเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการควบคุมอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ ต้องบ่มคอนกรีตหุ้มให้ดี และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำตลอด

### 6.2 ชนิดและปริมาณของปูนซีเมนต์

Soroka (1993) กล่าวว่า สภาพการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมเกิดจากคลอไรด์อิสระหรือคลอไรด์ที่ไม่ถูกกักกัน ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่คลอไรด์เข้าร่วมสารผลิตภัณฑ์ของ  $C_3A$  เกือบทั้งหมด กลายเป็น Friedels salt ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) หรือเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูง เกิดแคลเซียมออกไซด์คลอไรด์ ( $CaO \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) ด้วยความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขึ้นอยู่กับปริมาณ  $C_3A$  ถ้า ปริมาณ  $C_3A$  มาก ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ก็มากตามไปด้วย ดังนั้น ถ้าปูนซีเมนต์ยังมีความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์มากเท่าใด ย่อมหน่วงการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้าไปในคอนกรีตให้ช้าลงเท่านั้น และทำให้ระยะเวลาช่วงแรกของการเกิดสนิมช้าลงไป อีกทั้งส่วนประกอบ และปริมาณของปูนซีเมนต์ ต่างมีผลต่อปริมาณของคลอไรด์ที่เข้าไปทำปฏิกิริยาเมื่อปูนซีเมนต์ที่ใช้มีปริมาณมากย่อมมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ได้ในปริมาณมาก จึงทำให้อัตราการแทรกซึมลดลง ดังนั้นอัตราส่วนน้ำต่อ

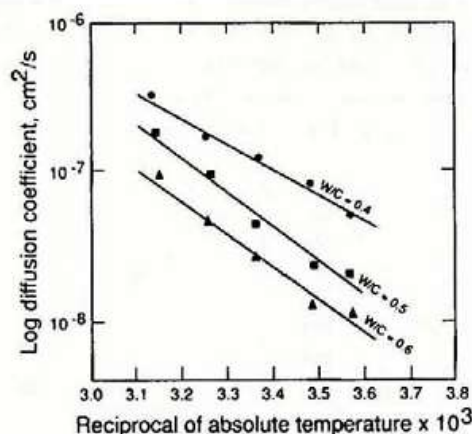
ปูนซีเมนต์ และประเภทของปูนซีเมนต์ บ่งชี้คุณภาพความซึมผ่านได้ของคอนกรีต ซึ่งคุณภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับทำให้คอนกรีตแน่น และเงื่อนไขการบ่ม

### 6.3 ตัวชี้ควาการเกิดสนิม

ตัวชี้ควาการเกิดสนิมคือ สารที่มีคุณสมบัติต่อต้านการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ ไม่ว่าจะเป็นลักษณะการป้องกันหรือหน่วงให้เหล็กเสริมผุกร่อนช้าลง มีทั้งแบบที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แต่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ประเภทไนไตรต์ ได้แก่ แคลเซียมไนไตรต์และโซเดียมไนไตรต์ ซึ่งเป็นประเภทสารอนินทรีย์

### 6.4 อุณหภูมิ

Soroka (1993) กล่าวว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ในภาพที่ลอกการิทึมกับส่วนกลับของอุณหภูมิที่มีหน่วยเป็นเคลวิน เป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 2.7 โดยในสภาพอากาศร้อน เวลาที่คลอไรด์ใช้ในการเคลื่อนที่ถึงเหล็กสั้นกว่าในสภาพอากาศเป็นกลาง และอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์

### 6.5 คุณภาพของคอนกรีต

ส่วนประกอบของคอนกรีตและอุณหภูมิที่ใช้บ่มมีความสำคัญกับโครงสร้างโพรงของคอนกรีต เมื่อเพิ่มระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง ซึ่งเป็นจริงเมื่อคอนกรีตไม่มีการสูญเสียน้ำเท่านั้น หากสูญเสียน้ำ ระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชันเปลี่ยนไปตามระยะจากผิว เนื่องจากการลดลงของความชื้น ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านเพิ่มขึ้น หากบ่มคอนกรีตไว้นาน การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง นอกจากนี้หากการทำให้คอนกรีตแน่นไม่เพียงพอ การแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มขึ้น

Kayyali et al. (1988) กล่าวว่า คอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมที่มีเกลือคลอไรด์ต้องการระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตที่มากเพียงพอ เนื่องจากการบ่มคอนกรีตที่นานเพียงพอทำให้โครงสร้างของโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตมีขนาดเล็ก และส่งผลทำให้การแพร่ของคลอไรด์ในเนื้อของคอนกรีตเกิดขึ้นได้ยาก

### ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอช โซลาน

กรรมวิธีการผสมอย่างสม่ำเสมอระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปอช โซลานละเอียด โดยการปดปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปอช โซลานหรือการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปอช โซลานละเอียด หรือทั้งการบด (Clinker) และการผสม จึงมีความเป็นสารปอช โซลาน มีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารซัลเฟตและคลอไรด์ได้ดี ทำให้โครงสร้าง คอนกรีตมีความแข็งแรงทนทาน และเหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตในพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ พื้นที่ดินเค็ม ในภาคอีสาน พื้นที่น้ำกร่อย

### เถ้าลอย

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดนำไปเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ตกลงมายังก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน ลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อน และเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ลักษณะส่วนใหญ่เป็นภาพที่ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน (0.001 มม.) จนถึง 0.15 มม. ความละเอียดของเถ้าถ่านหินขึ้นอยู่กับกระบวนการบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา ถ่านหินที่เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาที่มีความละเอียดสูงและมีทรงกลมแต่กรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ภาพที่ร่างของเถ้าถ่านหินไม่แน่นอน เถ้าถ่านหินที่ละเอียดมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า

เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะมีคุณสมบัติเป็นสาร Pozzolan มีส่วนประกอบหลักที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ อยู่ในภาพที่สารประกอบของ Silica และ Alumina เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ในสภาพที่มีความชื้น ในระยะแรก น้ำกับปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยา Hydration เกิดเป็นสารเชื่อมประสาน ที่แข็งตัว เช่น Calcium Silicate Hydrate , Calcium Aluminate Hydrate และเป็นสารละลาย  $\text{Ca(OH)}_2$

อิสระอยู่ในโพรงของเนื้อคอนกรีต (Pore solution) ซึ่งสามารถถูกชะล้างออกไปได้ ในช่วงต่อมา แก้วลอยเข้าทำปฏิกิริยา Pozzolanic กับสาร  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ส่วนนี้เกิดเป็นสารเชื่อมประสานชนิดเดียวกัน เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตเหลือปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  น้อยลง มีความแข็งแรงในระยะยาวเพิ่มขึ้น และมีความคงทนเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียด และมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอสามารถทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิก่อให้เกิดสารเชื่อมประสานใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate , C-S-H) เพิ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction)

1. ชนิดของแก้วลอย มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งแก้วลอยออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

ก. แก้วลอย ชนิด C (Class C) เป็นแก้วลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซัลฟิวไรต์เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2-3 แก้วลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าแก้วลอยแคลเซียมสูง สำหรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำทำให้แก้วลอยชนิด C นอกจากมี  $\text{SiO}_2$  ต่ำแล้วยังมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำด้วย

ข. แก้วลอย ชนิด F (Class F) เป็นแก้วลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica :  $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา (Alumina :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.3 โดยทั่วไปแก้วลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide : CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แก้วลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ  $\text{SiO}_2$  มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้แก้วลอยที่มี  $\text{SiO}_2$  สูง

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของแก้วลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	C	F
-ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อย่างต่ำ, ร้อยละ	50.0	70.0
-ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
-ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
-การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0

-ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า $\text{Na}_2\text{O}$ , ร้อยละ	1.5	1.5
---	-----	-----

## 2. ลักษณะการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในงานคอนกรีต

ปัจจุบันการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตได้แพร่หลายมากขึ้น โดยอาศัยข้อดีทั้งทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยมาเป็นประโยชน์ กล่าวคือ เถ้าลอยมีอนุภาคกลมส่งผลดีต่อความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต อีกทั้งอนุภาคมีความละเอียดสูงกว่าซีเมนต์ จึงทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดช่องว่าง (Filler) ระหว่างอนุภาคซีเมนต์ซึ่งโดยปกติแล้วช่องว่างเหล่านี้จะถูกอุดด้วยปริมาณน้ำส่วนที่เกินจากการใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนั้นแล้วเถ้าลอยยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้นเช่น เพิ่มคุณสมบัติการรับแรง ความทนทาน คุณสมบัติการรับแรงคัด ลดคุณสมบัติการซึมน้ำ ลดการย่ิม และการแยกตัว ลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลน์ เป็นต้น

การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในงานคอนกรีตสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ ตามหน้าที่การทำงานของเถ้าลอย คือ

1. การแทนที่ เถ้าลอยที่ใช้เป็นส่วนผสมทำหน้าที่ทดแทนในส่วนของปูนซีเมนต์ โดยทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เกิดสารที่ให้ความแข็งแรง (C-S-H) เช่นเดียวกันกับปฏิกิริยาที่เกิดจากปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิก นอกจากนี้ปฏิกิริยาของเถ้าลอยกับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ยังมีส่วนทำให้คอนกรีตสามารถทนทานต่อสารเคมีสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้น สามารถลดปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ซึ่งเป็นสารประกอบที่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบพวกซัลเฟต ซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว และแตกร้าวได้

2. การผสมเพิ่มเถ้าลอยที่เหลือจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำหน้าที่เป็นมวลละเอียดอุดตามช่องว่างของเนื้อคอนกรีต และเนื่องจากอนุภาคที่มีลักษณะกลมของเถ้าลอยจึงทำให้เนื้อคอนกรีตมีการไหลลื่นดี มีความต้องการน้ำลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัด และความทึบน้ำของคอนกรีตสูงขึ้น

3. การแทนที่ และการผสมเพิ่มร่วมกัน เถ้าลอยแบ่งการทำหน้าที่เป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกทำหน้าที่ทำปฏิกิริยาแทนปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือทำหน้าที่เป็นมวลละเอียดอุดตามช่องว่างของเนื้อคอนกรีต

## 3. ผลกระทบของเถ้าลอยต่ออัตราส่วนผสมคอนกรีต

วิธีการที่ดีที่สุดในการประเมินคุณลักษณะของเถ้าลอยชนิดใดชนิดหนึ่งในส่วนผสม คือ การนำเถ้าลอยผสมในคอนกรีตและทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ เถ้าลอยจากบางแหล่งอาจมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าเถ้าลอยจากแหล่งอื่น และข้อกำหนดสำหรับคอนกรีตแต่ละชนิดยังแตกต่างกัน ดังนั้น

การกำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย จึงไม่สามารถทำนายถึงคุณสมบัติของวัสดุและค่าต่าง ๆ ที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยในปริมาณที่ต่างกัน เพื่อทดสอบหาปริมาณวัสดุประสานที่เหมาะสม ให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดตามต้องการ โดยมีการปรับเปลี่ยนการใช้เถ้าลอยในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปสำหรับงานคอนกรีตธรรมดาปริมาณที่เหมาะสมของการใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ขณะที่การใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C จะอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 35 ของน้ำหนักวัสดุประสาน แต่อาจเพิ่มปริมาณเถ้าลอยชั้นได้อีก หากเป็นการเทคอนกรีตหนา เพื่อลดปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือเพิ่มความสามารถในการป้องกันการเกิดสนิมของซัลเฟตหรือเพื่อควบคุมปฏิกิริยาระหว่างค่างอัลคาไลน์ และมวลรวมหรือเพื่อใช้ในงานคอนกรีตพิเศษอื่น ๆ

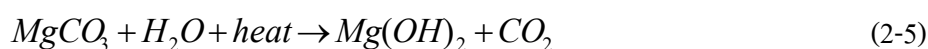
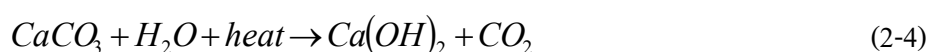
เถ้าลอยที่ใช้ในงานคอนกรีตอาจเป็นส่วนหนึ่งในปูนซีเมนต์ผสมตามมาตรฐาน ASTM C595 ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (Type IP) ปูนซีเมนต์ปอซโซลานดัดแปลงหรืออาจใส่แยกกับปูนซีเมนต์ในเครื่องผสมคอนกรีตก็ได้ ในกรณีที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งในปูนซีเมนต์ ปริมาณของเถ้าลอยที่ใช้ผสมถูกกำหนดไว้คงที่จากโรงงานผู้ผลิตเพื่อให้มีคุณภาพตามที่กำหนดในมาตรฐานการกำหนดอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (Type IP) ในกรณีที่เหมาะสมเถ้าลอยแตกต่างกันหากต้องเลือกส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าลอย และปรับส่วนผสมนั้นเพื่อให้เหมาะสมกับงานแต่ละงาน การเลือกใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยเพื่อออกแบบคอนกรีตให้มีกำลังอัดตามต้องการสามารถทำได้โดยการปรับอัตราส่วนปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยให้เหมาะสมซึ่งทำให้ลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่กำลังอัดระดับเดียวกันแต่ไม่ใช้เถ้าลอย และอาจลดปูนซีเมนต์ได้มากขึ้นเมื่อใช้สารลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต หลักการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตก็คือ ปริมาณของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์กับเถ้าลอย) ตามปกติต้องมากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย เพื่อให้ได้กำลังอัดที่อายุต้น ๆ และค่าความชื้นเหลวเท่าเทียมกัน ปริมาณวัสดุประสานทั้งหมด และสัดส่วนของเถ้าลอยที่ใช้ในส่วนผสมขึ้นอยู่กับชนิด และคุณภาพของเถ้าลอยรวมถึงชนิด คุณภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ สารเคมีที่ใช้ สภาพแวดล้อมของคอนกรีตที่ผสม กำลังอัดที่ต้องการของคอนกรีต วิธีการบ่ม สภาพของอากาศในขณะผสม ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนมีผลต่อคุณภาพของคอนกรีตทั้งสิ้น

## ผงหินปูน

ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้ (By product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน ประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>2</sub>) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO<sub>3</sub>) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในสภาพที่ของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive material) และมีความละเอียดสูง ซึ่งสามารถอุดโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีต จึงทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมแทรก (Filler) มีรายละเอียดดังนี้

### 1. วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ มีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ซึ่งจะมีราคาถูก เนื่องจากมีความละเอียดและความบริสุทธิ์ของผงหินปูนในระดับต่ำ และผงหินปูนที่ผลิตขึ้น (Product) เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีต ซึ่งมีราคาสูง เนื่องจากมีความละเอียด และความบริสุทธิ์ของผงหินปูนในระดับที่สูงผงหินปูนเป็นวัสดุที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาต่ำ (Inert material) ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) โคลโลไมด์ (CaCO<sub>3</sub> . MgCO<sub>3</sub>) และซิลิกาเกต (SiO<sub>2</sub>) เหมาะสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเนื่องจาก ช่วยเพิ่มกำลังอัดในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age strength) และเป็นวัสดุเติมเต็มในช่องว่างของคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเกิดสนิมเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะที่เดียวกันก็อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO<sub>3</sub>) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตาม สารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สมารถที่ทำปฏิกิริยาได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียง และให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2-4 และสมการที่ 2-5





## 2. วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยารวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2-6



ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

การนำผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาทดแทนปูนซีเมนต์ จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่าง ๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อทราบถึงคุณสมบัติ

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Matthews (1989) ได้ทำการศึกษาความสามารถการกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมผงหินปูน การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration) ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของผงหินปูนที่อัตราส่วนร้อยละ 5 และร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทดสอบในสภาวะแวดล้อมทะเลที่เป็นบริเวณน้ำขึ้น – น้ำลง (Tidal zone) เป็นระยะเวลา 5 ปี พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีส่วนผสมของผงหินปูนร้อยละ 5 มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อย่างเดียว และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีส่วนผสมของหินปูนร้อยละ 25 ตามลำดับ เนื่องจากความสามารถในการกักคลอไรด์ (Chloride binding capacity) ของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่อัตราส่วนร้อยละ 25 มีค่าต่ำ เพราะว่ามีปริมาณวัสดุเชื่อมประสานต่ำ (Low cementitious material) และคอนกรีตมีความพรุนสูงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว และคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของผงหินปูนร้อยละ 5

Costa and Appleton (2002) กล่าวว่า โครงสร้างคอนกรีตที่มีอายุการใช้งานเป็นระยะเวลานาน มักพบสาเหตุหลักที่ทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ความรุนแรงส่วนใหญ่ที่มีผลกระทบต่อคอนกรีตคือสิ่งแวดล้อมทะเล การแทรกซึมคลอไรด์มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมค่อนข้างสูง ซึ่งทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานที่สั้นลง งานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงที่เกิดจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่แตกต่างกัน

Hooton (1996) ได้รายงานผลการศึกษากำหนดค่าการเกี่ยวกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กถูกเผชิญในสภาวะน้ำขึ้นน้ำลงเป็นระยะเวลา 1 - 4 ปี การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมถูกเปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่าง ๆ กัน และปริมาณการใช้เถ้าลอยต่าง ๆ กัน โดยพบว่า ปริมาณคลอไรด์สูงสุดที่ยังไม่เกิดการสูญเสียน้ำหนักมากอย่างมีนัยสำคัญขึ้นอยู่กับปริมาณเถ้าลอยทั้งปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ละลายกรดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่ใช้มากขึ้น กล่าวถึงเท่ากับ 0.70% 0.65% 0.50% และ 0.20% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย 0% 15% 30% และ 50% ตามลำดับ แม้ว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าต่ำลงก็ตาม แต่คอนกรีตผสมเถ้าลอยให้คุณสมบัติป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ดี เนื่องจากต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สูง

Angst et al. (2009) กล่าวว่าการศึกษาเนื่องมาจากเกลือคลอไรด์ที่เป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้รับการศึกษาอย่างมากมากกว่า 50 ปี มีการเสนอแนวคิด ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตอิทธิพลที่มีผลกระทบ และเทคนิคการประเมินที่มีอยู่ ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต และผลการทดลองถูกตีพิมพ์ และรวบรวมไว้จำนวนมาก การศึกษาวัสดุประสานที่แตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ บ่อยครั้งให้ผลลัพธ์ตรงกันข้ามกับงานวิจัยที่ผ่านมา จากการประเมินรายงานวิจัยปัจจุบัน พบว่า มีความจำเป็นมากในการเน้นวิธีการทดสอบที่สามารถปฏิบัติได้ กล่าวคือ ขั้นตอนในการทดลองที่มีทั้งข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีการทดสอบ และการติดตั้ง และพบว่า วิธีการติดตั้งการทดลองหลายแบบไม่สามารถให้ผลการทดสอบที่ตรงตามความเป็นจริง

Song et al (2008) กล่าวว่าปัจจุบันการศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ และเกลือคลอไรด์ที่ผิวเกี่ยวข้องกับงานวิจัยเกลือคลอไรด์ใน โครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การแพร่ และเกลือคลอไรด์ที่ผิวที่เสนอนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลา เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง ทำให้เกลือคลอไรด์ที่ผิวเพิ่มขึ้น จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ควรให้ความสำคัญกับส่วนผสมของคอนกรีต ช่องว่างอากาศในคอนกรีต และขั้นตอนการบ่มคอนกรีต จากการศึกษา พบว่า การเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล และสภาพภูมิอากาศคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสม (Blended cement) ช่วยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง แต่ค่าเกลือคลอไรด์ที่ผิวสูงขึ้น เนื่องจากขนาดโพรงช่องว่างที่เล็กลง และสามารถเก็บกักคลอไรด์ การเพิ่มขึ้นของโพรงอากาศในคอนกรีต ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นแต่ค่าเกลือคลอไรด์ที่ผิวลดลง ซึ่งเกลือคลอไรด์ที่ผิวขึ้นอยู่กับวิธีการบ่ม เช่น บ่มน้ำ บ่มด้วยแผ่นเมมเบรน และบ่มในอากาศ ระดับขั้นของการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล ไม่มีความสัมพันธ์ชัดเจนกับปริมาณคลอไรด์ที่ผิว กล่าวคือ เมื่อเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลไม่ได้ทำให้ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวมีค่าสูงขึ้นแต่อย่างใดการเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลในพื้นที่เขตร้อน ทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวของโครงสร้างคอนกรีตกันคลื่นสูงขึ้น เช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์การแพร่ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เมื่อความเข้มข้นของความเค็ม น้ำทะเล จากสิ่งที่พบดังกล่าวได้เสนอแบบจำลองปริมาณคลอไรด์ที่ผิว เพื่อใช้ทำนายการเพิ่มขึ้นของเกลือคลอไรด์ให้ตรงกับความจริง สำหรับ โครงสร้างที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

Cheewaket et al. (2012) กล่าวว่างานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดสนิมของคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการเจาะหาเกลือคลอไรด์ความลึกของคอนกรีตที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมทางทะเล ผลที่ได้จากการศึกษากำลึงของคอนกรีตผสมคอนกรีตที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมทะเล 10 ปี พบว่าเป็นทดลองเกลือคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้เป็นการวัดค่าเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตผสมแล้วอยู่ที่อยู่สภาพน้ำขึ้นน้ำลงในสิ่งแวดล้อมทะเล 2 3 4 5 7 และ 10 ปี การวัดค่าเกลือคลอไรด์อิสระ และวัดระดับที่ได้รับจากการทดลอง ซึ่งเป็นการคำนวณความลึก และเวลาของการเกิดสนิมเนื่องจากเกลือคลอไรด์

ในสภาพแวดล้อมทะเล การศึกษานี้ พบว่า ความลึกของเกลือคลอไรด์เพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงในช่วง 5 ปี หลังจากที่อัตราการเพิ่มขึ้นลดลง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลมากในการทำให้เกลือคลอไรด์ลดลงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กว่าในคอนกรีตผสมเถ้าลอย การใช้เถ้าลอยทดแทนอย่างน้อย 35 % ของอัตราส่วน 0.65 ซึ่งมีความต้านทานการเกิดสนิมได้ดีเท่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วน W/B 0.45 ที่คอนกรีตแบบเดียวกัน ซึ่งความลึกและอัตราส่วน W/B เดียวกัน เถ้าลอยที่สูง (มากกว่า 25 % แทนเถ้าลอย) อย่างมากช่วยยืดเวลาในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้

Cheewaket et al. (2010) ได้ศึกษาปริมาณของไอออนคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ภายใต้สภาพแวดล้อมทะเล สามารถหาปริมาณของเกลือคลอไรด์อิสระ และเกลือคลอไรด์รวมที่อยู่ในคอนกรีต ด้วยวิธีการละลายในน้ำ และละลายในกรด ตามลำดับ จากการศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ความสัมพันธ์ของระยะเวลา และอัตราเถ้าลอยที่แทนที่เข้าไป กับความสามารถยึดจับเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่รับได้ในสภาพแวดล้อมทะเล เถ้าลอยชนิด F แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ 0% 15% 25% 35% และ 50% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่าง 0.45 0.55 และ 0.65 ตัวอย่างคอนกรีตถูกหล่อเป็นทรงลูกบาศก์ ขนาด 20x20 ซม<sup>2</sup> และนำไปเผชิญสภาพแวดล้อมทะเล อ่าวไทย บริเวณเขตน้ำขึ้นน้ำลง การวัดเกลือคลอไรด์ทั้ง ชนิดที่เป็นกรดละลายน้ำ และเกลือละลายน้ำในคอนกรีตถูกวัดหลังจากคอนกรีตเผชิญน้ำขึ้นน้ำลงเป็นระยะเวลา 3 4 5 และ 7 ปี พบว่า ร้อยละของเกลือคลอไรด์ขึ้นอยู่กับ การแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีต ร้อยละของเกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลา 3 - 4 ปี หลังจากคอนกรีตเผชิญสภาพแวดล้อมทะเล ซึ่งเป็นค่าร้อยละของเกลือคลอไรด์ที่ใกล้เคียงจุดสูงสุด

