

การแทรกซึมเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม
และโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

CHLORIDE PENETRATION OF CONCRETE USING INDUSTRIAL
WASTES AND CONCRETE STRUCTURES IN MARINE
ENVIRONMENT

ชวฤทธิ์ ยะวิญชาญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การแทรกซึมเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม
และโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล

ชูวฤทธิ์ ยะวิญชาญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแทรกซึมเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมและโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล
ชื่อ – นามสกุล	นายชวฤทธิ์ ยะวิญญาญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศักดิ์กร้ามาตร, ปร.ค.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทิวชัย สำราญวานิช, ปร.ค.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการนำวัสดุวัสดุกากอุตสาหกรรมมาใช้ในงานคอนกรีต เพื่อพัฒนาปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้มีความสามารถในด้านต่างๆให้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านกำลังการรับน้ำหนักและความคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆในระยะยาวได้

การวิจัยครั้งนี้จึงได้มุ่งเน้นไปที่การนำเอาเม็ดลอมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GGBS) ซิลิกาฟุ้งร่วมด้วยผงหินปูน โดยวัสดุเหล่านี้ต่างเป็นวัสดุกากอุตสาหกรรมแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เพื่อพัฒนาคอนกรีตที่เผชิญกับคลอไรด์ส่วน โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง พบว่าความเสียหายส่วนใหญ่เนื่องจากการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเม็ดลอม GGBS ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูนนั้นมีค่าลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นจากผิวหน้าของคอนกรีต โดยคอนกรีตผสมเม็ดลอม GGBS ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูนสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้มากกว่าของคอนกรีต OPC ล้วน นอกจากนี้อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตผสมเม็ดลอม GGBS และผงหินปูน มีค่ามากกว่าในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟุ้งมีค่าไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีต OPC ล้วน และการใช้เม็ดลอมและ GGBS แทนที่บางส่วนของ OPC สามารถลดสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Da) ได้มากกว่า ในขณะที่การใช้ซิลิกาฟุ้งและผงหินปูนก็ยังมีแนวโน้มที่สามารถลด Da ได้มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีต OPC ล้วนสำหรับกรณีโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเลนั้นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นจากผิวหน้าของคอนกรีตสุดท้ายพบว่า Da ของโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเลลดลงเมื่อมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นแต่มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตน้อยลง เช่นเดียวกับคอนกรีตผสมเม็ดลอม GGBS ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูนที่สัมผัสเกลือคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: วัสดุกากอุตสาหกรรม การแทรกซึมคลอไรด์สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ โครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเล

Thesis Title	Chloride Penetration of Concrete Using Industrial Wastes and Concrete Structures in Marine Environment
Name – Surname	Mr. Choovarit Yawinchant
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Assistant Professor Taweechai Sumranwanich, Ph.D.
Academic Year	2016

ABSTRACT

At present, industrial waste materials are used in concrete to improve the quality of concrete to be able to better, especially in terms of long-term of compressive strength and durability of concrete structures in various environments.

This research had focused on concrete using fly ash (FA), ground granulated blast-furnace slag (GGBS), silica fume (SF) and limestone powder (LP). By partial replacement of these industrial materials in type 1 Portland cement (OPC) improved concrete exposed to chloride environment. In case of the concrete structures were located in the real sea environment, it was found that the damage was mainly due to the chloride penetration in the concrete.

The results shown that the total chloride content of concrete with FA, GGBS, SF and LP decreases with increasing distance from concrete surface. Concrete mixed with FA, GGBS, SF and LP had lower chloride penetration than OPC concrete. In addition, the values of fixed chloride ratio (FCR) of concrete with FA, GGBS and LP were greater than those of OPC concrete, while the FCR of concrete with SF was not different when compared to that of OPC concrete. Also, the use of FA and GGBS partially replacing in OPC can greatly reduce the chloride diffusion coefficient (D_a) than that of OPC concrete. While the use of SF and LP shown the trend of the reduction of D_a compared to that of OPC concrete. For concrete structures in marine environment, both of the total chloride and free chloride decreases with increasing distance from concrete surface. Lastly, the D_a of concrete structures exposed to marine environmental conditions decrease upon longer service life, but it was more likely when the strength of concrete was less. As with concrete with FA, GGBS, SF and LP exposed to chloride in the laboratory.

Keywords: industrial wastes, chloride penetration, chloride diffusion coefficient, concrete structures in marine environment

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติสาคด์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวิชัย สำราญวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาแนะนำและเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยจนสำเร็จ ขอขอบพระคุณ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ และดร.ภักววัฒน์ แสนเจริญ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ และประสบการณ์ทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณเจ้าของพื้นที่เทศบาลตำบลบ้านฉาง เทศบาลตำบลพลา และวัดพลา ตำบลพลา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยองที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ ในการเก็บตัวอย่างข้อมูล อาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ชั้นและ 5 ชั้น ทำเทียบเรือสะพานปลา เชื้อนป้องกันตลิ่ง สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กข้ามคลองพลา ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิริธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการ ทดสอบ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรีที่ช่วยเหลือในการเก็บ ตัวอย่างและทำการทดสอบในครั้งนี้ด้วย ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนในการทำวิจัยที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ผู้ทำวิจัยต้องกราบขอภัยเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดสำคัญยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมักร คุณแม่บัวผัน ะวิญญาญ ที่ให้ทุก สิ่งทุกอย่างในชีวิต ซึ่งได้มาด้วยความอยากลำบากและด้วยหยาดเหงื่อของท่าน ให้โอกาสลูกได้มี โอกาสได้ศึกษาเล่าเรียนจนได้ถึงระดับนี้

ชูวฤทธิ์ ะวิญญาญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	11
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	11
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	13
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	48
3.1 การทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ.....	48
3.2 การศึกษาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ใน โครงสร้างจริงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณ ชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง.....	51
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	67
4.1 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ.....	67
4.2 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้าง จริงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล จังหวัดระยอง.....	83
บทที่ 5 สรุป.....	91
บรรณานุกรม.....	92

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	96
ข้อมูลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต.....	97
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	122



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	19
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545.....	20
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ.....	21
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา.....	30
ตารางที่ 2.5 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ.....	29
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ (โดยน้ำหนัก: กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	50
ตารางที่ 3.2 ประเภทและชื่อ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สถานที่ตั้งและระยะทางจากชายฝั่ง ทะเลในการเก็บตัวอย่าง.....	52
ตารางที่ 4.1 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเล บริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง.....	68
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา.....	68
ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสม เถ้าลอย ตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก.....	69
ตารางที่ 4.4 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของ คอนกรีต ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	72
ตารางที่ 4.5 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเล บริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง.....	84

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์.....	27
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างความเสียหายเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์	28
รูปที่ 2.3 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต	29
รูปที่ 2.4 กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	31
รูปที่ 2.5 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล	32
รูปที่ 2.6 ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	33
รูปที่ 2.7 โครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล	34
รูปที่ 2.8 แผนภาพประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต	36
รูปที่ 3.1 ตำแหน่งที่ตั้งของอาคาร คสล. 3 ชั้น บริเวณชายฝั่งทะเล ต.บ้านฉาง อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	53
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายสถานที่จริงอาคารค.ส.ล. 3 ชั้น	53
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งที่ตั้งของอาคาร คสล. 5 ชั้น บริเวณชายฝั่งทะเล ต.บ้านฉาง อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	54
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายสถานที่จริงอาคารค.ส.ล. 5 ชั้น	54
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งที่ตั้งของท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1) ม. 5 ต.พลา อ.บ้านฉาง จ.ระยอง.....	55
รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายสถานที่จริงท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1)	55
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งที่ตั้งของท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 2) ม. 5 ต.พลา อ.บ้านฉาง จ.ระยอง.....	56
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายสถานที่จริงท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 2)	56
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งที่ตั้งของเขื่อนป้องกันคลื่นบริเวณชายฝั่งทะเล ม. 4 ต.บ้านฉาง อ.บ้านฉาง	57
รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายสถานที่จริงเขื่อนป้องกันคลื่น	57
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งที่ตั้งของสะพาน คสล. ซึ่งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ต.พลา อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	58
รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายสถานที่จริงสะพาน คสล.	58
รูปที่ 3.13 การวัดค่า Rebound number ด้วยเครื่อง Schmidt hammer ที่ผิวหน้าของโครงสร้าง	59
รูปที่ 3.14 การตัดผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อเก็บตัวอย่างผกคอนกรีต	60
รูปที่ 3.15 การเจาะตัวอย่างผกคอนกรีตเพื่อหาการกระจายตัวของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	60
รูปที่ 3.16 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	61
รูปที่ 3.17 เครื่องเจียรไฟฟ้า	61

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.18 ส่วนไฟฟ้า.....	62
รูปที่ 3.19 Schmidt hammer	62
รูปที่ 3.20 เครื่องดูด (Suction apparatus).....	63
รูปที่ 3.21 เครื่องต้ม (Hot plate)	63
รูปที่ 3.22 เครื่อง Auto Titration.....	64
รูปที่ 3.23 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance).....	64
รูปที่ 3.24 กรดไนตริก (Nitric acid)	65
รูปที่ 3.25 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide).....	65
รูปที่ 3.26 การหาปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธี Potentiometric titration.....	66
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เกลือย ตะกรันเตาหลอมเหล็กบดละเอียดละเอียด และผงหินปูน	69
รูปที่ 4.2 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน.....	77
รูปที่ 4.3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน.....	80
รูปที่ 4.4 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของอาคาร ค.ศ.ล. 3 ชั้น	86
รูปที่ 4.5 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของอาคาร ค.ศ.ล. 5 ชั้น	86
รูปที่ 4.6 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ บริเวณทำเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1)	87
รูปที่ 4.7 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ บริเวณทำเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 2)	88
รูปที่ 4.8 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของเขื่อนป้องกันตลิ่ง.....	88
รูปที่ 4.9 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ สะพานปลาแม่น้ำ ม.5 ต.ปลา อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	89
รูปที่ 4.10 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต....	90
รูปที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตกับเวลา.....	90

บทที่ 1

บทนำ

1.1ความเป็นมาของปัญหา

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการพัฒนาเถ้าลอยจากถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นสารปอซโซลาน มาใช้งานคอนกรีตซึ่งเป็นผลผลิตที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมาใช้ในการรูปแบบของการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า [1, 2, 3] การนำเถ้าลอยมาใช้งานคอนกรีต ทำให้ความสามารถไหลของคอนกรีตดีขึ้น ทำให้ลดอุณหภูมิของคอนกรีต ลดความสามารถในการซึมผ่าน อัตราการแพร่กระจายของความชื้นและสารละลายเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตมากขึ้น ลดการกัดกร่อนของซัลเฟต เพิ่มความทนทานและกำลังอัดประลัยในระยะยาว และผงหินปูน (Limestone powder) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ พบว่า มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมสารปอซโซลานหลายชนิด ดังนั้นจึงน่าจะศึกษาค้นคว้าโดยนำข้อดีของผงหินปูนกับเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานมาหาสัดส่วนที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามในส่วนของการเติมเตาถลุงเหล็กบดละเอียดละเอียด (Ground granulated blast-furnace slag) ซึ่งเป็นผลผลิตเหลือจากกระบวนการถลุงเหล็ก และซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) ซึ่งเป็นสารปอซโซลานชนิดหนึ่ง ดังนั้นการนำเอาวัสดุดังกล่าวซึ่งเป็นวัสดุจากอุตสาหกรรมมาผสมในคอนกรีตก็น่าจะเป็นแนวทางในการป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น และเป็นแนวทางที่จะนำไปสู่การพัฒนาคุณภาพคอนกรีตต่อไป

ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพและมีอายุการใช้งานน้อยกว่าที่ต้องการเป็นผลเนื่องจากในขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ผู้ออกแบบจะคำนึงถึงความแข็งแรงของโครงสร้าง กับคุณสมบัติด้านกำลังและความสามารถในการเทได้คอนกรีตเพียง

เท่านั้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวได้มาจากผลการทดสอบคอนกรีตตามอายุที่กำหนด โดยส่วนมากมักพิจารณาที่ 28 วัน เป็นหลัก แต่ไม่ได้คำนึงถึงสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นต้องตั้งอยู่ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วสภาพแวดล้อมนั้นมีผลต่อสภาพคอนกรีตอยู่ตลอดเวลา อาทิเช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในบริเวณชายฝั่งทะเล ต้องสัมผัสกับน้ำทะเลตลอดเวลา ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ จากการกัดเซาะ การชะล้าง การทำลายเนื้อคอนกรีตโดยเกลือซัลเฟตและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต ทั้งนี้เพราะว่าคอนกรีตมีลักษณะเป็นวัสดุพรุนที่มีโครงสร้างโพรงช่องว่าง (Pore structure) กระจายอยู่ในเนื้อคอนกรีตและมีต่อเนื่องกันจึงทำให้ทั้งก๊าซ ความชื้นและอิออนของสารเคมีต่างๆ สามารถแทรกซึมผ่านระบบโพรงเข้าสู่คอนกรีตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกลือคลอไรด์ที่มีมากในน้ำทะเล สามารถแทรกซึมผ่านเนื้อคอนกรีตเข้าไปถึงเหล็กเสริมภายในได้ และเมื่อมีปริมาณเกลือคลอไรด์มากถึงค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต(Threshold chloride content) ของคอนกรีตก็จะทำให้ชั้นฟิล์มออกไซด์ของเหล็กเสริมถูกทำลายลง ส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิม และเนื้อสนิมดันเนื้อคอนกรีตให้แตกร้าวและทำให้กำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง รวมถึงอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงด้วย ซึ่งต้องสิ้นเปลืองงบประมาณเป็นจำนวนมากในการซ่อมแซมและแก้ไขปัญหาดังนั้นหากผู้ออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทราบถึงความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในโครงสร้าง ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงการออกแบบ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีทั้งความแข็งแรงและความคงทนต่อสภาพแวดล้อมที่เข้ามาทำลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล

จากที่กล่าวมา การวิจัยครั้งนี้จึงได้มุ่งเน้นไปที่การนำเอาถ้ำลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียดละเอียด และซิลิกาฟูม ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน ร่วมกับผงหินปูน (เป็นวัสดุเติมเต็ม) ซึ่งต่างก็เป็นวัสดุภาคอุตสาหกรรม มาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนผสมในคอนกรีตที่เสื่อมสภาพจากสาเหตุของคลอไรด์ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้วัสดุภาคอุตสาหกรรมดังกล่าวกับโครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้นต่อไปนอกจากนี้ในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้ศึกษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง โดยมุ่งเน้นไปที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ซึ่งพบว่ามีความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นจำนวนมาก โดยได้ทำการศึกษาถึงการแทรกซึมของคลอไรด์ ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล บริเวณชายฝั่งของจังหวัดระยอง โดยพิจารณาถึง ระยะทางที่ห่างจากชายฝั่งทะเล อายุของโครงสร้างนั้นๆนับจากที่เริ่มเผชิญกับคลอไรด์ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด รวมถึงกำลังอัดของคอนกรีตด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา

1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

1.2.3 เพื่อศึกษากำลังอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลของจังหวัดระยอง

1.2.4 เพื่อศึกษาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมคลอไรด์ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลของจังหวัดระยอง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการมีขอบเขตดังนี้

1) วัตถุประสงค์ที่ใช้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

2) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

3) ทดสอบคุณภาพเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

4) ทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาการศึกษาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างจริงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง มีขอบเขตดังนี้

1) อาคาร โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง ประกอบด้วย อาคาร ค.ส.ล. 3 ชั้น อาคาร ค.ส.ล. 5 ชั้น ทำเทียบเรือสะพานปลาเขื่อนป้องกันคลื่นและสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

2) ทำการทดสอบกำลังอัดแบบไม่ทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ใน
สิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลของจังหวัดระยอง

3) ทำการเก็บผงตัวอย่างที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและเจาะเก็บผล
ตัวอย่างคอนกรีตตามความลึกจากผิวหน้าโครงสร้างเพื่อหาการกระจายตัวการแทรกซึมของคลอไรด์
ในคอนกรีตโครงสร้างภายใต้สภาพแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง

4) วิเคราะห์ผลการศึกษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

1.4.1 ทราบคุณสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้าวัยตะกัณเตา
ถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

1.4.2 ทราบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตผสมถ้าวัยตะกัณเตาถลุง
เหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

1.4.3 ทราบกำลังอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่
ในสิ่งแวดล้อมทะเล บริเวณชายฝั่งทะเลของจังหวัดระยอง

1.4.4 ทราบปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมคลอไรด์ของโครงสร้าง
คอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลของจังหวัดระยอง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องนั้นจะกล่าวถึงพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ วัสดุปอซโซลาน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เถ้าลอย ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และสารผสมเพิ่ม ประเภทคริสตัลไลน์ รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานทางด้านคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตและคุณสมบัติในการต้านทานซัลเฟตโดยมีรายละเอียดดังนี้ [4]

2.1.1 ปฏิกริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

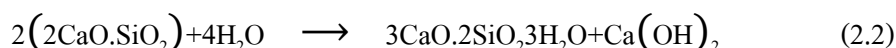
ก. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.1



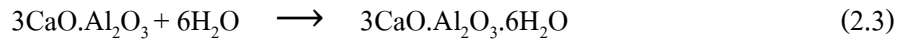
ข. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2



ค. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3

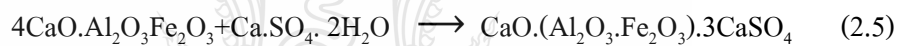


เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum : $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆ ของเอตริงไจท์ (Ettringite : $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Ca}\cdot\text{SO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.4



ง. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ 2.5



เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดขึ้นเคลือบของเอตริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของไอออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งทำให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้เอตริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอไรท์แคลเซียมซัลไฟด์ ยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.1.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และหรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่าปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.1.2.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลานมีสองชนิด คือชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

ก) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) หินภูมิไซต์ (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อต้องการนำไปใช้งานจะต้องนำมาบดก่อน

ข) ปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

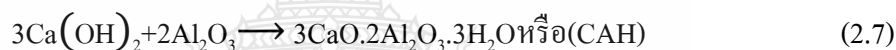
2.1.2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่ง

แคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ (2.6) ถึง (2.7) ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



2.1.3 เถ้าลอย [4]

เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์จำพวกสารปอซโซลานสังเคราะห์หรือปอซโซลานคัดแปลงประเภทหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (Electrostatic precipitation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า

2.1.3.1 ชนิดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

ก) เถ้าลอย ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica : SiO₂) และอลูมินา (Alumina : Al₂O₃) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric oxide : Fe₂O₃) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.2 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide :

CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียว และควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

ข) เถ้าลอย ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และชั้นบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ 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 2.1 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [5]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O , ร้อยละ	1.5	1.5

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าถ่านออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวมา ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ได้แนะนำว่า ควรใช้เถ้าถ่านหิน Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class C เนื่องจากพบว่า เถ้าถ่านหิน Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์ มากกว่าเพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าถ่านหิน Class F

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก. 2135-2545) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยถ่านหิน ใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็น วัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมี ได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดัง ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 [6]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้น คุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้น คุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO ₂) อย่างต่ำ, ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO), ร้อยละ	-	น้อยกว่า 10.0	น้อยกว่า 10.0	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) อย่างมาก, ร้อยละ	5.0	5.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก, ร้อยละ	3.0	3.0	2.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมา, ร้อยละ	6.0	6.0	6.0	6.0

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา และลักษณะการเผาถ่านหิน อย่างไรก็ตามก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้งานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมี โดย ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [7]

ตัวอย่าง เถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

2.1.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) ไอออนออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และมี แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na₂O, K₂O) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H₂O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition : LOI) SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80 ถึง 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ ของเถ้าลอยไว้ร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

2.1.3.3 ปฏิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

ปฏิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิริยาไฮเดรชัน (hydration) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.10 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO.2SiO₂.3H₂O หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในนี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) และอลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) จะทำปฏิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ 2.6 และ/หรือสมการที่ 2.7 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic

reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.1.4 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (blast-furnace slag) คือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่หลอมละลายพร้อมกันกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก นอกจากนี้ยังให้คำจำกัดความของเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก (granulated blast-furnace slag) หมายถึงเม็ดวัสดุที่ไม่เป็นผลึกซึ่งได้จากการทำตะกรันที่หลอมเหลวในเตาถลุงเหล็กให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดเพื่อให้ตะกรันเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ตะกรันเตาถลุงเหล็กนอกจากจะใช้เป็นวัสดุเติมในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ปูนขาวอิมตัว (hydrated lime) ยิปซัม หรือ แอนไฮไดรต์ (anhydrite) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีตมีข้อดี 2 ประการคือ สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และสามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้

องค์ประกอบทางเคมี ตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินา เป็นหลักซึ่งปนมากับ สินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูนและหินโคลไลไม่ต้องประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่า ร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นๆ ที่ติดมาเช่น SO_3 , Fe_2O_3 และ MnO อยู่เล็กน้อย ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดาใน ค.ศ. 1988 แม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในตารางที่ 1 จะแตกต่างกันมาก แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะแต่ละโรงงานจะพบว่ามีความแตกต่างกันไม่มาก การที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูง (มากกว่า ร้อยละ 30 ขึ้นไป) จึงทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
SiO ₂	32-40
Al ₂ O ₃	7-16
CaO	32-45
MgO	5-15
SO ₃	0.7-2.2
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5
MnO	0.2-1.0

2.1.5 ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume)