## บทที่ 3

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้หล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน และสารผสมเพิ่มต่าง ๆ นำไปเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลไว้แล้ว และได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบหาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต พื้นที่เกิดสนิม การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต และกำลังอัดของคอนกรีต

#### วัสดุที่ใช้

##### 1. ปูนซีเมนต์

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement) มีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 ประเภทที่หนึ่ง และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C150 TYPE 1 ดังภาพที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพถูกแสดงไว้ใน ตารางที่ 3.1 และอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งมีขนาดภาพถ่ายขยายกำลังสูง ดังภาพที่ 3.2 ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลาน และผงหินปูนแต่ใกล้เคียง ถ้าวัดโดยพิจารณาที่ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค  $D(v, 0.5)$  ดังตารางที่ 3.3 และจากกราฟแสดงขนาดคละของอนุภาคดังแสดงในภาพที่ 3.11

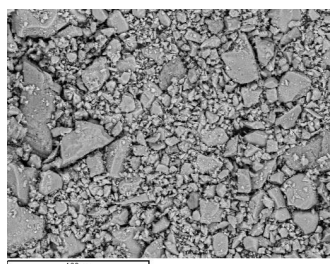
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate resisting Portland cement) มีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 ประเภทห้า และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C-150 TYPE 5 ดังภาพที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพถูกแสดงไว้ใน ตารางที่ 3.1 และอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้ามีขนาดภาพถ่ายกำลังสูง ดังภาพที่ 3.4 ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้ามีอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้าวัดโดยที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทปอชโซลาน และผงหินปูน โดยพิจารณาที่ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค  $D(v, 0.5)$  ดังตารางที่ 3.3 และจากกราฟแสดงขนาดคละของอนุภาคดังแสดงในภาพที่ 3.11

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลาน มีคุณสมบัติตามมาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปอชโซลาน มอก. 849-2532 และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C 595 ดังภาพที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมี และ

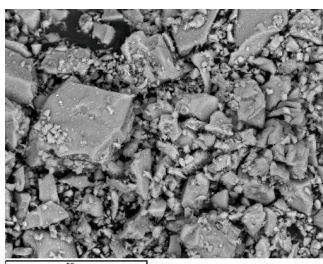
คุณสมบัติทางกายภาพถูกแสดงไว้ใน ตารางที่ 3.1 และอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลานมีขนาดภาพถ่ายกำลังสูง ดังภาพที่ 3.6 ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลานมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าผงหินปูนแต่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ประเภทที่ห้า และเก้าลอย โดยพิจารณาที่ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค D (v, 0.5) ดังตารางที่ 3.3 และจากกราฟแสดงขนาดคละของอนุภาคดังแสดงในภาพที่ 3.11



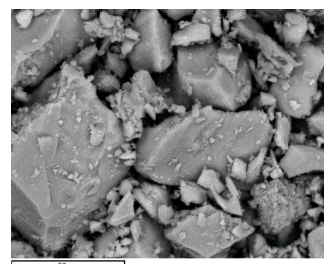
ภาพที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง



x500



x1000

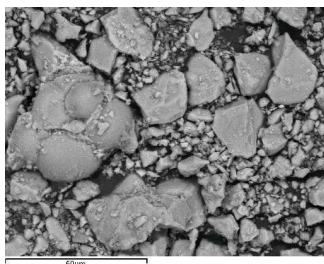


x2000

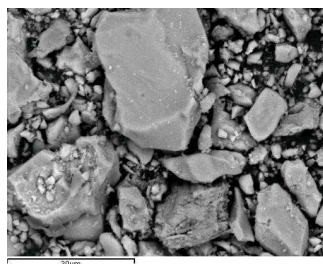
ภาพที่ 3.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง



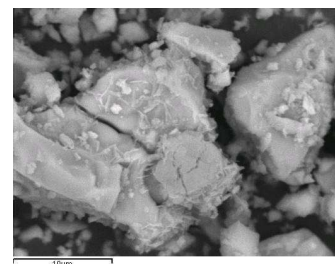
ภาพที่ 3.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า



x1000



x1500

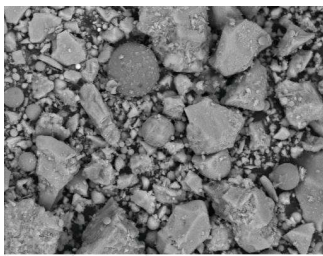


x3500

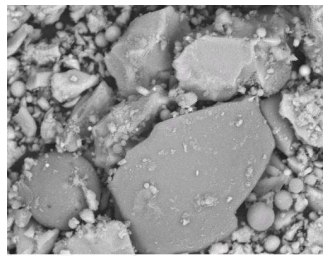
ภาพที่ 3.4 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า



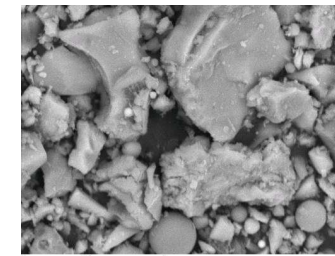
ภาพที่ 3.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน



x1000



x1500



x2000

ภาพที่ 3.6 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์

Chemical compositions (% by weight)	Portland cement type 1	Portland cement type 5	Portland pozzolan cement
Silicon dioxide, SiO <sub>2</sub>	19.51	21.87	24.98
Aluminum oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.97	3.87	9.25
Iron oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.78	4.34	5.97
Calcium oxide, CaO	65.38	64.56	52.65
Magnesium oxide, MgO	1.08	1.11	1.62
Sulfur trioxide, SO <sub>3</sub>	2.16	2.08	2.48
Loss on ignition, LOI	2.27	1.59	1.85
Sodium oxide, Na <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01
Potassium oxide, K <sub>2</sub> O	0.48	0.24	0.78
Titanium Dioxide, TiO <sub>2</sub>	0.25	0.21	0.28
Phosphorus pentoxide P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.05	0.08
Free CaO	0.28	0.23	6.28
Physical properties			
Blaine fineness(cm <sup>2</sup> /g)	3,550	3,830	4,100
Specific gravity	3.15	3.21	2.98



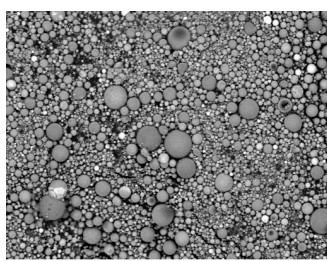
## 2. สารผสมเพิ่ม

### 1. เถ้าลอย (Fly ash, FA)

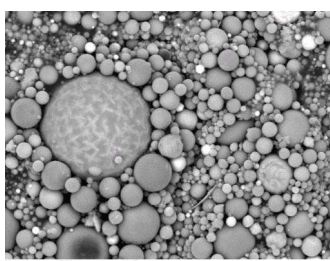
เถ้าลอย เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ในแต่ละปีมีปริมาณเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณ 3 ล้านตันต่อปีในประเทศไทย เถ้าลอย มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานเนื่องจากมีซิลิกาหรืออะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ในการศึกษาใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง เป็นเถ้าลอยของ มอก. Class 2 ข. ( $\text{CaO} > 10\%$ ) เกรด F ที่ตาม ASTM class F ( $\text{Si} + \text{Fe} + \text{Al} > 70\%$ ) ดังภาพที่ 3.7 อนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยจากถ่านหินแม่เมาะมีขนาดภาพถ่ายขยายกำลังสูง ดังภาพที่ 3.8 ซึ่งเถ้าลอยมีอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง และใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า ปอซโซลาน และผงหินปูน โดยพิจารณาที่ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค D (v, 0.5) ดังตารางที่ 3.3 และจากกราฟแสดงขนาดคละของอนุภาคดังแสดงในภาพที่ 3.11



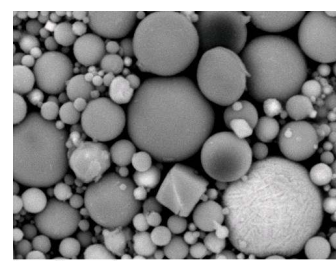
ภาพที่ 3.7 เถ้าลอย



x1000



x1500



x3500

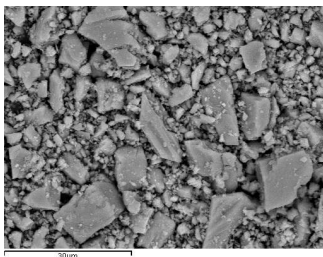
ภาพที่ 3.8 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าลอย

## 2. ผงหินปูน (Limestone powder, L)

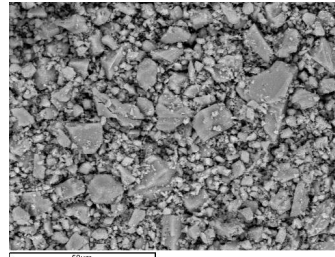
ผงหินปูนเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการการย่อยหินเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม การผลิตเม็ดปูนซีเมนต์ (Clinker) เป็นวัสดุเติมแทรกช่องว่าง (Filler) ของคอนกรีต การศึกษาใช้ผง หินปูนของ บริษัท Surint omya จำกัด ดังภาพที่ 3.9 อนุภาคเฉลี่ยของผงหินปูนจากบริษัท Surint omya จำกัด มีขนาดภาพถ่ายขยายกำลังสูง ดังภาพที่ 3.10 ซึ่งมีอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่หนึ่ง ประเภทที่ห้า ปอชโซลาน และเถ้าลอย โดยพิจารณาที่ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าน ศูนย์กลางของอนุภาค D (v, 0.5) ดังตารางที่ 3.3 และจากกราฟขนาดคละของอนุภาคดังแสดงใน ภาพที่ 3.11



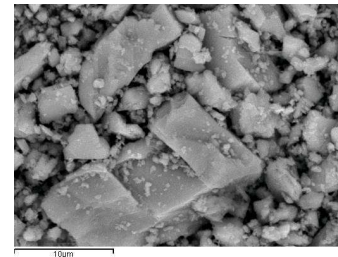
ภาพที่ 3.9 ผงหินปูน



x1000

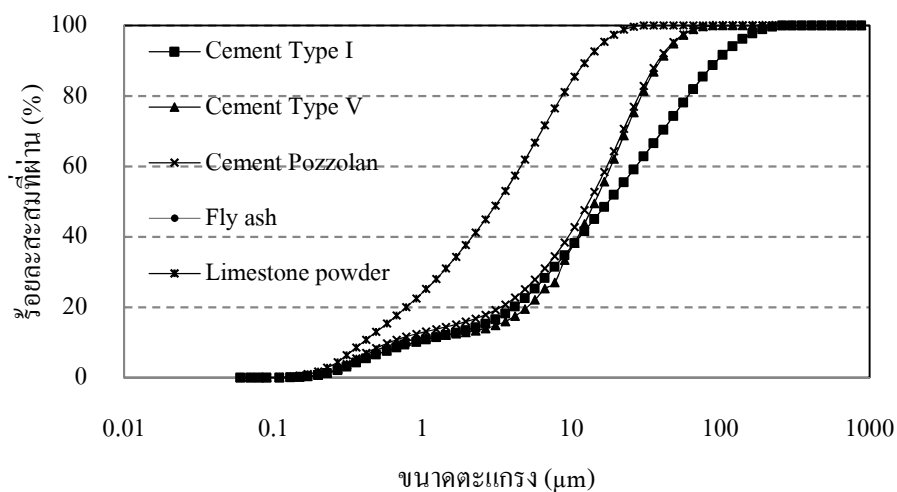


x1500



x3500

ภาพที่ 3.10 ภาพถ่ายกำลังสูงของผงหินปูน



ภาพที่ 3.11 ขนาดคละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 ปอชโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย และผงหินปูน

Chemical compositions (% be weight)	Fly ash, FA (Mae Moh)	Limestone powder, LP
Silicon dioxide, SiO <sub>2</sub>	40.93	0.46
Aluminum oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.42	0.06
Iron oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.64	0.03
Calcium oxide, CaO	13.63	55.25
Magnesium oxide, MgO	2.93	0.37
Sulfur Trioxide, SO <sub>3</sub>	1.92	<0.01
Loss on ignition, LOI	0.46	43.79
Sodium oxide, Na <sub>2</sub> O	0.89	<0.01
Potassium oxide, K <sub>2</sub> O	2.39	0.01
Titanium Dioxide, TiO <sub>2</sub>	0.43	<0.01
Tricalcium silicate, C <sub>3</sub> S	93	-
Phosphorus pentoxide P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.01
Free CaO	0.22	-
Physical properties		
Blaine Fineness(cm <sup>2</sup> /g)	4,658	8,840
Specific gravity	2.20	2.69

ตารางที่ 3.3 ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน เถ้าลอยและผงหินปูน

Mean diameters	Portland cement type 1 (µm)	Portland cement type 5 (µm)	Portland cement pozzolan (µm)	Fly ash (µm)	Limestone powder (µm)
D (v, 0.1)	0.89	0.71	0.6	0.89	0.40
D (v, 0.5)	17.74	14.43	13.16	17.84	3.23
D (v, 0.9)	94.87	39.48	38.19	94.87	12.58
D [4 , 3]	35.23	18.09	17.02	35.23	5.08
D [3 , 2]	2.64	2.45	2.22	2.54	1.18

#### ตัวย่อ

#### ความหมาย

- D (v, 0.1) ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 10 เล็กกว่า
- D (v, 0.5) ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 50 เล็กกว่า
- D (v, 0.9) ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 90 เล็กกว่า
- D [4 , 3] ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคเทียบเท่าโดยปริมาตร
- D [3 , 2] ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคเทียบเท่าโดยพื้นที่ผิว

### 3. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate)

มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายบดจากจังหวัดชลบุรี ได้ทำการทดสอบขนาดละเอียดแล้วพบว่า ทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นเป็นทรายที่มีขนาดละเอียดดี จึงสามารถนำทรายนี้ไปใช้ในการทดสอบได้ทันที โดยไม่ต้องทำการคัดแยกขนาดของทรายอีก ในการศึกษาใช้ทรายบดในทุก ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3.4 ขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียด

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างบน ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบน ตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ผ่านตะแกรง
เบอร์ 4	13.4	2.68	2.68	97.32
เบอร์ 8	68.5	13.70	16.38	83.62
เบอร์ 16	162.4	32.48	48.86	51.14
เบอร์ 30	87.8	17.56	66.42	33.58
เบอร์ 50	63.8	12.76	79.18	20.82
เบอร์ 100	50.1	10.02	89.20	10.80
รวม	500.0	100		

#### 4. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate)

มวลรวมหยาบที่ใช้เป็นหินปูน (Lime stone) เมื่อนำไปวิเคราะห์ขนาดพบว่า มีขนาด  
 คละที่ดี จึงสามารถนำไปใช้ได้ทันที โดยไม่ต้องทำการคัดแยกขนาด ในการศึกษาใช้หินปูนในทุก  
 ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3.5 ขนาดคละของมวลหยาบ

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างบน ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบน ตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ผ่านตะแกรง
1"	-	-	-	100
3/4"	23.10	2.31	2.31	97.69
1/2"	582.0	58.23	60.54	39.46
3/8"	284.2	28.44	88.98	11.02
เบอร์ 4	99.2	9.92	98.9	1.1
เบอร์ 8	0.6	0.06	98.96	1.04
รวม	999.4	100		

#### 5. น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้ผสมตัวอย่างคอนกรีตใช้น้ำประปาที่ใช้อุปโภค ภายในห้องปฏิบัติการคอนกรีตและ  
 โครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

## อุปกรณ์ที่ใช้

- 3.2.1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20x20x20 เซนติเมตร<sup>3</sup> ดังภาพที่ 3.12
- 3.2.2 อุปกรณ์กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ดังภาพที่ 3.13
- 3.2.3 เหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร สำหรับฝัง  
ในตัวอย่างคอนกรีต ดังภาพที่ 3.14
- 3.2.4 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ดังภาพที่ 3.15
- 3.2.5 เครื่องผสมคอนกรีต ดังภาพที่ 3.16
- 3.2.6 เครื่องจี้เขย่าคอนกรีต ดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.12 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรง  
ลูกบาศก์ขนาด 20x20x20 เซนติเมตร<sup>3</sup>



ภาพที่ 3.13 อุปกรณ์กำหนดระยะคอนกรีตหุ้ม  
เหล็ก



ภาพที่ 3.14 เหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.15 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล



ภาพที่ 3.16 เครื่องผสมคอนกรีต

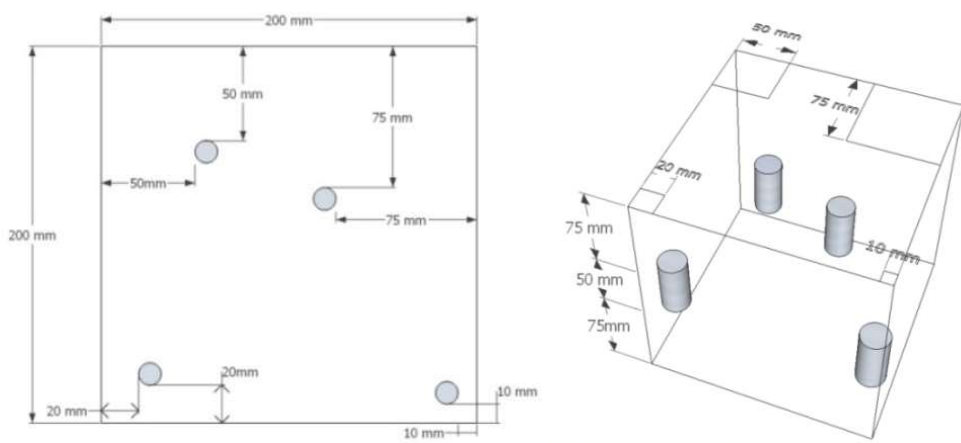


ภาพที่ 3.17 เครื่องจี้เขย่าคอนกรีต

## วิธีการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเล

### 1. ตัวอย่างคอนกรีต

โดยการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 20x20x20 เซนติเมตร<sup>3</sup> ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงข้างต้นเป็นวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 0.50 และ 0.60 ทำการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน และเถ้าลอยโดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ (ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.6) ทั้งนี้การแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน และเถ้าลอยแทนที่ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งจากบริษัทเท่านั้น ทำการฝังเหล็กเสริมโดยใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (Covering depth) เท่ากับ 1 2 5 และ 7.5 เซนติเมตร (ภาพที่ 3.18) โดยใช้อุปกรณ์กำหนดระยะฝังเหล็กเสริมจากนั้นทำการถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชม. แล้วบ่มตัวอย่างโดยใช้กระสอบป่านพรมน้ำอีก 27 วันแล้วจึงนำตัวอย่างไปเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลเพื่อให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลเข้าสู่ตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ 3.18 แบบจำลองตัวอย่างคอนกรีตและรายละเอียดการวางเหล็กเสริม



ตารางที่ 3.6 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบในสภาวะแวดล้อมทะเล

ID	Code on sample	Mix designation	Mix proportion (per 1 m <sup>3</sup> of concrete)					
			Cement (kg)	SSD Rock (kg)	SSD Sand (kg)	Additive (kg)		Water (kg)
						FA	LP	
1	C1	SCG1 W40	435	1025	776	-	-	174
2	C2	SCG1 W50	382	1025	776	-	-	191
3	C3	SCG1 W60	340	1025	776	-	-	204
4	C4	SCG5 W40	435	1025	776	-	-	174
5	C5	SCG5 W50	382	1025	776	-	-	191
6	C6	SCG5 W60	340	1025	776	-	-	204
7	C13	SCGP W40	435	1025	776	-	-	174
8	C14	SCGP W50	382	1025	776	-	-	191
9	C15	SCGP W60	340	1025	776	-	-	204
10	C22	SCG1 FA20 W40	335	1025	776	84	-	168
11	C23	SCG1 FA40 W40	242	1025	776	162	-	162
12	C24	SCG1 FA60 W40	156	1025	776	234	-	156
13	C25	SCG1 FA20 W50	295	1025	776	74	-	185
14	C26	SCG1 FA40 W50	215	1025	776	143	-	179
15	C27	SCG1 FA60 W50	139	1025	776	208	-	173
16	C28	SCG1 FA20 W60	264	1025	776	66	-	198
17	C29	SCG1 FA40 W60	193	1025	776	128	-	193
18	C30	SCG1 FA60 W60	125	1025	776	187	-	187
19	C31	SCG1 L5 W50	362	1025	776	-	19	190
20	C32	SCG1 L10 W50	342	1025	776	-	38	190
21	C33	SCG1 L15 W50	322	1025	776	-	57	189
22	C34	SCG1 L5 W60	322	1025	776	-	17	204
23	C35	SCG1 L10 W60	305	1025	776	-	34	203
24	C36	SCG1 L15 W60	287	1025	776	-	51	191

ตารางที่ 3.6 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบในสภาวะแวดล้อมทะเล (ต่อ)

ID	Code on sample	Mix designation	Mix proportion (per 1 m <sup>3</sup> of concrete)					
			Cement (kg)	SSD Rock (kg)	SSD Sand (kg)	Additive (kg)		Water (kg)
						FA	LP	
25	C37	SCG1 FA35 L5 W40	244	1025	776	142	20	163
26	C38	SCG1 FA30 L10 W40	245	1025	776	123	41	164
27	C39	SCG1 FA25 L15 W40	247	1025	776	103	62	165
28	C40	SCG1 FA35 L5 W50	216	1025	776	126	18	180
29	C41	SCG1 FA30 L10 W50	217	1025	776	108	36	181
30	C42	SCG1 FA25 L15 W50	218	1025	776	91	55	182
31	C43	SCG1 FA35 L5 W60	193	1025	776	113	16	193
32	C44	SCG1 FA30 L10 W60	194	1025	776	97	32	194
33	C45	SCG1 FA25 L15 W60	195	1025	776	81	49	195

โดยที่ Mix designation ต่าง ๆ มีความหมายดังนี้

ตัวย่อ	ความหมาย
SCG1	ตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
SCG5	ตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
LP5	ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนร้อยละ 5
LP10	ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนร้อยละ 10
LP15	ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนร้อยละ 15
FA35	ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35
FA30	ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30
FA25	ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25
FA35 LP5	ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5
FA30 LP10	ตัวอย่างคอนกรีตมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10
FA25 LP15	ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 15
W40	ตัวอย่างคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40
W50	ตัวอย่างคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50
W60	ตัวอย่างคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ตัวอย่าง เช่น SCG1 FA35 L5 W50 คือ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จากตารางที่ 3.5 พบว่า ตัวอย่างที่ใช้ผงหินปูนผสมเพิ่มลงไปภายหลังในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งเป็นตัวอย่างคอนกรีตรหัส C31 – C36 การผสมผงหินปูนเพิ่มต่างหากภายหลัง ส่วนผสมคอนกรีตต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต จากตารางที่ 3.6 เห็นได้ว่าส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนผสมเพิ่มลงไป ภายหลัง (ตัวอย่างคอนกรีต C31- C36) ไม่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ( $w/b = 0.40$ ) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เมื่อผสมคอนกรีตพบว่า ส่วนผสมคอนกรีตแห้งเกินไปส่งผลให้ไม่สามารถหล่อตัวอย่างคอนกรีตได้

## 2. สถานที่ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง

การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลใช้พื้นที่บริเวณใต้ศาลาวัด โคมุท วัฒนาราม ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี มีระยะเวลาศึกษาทั้งหมด 10 ปี

สภาวะแวดล้อมทะเลบริเวณใต้ศาลาวัด โคมุทวัฒนาราม ระดับน้ำทะเลขึ้นและลงวันละ 2 รอบ คือ ตอนเช้าน้ำทะเลมีระดับสูงสุดจากนั้นเวลาบ่ายน้ำทะเลลดลงต่ำสุดจนคอนกรีตอยู่ในสภาวะแห้ง และช่วงเย็นน้ำทะเลขึ้นสูงสุดอีกครั้ง และลดระดับลงในเวลากลางคืน ระยะเวลาขึ้นลงของน้ำทะเลเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เช่น ฤดูหนาวน้ำทะเลขึ้นสูงเป็นเวลานาน ส่งผลให้ตัวอย่างคอนกรีตอยู่ในสภาวะเปียกนานกว่าฤดูอื่น ๆ หรือตัวอย่างคอนกรีตไม่ได้อยู่ในสภาวะแห้งสนิท