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมทัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันควอร์ตที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอของ SiO ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็น ซิลิกอน ไดออกไซด์ (SiO₂) ขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึกและมีรูปร่างกลม ซิลิกาฟุ้ง จะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูง และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาซิลิกาฟุ้งในงานคอนกรีตคือส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิม เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟุ้ง ทำให้พื้นที่ผิวสูงมากจึงต้องการปริมาณน้ำในการหล่อลื่นพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงขึ้นด้วย

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO₂ ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมี SiO₂ มากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O และออกไซด์อื่นๆอีกร้อยละ 1 หรือ 2

คุณสมบัติทางกายภาพที่เห็นชัดเจนคือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมากสีเทาดำหรือเทาอมขาว ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ้งมีค่าประมาณ 2.2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตรมีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

2.1.6 ผงหินปูน (Limestone powder)

ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO₃) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (inert material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (reactive material) มีรายละเอียดดังนี้

2.1.6.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยในการลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO₃) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และ/หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9



2.1.6.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.10



โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2

การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เพื่อนำมาใช้ร่วมกันให้เกิดประสิทธิภาพนั้นต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสมอีกทั้งต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.1.7 คลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวกลางที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลงและหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

2.1.7.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่นมีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราซ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทราซจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ที่มีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตามได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ ในคอนกรีตสด (วสท. 1014 – 40) แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีต ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน ซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตโดยโดยวิธีดังต่อไปนี้

ก) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ เป็นส่วนประกอบ (Capillary Suction)

ข) การแพร่ของอิออนคลอไรด์ (Chloride diffusion) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าไปสู่ความเข้มข้นของคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีต

ค) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวสัมผัส กับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความ

เข้มข้นคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่าง ของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้น ของคลอไรด์ใน สิ่งแวดล้อม ได้ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation เกิดใน 2 ลักษณะดังนี้

1) ในกรณีของสภาวะเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิวหน้า คอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวคอนกรีต ทั้งเกลือไว้ในบริเวณผิว คอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่ภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว

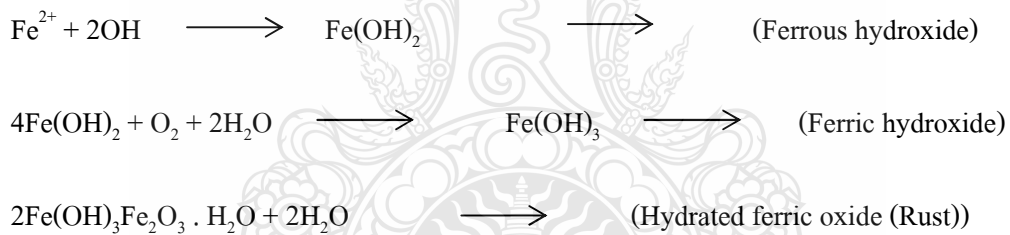
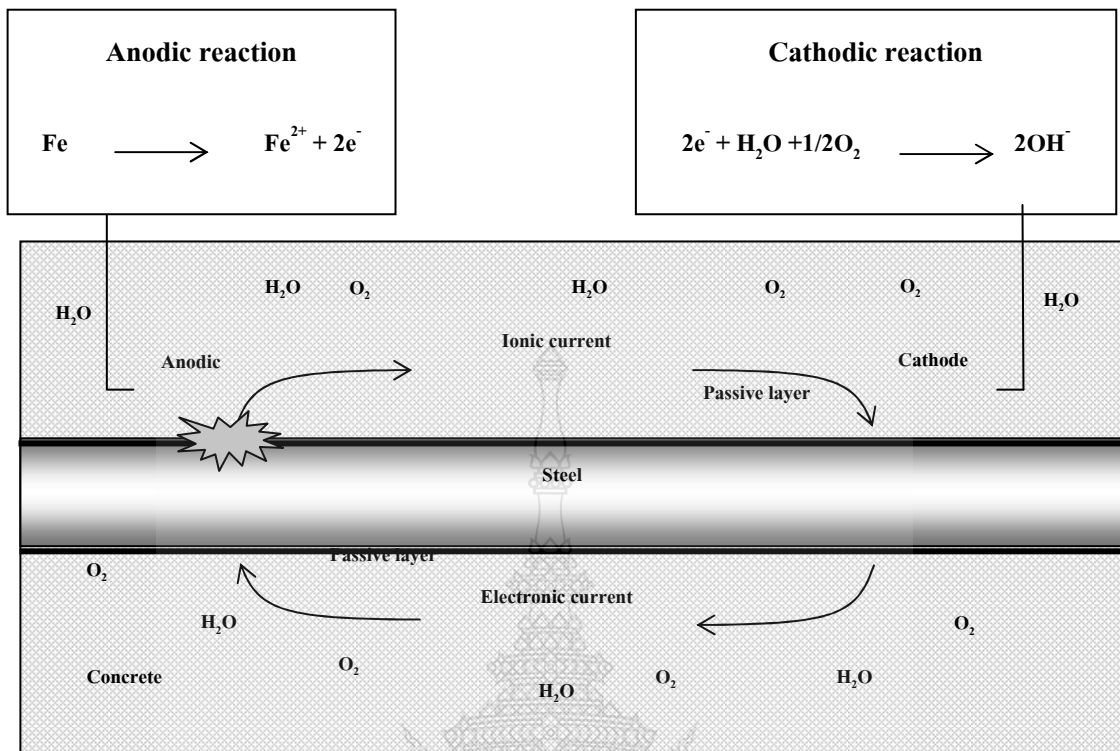
2) ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ใน กรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อม สามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน เช่น (C-S-H) จะมีคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าเป็นบวกสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ตามสภาพของ สิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้ไม่มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อ เหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ในบริเวณที่ติดกับคอนกรีต จะมี ส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขา วิศวกรรมโยธา ว.ส.ท., 2543)

2.1.7.2 กลไกการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์

ณัฐมนต์ กัมปนานนท์และจุลเศรษฐ์ กฤษณะภักดี [8] ปริมาณเกลือคลอไรด์ เป็นสาเหตุที่สำคัญของการเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมของเหล็กเสริม และถ้าหากว่ามีปริมาณของคลอไรด์ในปริมาณที่มากพอในระหว่างการผสมคอนกรีต อาจส่งผลทำให้ Passivity Film ไม่เกิดขึ้นได้

ทวิชัย สาราญวานิช [9] โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของ “ปฏิกิริยา ไฟฟ้าเคมี” โดยมีคลอไรด์ประพัตติตัวในลักษณะคล้ายๆ กับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อน

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ [10] และชัยชาญ โชติถนอม [11] กล่าวว่า โดยปกติเหล็กเสริมในคอนกรีต จะมีชั้นของฟิล์มออกไซด์ (Protective passivity layer) บางๆ เคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กเสริม เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) แต่เมื่อใดก็ตามหากคลอไรด์ อีออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้ (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ชั้นของ ฟิล์มออกไซด์ดังกล่าวจะถูกทำลาย จนกระทั่งเมื่อใดที่ชั้นฟิล์มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤต (Critical value) เหล็กเสริมในบริเวณนั้นจะเกิดสนิม ซึ่งเราเรียกว่า (Depassivation) และใน ขณะเดียวกัน หากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่เหมาะสม กระบวนการทาง ไฟฟ้าเคมี ก็จะเกิดขึ้น



$$\frac{\text{Vol}_{\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}}{\text{Vol}_{\text{Steel}}} = 2 \rightarrow 10$$

คอนกรีตแตกร้าว และ หลุดร่อน

รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ [9]

กล่าวคือ บริเวณที่ฟิล์มถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ (Anode) ซึ่งเกิด “ปฏิกิริยาออกซิเดชัน” (Anodic reaction) ดังสมการต่อไปนี้



อิเล็กตรอน (e^-) ที่เกิดขึ้นนี้ จะวิ่งผ่านไปยังฟิล์มที่ไม่ได้ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathode) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนได้ก็จะเกิดเป็น ไฮดรอกไซด์ไอออน ($(OH)^-$) เป็น “ปฏิกิริยาคาโทดิก” (Cathodic reaction)



และในขณะเดียวกัน Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบ (Anode) ส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจน จนกระทั่งได้ เฟอริกไฮดรอกไซด์ (Ferric hydroxide) ดังสมการทางเคมีดังนี้

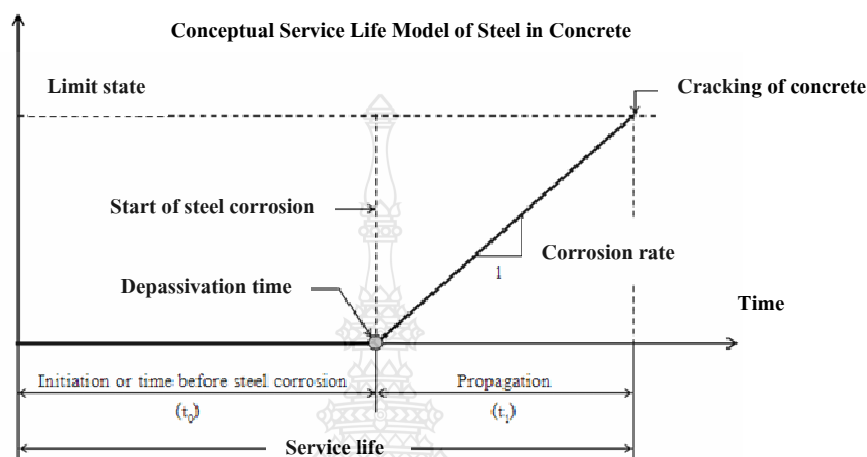


จากนั้น Fe^{2+} ที่เหลืออยู่อีกส่วนหนึ่งที่ขั้วลบนั้น จะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็น เฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride) และเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดสนิมเพิ่มเติมขึ้นมา ดังสมการทางเคมี ดังนี้



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างความเสียหายเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์

โดยกระบวนการในการเกิดสนิม จากสาเหตุของการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออน ผ่านเนื้อคอนกรีตนั้น สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอนคือ Initial period และ Propagation period ดังแสดงใน รูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต [9]

ก) Initial period หรือ ระยะเวลาช่วงแรก (t_0) หมายถึง ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่หล่อคอนกรีตเสร็จจนถึงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วงนี้คลอไรด์ไอออนจะแพร่ผ่านเข้ามาสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต นอกจากนั้นออกซิเจนและน้ำจะซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปยังเหล็กเสริมแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ซึ่งระยะเวลาช่วงแรก (t_0) นี้จะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ความสามารถซึมผ่านได้ของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต และความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม

ข) Propagation period หรือ ระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง (t_1) หมายถึง ช่วงระยะเวลาของการพัฒนาการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในคอนกรีต คือ เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งานจะเห็นได้ว่า คลอไรด์ไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อยนั้นจะมีผลกระทบต่อการกระตุ้นให้เกิดสนิมบนเหล็กเสริมได้ แต่สนิมเหล็กเองกลับไม่มีคลอไรด์ไอออนเป็นส่วนประกอบเลย