ภาพที่ 3.19 บริเวณวางตัวอย่างและตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ ใต้ศาลาวัด โคมุทวัฒนาราม

## การทดสอบหาความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของตัวอย่างทดสอบที่เผชิญ สิ่งแวดล้อมทะเล

### 1. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

#### 1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

- 1.1 เครื่องเจาะตัวอย่าง (Coring machine)
- 1.2 เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ
- 1.3 ครกหินบดตัวอย่างทดสอบ
- 1.4 เครื่อง Auto titration รุ่น 785 DMP Titrino Metrohm
- 1.5 TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar
- 1.6 เครื่องกวนแม่เหล็ก
- 1.7 เครื่องดูด (Suction apparatus)
- 1.8 เครื่องต้ม (Hot pate)
- 1.9 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)
- 1.10 แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบ
- 1.11 ซ้อนตักสาร
- 1.12 บีกเกอร์ขนาด 250 ml
- 1.13 กระบอกลงขนาด 50 ml
- 1.14 ปิเปตขนาด 10 ml
- 1.15 ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 ml
- 1.16 กรวย (Buchner funnel)
- 1.17 ขวดกรองแก้วกั้นโปร่ง (Filtration flank)
- 1.18 ตะแกรงเบอร์ 20

#### 2. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

- 2.1 กรดไนตริก (Nitric Acid)
- 2.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
- 2.3 สารละลายมาตรฐาน 0.05 N NaCl
- 2.4 สารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate)

## 2. วิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

### 1. การเตรียมผงตัวอย่างคอนกรีตก่อนการไตเตรท

หลังนำตัวอย่างไปเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลแล้ว นำตัวอย่างทดสอบมาทำการเจาะด้วยเครื่องเจาะคอนกรีตทำการเจาะจากผิวหน้าคอนกรีตลงไป และทำการเจาะเพื่อเก็บตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 2 ตัวอย่าง (ภาพที่ 3.20) แล้วนำแท่งคอนกรีตที่เจาะมาจากตัวอย่างคอนกรีตนั้นตัดแบ่งเป็นชิ้น ความหนา 10 มิลลิเมตร ลึกลงไปจากผิวหน้าเป็นจำนวน 10 ชิ้น (ภาพที่ 3.21)



ภาพที่ 3.20 เครื่องเจาะคอนกรีตขณะทำงาน และตำแหน่งเจาะเพื่อนำแท่งคอนกรีตมาทดสอบ



ภาพที่ 3.21 แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะออกมา และการตัดแท่งตัวอย่าง



ภาพที่ 3.22 ครกใช้บดตัวอย่าง และผงตัวอย่างที่ถูบดแล้ว

ตัวอย่างผงคอนกรีตที่ได้จากการบด นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 (ภาพที่ 3.22) ก่อนนำไปทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 (Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete) และเพื่อหาปริมาณคลอไรด์อิสระตามมาตรฐาน ASTM C 1218 (Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete) ทำการไตเตรทโดยใช้เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ (ภาพที่ 3.23) โดยเครื่องทดสอบพิจารณาจุดยุติของปฏิกิริยาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกวินหาปริมาณคลอไรด์นี้ว่า “Potentiometric titration”



ภาพที่ 3.23 เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ ด้วยวิธีจุดยุติทางศักย์ไฟฟ้า

วิธีการไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) คลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) คือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 (Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete) ดังนี้

- นำสารซีเมนต์ที่บดเป็นผงมาจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml
- เติมน้ำกลั่นลงไปในบีกเกอร์ที่มีซีเมนต์บดเป็นผง ไว้แล้วจนถึงขีด 100 ml แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกที่ทำให้เจือจาง ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 ml ตามลงไปทันที
- ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่มีตัวอย่างด้วยการต้มให้เดือด อย่าให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (Hot plate) แล้วทิ้งไว้ให้เย็น
- ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้น โป่ง ไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วก้น โป่งทันทีด้วยน้ำกลั่น ทั้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้องปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml

- สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ว วางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แชน electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode เริ่มการกวนช้า ๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เติมไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงในหรืออยู่เหนือสารละลาย
- เครื่อง Auto titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดที่ยุติปฏิกิริยา
- จุดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็น ร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% Chloride by weight of concrete)

วิธีการไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) คลอไรด์ที่ละลายน้ำ (Water-soluble chloride) คือ คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระตามมาตรฐาน ASTM C 1218 (Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete) ดังนี้

- นำสารซีเมนต์ที่บดเป็นผงมาจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml
- เติมน้ำกลั่นลงไป ในบีกเกอร์ที่มีซีเมนต์บดเป็นผง ไว้แล้วจนถึงขีด 100 ml
- นำไปต้มให้เดือด 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
- ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกันโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วกันโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่น ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml
- เติมสารละลายกรดไนตริกที่เจือจาง ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 ml และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 ml ลงในสารละลายที่ผ่านการกรอง ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระเบื้องแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือด อย่าให้เดือดนานเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (Hot plate)



- สำหรับบีกเกอร์สารที่เขียนแล้ว วางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แขน Electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ Stirring bar ไปชน Electrode เริ่มการกวนช้าๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงในหรืออยู่เหนือสารละลาย
- เครื่อง Auto titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์ และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดที่ยุติปฏิกิริยา
- จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็น ร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% Chloride by weight of concrete)

การทดสอบหาพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

### 1. การทดสอบหาพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

เกิดสนิมพื้นที่ผิวรอบๆเหล็กเสริมได้ถูกพิจารณาด้วยการคำนวณพื้นที่การเกิดสนิม จะทำโดยการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใช้แผ่นกราฟพลาสติกที่มีช่องตารางขนาด 1x1 มม.<sup>2</sup> มาทาครอบเหล็กเสริมแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิม (ดังแสดงในภาพที่ 3.30) จากนั้นนับพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากสนิมที่เกิดขึ้นบริเวณด้านข้างของเหล็กเสริม (Area of lateral surface corrosion) และนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด สามารถคำนวณร้อยละของพื้นที่ผิวการเกิดสนิม (Corrosion of lateral surface area) ดังสมการ 3-1

$$\text{Corrosion of lateral surface area (\%)} = \frac{\text{Area of lateral surface corrosion}}{\text{Lateral surface area}} \times 100 \quad (3-1)$$

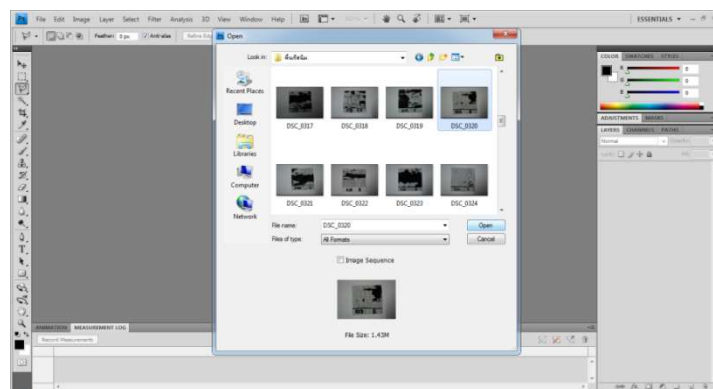
โดยที่ Area of lateral surface corrosion สามารถหาได้ 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่1 หาโดยการนับช่องตารางกราฟที่ระบายไว้ 1 ช่อง เท่ากับ 1 มม.<sup>2</sup>

วิธีที่2 หาโดยคำนวณพื้นที่สนิมด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop ดังนี้

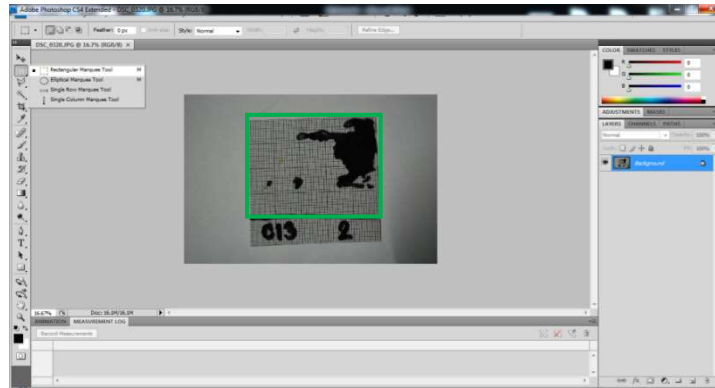
1.ถ่ายรูปแผ่นใสนำเข้าโปรแกรม Photoshop File →Open→เลือกไฟล์รูปภาพ→กด

Open ดังภาพที่ 3.24



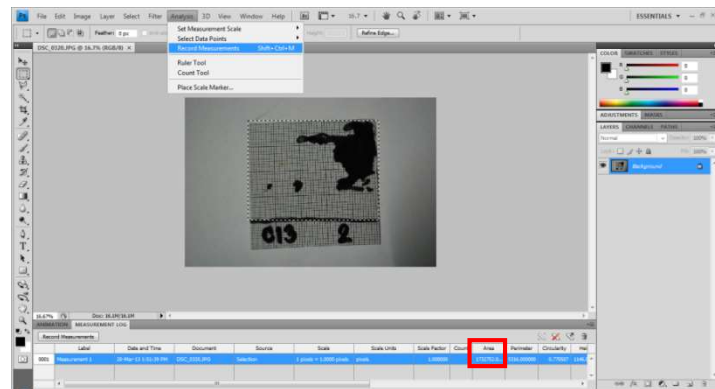
ภาพที่ 3.24 ขั้นตอนที่ 1 ของการหาพื้นที่สนิมด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop

2. กดเครื่องมือ Rectangular Marquee แล้วครอบให้พอดีกับ พื้นที่ผิวเหล็ก ดังภาพที่ 3.25



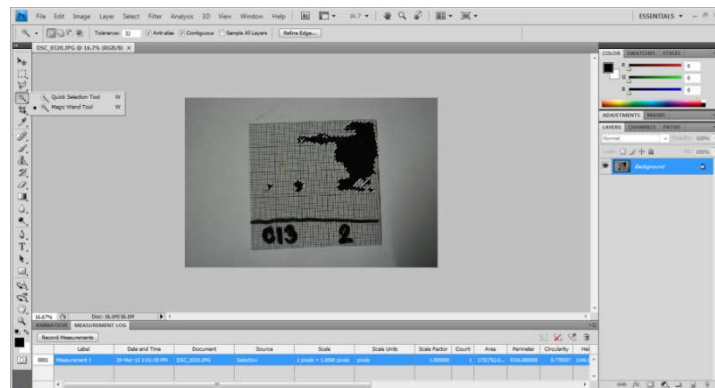
ภาพที่ 3.25 ขั้นตอนที่ 2 ของการหาพื้นที่สนิมด้วย โปรแกรม Adobe Photoshop

3. กด Analysis → Record Measurements ได้ค่าพื้นที่ที่เหล็กทั้งหมด  $A_s = 1732752$  (pixel) ดังภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.26 ขั้นตอนที่ 3 ของการหาพื้นที่สนิมด้วย โปรแกรม Adobe Photoshop

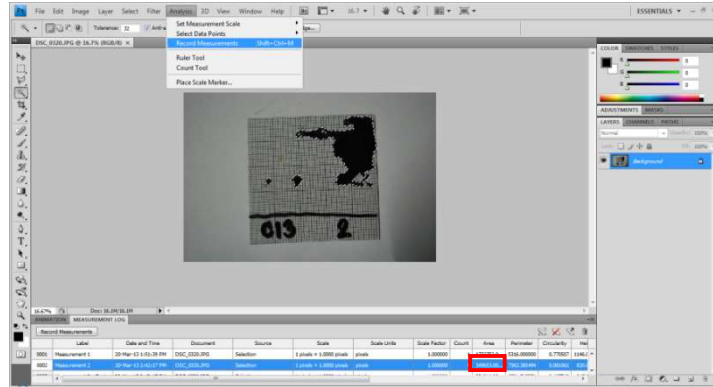
4. กดเครื่องมือ Magic Wand คลิกเมาท์เลือกที่พื้นที่ที่เรงาสนิมเหล็ก ดังภาพที่ 3.27



ภาพที่ 3.27 ขั้นตอนที่ 4 ของการหาพื้นที่สนิมด้วย โปรแกรม Adobe Photoshop

5. กด Analysis → Record Measurements ได้ค่าพื้นที่สนิมทั้งหมด  $A_c = 349653$  (pixel)

ดังภาพที่ 3.28



ภาพที่ 3.28 ขั้นตอนที่ 5 ของการหาพื้นที่สนิมด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop

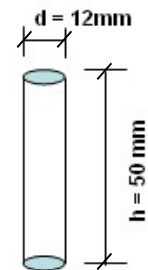
6. กำหนดหาร้อยละของพื้นที่สนิมจาก  $A_c / A_a = 349653 / 1732752 = 0.2017$  ได้พื้นที่สนิม

ร้อยละ 20.17

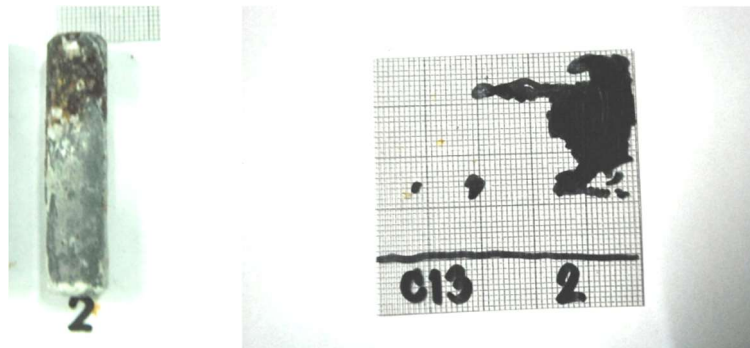
7. พื้นที่สนิมเหล็กจริง = พื้นที่ผิวเหล็ก x 20.17 เมื่อ พื้นที่ผิวเหล็ก =  $\pi dh$

∴ Lateral surface area

$$\begin{aligned}
 &= \pi dh \\
 &= \pi \times 12 \times 50 \\
 &= 1,885 \text{ มม}^2
 \end{aligned}$$



ภาพที่ 3.29 ขนาดของเหล็ก



ภาพที่ 3.30 แท่งเหล็กที่เกิดสนิม และแผนกราฟที่ทำการระบายพื้นที่ที่เกิดสนิมแล้ว

## 2. การทดสอบหาการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทดสอบในสิ่งแวดล้อมทะเลนอกจากจะทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์แล้ว ในการศึกษาวิจัยศึกษาการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล นำเหล็กเสริม มาทำการชั่งน้ำหนักก่อนนำเหล็กไปแช่ในสารละลาย โดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดในการชั่ง 0.001 g บันทึกเป็นค่าน้ำหนักเริ่มต้น ( $W_i$ ) จากนั้นนำเหล็กไปแช่ในสารละลายกรด เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 25 °C ตามมาตรฐาน ASTM G1 (Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens) แล้วนำขึ้นมาทำความสะอาด แล้วชั่งน้ำหนักทำการบันทึกเป็นค่าน้ำหนักสุดท้าย ( $W_f$ ) โดยทำงานกว่าค่าน้ำหนักสุดท้ายไม่ลดลงจากครั้งแรกที่แช่ในสารละลายกรดจึงจะนำค่าน้ำหนักสุดท้ายมาคำนวณการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม (Weight loss) สามารถคำนวณได้จากสมการ 3-2

$$\text{Weight loss(\%)} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (3-2)$$

โดยที่  $W_i$  = น้ำหนักเริ่มต้น

$W_f$  = น้ำหนักสุดท้าย

## การทดสอบกำลังรับแรงอัด

แท่งคอนกรีตที่เจาะออกมาจากตัวอย่างคอนกรีตมาตัดให้ได้สัดส่วนความชะลูด (Slenderness ratio) เท่ากับ 1:2 และทำการปรับผิวหน้าของตัวอย่างคอนกรีตตัวอย่างด้วยกำมะถัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบเพื่อหาลำดับรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive strength) ตามมาตรฐาน ASTM C39 (Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens)



ภาพที่ 3.31 แท่งตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดการทดสอบกำลังรับแรงอัด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตถูกแสดงด้วยการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration profile) ที่ระดับความลึกต่าง ๆ เทียบจากผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งในที่นี้ได้นำเสนอเฉพาะค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) เทียบเป็นร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (% by weight of binder) ในคอนกรีต ส่วนค่าปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ได้แสดงไว้ในภาคผนวก

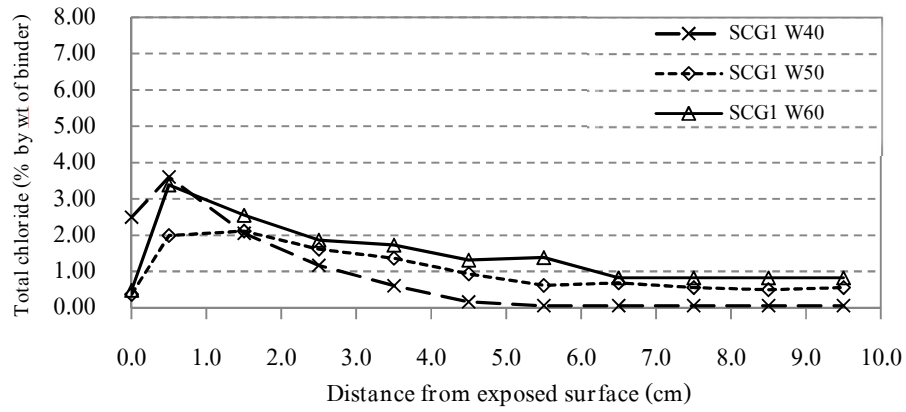
โดยทำการเปรียบเทียบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 3 ปี ด้วยการพิจารณาการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากผิวหน้าคอนกรีตเข้าไปเป็นระยะ 10 ซม. เท่ากัน โดยได้พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ชนิดของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน และอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน ตามลำดับ

### 1. ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

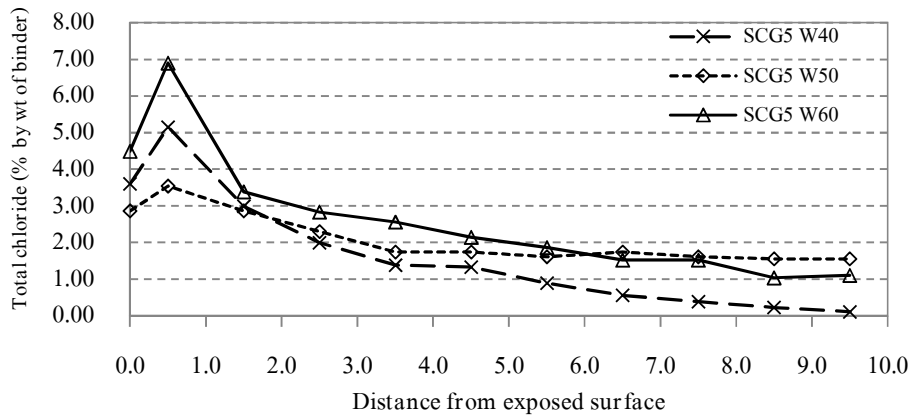
ภาพที่ 4.1 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต จากภาพที่ 4.1 (ก) ซึ่งแสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และมีค่าใกล้เคียงกันที่ระดับความลึก 3 ถึง 10 เซนติเมตร เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อย ส่งผลให้เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปได้น้อยกว่า ทั้งนี้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60

จากภาพที่ 4.1 (ข) ซึ่งแสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.40 0.50 และ 0.60 พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ทำให้คอนกรีตมีความสามารถต้านทานคลอไรด์มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากคอนกรีตที่มีความพรุนน้อย คลอไรด์จึงสามารถแทรกซึมได้น้อยลง แต่ที่ผิวหน้าคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.60 มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่มีความพรุนมากนั้นอาจมีการชะล้าง (Leaching) คลอไรด์บริเวณผิวหน้าออกไปได้ง่ายจากน้ำทะเล

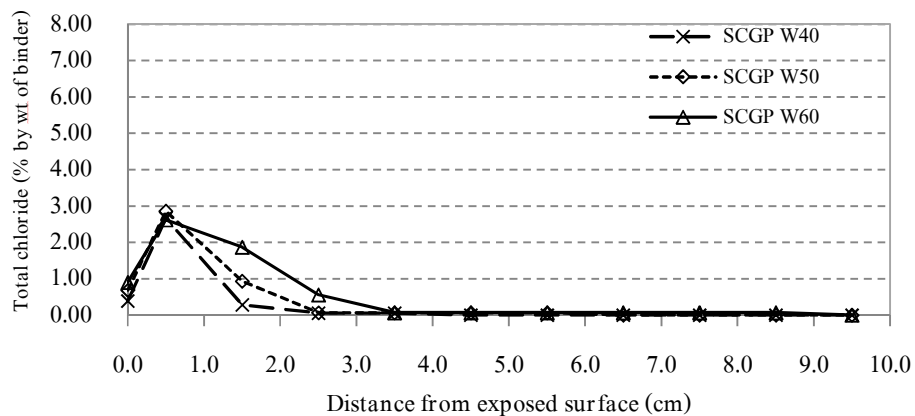
จากภาพที่ 4.1 (ค) ซึ่งแสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.40 0.50 และ 0.60 พบว่า เกลือคลอไรด์ไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตได้ตั้งแต่ระยะความลึก 3 ซม เป็นต้นไป ในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ได้จากการผสมเถ้าลอยและ Clinker แล้วบดละเอียดร่วมกัน จึงมีความเป็นสารปอซโซลานอยู่ด้วย จึงช่วยให้คอนกรีตมีความพรุนน้อย ส่วนที่ผิวหน้าของคอนกรีตทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าปริมาณคลอไรด์สะสมน้อย อาจเนื่องจากคลอไรด์ถูกชะล้างออกไปด้วยวัฏจักรเปียกสลับแห้งของน้ำทะเล



(ก) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



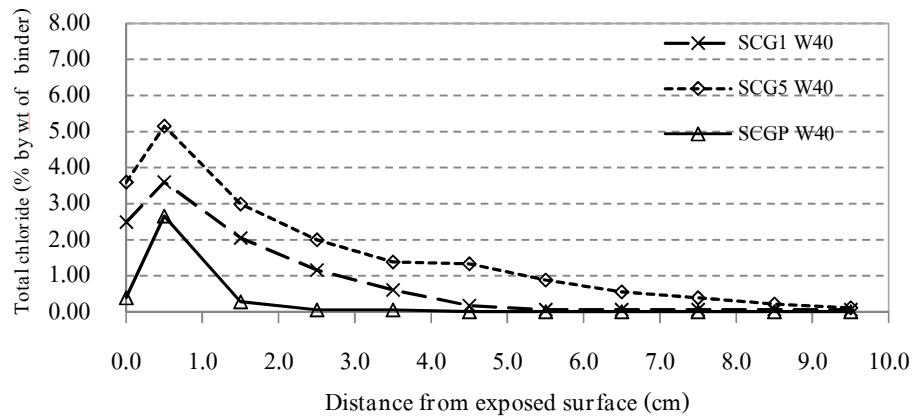
(ค) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน