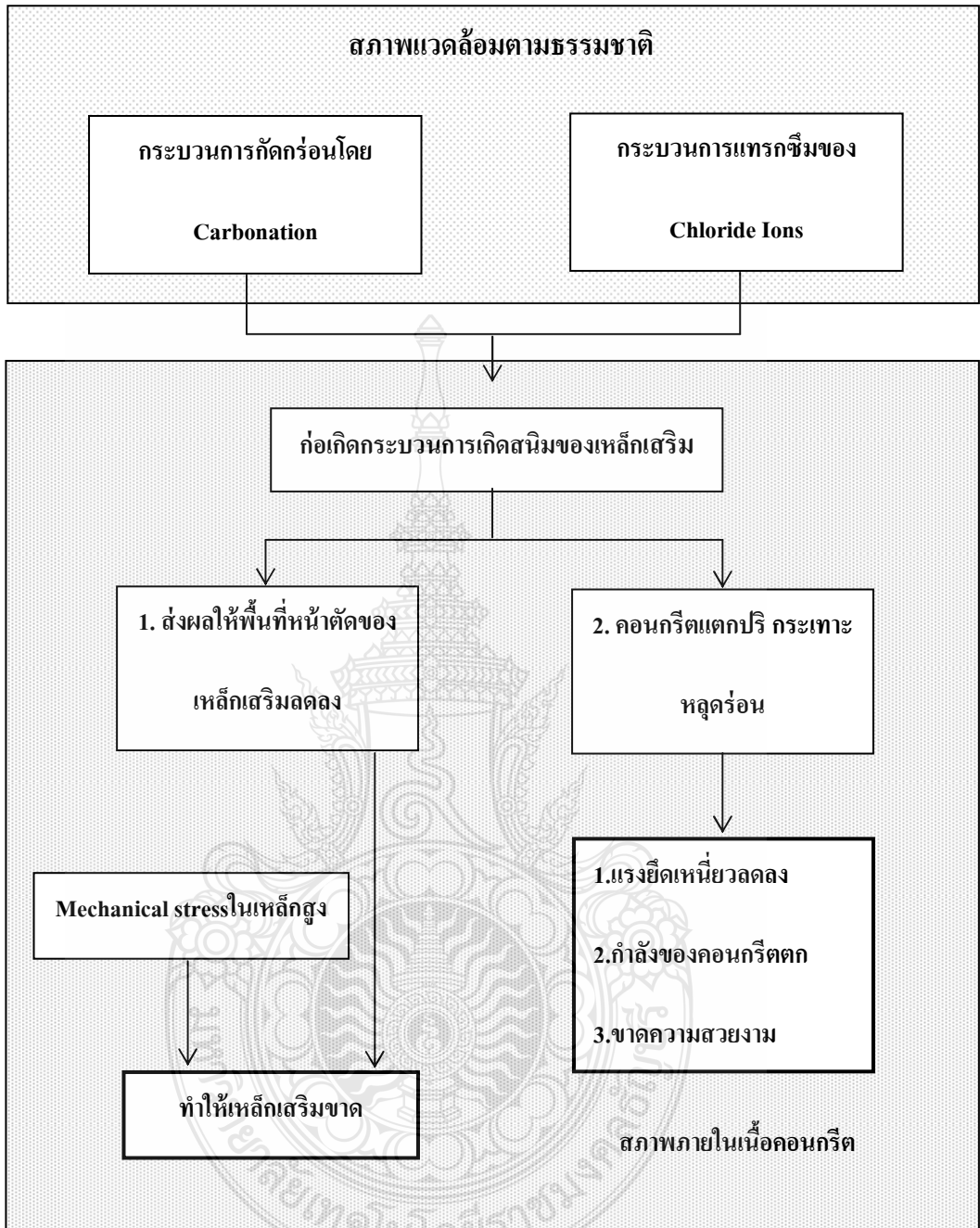
โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น จะทำให้เหล็กเสริมบริเวณขั้วลบลูกกัดกร่อนทำให้เหล็กเสริมมีขนาดหน้าตัดเล็กลง และเหล็กเสริมบริเวณขั้วบวกก็จะเกิดเป็นสนิม ซึ่งสนิมบนเหล็กเสริม ภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นนี้ จะมีการพัฒนาเพิ่มปริมาณมากขึ้น

เรื่อย ๆ ประมาณ 4-6 เท่า คำนึงให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่กะเพาะออก เมื่อการกัดกร่อนเกิดเพิ่มมากขึ้น คอนกรีตก็จะหลุดร่อนออกเป็นชั้น ๆ (Delamination) ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เป็นผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนี้สูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่นคงแข็งแรงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง อัตราการพัฒนากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมรอบ โครงสร้างนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 คือแผนภาพแสดงกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และรูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

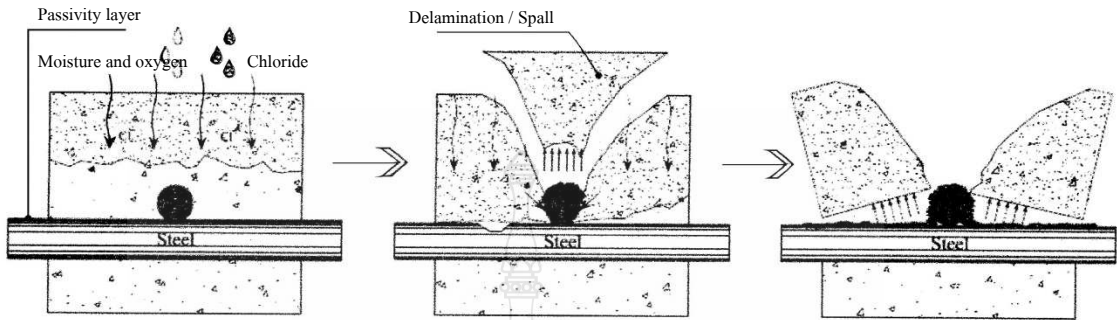
นอกจากการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออนผ่านเนื้อคอนกรีต จะเป็นสาเหตุของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันนี้จะลดความเป็นด่างของคอนกรีตลง ซึ่งความเป็นด่างของคอนกรีตนี้จะเป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมเกิดสนิมโดยปกติ ค่า pH ของคอนกรีตจะอยู่ระหว่าง 12-13 หากค่า pH ของคอนกรีตลดลงจนถึงจุดวิกฤตรวมทั้งมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ซึ่งค่า pH ก็จะเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่ามีโอกาสเกิดสนิมได้มากน้อยเพียงใด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ [12]

ค่า pH ของคอนกรีต	สภาพของสนิมภายในเหล็กเสริมคอนกรีต
ต่ำกว่า 9.5	เริ่มเกิดสนิมเล็กน้อยที่ผิว (ฟิล์มที่ผิวยังไม่หาย)
8.0	ฟิล์มที่เคลือบผิวเหล็กหายไป
ต่ำกว่า 7.0	เกิดสนิมอย่างรุนแรงที่ตัวของเหล็กเสริม



รูปที่ 2.4 กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [9]



รูปที่ 2.5 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล [9]

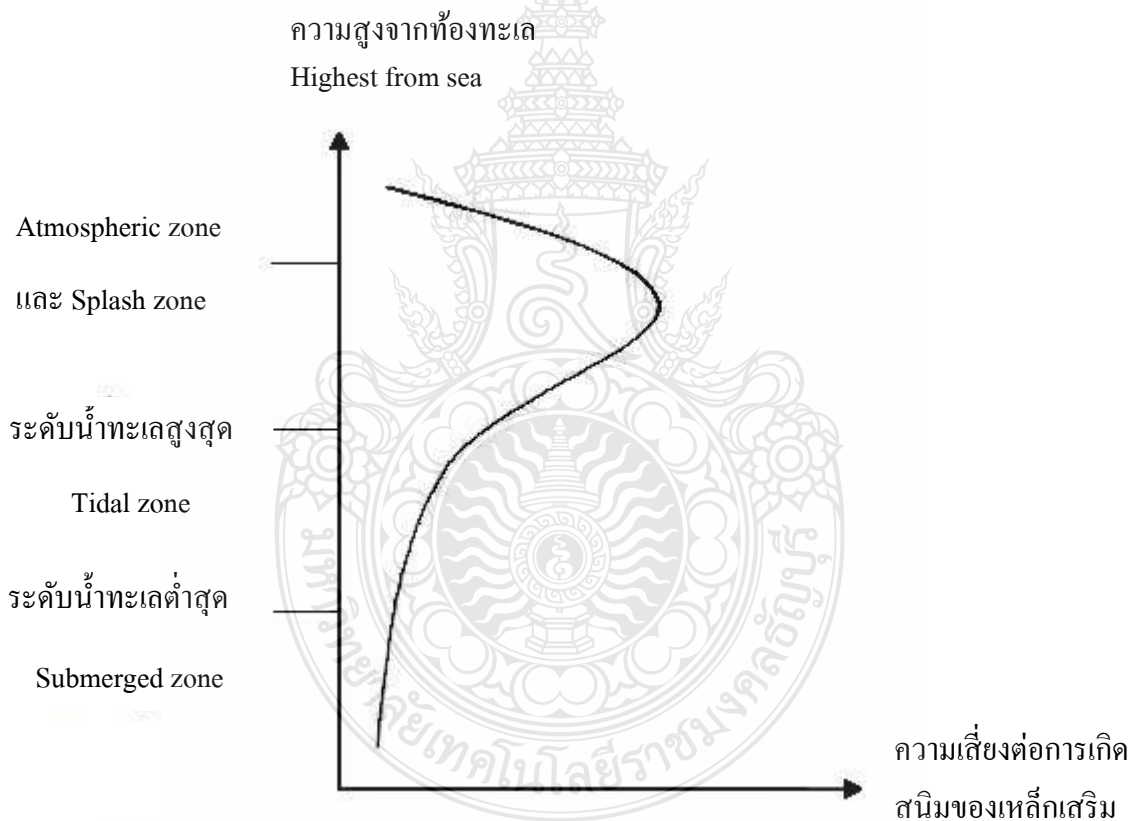
Soroka [13] คลอไรด์ไอออนจะเกิดขึ้นในน้ำคังนั้นจะเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ต่อเมื่อมีน้ำอยู่ในระบบโพรง กลไกที่เกิดขึ้นจะเป็นทั้งการดูดซึมน้ำแบบคาพิลลารี (Capillary suction) หรือการแพร่อย่างง่ายของไอออนของน้ำในโพรงที่อยู่ข้าง ในกรณีแรกจะเกิดกับคอนกรีตที่มีลักษณะค่อนข้างแห้ง น้ำจะพาคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต ในกรณีหลังจะเกิดกับคอนกรีตที่อิมตัวหรือค่อนข้างอิมตัว น้ำจะเป็นเสมือนตัวกลางให้คลอไรด์ไอออนแพร่เข้าไปในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่ต้องอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง จะเกิดกลไกขึ้นได้ทั้งสองกรณีซึ่งอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