ภาพที่ 4.1 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

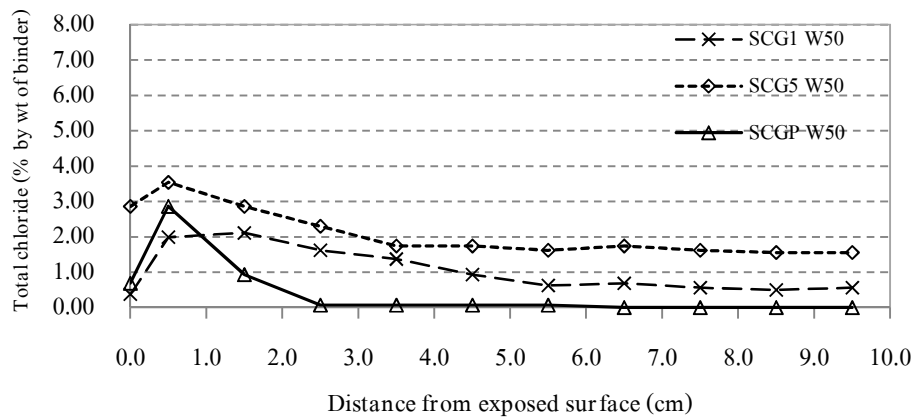


## 2. ผลกระทบของชนิดของปูนซีเมนต์

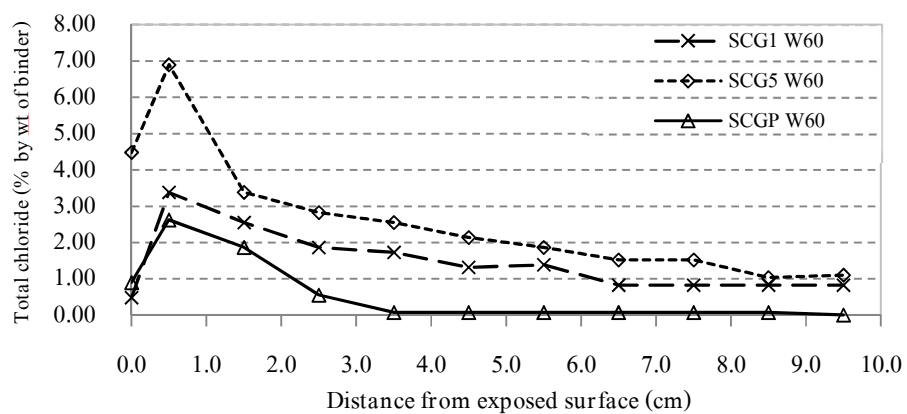
ภาพที่ 4.2 แสดงผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตจากภาพที่ 4.2 (ก) (ข) และ (ค) ซึ่งแสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอชโซลานมีการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามลำดับ ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 2 ซม เป็นต้นไป เกือบคลอไรด์มีการแทรกซึมในคอนกรีตได้น้อย เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอชโซลานได้จากการผสมเถ้าลอยและ Clinker แล้วบดละเอียดรวมกัน จึงมีความเป็นสารปอชโซลาน ช่วยให้คอนกรีตมีความพรุนน้อย ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่รองลงมา เนื่องจากไม่มีสารปอชโซลานผสมอยู่ อีกทั้งมีความละเอียดของผงปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอชโซลาน (ดังตารางที่ 3.1) ความพรุนของคอนกรีตจึงมีมากกว่า การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์จึงมีค่าสูงกว่า และสุดท้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์น้อยที่สุดเนื่องจากมีสารไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงยึดจับคลอไรด์ได้น้อย เกือบคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปมากกว่า



(ก) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

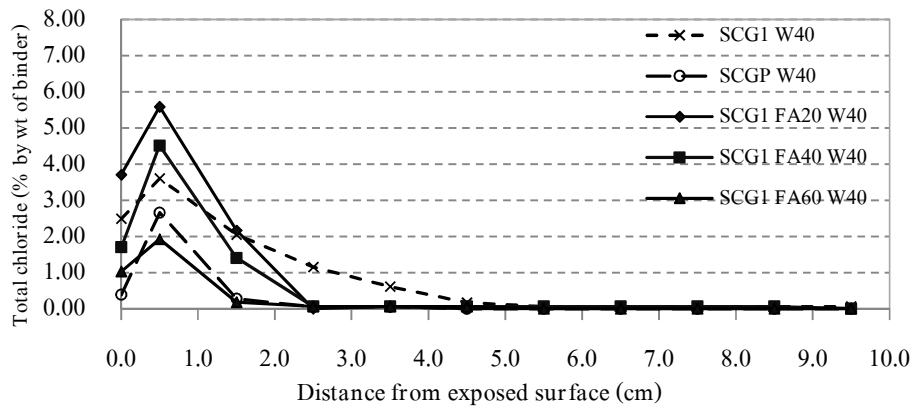


(ค) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

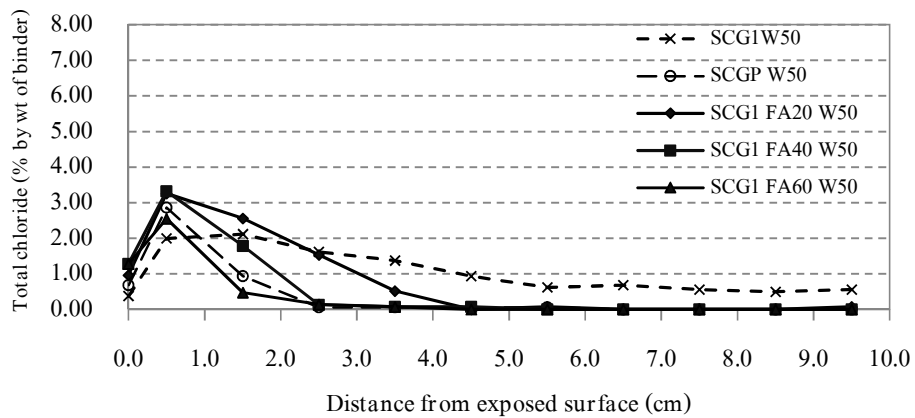
ภาพที่ 4.2 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน

### 3. ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

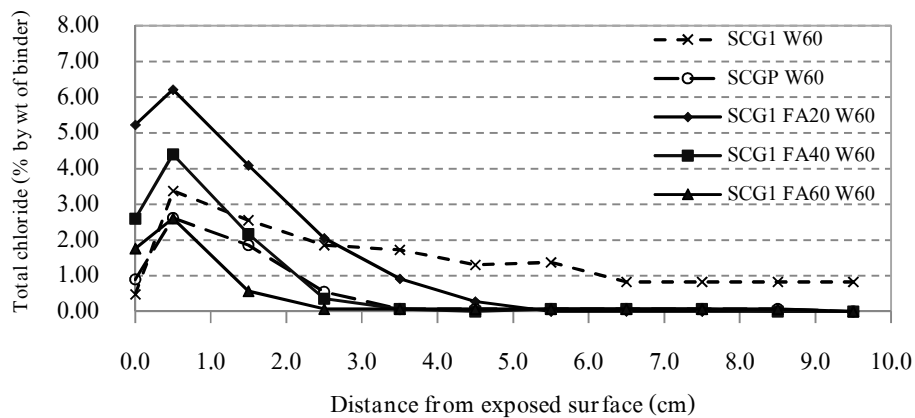
ภาพที่ 4.3 แสดงผลกระทบของวัสดุประสานร่วมกัน 2 ชนิด คือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร่วมกับเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ ต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต จากภาพที่ 4.3 (ก) (ข) และ (ค) ซึ่งแสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเปรียบเทียบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ พบว่า การแทนที่เถ้าลอยต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 60 มีการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ เนื่องจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลดความพรุนในคอนกรีต เคลือบคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปได้น้อยลง โดยเฉพาะตั้งแต่ความลึก 3 ซม เป็นต้นไป การกระจายตัวของเกลือคลอไรด์มีค่าน้อยมาก อีกทั้งยังมีการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอซโซลานด้วย และเมื่อใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานต่ำลง พบว่าการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ก็ยังมีการกระจายการแทรกซึมที่น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เพียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อย่างเดียว ในทุกส่วนผสม ส่วนที่ผิวหน้าของคอนกรีตทุกอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน มีค่าปริมาณคลอไรด์สะสมน้อย อาจเนื่องมาจากคลอไรด์ถูกชะล้าง (Leaching) ออกไปด้วยวัฏจักรเปียกสลับแห้งของน้ำทะเล



(ก) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



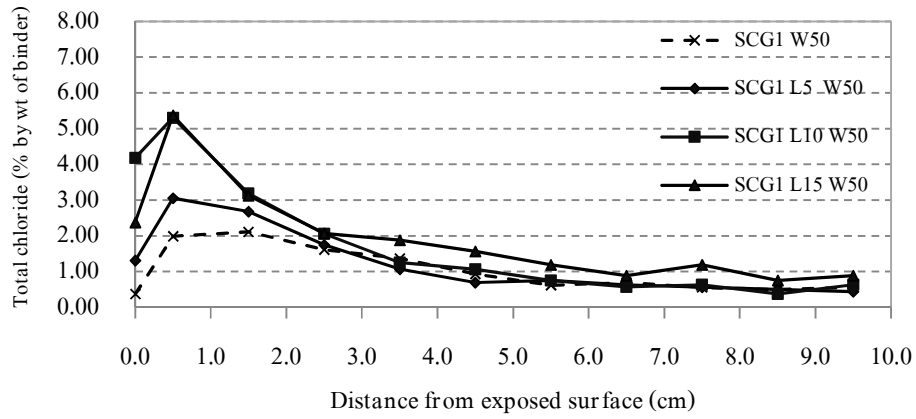
(ค) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ภาพที่ 4.3 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 40 และ 60

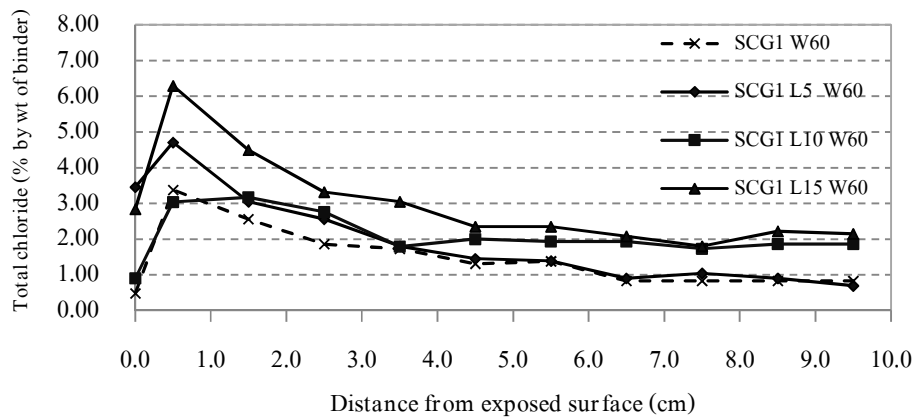
#### 4. ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

ภาพที่ 4.4 แสดงผลกระทบของวัสดุประสานร่วมกัน 2 ชนิด คือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร่วมกับผงหินปูนที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต จากภาพที่ 4.4 (ก) ซึ่งแสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่า การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใกล้เคียงกันที่ระดับความลึกตั้งแต่ 6 ถึง 10 เซนติเมตร การใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 มีการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตต่ำกว่า การแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน และมีการกระจายการแทรกซึมที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 3 ซม เป็นต้นไป แต่ที่ใกล้ผิวมีการกระจายการแทรกซึมสูงกว่า การแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 ทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลง เนื่องจากผงหินปูนช่วยเติมแทรกช่องว่าง (Filler) ในคอนกรีต แต่เมื่ออัตราส่วนผงหินปูนในวัสดุประสานเพิ่มขึ้น การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทนที่ผงหินปูนทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ไตรแคลเซียมอลูมินेट ( $C_3A$ ) ในคอนกรีตลดลง ความสามารถในการจับคลอไรด์จึงลดลง

จากภาพที่ 4.4 (ข) ซึ่งแสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 พบว่า การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานทุกร้อยละของการแทนที่ มีการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงกว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อาจเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูง การเติมแทรกของผงหินปูนในช่องว่างของคอนกรีตอาจไม่เพียงพอ แต่อย่างไรก็ตามการใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 มีการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เล็กน้อยที่ระดับความลึกตั้งแต่ 3 ซม เป็นต้นไป



(ก) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

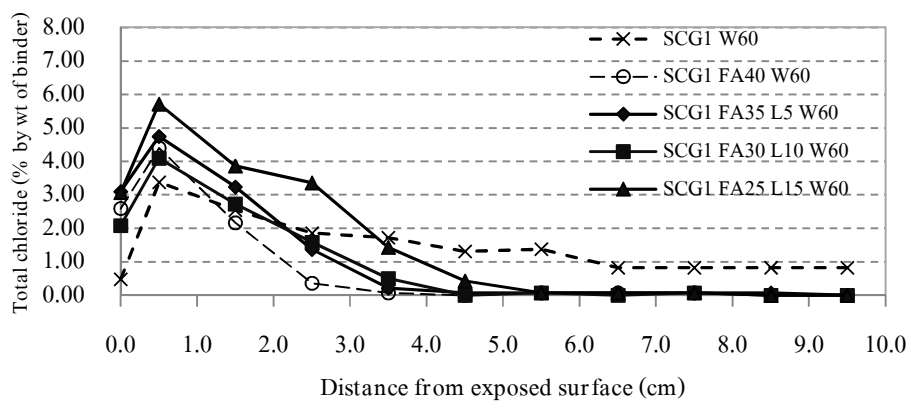
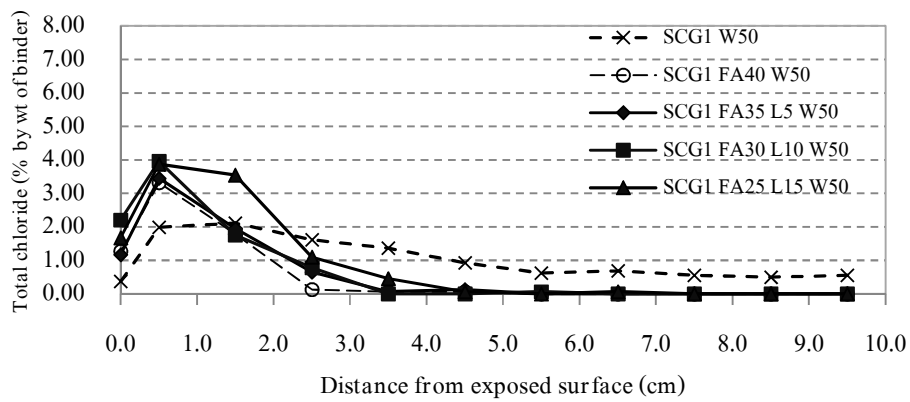
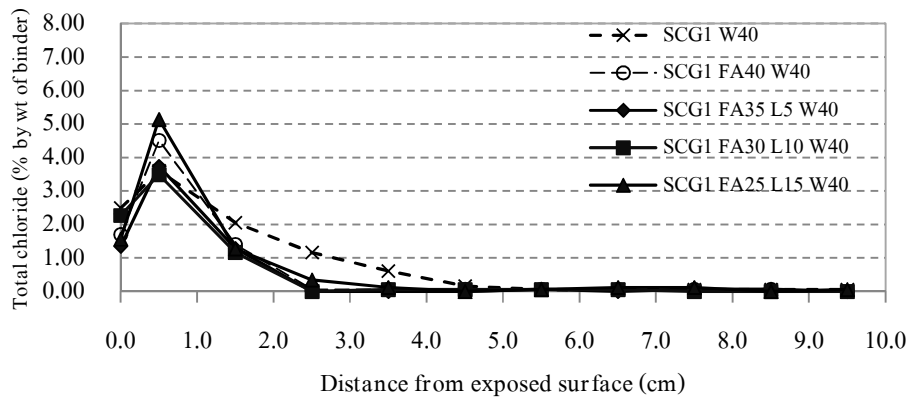


(ข) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ภาพที่ 4.4 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15

#### 5. ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

ภาพที่ 4.5 แสดงผลกระทบของวัสดุประสานร่วมกัน 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร่วมกับเถ้าลอย และผงหินปูน ต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต จากภาพที่ 4.5 (ก) (ข) และ (ค) ซึ่งแสดงการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 30 25 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 15 ตามลำดับ พบว่า เมื่อเพิ่มร้อยละของเถ้าลอย และลดร้อยละของผงหินปูน ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น และเมื่อลดร้อยละของเถ้าลอยลง และเพิ่มร้อยละของผงหินปูน ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตต่ำลง ไปด้วย เนื่องจากการใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน ช่วยเพิ่มการยึดประสานของคอนกรีตมีความพรุนน้อยลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานแต่การใช้ผงหินปูนนั้นเป็นการช่วยเติมแทรกช่องว่างภายในคอนกรีต ดังนั้น การเพิ่มสัดส่วนผงปริมาณเถ้าลอย และลดสัดส่วนของผงหินปูนลง จึงช่วยให้เกลือคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปได้น้อยลง และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน



ภาพที่ 4.5 การกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
 เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 30 และ 25  
 และผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15

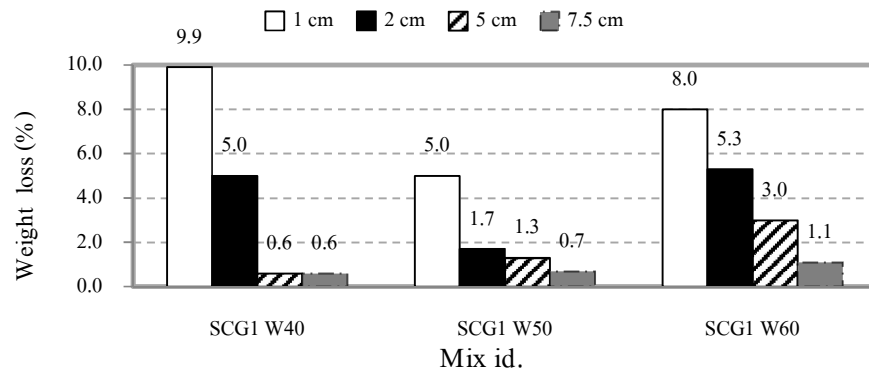


## การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

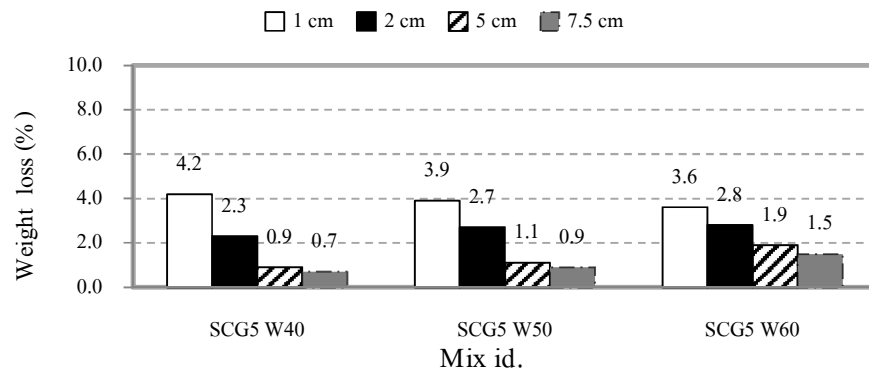
การวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยการเปรียบเทียบน้ำหนักของเหล็กเสริมก่อน และหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมทางทะเล ค่าที่ได้แสดงไว้นี้เป็นปริมาณร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริม

### 1. ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

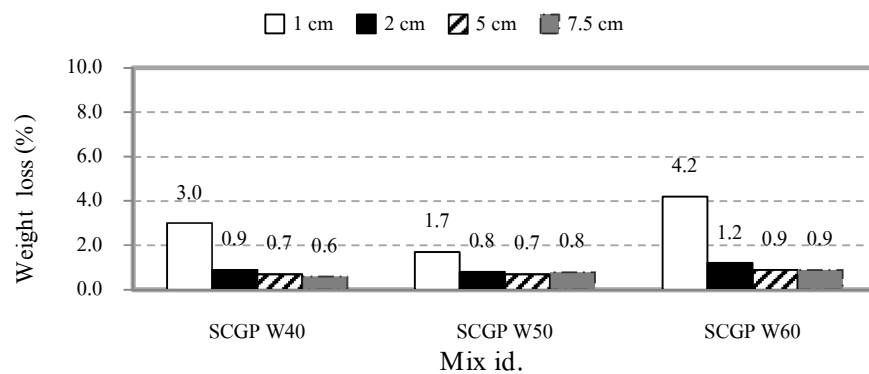
ภาพที่ 4.6 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน เปรียบเทียบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ จากรูป พบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น การสูญเสียน้ำหนักเหล็กมากยิ่งขึ้น เนื่องจากคอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต จึงเกิดง่าย ดังเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีการสูญเสียน้ำหนักเหล็กที่น้อยกว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 ซม ถึง 7.5 ซม แต่มีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะหุ้ม 5 ซม ถึง 7.5 ซม ในส่วนระยะหุ้ม 1 ซม ถึง 2 ซม มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่สูง อาจเนื่องมาจากระยะหุ้มของเหล็กเสริมน้อย อิทธิพลของวัฏจักรเปียกสลับแห้งของน้ำทะเล ซึ่งมีองค์ประกอบของน้ำ เกลือคลอไรด์ และออกซิเจน แทรกซึมเข้าได้ง่าย ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมในระยะหุ้มนี้ได้ไม่แน่นอน แต่เหล็กเสริมที่อยู่ลึกภายในเข้าไปเกิดสนิมจากการสะสมของเกลือคลอไรด์มากจนถึงระดับคลอไรด์วิกฤต ทำให้ Passive film ที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมอยู่นั้นสลายไปทำให้เกิดสนิมเหล็กขึ้น



(ก) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

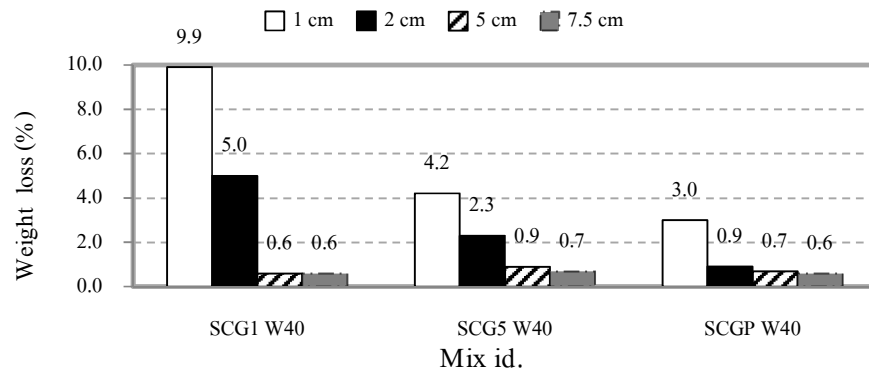


(ค) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน

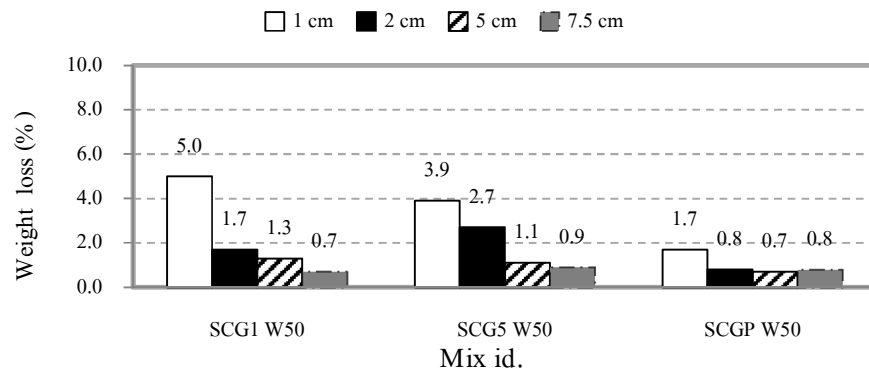
ภาพที่ 4.6 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