Funahashi M. [14] การเกิดสนิมแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ Initial period จะเริ่มเมื่อคลอไรด์ไอออน ซึมผ่านเข้าไปสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤติ ซึ่งเป็นระดับที่ฟิล์มออกไซด์ที่เคลือบตามผิวเหล็กเสริมเกิดความเสียหาย โดยมีค่าปริมาณของคลอไรด์ในช่วงตั้งแต่ 0.20 – 1.33 กม./ม.³ หรือตั้งแต่ 75 – 1175 ppm. ของคอนกรีต และหลังจากนั้นจะเกิด Propagation period ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้า-เคมี ส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กขึ้นอย่างต่อเนื่อง

Bakker [15] ในกรณีที่คอนกรีตปนเปื้อนคลอไรด์ตั้งแต่ส่วนผสม การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ส่วนกรณีที่สัมผัสกับเกลือที่ละลายในน้ำทะเล ปริมาณของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามเวลา บางที่อาจนำไปสู่สภาวะที่คอนกรีตไม่สามารถปกป้องเหล็กเสริมจากการกัดกร่อนได้อีกต่อไป

2.1.7.3 ความเสี่ยงของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีมากที่สุด ในบริเวณโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณคลื่นละอองน้ำ รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมบนเหล็กเสริมในโครงสร้างได้น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.6



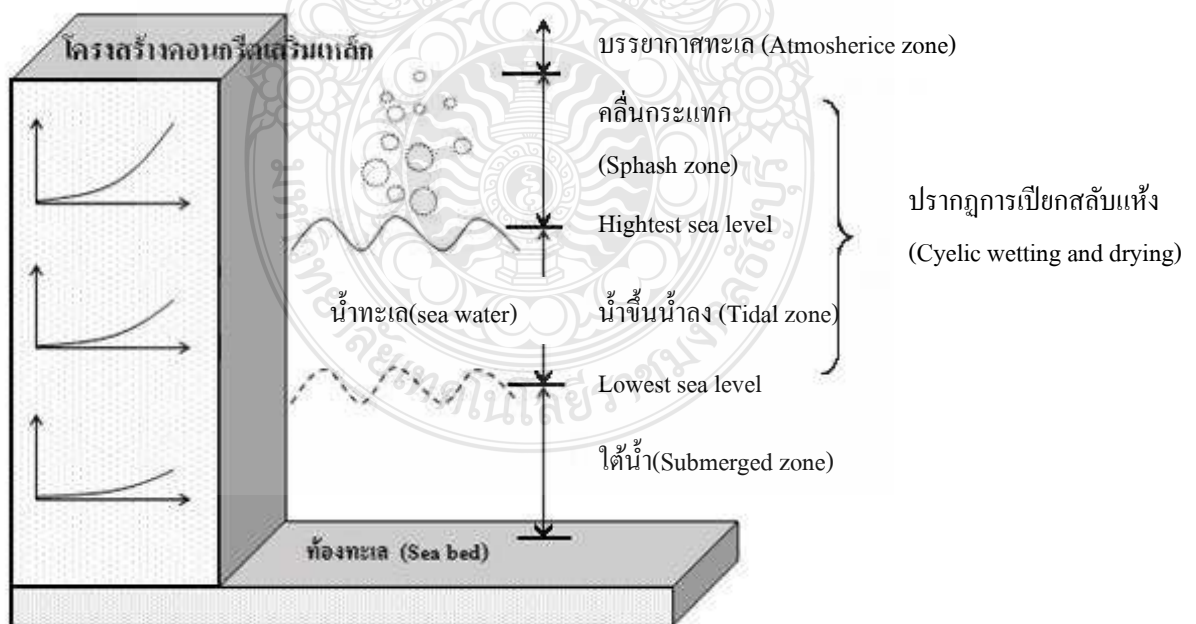
รูปที่ 2.6 ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [10]

การที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมบนเหล็กเสริมในโครงสร้างน้อยกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำ เนื่องจากช่องว่างภายใน

คอนกรีตอิมตัวด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนจะละลายในน้ำได้น้อยมาก เป็นผลทำให้อัตราการแพร่ในคอนกรีตเกิดขึ้นน้อย

ถึงแม้ว่า จะมีปริมาณออกซิเจนมากในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นก็จะถูกจำกัดไปด้วย อัตราการแพร่ของออกซิเจนที่ต่ำ ผ่านช่องว่างที่อิมตัวด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่สภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้ง โดยการแพร่ หรือการซึมผ่าน จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิมตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง น้ำที่ผิวที่ผิวของคอนกรีตจะระเหยออกไป ทั้งไว้แต่ทราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจะสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อคลอไรด์ไอออนที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต มีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และกระจายเข้าสู่ภายในคอนกรีต ทำให้คลอไรด์เข้าสู่บริเวณผิวของเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติคอนกรีตจะเปียกได้เร็วแต่จะแห้งได้ช้า และภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้น การแพร่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปในคอนกรีตของคลอไรด์ไอออนในสภาพเปียกสลับแห้งดังแสดงในรูปที่ 2.7 แบบจำลองของโครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล



รูปที่ 2.7 โครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล [9]

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางของลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และสภาพการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ส่วนนี้อาจจะประสบกับภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกันโดยทั่วไป คอนกรีตจะมีสภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกจะเร่งให้คลอไรด์ไอออนเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้น คอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง โดยมีช่วงแห้งที่นานกว่านั้น จะมีโอกาสเกิดปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้มากกว่า และสนิมจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ผิวของเหล็กเสริมมีมากพอที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเริ่มเกิดสนิมได้

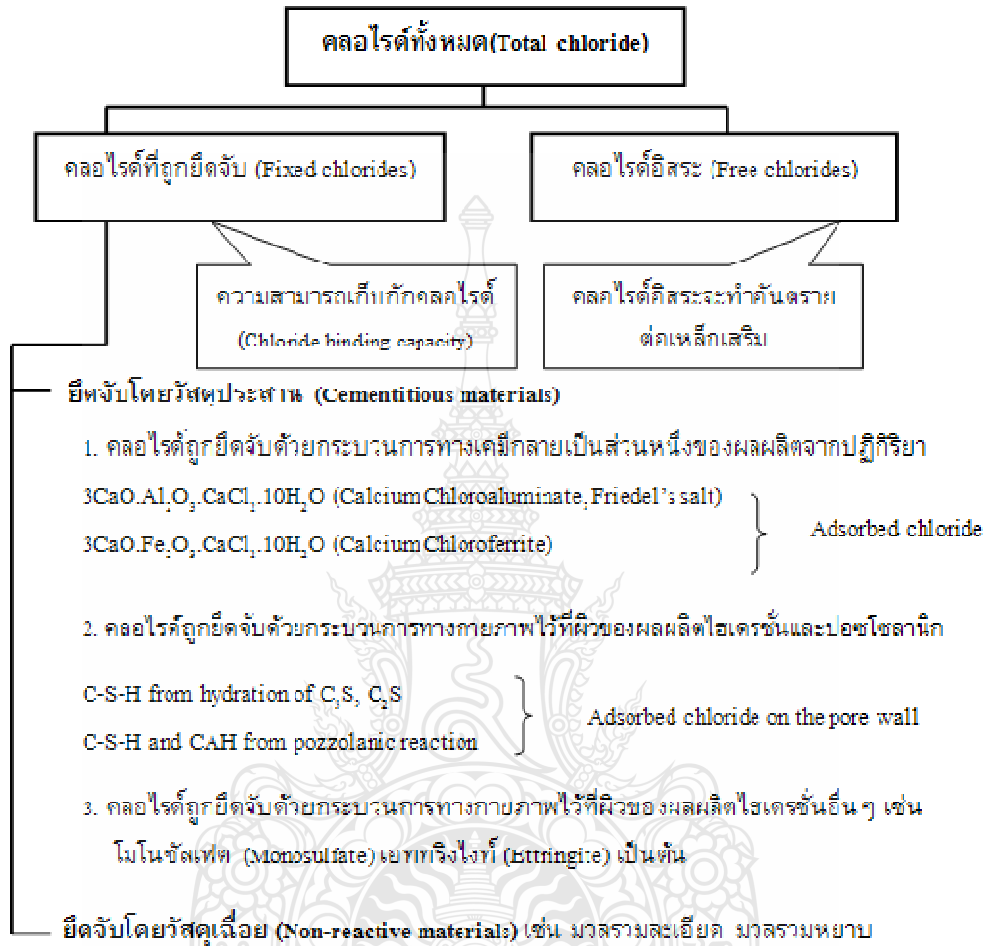
2.1.7.4 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ [10] การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ชนิดของแคลอไอออน ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้นๆเผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีตนั้นจะเป็นผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท (Total chloride) ได้แก่

ก.) คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คือ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับให้อยู่ในผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Friedal's salt) หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Calcium chloroferrite) และเกิดปฏิกิริยา โดยเปลี่ยนไปในรูปของ Calcium chloro-aluminate hydrate ที่เรียกว่า Friedel's salt หรือคลอไรด์ถูกยึดจับไว้ที่ผิวของ Gel pores และบางส่วนอาจถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic production) ของเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งคลอไรด์ประเภทนี้ไม่มีผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราช หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

ข.) คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่มีสภาพเป็นสารละลาย ซึ่งละลายอยู่ในน้ำ ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ซึ่งถ้ามีคลอไรด์ประเภทนี้ในปริมาณที่มากพอก็จะสามารถทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เปียกสลับแห้ง เช่น บริเวณคลื่นละอองน้ำ (Splash zone) หรือ บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) จะได้รับผลกระทบจากการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนที่ค่อนข้างรุนแรงกว่า โครงสร้างที่

อยู่ในสภาพเปียกตลอดเวลา เช่น บริเวณใต้ทะเล (Submerged zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ที่เป็นแผนภาพแสดงชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต



รูปที่ 2.8 แผนภาพประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต [9]

2.1.7.5 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

เนื่องจากคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำทะเล จึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่างๆของคอนกรีตได้ [11] ซึ่งจะมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเสื่อมสภาพลง โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไก และธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไก ดังนี้

1) การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่จะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อึดตัว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์ไอออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของไอออน โดยคลอไรด์ไอออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูงไปยัง บริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนต่ำ ซึ่งจะเป็นไปตามกฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งแสดงดังสมการดังนี้

$$\frac{\partial C_f(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial x^2} \quad (2.16)$$

โดยที่	$C_i(x,t)$	คือ	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)
	$C_f(x,t)$	คือ	ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)
	D_a	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม. ² /ปี)
	x	คือ	ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)
	t	คือ	ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

ทั้งนี้ คำตอบของสมการที่ (2.16) สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.17) ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

$$C_d = \frac{(C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_0}{B} \times 100 \quad (2.17)$$

โดยที่	C_d	คือ	ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
	C_s	คือ	ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (กก./ม ³)
	C_0	คือ	ปริมาณคลอไรด์ในปฏิภาคส่วนผสม
	c	คือ	ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม.)
	D_a	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม. ² /ปี)

t	คือ	อายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปี)
B	คือ	น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กก./ม. ³)