## 2. ผลกระทบของชนิดของปูนซีเมนต์

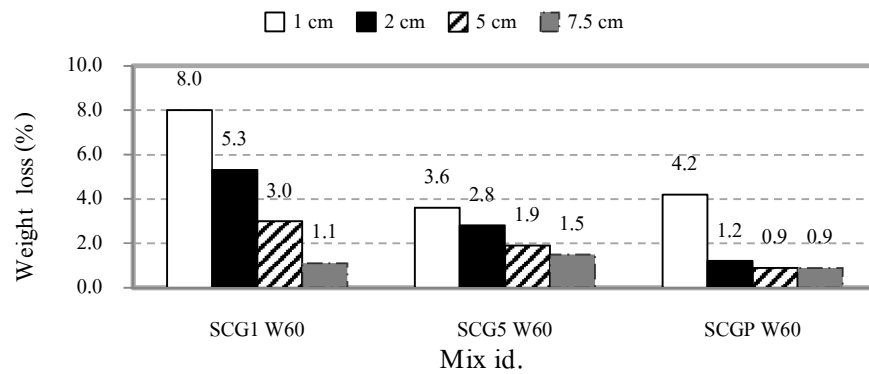
ภาพที่ 4.7 (ก) และ (ข) แสดงการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต เปรียบเทียบระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันดังนี้ 0.40 0.50 และ 0.60 จากรูป พบว่า ที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 2 ซม. เป็นต้นไป การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอชโซลานมีค่าน้อยที่สุด การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมรองลงมาเป็นเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามลำดับ เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอชโซลาน ได้จากการผสมเถ้าลอยและ Clinker แล้วบดละเอียดร่วมกัน จึงมีความเป็นสารปอชโซลานอยู่ด้วย จึงช่วยให้คอนกรีตมีความพรุนน้อย การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์จึงเป็นไปได้ยากทำให้เกิดสนิมได้น้อย การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้อยกว่า การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี  $C_3A$  มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งเป็นสารประกอบที่ช่วยจับยึดคลอไรด์ จากภาพที่ 4.7 (ค) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอชโซลานยังคงมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แต่การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 กลับให้ผลการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่น้อยกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงทำให้ความพรุนในคอนกรีตสูงมาก อย่างไรก็ตามที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 7.5 ซม. เหล็กเสริมในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่า และเมื่อพิจารณาแนวโน้มเชิงเส้นของการสูญเสียน้ำหนักกับระยะหุ้มเหล็กเสริมพบว่า อัตราการลดลงของการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงกว่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วนระยะหุ้มเหล็กเสริม 1 ซม. ถึง 2 ซม. ของคอนกรีตทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานปริมาณสนิมเหล็กไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องมาจากระยะหุ้มของเหล็กเสริมน้อย อิทธิพลของวัฏจักรเปียกสลับแห้งของน้ำทะเล ซึ่งมีองค์ประกอบของน้ำ เกลือคลอไรด์ และออกซิเจน แทรกซึมเข้าได้ง่าย ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมในระยะหุ้มนี้ได้ไม่แน่นอน แต่เหล็กเสริมที่อยู่ลึกภายในเข้าไปเกิดสนิมจากการสะสมของเกลือคลอไรด์มากจนถึงระดับคลอไรด์วิกฤต ทำให้ Passive film ที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมอยู่นั้นสลายไปทำให้เกิดสนิมขึ้น



(ก) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

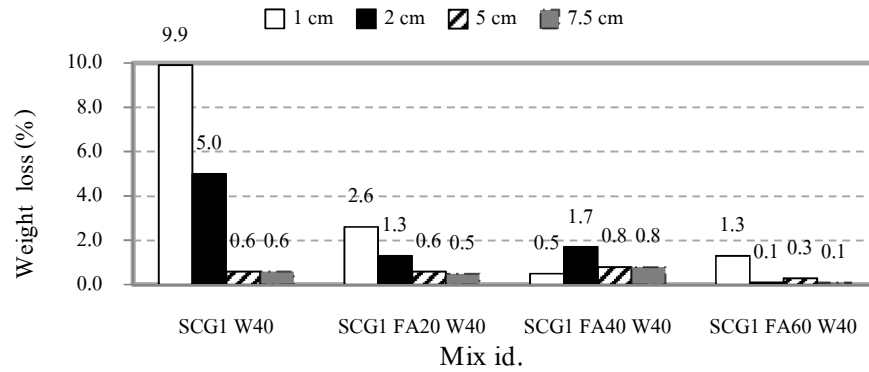


(ค) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

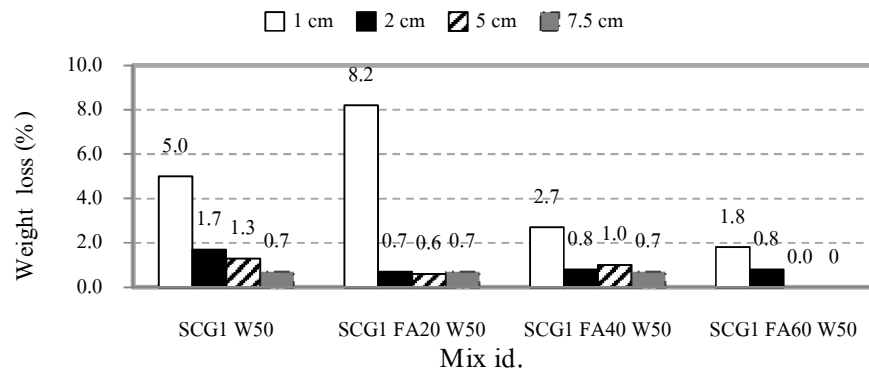
ภาพที่ 4.7 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน

### 3. ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

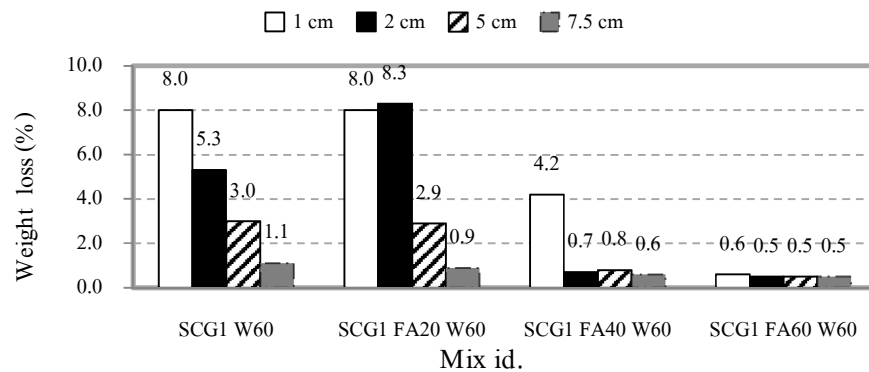
ภาพที่ 4.8 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต เปรียบเทียบระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานร้อยละ 20 40 และ 60 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันดังนี้ 0.40 0.50 และ 0.60 จากรูป พบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยกับคอนกรีต ที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมตั้งแต่ 1 ซม ถึง 7.5 ซม ผลของค่าสูญเสียน้ำหนักมีค่าน้อยลงกว่าเมื่อไม่ได้ผสมเถ้าลอยเข้าไป และการแทนที่เถ้าลอยในร้อยละที่สูงขึ้น ยังช่วยให้การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยลงกว่าแทนที่ในร้อยละที่ต่ำ เนื่องจากเถ้าลอยทำหน้าที่เข้าไปเติมเต็มช่องว่างที่มีอยู่ในคอนกรีตจึงมีความพรุนต่ำ ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตได้น้อย การสูญเสียน้ำหนักเหล็กจึงน้อยกว่า ส่วนระยะหุ้ม 1 ซม ถึง 2 ซม ของคอนกรีตทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานปริมาณสนิมเหล็กไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องมาจากระยะหุ้มของเหล็กเสริมน้อย อิทธิพลของวัฏจักรเปียกสลับแห้งของน้ำทะเล ซึ่งมีองค์ประกอบของน้ำ เกลือคลอไรด์ และออกซิเจน แทรกซึมเข้าได้ง่าย ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมในระยะหุ้มนี้ได้ไม่แน่นอน แต่เหล็กเสริมที่อยู่ลึกภายในเข้าไปเกิดสนิมได้จากการสะสมของเกลือคลอไรด์มากจนถึงระดับคลอไรด์วิกฤต ทำให้ Passive film ที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมอยู่นั้นสลายไปทำให้เกิดสนิมเหล็กขึ้น



(ก) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

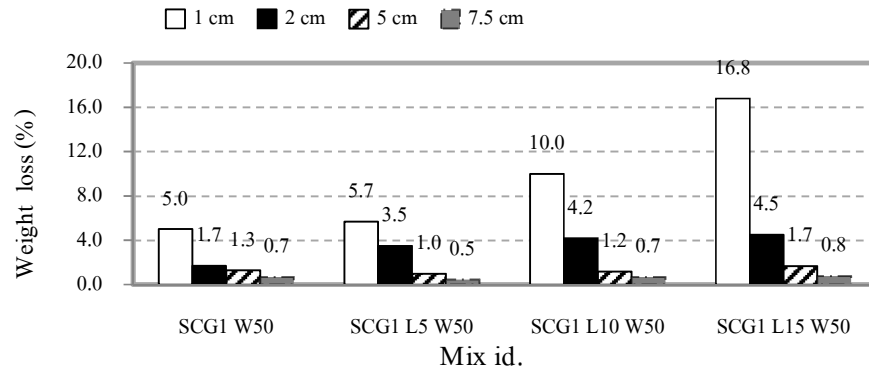


(ค) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

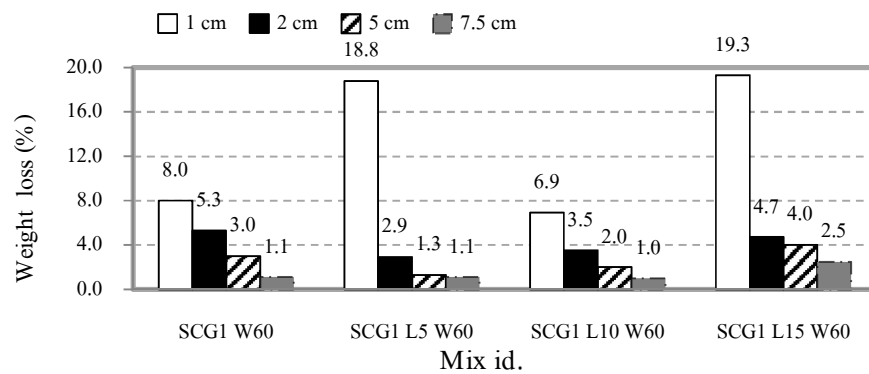
ภาพที่ 4.8 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
 ถ้าวัดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 40 และ 60 และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน

#### 4. ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

ภาพที่ 4.9 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต เปรียบเทียบระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนในวัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันดังนี้ 0.50 และ 0.60 จากภาพที่ 4.9 (ก) พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 คอนกรีตที่ผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมีค่าต่ำกว่า เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียวเล็กน้อย เนื่องจากผงหินปูนเข้าไปเติมแทรกความพรุนในคอนกรีตทำให้คลอไรด์มีความสามารถแทรกซึมต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กจึงมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้แทนที่ผงหินปูน แต่เมื่อแทนที่ผงหินปูนเพิ่มเป็นร้อยละ 10 และ 15 ค่าการสูญเสียน้ำหนักกลับเพิ่มขึ้นตามลำดับ ปริมาณผงหินปูนที่เพิ่มขึ้นจนมากกว่าความพรุนภายในคอนกรีต ผงหินปูนส่วนเกินนี้ ทำให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้น คลอไรด์จึงมีความสามารถแทรกซึมเข้าได้ง่าย การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ จากภาพที่ 4.14 (ข) เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 คอนกรีตที่ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 พบว่า ค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ที่ระยะหุ้ม 2 ซม. เป็นต้นไป มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้แทนที่ผงหินปูน และเมื่อเพิ่มปริมาณผงหินปูนเข้าไปเป็นร้อยละ 15 ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเหล็กมากกว่าการแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 ในส่วนระยะหุ้ม 1 ซม. ของคอนกรีตทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานปริมาณสนิมเหล็กไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องมาจากระยะหุ้มของเหล็กเสริมน้อย อิทธิพลของวัฏจักรเปียกสลับแห้งของน้ำทะเล ซึ่งมีองค์ประกอบของน้ำ เกลือคลอไรด์ และออกซิเจน แทรกซึมเข้าได้ง่าย ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมในระยะหุ้มนี้ได้ไม่แน่นอน แต่เหล็กเสริมที่อยู่ลึกภายในเข้าไปเกิดสนิมจากการสะสมของเกลือคลอไรด์มากจนถึงระดับคลอไรด์วิกฤต ทำให้ Passive film ที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมอยู่นั้นสลายไปทำให้เกิดสนิมเหล็กขึ้น



(ก) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

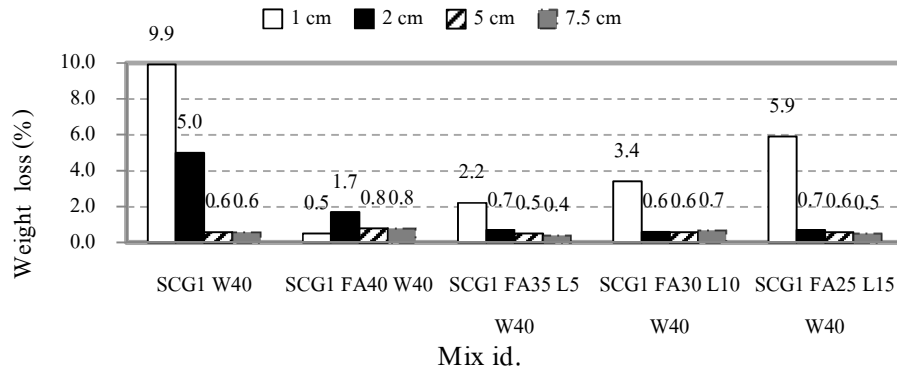


(ข) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60  
 ภาพที่ 4.9 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
 ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15

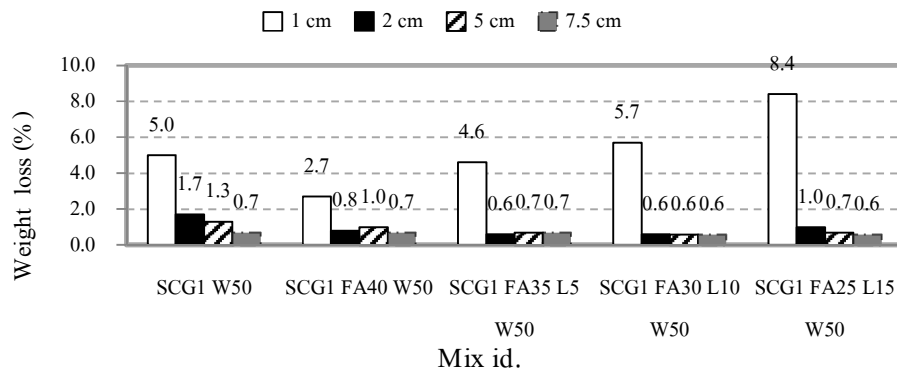


#### 5. ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยกับผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

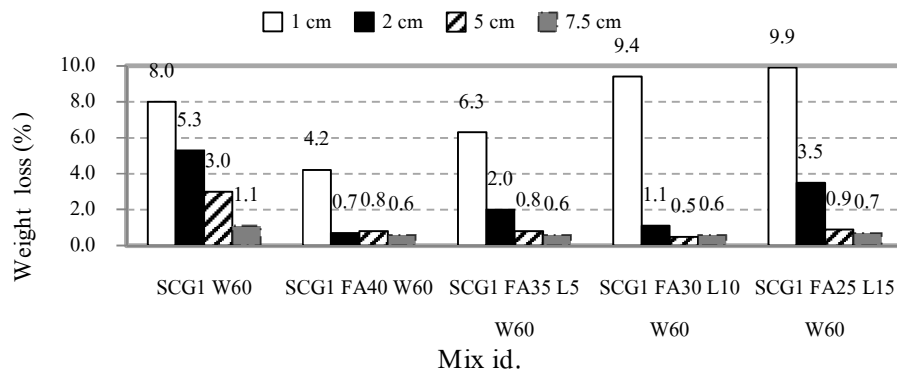
ภาพที่ 4.10 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตเปรียบเทียบระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 35 30 และ 25 ร่วมกับผงหินร้อยละ 5 10 และ 15 ในวัสดุประสาน ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 จากสรุปพบว่า การสูญเสียน้ำหนักเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนระยะหุ้มตั้งแต่ 1 ซม. เป็นต้นไป ของทุกอัตราส่วนวัสดุประสาน มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าเมื่อไม่มีการแทนที่เลย และเมื่อเปรียบเทียบกับการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40 ในวัสดุประสานพบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 35 และ 5 ตามลำดับ ทำให้การสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมน้อยกว่า ดังระยะหุ้ม 2 ซม. เป็นต้นไปของทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่มีการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่า แต่เมื่อลดร้อยละของเถ้าลอยลง 30 และ 25 และเพิ่มผงหินปูนร้อยละ 10 และ 15 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเพิ่มมากขึ้น ส่วนระยะหุ้ม 1 ซม. ถึง 2 ซม. ของคอนกรีตทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานปริมาณสนิมเหล็กไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องมาจากระยะหุ้มของเหล็กเสริมน้อย อิทธิพลของวัฏจักรเปียกสลับแห้งของน้ำทะเล ซึ่งมีองค์ประกอบของน้ำ เกลือคลอไรด์ และออกซิเจน แทรกซึมเข้าได้ง่าย ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมในระยะหุ้มนี้นี้ได้ไม่แน่นอน แต่เหล็กเสริมที่อยู่ลึกภายในเข้าไปเกิดสนิมจากการสะสมของเกลือคลอไรด์มากจนถึงระดับคลอไรด์วิกฤต ทำให้ Passive film ที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมอยู่นั้นสลายไปทำให้เกิดสนิมเหล็กขึ้น



(ก) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



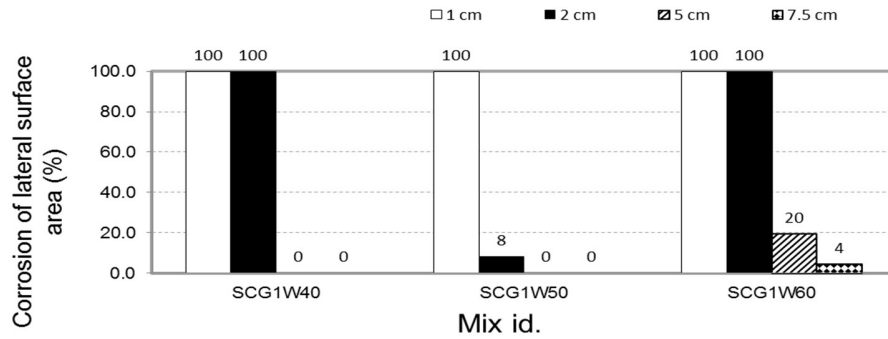
(ค) การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60  
 ภาพที่ 4.10 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
 ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 30 และ 25  
 และมีผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15

พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

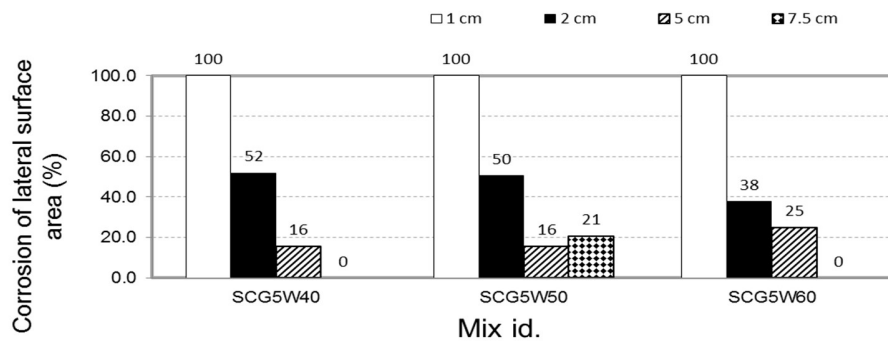
พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม ถูกแสดงเป็นปริมาณพื้นที่สนิมร้อยละต่อพื้นที่ผิวเหล็กเสริมทั้งหมด จากการศึกษาโครงการวิจัยนี้พบว่า ปริมาณพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมไม่สามารถบ่งชี้ความรุนแรงของการเกิดสนิมได้ เนื่องจากปริมาณที่แสดงเป็นเพียงพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม แต่สาเหตุหลักของการสูญเสียการรับกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น เกิดจากปริมาณพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่หายไป ดังนั้นการพิจารณาพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมสามารถบ่งชี้ได้เพียงเหล็กเสริมนั้นเกิดการเกิดสนิมไปแล้วเท่านั้น ในหัวข้อการอภิปรายบางประเด็น จำเป็นต้องอ้างถึงข้อมูลในส่วนของ การสูญเสียน้ำหนักเพื่อความชัดเจน

#### 1. ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

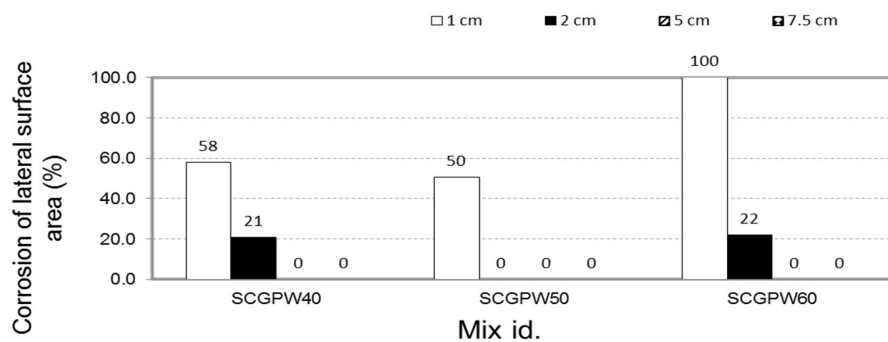
ภาพที่ 4.11 แสดงร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมเหล็กเสริม เปรียบเทียบระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 จากรูป พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 คลอไรด์สามารถทำให้เหล็กตัวอย่างเกิดสนิมได้ที่ระยะความลึก 2 ซม สามารถทำให้เหล็กตัวอย่างที่ระยะความลึก 5 ซม ถึง 7.5 ซม แต่ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เหล็กตัวอย่างเกิดสนิมทั้งหมด เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงทำให้คอนกรีตมีความพรุนมาก เกือบคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าได้ถึง และพบว่า ที่ระยะความลึก 1 ซม และ 2 ซม ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ตัวอย่างเหล็กเกิดสนิมทั้งหมด



(ก) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



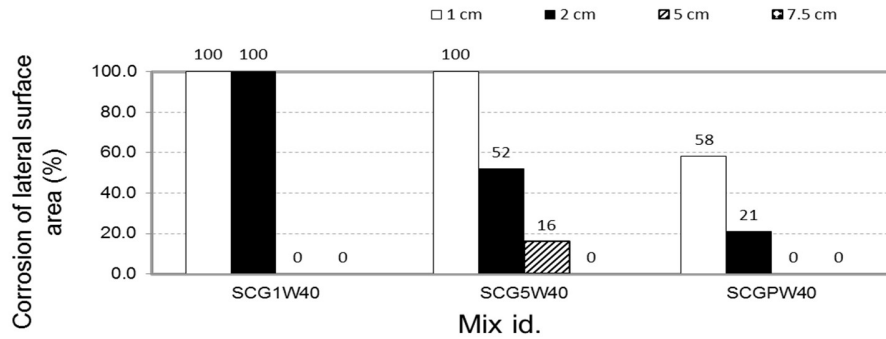
(ง) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



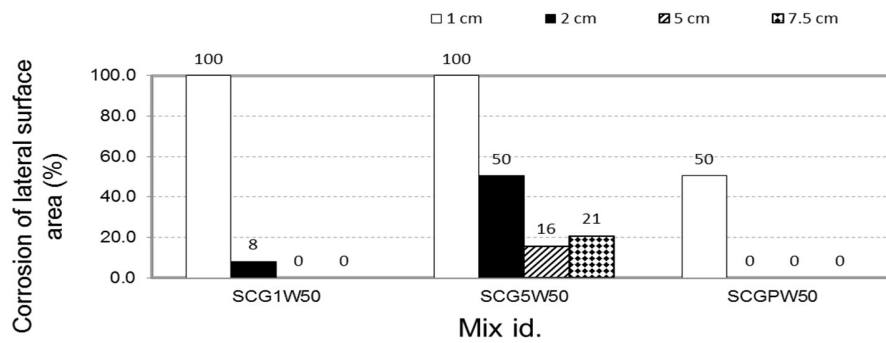
(ค) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน  
ภาพที่ 4.11 พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

## 2. ผลกระทบของชนิดของปูนซีเมนต์

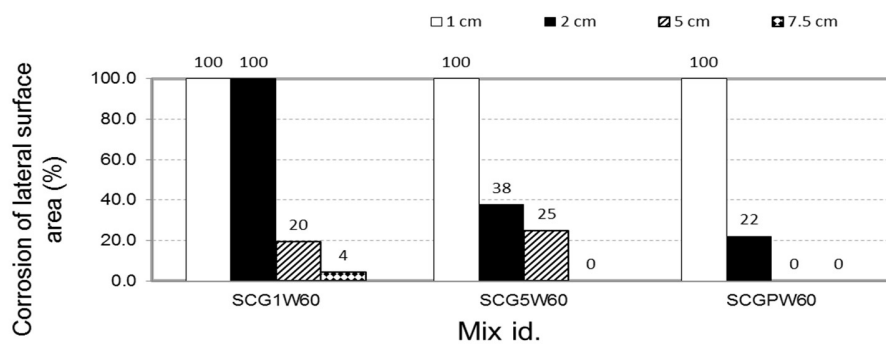
ภาพที่ 4.12 แสดงร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมเหล็กเสริมเปรียบเทียบระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 จากรูป พบว่า เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตโซลานทำให้เกิดพื้นที่สนิมที่ต่ำที่สุด เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอซโซลานได้ผสมเถ้าลอยในขั้นตอนการผลิตจึงทำให้มีประสิทธิภาพช่วยลดความพรุนได้ดี การเกิดสนิมที่รองลงมาคือเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ค่าการแทรกซึมคลอไรด์มีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทำให้เหล็กตัวอย่างเกิดพื้นที่สนิมน้อยกว่า และไม่ทำให้เหล็กที่อยู่ระยะความลึกตั้งแต่ 5 ซม. เข้าไปเป็นสนิม มี  $C_3A$  มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งเป็นสารประกอบที่ช่วยจับยึดคลอไรด์ จึงช่วยยับยั้งการเกิดสนิมที่ผิวเหล็กที่ความลึก 5 ซม. เป็นต้นไป



(ก) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ค) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60  
 ภาพที่ 4.12 พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน

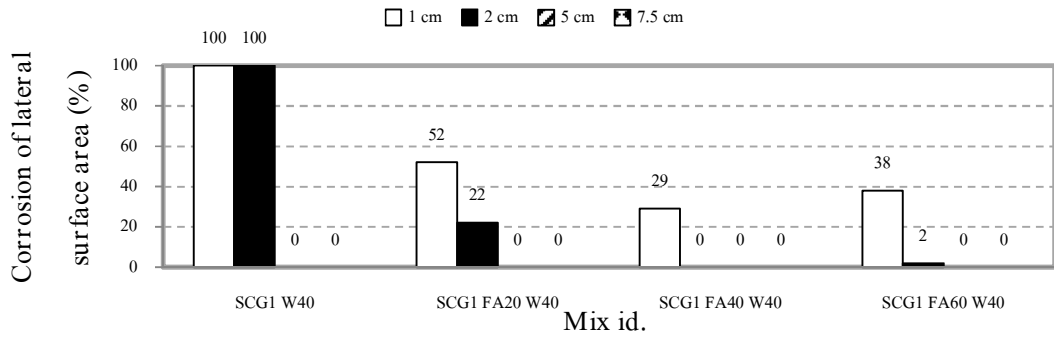
### 3. ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

จากภาพที่ 4.13 (ก) (ข) และ (ค) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 เมื่อใส่เถ้าลอยผสมไปในคอนกรีตแล้วสามารถลดปริมาณการเกิดสนิมที่ผิวได้ สังเกตได้จากพื้นที่สนิมที่ลดลงเมื่อเทียบกับ ตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย จึงทำให้คอนกรีต มีความสามารถในการต้านทานคลอไรด์เพิ่มขึ้น

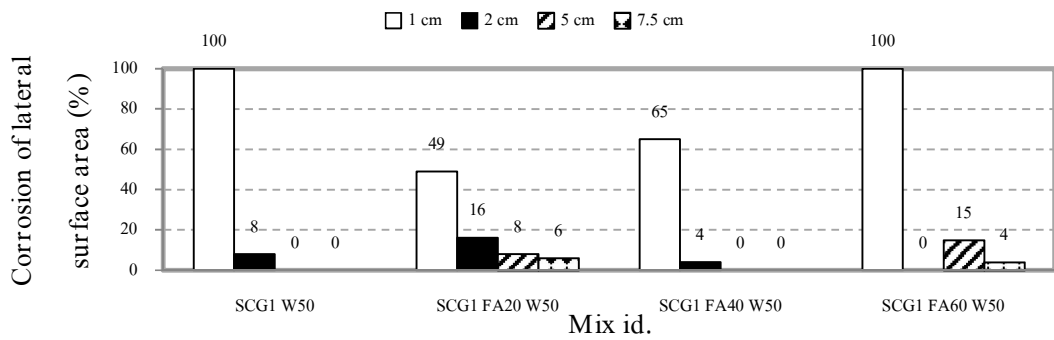
จากภาพที่ 4.13 (ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ซึ่งมีความพรุนน้อยอยู่แล้วจึงทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปได้ยาก เมื่อผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 เหล็กตัวอย่างที่ระยะความลึก 1 และ 2 ซม. ยังคงเกิดสนิมเหล็กและเมื่อผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 60 ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมากขึ้น โดยเหลือเพียงตัวอย่างเหล็กที่ระยะความลึก 1 ซม. เกิดสนิมและเหล็กตัวอย่างตั้งแต่ความลึก 2 ซม. เป็นต้นไปไม่เกิดสนิมเลย

จากภาพที่ 4.13 (ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ผสมเถ้าลอยที่มีอยู่การเพิ่มของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจาก 0.40 เป็น 0.50 นั้นทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปถึงระดับความลึกที่ 8 ซม. กระทั่งทำให้เหล็กตัวอย่างเกิดสนิมขึ้นที่ผิวเหล็ก โดยจะเห็นได้จะตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 เมื่อผสมเถ้าลอยเพิ่มเป็นร้อยละ 40 สนิมเหล็กสามารถเกิดขึ้นได้ที่ความลึก 1 ซม. และ 2 ซม. เมื่อเพิ่มเถ้าลอยเป็นร้อยละ 60 เหล็กตัวอย่างเกิดสนิมที่ระยะความลึก 1 ซม. ข้อสังเกต ที่ระยะความลึก 2 ซม. ไม่มีสนิมเหล็กเกิดขึ้น และจากกราฟแสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต SCG1 FA60 W50 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าไม่ถึง 1% สนิมเหล็กที่เกิดขึ้นในตัวอย่างชั้นความลึก ที่ 5 และ 8 ซม. เกิดจากการชะล้างที่ผิวหน้าคอนกรีต

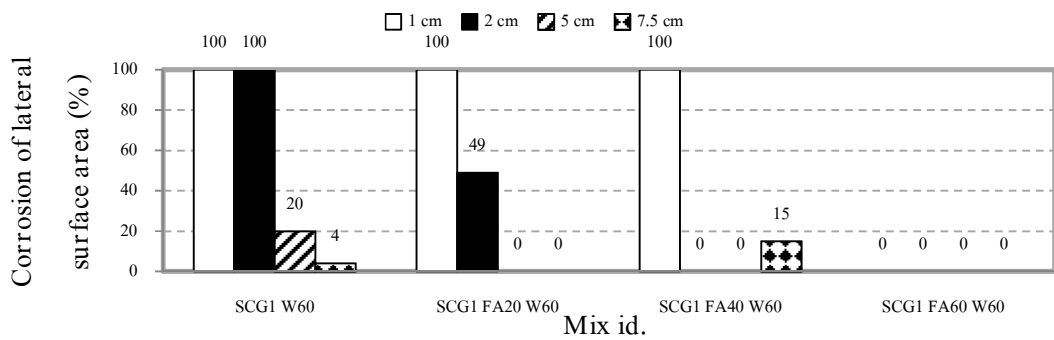
จากรูป 4.18 (ค) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เป็นอัตราส่วนที่คอนกรีตมีความพรุนมาก เมื่อผสมเถ้าลอยที่ร้อยละ 20 ช่วยต้านทานคลอไรด์ ไม่ให้เหล็กที่ระยะความลึก 5 และ 8 ซม. เกิดสนิมได้ เมื่อเพิ่มเถ้าลอยเป็นร้อยละ 40 การเติมเต็มในช่องว่างที่ได้ดีขึ้น เห็นได้ว่าคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าถึงเพียงเหล็กที่ระยะความลึก 1 ซม. แล้วเกิดสนิม และเมื่อเพิ่มเถ้าลอย เป็นร้อยละ 60 ไม่มีเหล็กตัวอย่างชั้นใดเลยที่เกิดสนิมขึ้น



(ก) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ค) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

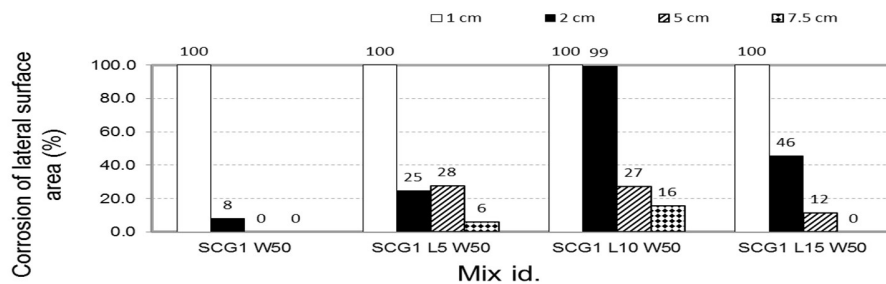
ภาพที่ 4.13 พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมถ้ำลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 30 และ 25



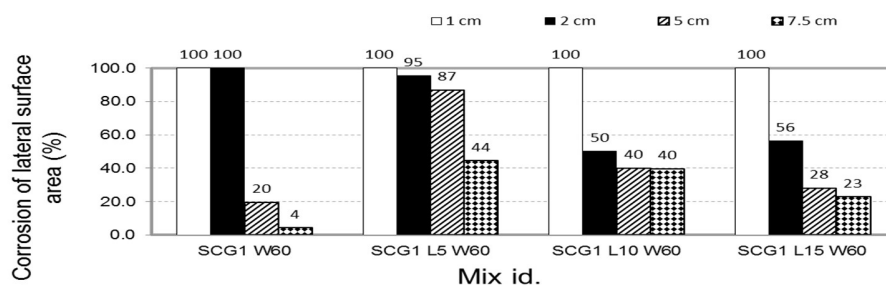
#### 4. ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

ภาพที่ 4.14 (ก) และ (ข) พบว่า เมื่อแทนที่ผงหินปูนในตัวอย่างคอนกรีต พื้นที่สนิมมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมผงหินปูน แต่เมื่อพิจารณาจากการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเหล็กแล้ว ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตที่ได้ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมผงหินปูน และสูงกว่าเมื่อผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 15 ผงหินปูนทำหน้าที่เข้าเติมแทรกความพรุนในตัวอย่างคอนกรีต ปริมาณผงหินปูนที่เพิ่มขึ้นจนมากกว่าความพรุนภายในคอนกรีต ผงหินปูนส่วนเกินนี้ ทำให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้น คลอไรด์จึงมีความสามารถแทรกซึมเข้าได้ง่ายขึ้น เหล็กเสริมจึงเกิดสนิมได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างนี้ทำให้ทราบว่า ข้อมูลพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมนั้น ดีกว่าข้อมูลการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

ข้อสังเกตตัวอย่างคอนกรีต SCG1 L15 W50 ไม่ปรากฏพื้นที่สนิม แต่เมื่อดูข้อมูลการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมแล้ว ตัวอย่างเหล็กยังคงมีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ถึงร้อยละ 0.7 โดยการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริม ไม่สามารถพบการเกิดสนิมเหล็กเสริมด้วยตาเปล่า เพราะสนิมเหล็กเกิดขึ้นโดยรอบเหล็กเสริม และมีขนาดเล็ก



(ก) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



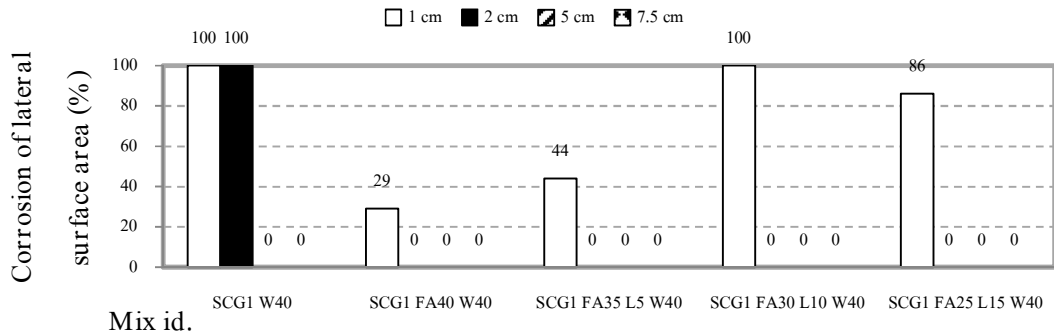
(ข) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ภาพที่ 4.14 พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15

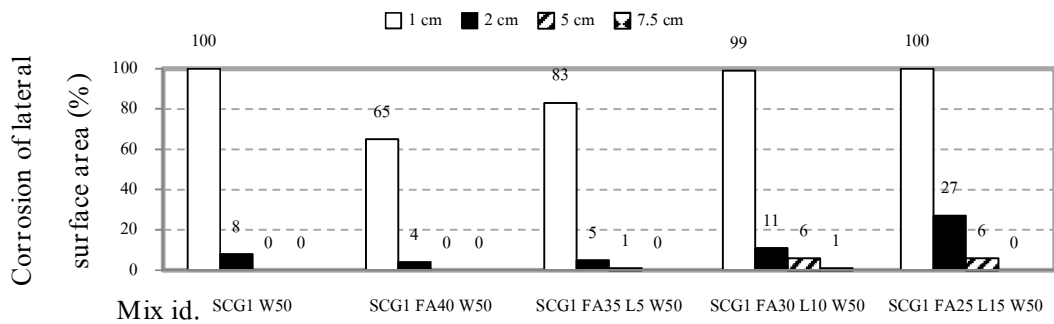
#### 5. ผลกระทบของอัตราส่วนเกลือลอย และผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

จากภาพที่ 4.15 (ก) (ข) และ (ค) พบว่า เมื่อเพิ่มการแทนที่เกลือลอยร้อยละขึ้น และลดการแทนที่ผงหินปูนลงตัวอย่างเหล็กเสริมเกิดสนิมมากขึ้นตามลำดับ การแทนที่เกลือลอยร้อยละ 35 ร่วมกับการแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 ทำให้เกิดพื้นที่สนิมน้อยกว่าตัวอย่างเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว แต่เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 2 ชนิด คือเกลือลอยร้อยละ 40 พื้นที่สนิมของการใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด ยังคงมีพื้นที่สนิมมากกว่า และมีสนิมเกิดขึ้นในเหล็กชั้นที่ลึกกว่าการใช้วัสดุประสาน 2 ชนิด

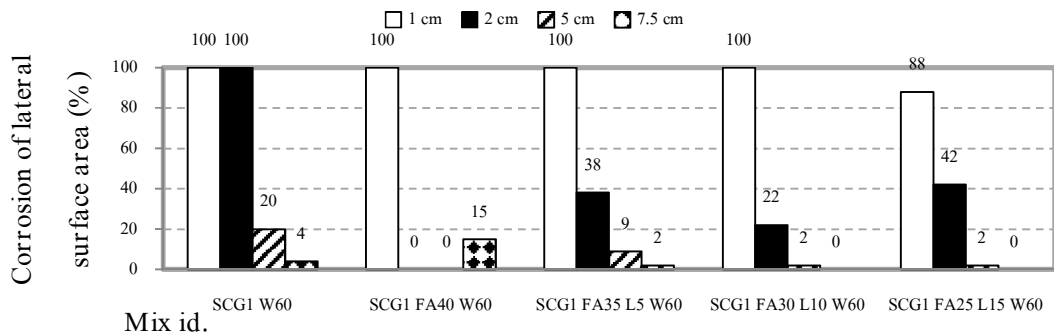
ข้อสังเกตเมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมประกอบ การใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด ทำให้เหล็กที่มีระยะหุ้มตั้งแต่ 5 ซม เป็นต้นไป มีการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่าการใช้วัสดุประสาน 2 ชนิดที่แทนที่โดยเกลือลอย แต่ที่ระยะหุ้ม 1 ซม และ 2 ซม มีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า เนื่องจากวัสดุปอซโซลานต้องใช้เวลาในการสร้างสารเชื่อมประสานความพรุนที่มีอยู่ให้ช่วงต้น คลอไรด์จึงสามารถแทรกซึมเข้าสู่ช่วงระยะหุ้ม 1 ซม และ 2 ซม ได้ จึงเกิดพื้นที่สนิม และมีการสูญเสียน้ำหนัก จากนั้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นความพรุนของคอนกรีตน้อยลงจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ทางให้เหล็กเสริมตัวอย่างที่ระยะหุ้มตั้งแต่ 5 ซม เป็นต้นไป เกิดสนิมและสูญเสียน้ำหนักน้อยลง



(ก) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



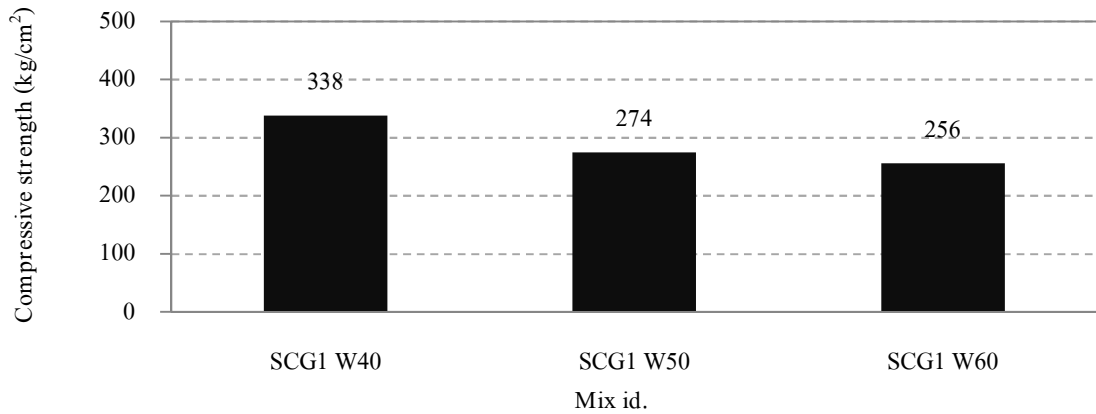
(ค) พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ภาพที่ 4.15 พื้นที่การเกิดสนิมบริเวณรอบของเหล็กเสริมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมถั่วลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 30 และ 25 และผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15

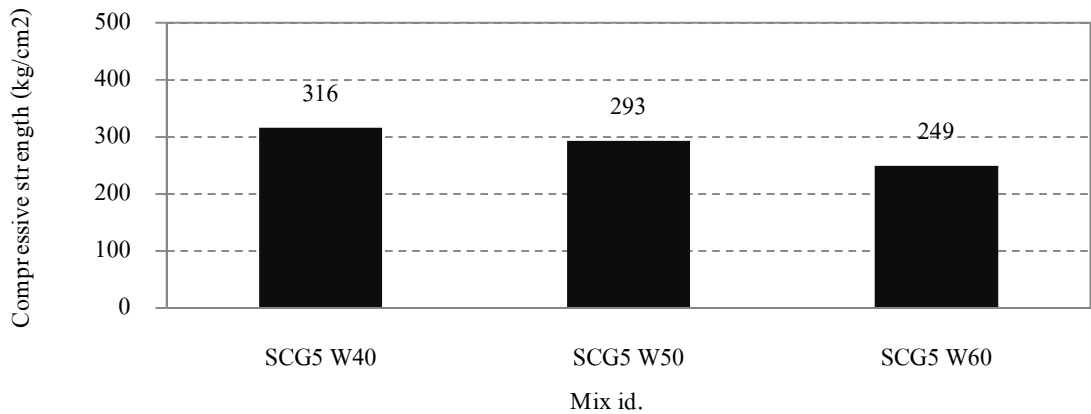
กำลังอัดคอนกรีตของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

1. ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

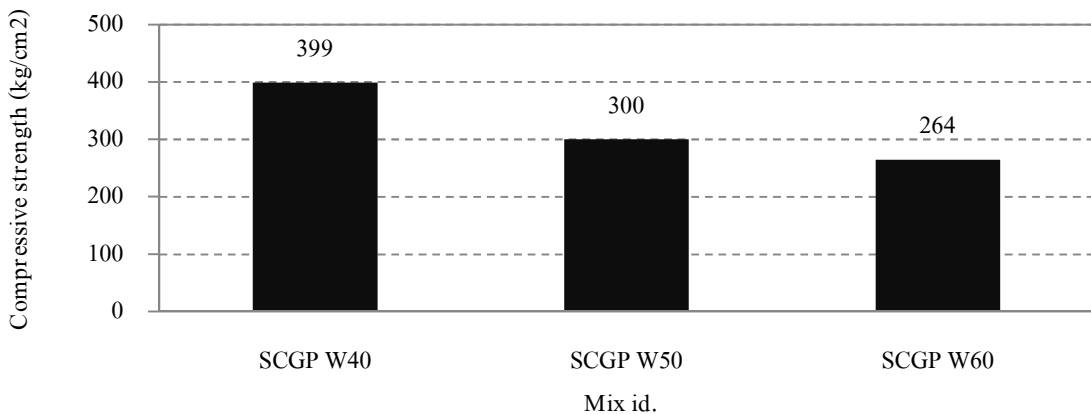
ภาพที่ 4.16 (ก) (ข) และ (ค) แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอชโซลาน เปรียบเทียบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กัน คือ 0.40 0.50 และ 0.60 จากรูป พบว่า คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ มีค่ากำลังอัดสูงกว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง เนื่องจากคอนกรีตมีความพรุนน้อยกว่า จึงทำให้ คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงกว่า