2.) การดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) โดยการดึงดูดแบบคาพิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเคลื่อนผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาอันสั้น

3.) การดูดซับไอออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต เท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนจะเกิดขึ้นเนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีตจะดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น

4.) แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูง ไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำและเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยที่ในคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตนั้นสัมผัสอยู่จะแพร่จากคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูง ไปสู่คอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำกว่า และเมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตแล้วคลอไรด์ก็จะแพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง ไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า จึงทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์ เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

2.1.7.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์และปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต

Dhir et al. [16] ในงานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาความต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต โดยใช้เกลือชนิดที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำในการศึกษา ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์และเพิ่มความสามารถในการยึดจับคลอไรด์อออน รวมถึงศึกษาถึงปริมาณการใช้เกลือในการใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต โดยปริมาณการใช้เกลือที่เหมาะสมที่สุดจะใช้เกลือแทนที่ปริมาณซีเมนต์ 30% โดยน้ำหนักของซีเมนต์

วิเชียร ชาลี [17] ศึกษาถึงผลกระทบของเถ้านหินต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหินในปริมาณต่างๆ และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ และ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของคอนกรีต โดยใช้กฎข้อที่ 2 ของ ฟิค(Fick's second law) พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตทุกส่วนอัตราส่วนผสมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาแช่น้ำทะเลนานขึ้น และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตลดลงเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหินสูงขึ้น

Ann et al. [18] ในงานวิจัยนี้ได้แสดงถึงปริมาณคลอไรด์อออนบนผิวหน้าของคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่สภาวะต่างๆ เช่น สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง สภาวะละอองคลื่น และสภาวะบรรยากาศ โดยปริมาณคลอไรด์อออนจะสะสมที่ผิวหน้ามากขึ้นตามอายุการใช้งาน และในการทำนายอัตราการเพิ่มขึ้นของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตนั้น จะต้องอยู่ในรูปแบบของสมการที่เหมาะสมซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งาน และจากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า การใช้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวเป็นค่าคงที่ จะส่งผลทำให้การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มีค่ามากขึ้นไป ซึ่งเมื่อมีรูปแบบของสมการปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวขึ้นอยู่กับเวลาในรูปแบบต่าง ๆ จะทำให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเกลือคลอไรด์นี้จะมีผลต่อความเสี่ยงของการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

Song et al. [19] ศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์(D_u) และปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_u) ใน

คอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ และ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้า จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของ เกลือคลอไรด์มีค่าลดลงและปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออายุการใช้งานนานขึ้น เนื่องจากการพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ และ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจะได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วนผสม ของคอนกรีต ปริมาณโพรงช่องว่างในคอนกรีต วิธีการบ่ม ลักษณะการเผชิญกับน้ำทะเล และฤดูกาล เป็นต้น ส่วนในคอนกรีตที่ใช้วัสดุอื่นๆแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นวัสดุประสาน จะมี ประโยชน์ในการทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ลดลง และจะส่งผลทำให้ปริมาณเกลือ คลอไรด์ที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนนั้นจะไปเติม โพรงช่องว่างของคอนกรีต และช่วยในการยึดจับเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

2.1.7.7 ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูญเสียการรับแรงลงไป เนื่องจากสาเหตุการเกิดสนิมมีอยู่ 2 ประการ คือ [20]

1.) ขนาดของเหล็กเสริมบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (เหล็กเสริมสูญเสีย อิเล็กตรอน) จะมีหน้าตัดของเหล็กเสริมเล็กลงอย่างต่อเนื่อง เนื้อเหล็กบางส่วนกลายเป็นสารละลาย (Fe^{2+}) และ อิเล็กตรอน (e^-) ทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเพื่อรับแรงของ โครงสร้างในบริเวณ นั้นๆลดลง

2.) การเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้ เกิดแรงดันต่อคอนกรีตที่อยู่บริเวณรอบๆเหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาณมากกว่าเนื้อ เหล็กเดิม ซึ่งในบางกรณีสนิมเหล็กเสริมอาจมีปริมาณที่มากกว่า 6 เท่าของเนื้อเหล็กเดิม โดยจะทำให้ คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่นั้นแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมได้ (Splitting crack)

ดังนั้น ผลกระทบโดยรวมจากสาเหตุข้างต้นนี้ คือ จะส่งผลทำให้กำลังรับ แรงของโครงสร้างนั้นลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานความล้า (Fatigue strength) และ ความสามารถในการแอ่นตัวหรือเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็จะลดลงด้วย นอกจากนี้ความยืดหยุ่น (Stiffness) ก็จะลดลง ทั้งนี้การเกิดรอยร้าวเป็นการเร่งให้น้ำ และออกซิเจน เข้า ไปถึงบริเวณเหล็กเสริมโดยเร็ว และมากยิ่งขึ้นซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เร่งอัตราการเกิดสนิมใน เหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงมากขึ้น

2.1.7.8 ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตที่มีผลกระทบต่อเหล็กเสริมคอนกรีต (Chloride threshold)

Thomas [21] ศึกษาประสิทธิภาพของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน ที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเผชิญในสภาวะน้ำขึ้นน้ำลงในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 4 ปี เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ตำแหน่งต่างๆ ของเหล็กเสริมในตัวอย่างคอนกรีต ที่ใช้เหล็กเสริมที่มีคุณภาพ และการใช้เถ้าลอยในปริมาณต่าง ๆ พบว่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤติมีค่าที่ลดลงเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้น โดยจะมีค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤติ 0.70%, 0.65%, 0.50%, และ 0.20% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 0%, 15%, 30% และ 50% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤติ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน สามารถป้องกันเหล็กเสริมภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลได้เนื่องจากเถ้าลอยจะเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน

Alonso et al. [22] สรุปค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤติที่เหล็กเสริมภายในคอนกรีตจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤติมีค่าที่กระจายกระจายในช่วงกว้าง ๆ ทั้งนี้เป็นเพราะมีความแตกต่างของปริมาณคลอไรด์ที่ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตและลักษณะต่าง ๆ ของค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤติ ค่าอัตราส่วน Cl^-/OH^- หรือ ปริมาณเกลือคลอไรด์โดยน้ำหนักของซีเมนต์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นจะกล่าวถึงความเป็นไปได้ในการแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และใช้สารผสมเพิ่มประเภทคริสตัลไลน์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คุณสมบัติของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คุณสมบัติของเถ้าลอย คุณสมบัติของซิลิกาฟูม คุณสมบัติของผงหินปูน และคุณสมบัติของสารผสมเพิ่มประเภทคริสตัลไลน์ และตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก เถ้าลอย ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และสารผสมเพิ่มประเภทคริสตัลไลน์ ในการต้านทานซัลเฟต

วิศิษฐ์ เศษพันธ์ (2542) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงหินปูนเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบคอนกรีตผสมผงหินปูน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์เป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายจะเร็วขึ้น เนื่องจากผลของความเร่งทางกายภาพ (physical acceleration) เกิดขึ้นในกรณีที่ผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้อนุภาคปูนซีเมนต์กระจายตัวได้ดีขึ้นนอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากความเร่งทางเคมี (chemical acceleration) เพราะผงหินปูนทำให้ค่าความเป็นด่างของน้ำสูงขึ้นทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น จากผลการ

ทดลองยังพบอีกว่า ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากอนุภาคของผงหินปูนเป็นเหลี่ยมมาก อีกทั้งการแทนที่ด้วยผงหินปูนยังทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตผสมผงหินปูนจึงควรผสมสารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer)

ปีติ เสมรเมธากุล (2545) ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ และแนวทางการนำผงหินปูนเพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมุ่งหมายเพื่อนำผงหินปูนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ และ/หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานผลจากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผงที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์มีบทบาทสำคัญต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น หรือเป็นผลมาจากปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจสรุปได้เป็น 3 ปัจจัยด้วยกัน ปัจจัยแรกคือ ปริมาณร้อยละหรือความเข้มข้นของสารประกอบ ปัจจัยที่สองคือ ความสามารถในการทำปฏิกิริยา และ/หรือความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของสารประกอบ ปัจจัยสุดท้ายคือ ปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี สารประกอบดังที่ได้กล่าวมา ได้แก่ ปริมาณร้อยละหรือความเข้มข้นของ ซิลิกอนออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ ที่ว่องไวและอยู่ในสภาพที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ ซึ่งอาจมีแคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาด้วยซึ่งจากการทดสอบพบว่าปริมาณสารประกอบแมกนีเซียมออกไซด์ในสัดส่วนผสมระหว่างร้อยละ 0.5 ถึง 3.0 มีผลให้การพัฒนากำลังในช่วง 7 วันแรกดีขึ้น นอกจากนี้ยังสรุปแนวทางการประยุกต์ใช้ผงหินปูน และ/หรือผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอซโซลานในงานประเภทต่างๆ ดังนี้

1. อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ประยุกต์ใช้โดย ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบ ใช้บดหรือผสมรวมภายหลังเพื่อผลิตมอร์ตาร์สำเร็จรูป และ/หรือเพื่อการผลิตปูนซีเมนต์ราคาถูกที่เหมาะสมแก่ งานก่อสร้างขนาดเล็ก (dry mortar and/or economic – mixed cement)
2. อุตสาหกรรมผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ประยุกต์ใช้โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อยไม่เกินร้อยละ 35 เพื่อให้ทำหน้าที่วัสดุเติมเต็ม และ/หรือให้คุณสมบัติในการเชื่อมประสานในภายหลัง (filler and/or cementitious replacement material) หรืออาจใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก กล่าวคือปริมาณเกินกว่าร้อยละ 35 เพื่อให้ได้คุณสมบัติบางประการ เช่น คุณสมบัติคอนกรีตความร้อนต่ำ เป็นต้น
3. ประยุกต์ใช้งานในฐานะวัสดุปรับปรุงเสถียรภาพชั้นดินอ่อนและงานดินถมบดอัด

P. Chindaprasirt, P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak and H.T. Cao (2005) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมปอซโซลาน (ถ้าลยชนิด F และถ้ากลบ) ใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ตัวอย่างที่ใช้วัดการขยายตัวจะถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 และทำการตรวจสอบค่า pH ของ

สารละลาย จากการศึกษพบว่าเม็ดลอยและเม็ดแกลบช่วยลดการขยายตัวของมอร์ต้าร์ และค่า pH นอกจากนี้ยังพบว่าเม็ดแกลบมีประสิทธิภาพมากกว่าเม็ดลอย จากผลการทดสอบ SEM ที่ผิวตัวอย่างที่แตกร้าวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตชี้ให้เห็นว่าการทำลายโดยซัลเฟตของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเม็ดลอย หรือเม็ดแกลบถูกยับยั้งโดยการเคลือบเคลือบซีเมนต์ออกไซด์ และอัตราส่วน C/S ของ CSH เจล เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ซีเมนต์ล้วนพบว่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเม็ดแกลบมีเคลือบซีเมนต์น้อยกว่า และเกิดแอททริงใจท์น้อยกว่าอย่างชัดเจน เช่นเดียวกันกับในกรณีมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเม็ดลอยก็จะน้อยกว่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ล้วน แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีมากกว่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเม็ดแกลบเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปอชโซลานทั้งสองชนิดนี้ในอัตราส่วนที่ถึงร้อยละ 40 เพื่อสร้างซีเมนต์ผสมที่มีความต้านทานซัลเฟตดี