(ก) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

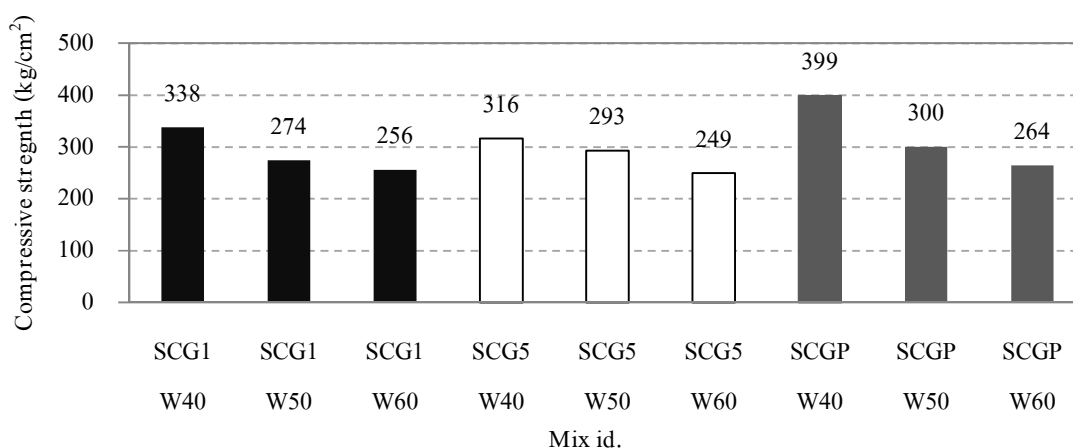


(ค) กำลังของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน

ภาพที่ 4.16 กำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

## 2. ผลกระทบของชนิดของปูนซีเมนต์

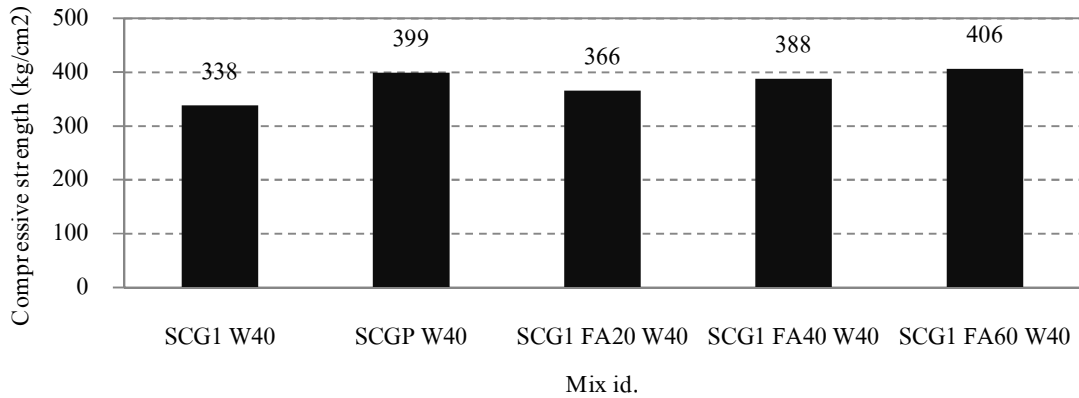
ภาพที่ 4.17 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 จากรูป พบว่าปูนซีเมนต์ปอซโซลานให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามลำดับ เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอซโซลานได้จากการผสมเถ้าลอยและ Clinker แล้วบดละเอียดรวมกัน จึงมีความเป็นสารปอซโซลาน ช่วยให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่มีสารปอซโซลานผสมอยู่ อีกทั้งความละเอียดของผงปูนซีเมนต์ (ดังตารางที่ 3.1) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ทำให้ความพรุนของคอนกรีตมากกว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตจึงน้อยกว่า และสุดท้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีกำลังอัดของคอนกรีตน้อยที่สุด เนื่องจากมีสารไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) ที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงเกิดผลิตภัณฑ์ แคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรต (CSH) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้น้อยกว่า กำลังอัดของคอนกรีต จึงมีค่าต่ำที่สุด



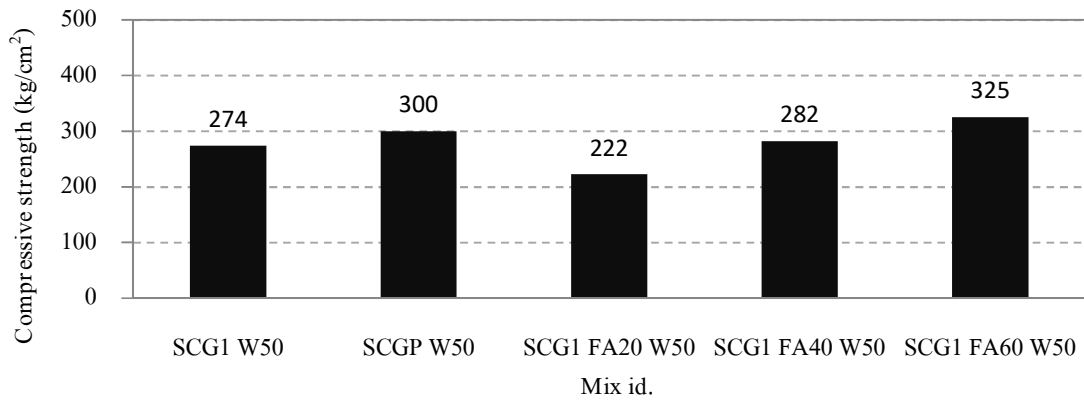
ภาพที่ 4.17 กำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

### 3. ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

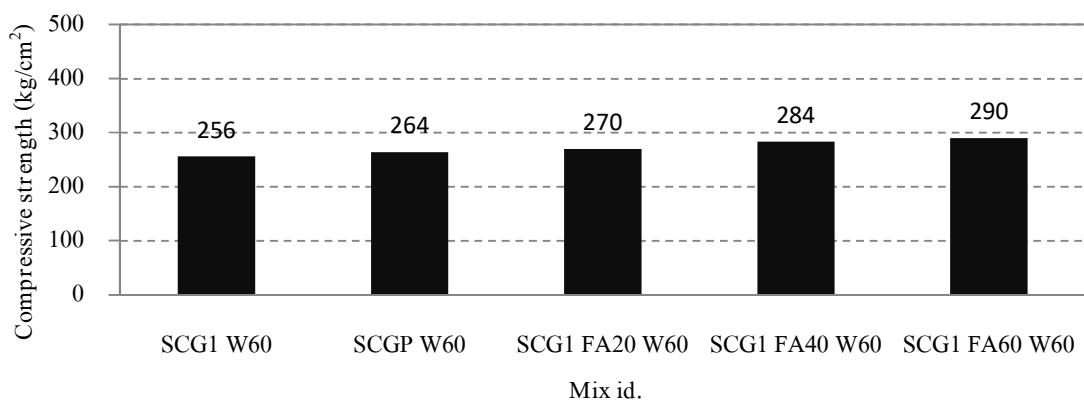
ภาพที่ 4.18 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานร้อยละ 20 40 และ 60 เปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กัน คือ 0.40 0.50 และ 0.60 จากรูป พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยมีค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย เนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานจากวัสดุปอซโซลานที่ผสมเข้าไปคือเถ้าลอย ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) คอนกรีตมีความพรุนน้อย กำลังอัดจึงสูง นอกจากนี้ยังพบว่า การแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานที่ร้อยละ 60 ทำให้คอนกรีตกำลังอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40



(ก) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ค) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ 0.60

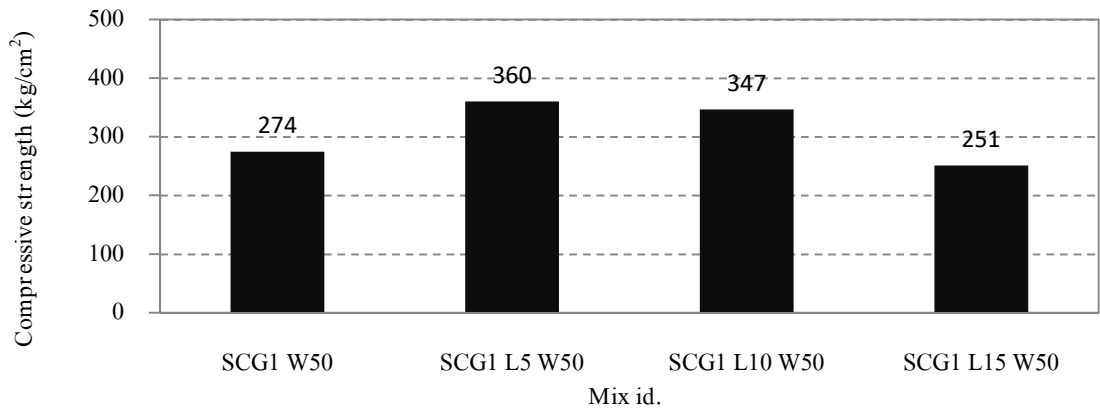
ภาพที่ 4.18 กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผสมแก้ลยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 40 และ 60

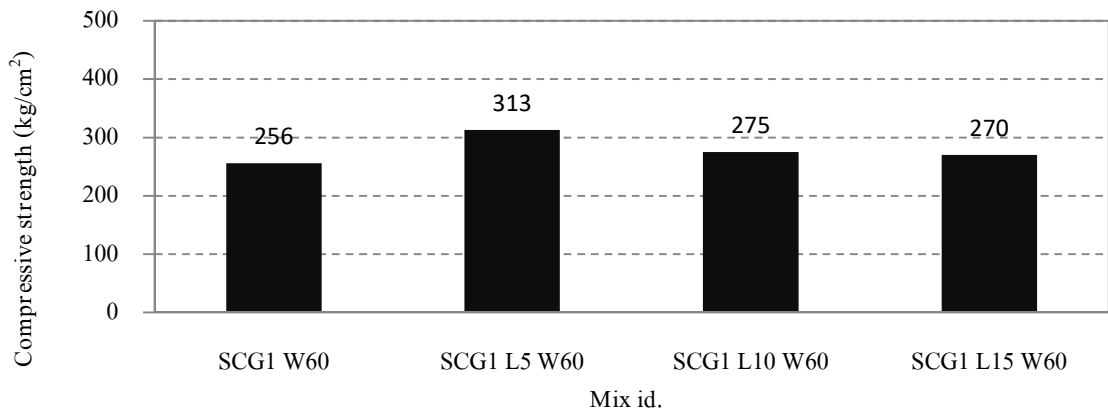


#### 4. ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

ภาพที่ 4.19 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 จากรูป พบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมผงหินปูนมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากผงหินปูนทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ทำให้ความพรุนของคอนกรีตน้อย กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนจึงสูงกว่า และพบว่า การผสมผงหินปูนร้อยละ 5 ให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่สูงกว่าการผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 15 ตามลำดับ เนื่องจากการแทนที่ผงหินปูนในวัสดุประสานร้อยละที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ซึ่งมีไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) น้อยลง ปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดต (CSH) ได้น้อยตามลงไปด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มร้อยละของผงหินปูนมากไป ทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง



(ก) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



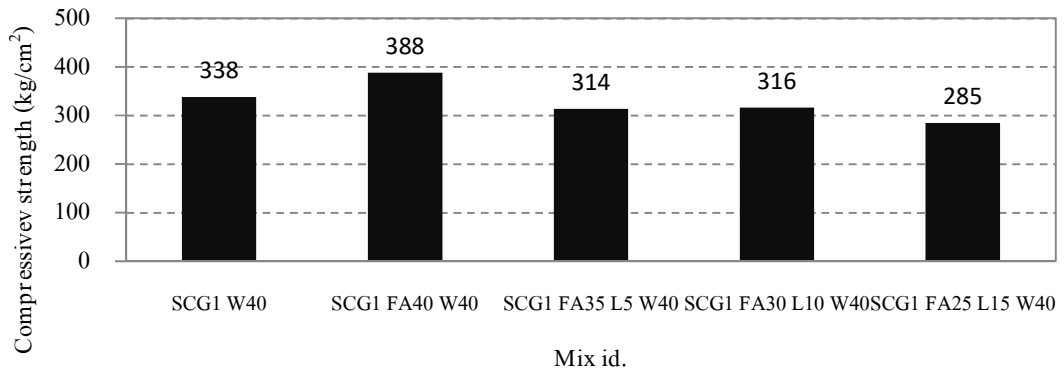
(ข) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ภาพที่ 4.19 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15

#### 5. ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

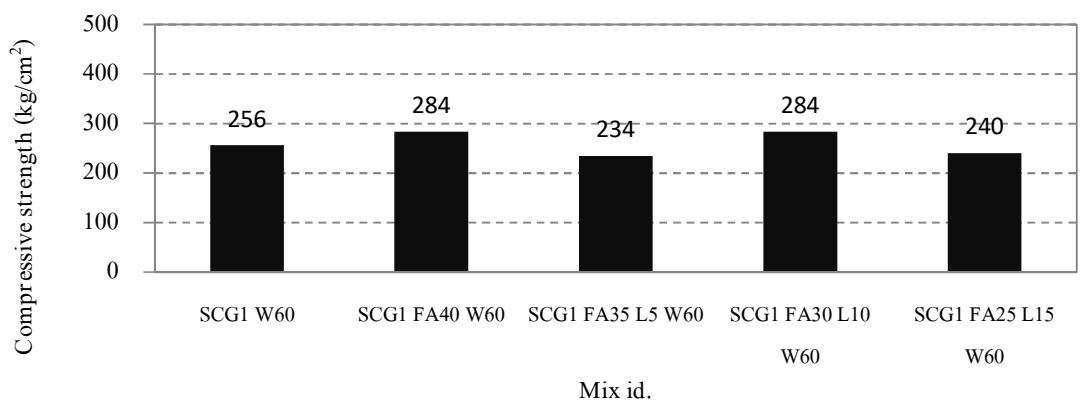
ภาพที่ 4.20 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 30 และ 25 และผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 จากรูป พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนร่วมกันร้อยละ 40 ทุกอัตราส่วนผสม มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอชโซลานได้จากการผสมเถ้าลอยและ Clinker แล้วบดละเอียดรวมกัน จึงมีความเป็นสารปอชโซลาน ช่วยให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยจากการทำปฏิกิริยาปอชโซลาน และพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่าต่ำกว่า แต่การแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ค่ากำลังอัดที่สูงกว่านั้น เนื่องจากการเติมแทรกของผงหินปูนที่เพิ่มขึ้นความพรุนของคอนกรีตน้อยลง กำลังอัดสูงขึ้น



(ก) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ข) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50















(ค) คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ภาพที่ 4.20 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 35 30 และ 25 และผสมผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15

### ภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

#### 1. ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและผลกระทบของชนิดปูนซีเมนต์

ภาพที่ 4.21 4.22 และ 4.23 แสดงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ระยะหุ้มต่าง ๆ ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลานตามลำดับ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ พบว่า เหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีปริมาณสนิมน้อยกว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงที่ระยะหุ้มคอนกรีตเท่ากัน และเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณสนิมน้อยกว่าเหล็กตัวอย่างในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และในคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตโซลานปริมาณการเกิดสนิมของเหล็กเสริมน้อยที่สุด

Mix id.	SCG1 W40				SCG1 W50				SCG1 W60			
Pictures												
Covering (cm)	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	9.9	5.0	0.6	0.6	5.0	1.7	1.3	0.7	8.0	5.3	3.0	1.1
Area corrosion (%)	100	100	0	0	100	8	0	0	100	100	20	4
Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	338				274				256			

ภาพที่ 4.21 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

Mix id.	SCG5 W40				SCG5 W50				SCG5 W60			
Pictures												
Covering (cm)	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	4.2	2.3	0.9	0.7	3.9	2.7	0.9	0.7	3.6	2.8	1.9	1.5
Area corrosion (%)	100	50	16	0	100	50	16	21	100	38	25	0
Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	316				293				249			













ภาพที่ 4.22 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5  
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

Mix id.	SCGP W40				SCGP W50				SCGP W60			
Pictures												
Covering (cm)	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	3	0.9	0.7	0.6	1.7	0.8	0.7	0.8	4.2	1.2	0.9	0.9
Area corrosion (%)	58	21	0	0	50	0	0	0	100	22	0	0
Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	399				300				264			

ภาพที่ 4.23 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน  
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

## 2. ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

ภาพที่ 4.24 แสดงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 40 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 เมื่อพิจารณาการเกิดสนิมของเหล็กตัวอย่างที่ระยะหุ้มต่าง ๆ เห็นได้ว่า เหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 60 ที่ระยะหุ้มมากกว่า 2 ซม. เป็นต้นไปเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40 และ 20 ตามลำดับ เนื่องจากเถ้าลอยทำหน้าที่เป็นปอซโซลาน จึงความพรุนในคอนกรีต ทำให้เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตได้ต่ำ จึงเกิดสนิมที่เหล็กเสริมน้อย

Mix id.	SCG1 FA20 W40				SCG1 FA40 W40				SCG1 FA60 W40			
Pictures												
Covering (cm)	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	2.6	1.3	0.6	0.5	0.5	1.7	0.8	0.8	1.3	0.1	0.3	0.1
Area corrosion (%)	52	22	0	0	29	0	0	0	38	2	0	0
Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	366				388				406			

(ก) การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

Mix id.	SCG1 FA20 W50				SCG1 FA40 W50				SCG1 FA60 W50			
Pictures												
Covering (cm)	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	8.2	0.7	0.6	0.7	2.7	0.8	1.0	0.7	1.8	0.8	0	0
Area corrosion (%)	49	16	8	6	65	4	0	0	100	0	15	4
Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	222				282				325			

(ข) การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

Mix id.	SCG1 FA20 W60				SCG1 FA40 W60				SCG1 FA60 W60			
Pictures												
Covering (cm)	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	8.0	8.3	2.9	0.9	4.2	0.7	0.8	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5
Area corrosion (%)	100	49	0	0	100	0	0	15	0	0	0	0
Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	270				284				290			

(ค) การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60




ภาพที่ 4.24 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

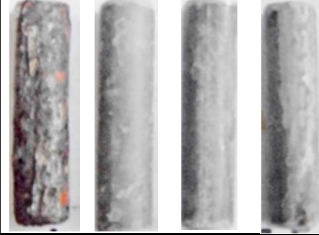




### 3. ผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

ภาพที่ 4.25 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 เมื่อพิจารณาการเกิดสนิมของเหล็กตัวอย่างที่ระยะหุ้มต่าง ๆ พบว่า เหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 ที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 5 ซม. เป็นต้นไป มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่น้อยที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ผงหินปูน ทำให้การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น เนื่องจากผงหินปูนเข้าไปเติมแทรกความพรุนในคอนกรีตทำให้คลอไรด์มีความสามารถแทรกซึมต่ำ การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กจึงมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้แทนที่ผงหินปูน แต่เมื่อแทนที่ผงหินปูนเพิ่มเป็นร้อยละ 10 และ 15 ปริมาณผงหินปูนที่เพิ่มขึ้นมากไป ทำให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้น คลอไรด์จึงมีความสามารถแทรกซึมเข้าได้ง่าย การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม จึงเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ

Mix id.	SCG1 L5 W50				SCG1 L10 W50				SCG1 L15 W50			
Pictures												
Covering (cm)	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	5.7	3.5	1.0	0.5	10.0	4.2	1.2	0.7	16.8	4.5	1.7	0.8
Area corrosion (%)	100	25	28	6	100	99	27	16	100	46	12	0
Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	360				347				251			

(ก) การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
ผสมผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

Mix id.	SCG1 L5 W60				SCG1 L10 W60				SCG1 L15 W60			
Pictures												
Covering (cm)	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	18.8	2.9	1.3	1.1	6.9	3.5	2.0	1.0	19.3	4.7	4.0	2.5
Area corrosion (%)	100	95	87	44	100	50	40	40	100	56	28	23
Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	313				275				270			

(ข) การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
ผสมผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ภาพที่ 4.25 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผง  
หินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60

#### 4. ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

ภาพที่ 4.26 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในวัสดุประสานร้อยละต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 เมื่อพิจารณาการเกิดสนิมของเหล็กตัวอย่างที่ระยะหุ้มต่าง ๆ พบว่า เหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เมื่อแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 35 และผงหินปูนร้อยละ 5 ที่ระยะหุ้ม 2 ซม. เป็นต้นไป ไม่เกิดสนิมขึ้น และเมื่อลดปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นร้อยละ 25 และเพิ่มผงหินปูนเป็นร้อยละ 15 เหล็กเสริมที่ระยะหุ้ม 2 ซม. เกิดสนิมเหล็กเล็กน้อย และไม่เกิดสนิมเหล็กตั้งแต่ระยะหุ้ม 5 ซม. สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 เมื่อแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 35 และผงหินปูนร้อยละ 5 ที่ระยะหุ้ม 5 ซม. เป็นต้นไป เหล็กเสริมไม่สามารถเกิดสนิมได้ และเมื่อลดเถ้าลอยเป็นร้อยละ 30 25 และเพิ่มผงหินปูนเป็นร้อยละ 10 15 ตามลำดับ เหล็กตัวอย่างไม่พบสนิมเหล็กที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 7.5 ซม. พบว่า การลดร้อยละของเถ้าลอยและเพิ่มร้อยละของผงหินปูน ทำให้เกิดสนิมที่เหล็กเสริมมาก เนื่องจากคอนกรีตมีความพรุนมากกว่าปริมาณผงหินปูนที่มากไป ทำให้เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตมากยิ่งขึ้น

Mix id.	SCG1 FA35 L5 W40				SCG1 FA30 L10 W40				SCG1 FA25 L15 W40			
Pictures												
Covering (cm)	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	2.2	0.7	0.5	0.4	3.4	0.6	0.6	0.7	5.9	0.7	0.6	0.5
Area corrosion (%)	44	0	0	0	100	0	0	0	86	0	0	0
Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	314				316				285			

(ก) การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

Mix id.	SCG1 FA35 L5 W50				SCG1 FA30 L10 W50				SCG1 FA25 L15 W50			
Pictures												
Covering (cm)	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	4.6	0.6	0.7	0.7	5.7	0.6	0.6	0.6	8.4	1.0	0.7	0.6
Area corrosion (%)	83	5	1	0	99	11	6	1	100	27	6	0
Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	278				285				251			

(ข) การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

Mix id.	SCG1 FA35 L5 W60				SCG1 FA30 L10 W60				SCG1 FA25 L15 W60			
Pictures												
Covering (cm)	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5	1	2	5	7.5
Weight loss (%)	6.3	2.0	0.8	0.6	9.4	1.1	0.5	0.6	9.9	3.5	0.9	0.7
Area corrosion (%)	100	38	9	2	100	22	2	0	88	42	2	0
Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	234				284				240			

(ค) การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ภาพที่ 4.26 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้า  
ลอยและผงหินปูนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

## บทที่ 5

### สรุปผล

#### สรุปผล

คอนกรีตที่มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสภาวะแวดล้อมทางทะเลมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน โดยคอนกรีตที่มีความต้านทานที่ดีนั้นสามารถช่วยยืดอายุการเกิดสนิมของเหล็ก ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริม ซึ่งผลจากการศึกษาตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 20x20x20 ซม. ฟังเหล็กเสริมไว้ข้างใน และผ่านการเผชิญสิ่งแวดล้อมเป็นทะเลระยะเวลา 3 ปี สามารถสรุปได้ดังนี้ ความคงทนของคอนกรีตต่อการทำลายของเกลือคลอไรด์

1. การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น โดยเกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ยาก เหล็กเสริมมีพื้นที่การเกิดสนิมต่ำลงและมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมน้อยลงด้วย

2. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากที่สุด และทำให้เหล็กเสริมมีพื้นที่การเกิดสนิมและการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดด้วย ส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์น้อยลงมาตามลำดับ

3. สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 2 ชนิด พบว่า การแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และหากแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานร้อยละ 60 ส่งผลให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และการแทนที่ผงหินปูนในวัสดุประสานร้อยละ 5 ทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีกว่าคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่เมื่อแทนที่มากขึ้นกลับส่งผลให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำลง

4. สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด พบว่า การแทนที่ผงหินปูนในวัสดุประสานมากขึ้นและใช้เถ้าลอยน้อยลง (โดยเถ้าลอยและผงหินปูนรวมกันร้อยละ 40) ทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตต่ำลง แต่ก็ยังดีกว่าคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ยังไม่ดีเท่าคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอซโซลาน

5. การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมีผลการทดสอบที่สอดคล้องกับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต กล่าวคือ เมื่อคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมก็น้อยลงตามเช่นกัน เป็นต้น

6. การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเป็นดัชนีบ่งชี้การเกิดสนิมของเหล็กที่ดีกว่าพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม ไม่สามารถบอกได้ว่าพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมคงเหลือเท่าใด รวมทั้งไม่สามารถบอกผลกระทบของความลึกของการเกิดสนิม ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียการรับกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้

#### กำลังอัดคอนกรีต (Compressive strength)

1. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ทำให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้น และปูนซีเมนต์ปอชโซลานให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตสูงกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และรองลงมาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

2. กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานมีค่าสูงกว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอชโซลาน และกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ผงหินปูนในวัสดุประสานมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่กำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง เมื่อร้อยละของการแทนที่ผงหินปูนเพิ่มมากขึ้น

3. กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าลอยรวมผงหินปูน รวมกันร้อยละ 40 มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียวทุกสัดส่วนในการแทนที่ และเมื่อเพิ่มปริมาณของการแทนที่เถ้าลอย และลดปริมาณของการแทนที่ผงหินปูน ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น

## ข้อเสนอแนะ

1. ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นของเหลือ ของกระบวนการผลิตเหล็กเป็นผลจากการหลอมตัวของแคลเซียมออกไซด์จากหินปูนกับซิลิกอนและอะลูมินาจากแท่งเหล็กและถ่านโค้ก ซึ่งคุณภาพเหล็กที่ได้จะสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเหล็ก และองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็ก ดังนั้นในการควบคุมคุณภาพของเหล็กที่หลอม จะมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของตะกรันอยู่ตลอดเวลา เพื่อทำการปรับปรุง คัดแปลงสัดส่วนของวัตถุดิบและสภาพการทำงานของเตาเผา จึงควรมีการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย

2. ซิลิกาฟุ้ง หรือไมโครซิลิกา เป็นชื่อเรียกวาสดผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของการผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ต ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี Electric arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นอนุภาคของซิลิกาขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึก ซิลิกาฟุ้งจะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ จึงควรมีการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟุ้ง เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย

## ผลผลิต (Output)

### ผลงานตีพิมพ์

ณัฐพล วงษ์वार, ทวีชัย สำราญวานิช, สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล, ผลกระทบของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดและปูนซีเมนต์แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11, โรงแรมลีมาธานี, นครราชสีมา, 17-19 กุมภาพันธ์ 2559.