ธีรวัฒน์ สินศิริ (2548) ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียด รูปร่างของเม็ดลอยและวัสดุเชื่อม ต่อกำลัง ขนาดโพรง การกระจายขนาดโพรง และการซึมผ่านอากาศในเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ใช้เม็ดลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยนำเม็ดลอยทั้งที่ไม่ได้แยกขนาด และแยกขนาดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35 จากการศึกษพบว่าเพสต์ผสมเม็ดลอยคัดขนาดให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเพสต์ผสมเม็ดลอยที่ไม่คัดขนาด การแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเม็ดลอยไม่ได้คัดขนาดในอัตราการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เพสต์มีปริมาณโพรงทั้งหมดเพิ่มขึ้นแต่ขนาดโพรงโดยเฉลี่ยจะลดลง ส่วนการแทนที่ด้วยเม็ดลอยขนาดเล็กจะส่งผลให้ทั้งปริมาณโพรงทั้งหมด และขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง เมื่อตรวจสอบปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าการแทนที่เม็ดลอยที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ลดลงมากกว่าการแทนที่ด้วยเม็ดลอยที่หยาบกว่า นอกจากนี้ยังศึกษาเพสต์ที่ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35 และเพสต์ที่ควบคุมให้มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ ใช้เม็ดลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และโรงไฟฟ้า COCO มาคัดแยก 3 ตัวอย่างคือ เม็ดลอยที่ไม่คัดแยกขนาด เม็ดลอยที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0-45 และ 0-10 ไมครอน ใช้ทรายแม่น้ำที่บดให้มีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดลอย โดยนำเม็ดลอยหรือทรายแม่น้ำแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าปริมาณโพรงของเพสต์เม็ดลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่เม็ดลอยเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้เม็ดลอยขนาดเล็กจะส่งผลให้ปริมาณโพรงลดลง การซึมผ่านอากาศในเพสต์จะลดลงเมื่อปริมาณเม็ดลอยเพิ่มขึ้นและใช้เม็ดลอยมีความละเอียดขึ้น นอกจากนี้พบว่าเพสต์ที่ผสมเม็ดลอยจากโรงไฟฟ้า COCO มีปริมาณโพรงและการซึมผ่านอากาศสูงกว่าเพสต์ที่ผสมเม็ดลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เนื่องจากเม็ดลอยจากโรงไฟฟ้า COCO มีรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีความพรุนและความเป็นผลึกมากกว่า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอชโซลานน้อยกว่า นอกจากนี้แล้วยังพบว่าเพสต์

ผสมวัสดุเนื้อที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้ปริมาณโพรงลดลงมากกว่าการผสมด้วยวัสดุเนื้อที่หยาบกว่า และเมื่อเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยวัสดุเนื้อและเถ้าลอยแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน และที่ อัตราการแทนที่เดียวกัน พบว่าปริมาณโพรงและการซึมผ่านอากาศของเพสต์ผสมวัสดุเนื้อสูงกว่า เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยแม่เมาะเป็นวัสดุปอซโซลานจึงสามารถลดขนาดโพรงจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกและผลจากการอัดตัวแน่นของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ขณะที่วัสดุเนื้อสามารถลดปริมาณโพรงได้เนื่องจากการอัดตัวแน่นของอนุภาคที่มีขนาดเล็กเท่านั้น

ยงยุทธ วัฒนกุลและคณะ (2553) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ (ทั้งประเภทที่ 1 และ 5) ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ในขณะที่การก่อตัวของเพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกับกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับค่าการยุบตัวของคอนกรีต นั้นมีแนวโน้มที่จะผกผันกับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ และนอกจากนี้ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจะมีค่าน้อยกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนกรณีแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตไม่แตกต่างกับกรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีแนวโน้มมากกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการขยายตัวของคอนกรีตเถ้าลอย และคอนกรีตผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างจากกรณีปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน สำหรับการใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) พบว่า การขยายตัวของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงในปริมาณต่ำจะทำให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตมากขึ้น แต่ถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงๆ จะให้ค่าการขยายตัวน้อยลง

ปิติสานต์ กร้ามาตร และคณะ(2549)ได้ศึกษาการด้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยโดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แตกต่างกันสองระดับคือร้อยละ 8.28 และร้อยละ 17.28 จากการศึกษาพบว่าการขยายตัวเมื่อแช่ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต รวมทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนี-เซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่า ในทางกลับกัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่ลงกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสองชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ

17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การลดลงจะไม่มีผลกระทบต่อเม็แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยังพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการสูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

ศักดิ์ประยุทธ์ สินธุภิญโญ และสุรัชย์ วัชรตันชัย (2552) ได้ตรวจสอบคุณสมบัติของผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่ผสมผงหินปูน เพื่อศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนไประหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากการศึกษาพบว่าผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และกลไกการเกิดปฏิกิริยามีข้อแตกต่างกัน โดยปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนทำให้เกิดเฟส Monocarboaluminate ซึ่งไม่พบในปูนซีเมนต์ปกติเกิด Nucleation Effect ในระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดการเติมเต็มช่องว่างและการอัดตัวแน่น (filling/packing effect) ของผงหินปูนระหว่างเนื้อปูนซีเมนต์ซึ่งจากผลทั้งสามส่วนดังกล่าวเป็นสาเหตุให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ในระยะต้นสูงกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์อย่างไรก็ตามประโยชน์ที่ได้จากการหินปูนบดละเอียดนี้จะอยู่ในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่านั้น และข้อควรระวังในการใช้ผงหินปูนในปริมาณมากอาจจะทำให้เกิด false set ในปูนซีเมนต์ได้

ชูศักดิ์และคณะ (2556) ได้ศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งจากเตาหลอมเหล็กมาทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตมอร์ต้าร์ โดยมีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อวัสดุเหลือทิ้งจากเตาหลอมเหล็กที่ร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก มีระยะเวลาการบ่มน้ำที่ 3, 7, 28 และ 60 วัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด และมีระยะเวลาการบ่มที่ 3, 7 และ 28 วัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกำลังรับแรงดึง โดยจะทำการหล่อแท่งตัวอย่างอัตราส่วนละ 3 ตัวอย่างต่อระยะเวลาการบ่มน้ำ 1 ช่วงเวลา พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุเหลือทิ้งจากเตาหลอมเหล็กที่ร้อยละ 5 และ 10 ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่จะพัฒนาำลังเพิ่มขึ้นอีกเมื่อมีอายุมากกว่า 60 วัน นอกจากนี้ยังมีค่าการหดตัวลดลงเมื่อแทนที่ในปริมาณมากขึ้นอีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมีได้

ศุวิมล อัสวพิศิษฐและดวงฤดี โชติกลาง (2544) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมมา 3 ชนิดได้แก่ตะกรันเตาหลอมเหล็กเถ้าลอยลิกไนต์และขี้เถ้าแกลบ โดยทำการศึกษาการพัฒนาำลังรับแรงอัดในระยะแรกของซีเมนต์ที่เตรียมจากปูนขาวและกากของเสีย

เหล่านี้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีสารกระตุ้นซึ่งในการศึกษาจะใช้อัตราส่วน 20 : 80 และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเคมีทั้ง 2 ชนิดคือโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนร้อยละ 0 , 4 , 5 และ 6 ตามลำดับจากการศึกษาพบว่าทั้งโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะแรกของปอซโซลานซีเมนต์ได้ดีโดยซีเมนต์ที่เตรียมจากปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์จะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าซีเมนต์ที่เตรียมจากตะกรันเตาหลอมเหล็กและที่เตรียมจากขี้เถ้าแกลบเนื่องจากซิลิกาออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าลอยลิกไนต์นั้นอยู่ในรูปที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาคือตะกรันจากเตาหลอมเหล็กและขี้เถ้าแกลบ

Khatib J.M and Mangat P.S [23] ทำการทดลองถึงผลกระทบของการบ่มที่อุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้วัสดุแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนโดยใช้อัตราส่วนผสมของคอนกรีต 3 อัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน โดยใช้อัตราส่วนผสมที่ 1 ใช้ซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน และอัตราส่วนผสมที่ 2 และ 3 ใช้เถ้าลอย 20% และ ซิลิกาฟุ่ม 9% แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ผลการทดสอบของการแช่ตัวอย่างในช่วงเวลาสั้นๆ พบว่า การบ่มในช่วงสั้นจะส่งผลกระทบอย่างมากต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต และผลของอุณหภูมิที่สูง และความชื้นที่ต่ำส่งผลกระทบต่อการแทรกซึมของการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตในในช่วงที่เผชิญเกลือคลอไรด์สั้นๆ มากกว่า ตัวอย่างที่อยู่ในอุณหภูมิปกติ และใช้วิธีการบ่มเปียก ทั้งนี้เนื่องจากการบ่มแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้พื้นที่ผิวหน้าของตัวอย่างสูญหายไป และปฏิกิริยาไฮเดรชันถูกจำกัด ผลกระทบของการบ่มจะส่งผลกระทบต่อผลน้อยลงเมื่อตัวอย่างเผชิญกับคลอไรด์ในช่วงเวลานานและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์จะลดลงเมื่อให้เถ้าลอย และซิลิกาฟุ่ม แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต

Thomas M.D.A., Bamforth P.B.[24] พบว่า เถ้าลอยส่งผลกระทบต่อแทรกซึมของคลอไรด์สำหรับคอนกรีตในช่วงอายุต้น ๆ แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุยาวนานขึ้นเถ้าลอยจะช่วยปรับปรุงความต้านทาน การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้อย่างมาก

Dhir et al.[25] พบว่า การใช้เถ้าลอยเพื่อที่จะพัฒนาคอนกรีตในระยะเวลานานขึ้นที่สามารถทนทานต่อคลอไรด์ได้ (chloride-resistant concrete) การพัฒนาความทนทานทางกายภาพโดยการใส่คลอไรด์เข้าไปจับกับบริเวณพื้นผิว ซึ่งรวมไปถึงการใส่องค์ประกอบจำพวก เถ้าลอยอย่างเหมาะสมและลดการใช้ปูนในองค์ประกอบ อัตราส่วนของตัวเชื่อม(binder)ในคอนกรีตการบ่มการใช้เถ้าลอยในการพัฒนาคุณสมบัติที่เฉพาะเจาะจง (particulate characteristics) โดยใช้ส่วนผสมจำพวกควันซิลิกาหรือพวก metakaolin เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการที่จะเตรียมให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทานต่อ คลอ