## บรรณานุกรม

ทวีชัย สําราวานิช. (2553). การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์ โยธาสาร วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, ปีที่ 22 ฉบับที่ 3, พฤษภาคม-มิถุนายน 2553, 79-85.

ทวีชัย สําราวานิช. (2551). คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 4 เดือนสิงหาคม.

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

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 C1218, Standard Test Method for water-soluble chloride in mortar and concrete. **Annual Book of ASTM Standards** , American Society for Testing and Materials, 2000

ASTM C39. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials, 2000

ASTM G1, Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens. **Annual Book of ASTM Standards** , Volume 04.02.

Bakker RFM. (1988). **Corrosion of steel in concrete**. New York : Chapman and Hall.

Castro P., De Rincon O.T., and Pazini E.J., (2001). Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments. **Cement and Concrete Research**, 31, 529-537.

Cheewaket T., Jaturapitakkul C. and Chalee W. (2010). Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. **Construction and Building Materials**, 24,1352–1357.

Cheewaket T., Jaturapitakkul C. and Chalee W. (2012). Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. **Construction and Building Materials**, 37,693–698.

Costa A. and Appleton J. (2002). Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal. **Cement & Concrete Composites**, 24,169-179.

Funahashi M. (1990). Predicting corrosion free service life of a concrete structure in chloride environment. **ACI Materials Journal**, 87(6), 584-587.

Meira G.R., Andrade C., Alonso C., Borba Jr J.C. and Padilha Jr M. (2010). Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement & Concrete Composites**, 32,427–435.

Matthews, J.D. (1989). Performance of Limestone-Filled Cements. **Building Research Establishment, BR 245**

Moon H.Y. and Shin K.J. (2006). Evaluation on steel bar corrosion embedded in antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, 36,521-529.

Shamsad A. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structure its monitoring and service life prediction. **Cement & concrete composites**, 25, 459-471

Shi Xianming., Xie Ning., Fortune Keith. and Gong Jing. (2012). Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, 30,125-138.

Soroka. (1993), “**Concrete in hot environments**”, Great Britain: Alden Press.

Song H-W., Lee C.-H., and Ann K.Y., (2008). Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. **Cement & Concrete Composites**, 30 ,113–121.

Thomas M. Chloride thresholds in marine concrete. **Cement and Concrete Research**, 26,513-519.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล  
เป็นระยะเวลา 3 ปี

Code on sample	Mix designation	Covering of steel in concrete (cm)	Initial weight, W <sub>i</sub> (g)	Final weight, W <sub>f</sub> (g)	Weight loss (%)
C1	SCG1 W40	1	39.40	35.50	9.9
		2	41.42	39.33	5.0
		5	46.28	45.98	0.6
		7.5	19.32	19.20	0.6
C2	SCG1 W50	1	34.97	33.23	5.0
		2	44.04	43.27	1.7
		5	44.43	43.87	1.3
		7.5	40.63	40.34	0.7
C3	SCG1 W60	1	41.82	38.48	8.0
		2	44.45	42.09	5.3
		5	46.46	45.07	3.0
		7.5	45.07	44.58	1.1
C4	SCG5 W40	1	43.35	41.55	4.2
		2	43.65	42.63	2.3
		5	44.11	43.72	0.9
		7.5	41.70	41.40	0.7
C5	SCG5 W50	1	44.51	42.79	3.9
		2	43.99	42.79	2.7
		5	43.01	42.62	0.9
		7.5	41.34	41.07	0.7
C6	SCG5 W60	1	41.65	40.15	3.6
		2	46.17	44.89	2.8
		5	44.67	43.83	1.9
		7.5	44.66	44.00	1.5
C7	SCC1 W40	1	42.38	41.13	2.9
		2	44.14	41.13	6.8
		5	45.38	45.04	0.7
		7.5	45.65	45.36	0.6
C8	SCC1 W50	1	40.95	37.94	7.4
		2	44.89	43.31	3.5
		5	46.01	45.31	1.5
		7.5	45.54	45.06	1.1
C9	SCC1 W60	1	43.83	42.37	3.3
		2	46.37	45.36	2.2
		5	44.73	43.83	2.0
		7.5	45.06	44.62	1.0
C10	TPI1 W40	1	39.32	38.12	3.1
		2	43.99	43.51	1.1
		5	44.73	44.45	0.6
		7.5	43.59	43.31	0.6
C11	TPI1 W50	1	41.38	37.98	8.2
		2	45.10	43.59	3.3
		5	43.89	43.56	0.8
		7.5	44.40	44.12	0.6
C12	TPI1 W60	1	41.00	37.14	9.4
		2	42.98	41.05	4.5
		5	44.21	42.37	4.2
		7.5	41.37	40.89	1.2
C13	SCGP W40	1	42.83	41.54	3.0
		2	43.22	42.82	0.9
		5	44.06	43.73	0.7
		7.5	43.72	43.44	0.6
C14	SCGP W50	1	43.38	42.65	1.7
		2	44.41	44.05	0.8
		5	44.16	43.83	0.7
		7.5	44.66	44.30	0.8
C15	SCGP W60	1	41.46	39.73	4.2
		2	44.05	43.53	1.2
		5	44.26	43.85	0.9
		7.5	44.45	44.04	0.9
C16	SCGL10 W40	1	36.87	33.24	9.8
		2	43.66	41.20	5.6
		5	45.11	44.82	0.6
		7.5	45.02	44.66	0.8

Code on sample	Mix designation	Covering of steel in concrete (cm)	Initial weight, $W_i$ (g)	Final weight, $W_f$ (g)	Weight loss (%)
C17	SCGL10 W50	1	37.98	33.27	12.4
		2	42.80	40.82	4.6
		5	44.74	44.32	0.9
		7.5	44.67	44.26	0.9
C18	SCGL10 W60	1	41.34	39.05	5.5
		2	39.79	36.72	7.7
		5	46.82	45.43	3.0
		7.5	43.90	42.59	3.0
C19	SCGL20 W40	1	41.28	38.44	6.9
		2	45.55	44.82	1.6
		5	45.90	45.50	0.9
		7.5	45.53	45.25	0.6
C20	SCGL20 W50	1	43.02	41.20	4.2
		2	44.80	43.70	2.5
		5	44.94	43.83	2.5
		7.5	38.76	38.24	1.3
C21	SCGL20 W60	1	41.03	38.71	5.7
		2	42.84	40.25	6.0
		5	43.65	41.39	5.2
		7.5	43.13	41.75	3.2
C22	SCG1 FA20 W40	1	44.79	43.64	2.6
		2	45.26	44.67	1.3
		5	45.32	45.06	0.6
		7.5	45.76	45.52	0.5
C23	SCG1 FA40 W40	1	42.19	41.97	0.5
		2	45.97	45.21	1.7
		5	42.38	42.04	0.8
		7.5	44.04	43.70	0.8
C24	SCG1 FA60 W40	1	44.70	44.10	1.3
		2	44.40	44.34	0.1
		5	44.23	44.11	0.3
		7.5	44.71	44.66	0.1
C25	SCG1 FA20 W50	1	43.01	39.48	8.2
		2	45.16	44.85	0.7
		5	45.92	45.63	0.6
		7.5	44.88	44.58	0.7
C26	SCG1 FA40 W50	1	45.63	44.38	2.7
		2	45.06	44.72	0.8
		5	44.02	43.60	1.0
		7.5	45.49	45.18	0.7
C27	SCG1 FA60 W50	1	45.29	44.46	1.8
		2	44.39	44.05	0.8
		5	45.30	45.28	0.0
		7.5	44.58	44.56	0.0
C28	SCG1 FA20 W60	1	44.39	40.82	8.0
		2	42.52	39.00	8.3
		5	44.94	43.62	2.9
		7.5	42.93	42.53	0.9
C29	SCG1 FA40 W60	1	44.26	42.40	4.2
		2	45.07	44.74	0.7
		5	45.87	45.52	0.8
		7.5	45.94	45.65	0.6
C30	SCG1 FA60 W60	1	45.73	45.47	0.6
		2	44.39	44.15	0.5
		5	46.00	45.79	0.5
		7.5	43.38	43.18	0.5
C31	SCG1 L5 W50	1	41.08	34.18	16.8
		2	43.20	41.26	4.5
		5	43.80	43.28	1.2
		7.5	43.84	43.50	0.8
C32	SCG1 L10 W50	1	39.86	35.88	10.0
		2	42.10	40.62	3.5
		5	45.65	44.88	1.7
		7.5	42.86	42.64	0.5

Code on sample	Mix designation	Covering of steel in concrete (cm)	Initial weight, W <sub>i</sub> (g)	Final weight, W <sub>f</sub> (g)	Weight loss (%)
C33	SCG1 L15 W50	1	42.07	39.68	5.7
		2	41.98	40.10	4.5
		5	44.39	43.94	1.0
		7.5	43.85	43.55	0.7
C34	SCG1 L5 W60	1	36.61	34.09	6.9
		2	41.56	40.11	3.5
		5	43.52	42.66	2.0
		7.5	43.08	42.64	1.0
C35	SCG1 L10 W60	1	40.98	33.09	19.3
		2	42.54	40.53	4.7
		5	43.19	41.46	4.0
		7.5	43.17	42.07	2.5
C36	SCG1 L15 W60	1	43.04	34.97	18.8
		2	45.75	44.42	2.9
		5	45.16	44.59	1.3
		7.5	42.79	42.34	1.1
C37	SCG1 FA35 L5 W40	1	43.64	42.67	2.2
		2	42.91	42.62	0.7
		5	44.21	43.97	0.5
		7.5	44.25	44.06	0.4
C38	SCG1 FA30 L10 W40	1	42.80	41.33	3.4
		2	39.55	39.31	0.6
		5	43.98	43.71	0.6
		7.5	44.25	43.96	0.7
C39	SCG1 FA25 L15 W40	1	42.12	39.64	5.9
		2	44.36	44.05	0.7
		5	43.60	43.32	0.6
		7.5	44.09	43.85	0.5
C40	SCG1 FA35 L5 W50	1	42.01	40.08	4.6
		2	44.41	44.16	0.6
		5	41.06	40.76	0.7
		7.5	40.03	39.75	0.7
C41	SCG1 FA30 L10 W50	1	41.97	39.58	5.7
		2	43.21	42.95	0.6
		5	42.91	42.66	0.6
		7.5	43.25	42.97	0.6
C42	SCG1 FA25 L5 W50	1	40.71	37.31	8.4
		2	44.27	43.83	1.0
		5	43.81	43.52	0.7
		7.5	44.32	44.05	0.6
C43	SCG1 FA35 L5 W60	1	40.42	37.86	6.3
		2	43.73	42.84	2.0
		5	43.72	43.38	0.8
		7.5	41.92	41.66	0.6
C44	SCG1 FA30 L10 W60	1	40.63	36.82	9.4
		2	43.52	43.02	1.1
		5	43.13	42.90	0.5
		7.5	43.76	43.50	0.6
C45	SCG1 FA25 L15 W60	1	41.50	37.40	9.9
		2	44.26	42.69	3.5
		5	43.55	43.16	0.9
		7.5	43.83	43.52	0.7
C46	SCGSEA W40	1	43.16	42.33	1.9
		2	43.52	43.25	0.6
		5	44.52	41.92	5.8
		7.5	41.39	41.07	0.8
C47	SCGSEA W30	1	42.59	41.98	1.4
		2	43.77	43.47	0.7
		5	42.25	41.92	0.8
		7.5	40.98	40.76	0.5
C48	SCGSEA W35	1	42.34	41.66	1.6
		2	42.59	42.34	0.6
		5	44.74	44.50	0.5
		7.5	43.88	43.55	0.8

Code on sample	Mix designation	Covering of steel in concrete (cm)	Initial weight, W <sub>i</sub> (g)	Final weight, W <sub>f</sub> (g)	Weight loss (%)
C49	Marine GGBFS W40	1	45.06	44.69	0.8
		2	44.12	43.75	0.8
		5	40.88	40.62	0.6
		7.5	43.35	43.02	0.8
C50	Marine GGBFS W50	1	42.81	42.17	1.5
		2	42.45	42.18	0.6
		5	43.98	43.65	0.8
		7.5	43.57	43.25	0.7
C51	Marine GGBFS W60	1	43.39	41.89	3.5
		2	44.56	44.28	0.6
		5	43.40	43.09	0.7
		7.5	44.77	44.50	0.6
C52	SCGSEA W25	1	43.64	43.18	1.1
		2	44.58	44.24	0.8
		5	44.65	44.32	0.7
		7.5	43.95	42.24	3.9
C53	SCGSEA W30	1	42.96	42.31	1.5
		2	44.80	44.51	0.6
		5	45.71	45.41	0.7
		7.5	40.41	40.04	0.9



ภาคผนวก ข

ร้อยละของพื้นที่ผิวการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล  
เป็นระยะเวลา 3 ปี

Code on sample	Mix designation	Covering of steel in concrete (cm)	Area of lateral surface corrosion cm <sup>2</sup>	Lateral surface area of steel (cm <sup>2</sup> )	Corrosion of lateral surface area (%)
C1	SCG1 W40	1	1885	1885	100
		2	1885	1885	100
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C2	SCG1 W50	1	1885	1885	100
		2	155	1885	8
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C3	SCG1 W60	1	1885	1885	100
		2	1885	1885	100
		5	369	1885	20
		7.5	81	1885	4
C4	SCG5 W40	1	1885	1885	100
		2	978	1885	52
		5	299	1885	16
		7.5	0	1885	0
C5	SCG5 W50	1	1885	1885	100
		2	952	1885	50
		5	297	1885	16
		7.5	393	1885	21
C6	SCG5 W60	1	1885	1885	100
		2	712	1885	38
		5	471	1885	25
		7.5	0	1885	0
C7	SCC1 W40	1	1885	1885	100
		2	958	1885	51
		5	179	1885	10
		7.5	0	1885	0
C8	SCC1 W50	1	1885	1885	100
		2	760	1885	40
		5	405	1885	21
		7.5	255	1885	14
C9	SCC1 W60	1	1109	1885	59
		2	724	1885	38
		5	709	1885	38
		7.5	306	1885	16
C10	TPI1 W40	1	1720	1885	91
		2	2133	1885	113
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C11	TPI1 W50	1	1885	1885	100
		2	637	1885	34
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C12	TPI1 W60	1	1885	1885	100
		2	1779	1885	94
		5	907	1885	48
		7.5	547	1885	29
C13	SCGP W40	1	1094	1885	58
		2	392	1885	21
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0

Code on sample	Mix designation	Covering of steel in concrete (cm)	Area of lateral surface corrosion cm <sup>2</sup>	Lateral surface area of steel (cm <sup>2</sup> )	Corrosion of lateral surface area (%)
C14	SCGP W50	1	952	1885	50
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C15	SCGP W60	1	1885	1885	100
		2	414	1885	22
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C16	SCGL10 W40	1	1885	1885	100
		2	1885	1885	100
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C17	SCGL10 W50	1	1885	1885	100
		2	1264	1885	67
		5	111	1885	6
		7.5	0	1885	0
C18	SCGL10 W60	1	1885	1885	100
		2	1885	1885	100
		5	1004	1885	53
		7.5	919	1885	49
C19	SCGL20 W40	1	1885	1885	100
		2	1044	1885	55
		5	368	1885	19
		7.5	0	1885	0
C20	SCGL20 W50	1	1885	1885	100
		2	1212	1885	64
		5	1123	1885	60
		7.5	390	1885	21
C21	SCGL20 W60	1	1769	1885	94
		2	985	1885	52
		5	970	1885	51
		7.5	935	1885	50
C22	SCG1 FA20 W40	1	971	1885	52
		2	424	1885	22
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C23	SCG1 FA40 W40	1	538	1885	29
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C24	SCG1 FA60 W40	1	718	1885	38
		2	42	1885	2
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C25	SCG1 FA20 W50	1	932	1885	49
		2	295	1885	16
		5	157	1885	8
		7.5	112	1885	6
C26	SCG1 FA40 W50	1	1227	1885	65
		2	70	1885	4
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0

Code on sample	Mix designation	Covering of steel in concrete (cm)	Area of lateral surface corrosion cm <sup>2</sup>	Lateral surface area of steel (cm <sup>2</sup> )	Corrosion of lateral surface area (%)
C27	SCG1 FA60 W50	1	1885	1885	100
		2	0	1885	0
		5	288	1885	15
		7.5	67	1885	4
C28	SCG1 FA20 W60	1	1885	1885	100
		2	929	1885	49
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C29	SCG1 FA40 W60	1	1885	1885	100
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	288	1885	15
C30	SCG1 FA60 W60	1	0	1885	0
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C31	SCG1 L5 W50	1	1885	1885	100
		2	467	1885	25
		5	522	1885	28
		7.5	110	1885	6
C32	SCG1 L10 W50	1	1885	1885	100
		2	1871	1885	99
		5	516	1885	27
		7.5	297	1885	16
C33	SCG1 L15 W50	1	1885	1885	100
		2	858	1885	46
		5	218	1885	12
		7.5	0	1885	0
C34	SCG1 L5 W60	1	1885	1885	100
		2	1797	1885	95
		5	1640	1885	87
		7.5	839	1885	44
C35	SCG1 L10 W60	1	1885	1885	100
		2	946	1885	50
		5	753	1885	40
		7.5	747	1885	40
C36	SCG1 L15 W60	1	1885	1885	100
		2	1059	1885	56
		5	531	1885	28
		7.5	431	1885	23
C37	SCG1 FA35 L5 W40	1	832	1885	44
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C38	SCG1 FA30 L10 W40	1	1885	1885	100
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C39	SCG1 FA25 L15 W40	1	1614	1885	86
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0

Code on sample	Mix designation	Covering of steel in concrete (cm)	Area of lateral surface corrosion cm <sup>2</sup>	Lateral surface area of steel (cm <sup>2</sup> )	Corrosion of lateral surface area (%)
C40	SCG1 FA35 L5 W50	1	1564	1885	83
		2	89	1885	5
		5	18	1885	1
		7.5	0	1885	0
C41	SCG1 FA30 L10 W50	1	1868	1885	99
		2	204	1885	11
		5	120	1885	6
		7.5	25	1885	1
C42	SCG1 FA25 L5 W50	1	1885	1885	100
		2	501	1885	27
		5	116	1885	6
		7.5	0	1885	0
C43	SCG1 FA35 L5 W60	1	1885	1885	100
		2	711	1885	38
		5	172	1885	9
		7.5	32	1885	2
C44	SCG1 FA30 L10 W60	1	1885	1885	100
		2	422	1885	22
		5	33	1885	2
		7.5	0	1885	0
C45	SCG1 FA25 L15 W60	1	1652	1885	88
		2	790	1885	42
		5	30	1885	2
		7.5	0	1885	0
C46	SCGSEA W40	1	851	1885	45
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C47	SCGSEA W30	1	799	1885	42
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C48	SCGSEA W35	1	955	1885	51
		2	76	1885	4
		5	156	1885	8
		7.5	0	1885	0
C49	Marine GGBFS W40	1	507	1885	27
		2	238	1885	13
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C50	Marine GGBFS W50	1	384	1885	20
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C51	Marine GGBFS W60	1	1885	1885	100
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0
C52	SCGSEA W25	1	299	1885	16
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0

Code on sample	Mix designation	Covering of steel in concrete (cm)	Area of lateral surface corrosion cm <sup>2</sup>	Lateral surface area of steel (cm <sup>2</sup> )	Corrosion of lateral surface area (%)
C53	SCGSEAW30	1	1065	1885	56
		2	0	1885	0
		5	0	1885	0
		7.5	0	1885	0

## ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช (Asst. Prof. Dr. Taweechai Sumranwanich)

ที่ทำงาน: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง

จังหวัดชลบุรี 20131

โทรศัพท์ : 0 3810 2222 ต่อ 3310, 3356

โทรสาร : 0 3874 5806

โทรศัพท์มือถือ : 081-862 1230

E-mail: [twc@buu.ac.th](mailto:twc@buu.ac.th)

Website: [www.cebuu.net](http://www.cebuu.net)

### วุฒิการศึกษา

- ปรัชญาคุณวุฒิบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2547
- วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโครงสร้าง) สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย 2540
- วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2538

### ประสบการณ์การทำงาน

15 มิ.ย. 2541 - ปัจจุบัน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

มิ.ย. 2540 - เม.ย. 2541

บริษัท พีดับบลิวเอชแอล วิศวกรที่ปรึกษา จำกัด

อาคารกุหลาบ ถนนบางนา-ตราด อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540

เม.ย. 2538 - ส.ค. 2538

บริษัท เมโทร โปลิเตน เอ็นจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์ จำกัด

19/2 ถนนสุขุมวิท ซอย 23 (ประสานมิตร) กรุงเทพฯ 10110

### งานวิจัยที่สนใจ

- การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์ (Corrosion of steel in concrete due to chloride attack)
- ความคงทนของคอนกรีต (Durability of concrete)
- คอนกรีตเสริมเส้นใย (Fiber-reinforced concrete)
- โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเส้นใย (Reinforced concrete structures with fibers)
- คานคอนกรีตเสริมแท่ง FRP (FRP-reinforced concrete beam)

## ความเชี่ยวชาญ

- สอนและวิจัยด้านวิศวกรรมคอนกรีตและวัสดุ
- ออกแบบโครงสร้าง
- ตรวจสอบอาคารตามกฎหมายควบคุมอาคาร

## สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- วุฒิสมาชิก สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) หมายเลข 1/021871
- กรรมการวิชาการ และสามัญสมาชิก สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.) หมายเลข 0008

## ใบอนุญาตผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรม

- สามัญวิศวกรโยธา สภาวิศวกร หมายเลข สย.8171

## ใบอนุญาตผู้ตรวจสอบอาคาร

- ผู้ตรวจสอบอาคาร บุคคลธรรมดา กรมโยธาธิการและผังเมือง เลขที่ บ.0951/2550

## รางวัลที่ได้รับ

- รางวัล “รัตนบูรพา” สาขาการบริการวิชาการ ประจำปี 2556 จากมหาวิทยาลัยบูรพา
- รางวัลผลงานวิจัยดีเด่น สภาวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2559 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ จากผลงานเรื่อง “การพัฒนามาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตโดยคำนึงถึงความคงทนและอายุการใช้งาน” ร่วมกับคณะวิจัยทั้งหมด 11 คน โดยมี ศ.ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล เป็นหัวหน้าคณะวิจัย