ไรต์สูงๆ ซึ่งการพัฒนาี้ยังไม่มีทิศทางที่แน่นอน การพัฒนาคอนกรีตจำเพาะประเภทนี้นั้นค่อนข้างได้รับการยอมรับทางด้านสิ่งแวดล้อม

Gjorv et al.[26] พบว่า อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีตมีผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตส่วนที่อยู่ใกล้ผิวด้านนอกของคอนกรีต มากกว่า ชนิดของปูนซีเมนต์ เมื่อช่วงระยะเวลาการแช่น้ำทะเลสั้นๆ แต่หากเมื่อระยะเวลาในการแช่น้ำทะเลมากขึ้นแล้ว ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในผสมของคอนกรีต จะมีผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีตส่วนที่อยู่ลึกเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีต มากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

Wee et al.[27] ได้เสนอวิธีการคำนวณค่าการกระจายตัวของปริมาณคลอไรด์ในวัสดุซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยคำนึงถึงผลของความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งพบว่าให้ผลการคำนวณเป็นที่น่าพอใจ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง



บทที่ 3

วิธีการศึกษา

สำหรับในส่วนของวิธีการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การทดสอบความสามารถในการการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ และส่วนที่ 2 การศึกษาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างจริงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง มีรายละเอียดดังนี้

3.1 การทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 etailoy (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง) กรันเตาดลูกละเอียด ซีลิกาฟูม และผงหินปูน (ขนาด 8 ไมโครเมตร) ส่วนมวลรวมใช้ทรายแม่น้ำและหินซึ่งมีขนาดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C33[28]

3.1.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

3.1.2.1 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 etailoy ตะกรันเตาดลูกละเอียด ซีลิกาฟูม และผงหินปูน ที่ใช้

การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 etailoy ตะกรันเตาดลูกละเอียด ซีลิกาฟูม และผงหินปูนประกอบด้วย องค์กรประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ความละเอียดโดยใช้วิธีของเบลน (Blaine Fineness) ตามมาตรฐาน ASTM C204[30] ค่าความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐาน ASTM C188[29] และภาพถ่ายกำลังสูงของอนุภาคโดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM)

3.1.2.2 สมบัติด้านความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์

ก) การเตรียมและการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. จากนั้นนำตัวอย่างบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากครบกำหนดอายุการบ่ม ทำการเคลือบผิวตัวอย่างทุกหน้าด้วย epoxy ยกเว้นด้านบนของตัวอย่างด้านเดียว (เพื่อให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าตัวอย่างเพียงทิศทางเดียว) แล้วนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (น้ำเกลือ) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 (ใช้สารโซเดียมคลอไรด์ 8.24 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร) เป็นเวลา 28 และ 91 วัน

ข) การทดสอบหาปริมาณไอออนคลอไรด์ของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

หลังจากตัวอย่างเผชิญคลอไรด์ครบกำหนด (28 และ 91 วัน) จึงทำการนำตัวอย่างมาตัดที่ระยะความลึก 1, 2, 3, 4, และ 5 ซม. โดยวัดจากผิวหน้าของคอนกรีต แล้วนำแต่ละชั้นของตัวอย่างบดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ให้ได้ปริมาณของผงคอนกรีตประมาณ 20 กรัม จากนั้นนำผงตัวอย่างไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระต่อไป สำหรับการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดทำได้โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152 [31] และ การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระทำได้โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 [32]

3.1.2.3 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ วัสดุประสานประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และใน ส่วน 2 วัสดุประสาน ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 และ 50 ปูนซีเมนต์ผสมซิลิการ้อยละ 5 และ 10 และปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 ส่วนในกรณี 3 วัสดุประสาน ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 45 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 ดังตารางที่ 3.1 ส่วนมวลรวมในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ใช้ทราย 970 กิโลกรัม หิน 1080 กิโลกรัม และน้ำ 183 กิโลกรัม (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55)

หลังจากทราบค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดแล้ว จะนำค่าที่ได้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient: D_u) ของคอนกรีต โดยการแพร่ของคลอไรด์เกิดจากความแตกต่างความเข้มข้นของคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีต กล่าวคือคลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากคำตอบของสมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้ผลการทดสอบการกระจายการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration profile) และปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้า (C_s) ของคอนกรีตดังตารางที่ 3.1

$$C(x,t)=C_s \left[1-\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (3.1)$$

- เมื่อ $C(x, t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก x จากผิวหน้าที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ t (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)
- C_s คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต(% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)
- D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (ซม.²/วัน)
- x คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (ซม.)
- t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ (โดยน้ำหนัก: กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

รายการ	ปูนซีเมนต์ ประเภท 1	เถ้า ลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก	ซิลิกา ฟูม	ผง หินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
C	332	-	-	-	-	970	1080	183
C-20FA	266	67	-	-	-	970	1080	183
C-40FA	200	132	-	-	-	970	1080	183
C-30SL	232	-	100	-	-	970	1080	183
C-50SL	166	-	166	-	-	970	1080	183
C-5SF	315	-	-	17	-	970	1080	183
C-10SF	298	-	-	34	-	970	1080	183
C-5LP	315	-	-	-	17	970	1080	183
C-10LP	298	-	-	-	34	970	1080	183
C-15FA-5LP	266	49	-	-	17	970	1080	183
C-35FA-5LP	199	116	-	-	17	970	1080	183
C-25SL-5LP	232	-	83	-	17	970	1080	183
C-45SL-5LP	166	-	149	-	17	970	1080	183

หมายเหตุ C หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน, C-20FA หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอย ร้อยละ 20, C-50SL หมายถึงคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50, C-5SF หมายถึง คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ

3.2 การศึกษาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างจริงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง

3.2.1 ประเภทและชื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณสถานที่ตั้งตำแหน่งและระยะทางจากชายฝั่งทะเลไปยังการเก็บตัวอย่าง

ประเภทและชื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล บริเวณชายฝั่งทะเลของจังหวัดระยอง ซึ่งจะทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตจาก โครงสร้าง 1) อาคาร คสล. 3 ชั้น 2) อาคาร คสล. 5 ชั้น 3) ท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1) 4) ท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 2) 5) เขื่อนป้องกันตลิ่งและ 6) สะพานคสล. ส่วนตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตนั้นได้แก่ ชั้นส่วน คาน เสา และผนังของตัวเขื่อน ที่มีโครงสร้างเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น โดยจะเก็บอย่างเฉพาะ บริเวณตำแหน่งที่รับลมทะเล (ทิศตะวันตกเฉียงใต้) พร้อมกันนั้นก็ทำการเก็บข้อมูลทั่วไปของโครงสร้าง อาทิเช่น เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดไหน เสา คาน ผนัง ระยะห่างจากชายฝั่งทะเลหรือลึกเข้าไปในทะเลเป็นระยะทางเท่าไร โดยจะให้ระยะทางที่วัดจากชายฝั่งทะเลลึกเข้ามาในแผ่นดินเป็นบวกและให้ระยะเป็นลบเมื่อวัดลึกเข้าไปในทะเล ระดับความสูงต่ำของตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างจากระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุดโดยสังเกตจากรอยคราบน้ำที่ทิ้งร่องรอยตาม โครงสร้างนั้นๆ โคนโครงสร้างของโครงการที่ทำการเก็บตัวอย่าง ได้แสดงดังตารางที่ 3.2 พร้อมกันนี้ได้การเก็บข้อมูลของการทดสอบกำลังอัดเพื่อนำไปหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลาย ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นๆ ด้วย

ตารางที่ 3.2 ประเภทและชื่อ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สถานที่ตั้งและระยะทางจากชายฝั่งทะเล
ในการเก็บตัวอย่าง

ลำดับ	ประเภทโครงสร้าง คอนกรีตและสถานที่ตั้ง	ตำแหน่งใน การเก็บ ตัวอย่างผง คอนกรีต	อายุ โครง สร้าง (ปี)	ระยะทาง จากชาย ฝั่งทะเล (เมตร)	ความสูง จากระดับ น้ำทะเล (เมตร)	สถานะสิ่งแวดล้อม ทะเล
1	อาคาร คสล. 3 ชั้น	เสา ชั้นที่ 1	30	28	+5.00	สภาวะบรรยากาศทะเล
	ม.4 ต.บ้านฉาง	คาน 1 ชั้นที่ 2	30	28	+5.00	สภาวะบรรยากาศทะเล
	อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	คาน 1 ชั้นที่ 2	30	27	+5.00	สภาวะบรรยากาศทะเล
2	อาคาร คสล. 5 ชั้น	ผนัง 1 ชั้นที่ 1	30	120	+12.00	สภาวะบรรยากาศทะเล
	ม.4 ต.บ้านฉาง	ผนัง 2 ชั้นที่ 1	30	120	+12.01	สภาวะบรรยากาศทะเล
	อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	ผนัง 3 ชั้นที่ 1	30	120	+12.02	สภาวะบรรยากาศทะเล
3	ท่าเทียบเรือสะพานปลา	คาน 1 ชั้น 2	40	-210	-1.50	สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง
	(ตัวที่ 1) ม.5 ต.พลา	เสา ชั้น 1	40	-210	-1.00	สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง
	อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	คาน 2 ชั้น 2	40	-210	+0.50	สภาวะบรรยากาศทะเล
4	ท่าเทียบเรือสะพานปลา	เสา 1	30	-4	-0.20	สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง
	(ตัวที่ 2) ม.5 ต.พลา	เสา 2	30	-4	± 0.00	สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง
	อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	เสา 3	30	-4	+0.50	สภาวะบรรยากาศทะเล
		คาน	30	-2	+1.00	สภาวะบรรยากาศทะเล
5	เขื่อนป้องกันตลิ่ง	ผนัง1	3	0	± 0.00	สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง หรือ
	ม.4 ต.บ้านฉาง	ผนัง1	3	0	± 0.00	สภาวะบรรยากาศทะเล
	อ.บ้านฉาง จ.ระยอง					(ขึ้นอยู่กับฤดูกาล)
6	สะพาน ค.ศ.ล.	เสา 1	40	65	-0.50	สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง
	ม.5 ต.พลา	เสา 2	40	65	± 0.00	สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง
	อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	เสา 3	40	65	+0.50	สภาวะบรรยากาศทะเล
		คาน	40	65	+1.00	สภาวะบรรยากาศทะเล

หมายเหตุ : -ระยะทางจากชายฝั่ง (-) หมายถึงการวัดระยะทางออกสู่ทะเล
-ระยะทางจากชายฝั่ง (+) หมายถึงการวัดระยะทางเข้าสู่แผ่นดิน
-ความสูงจากระดับน้ำทะเล ± 0.00 หมายถึงตำแหน่งที่น้ำขึ้นสูงสุดของแต่ละตัวอย่างใน
ตำแหน่งนั้นๆ

- ความสูงจากระดับน้ำทะเล (-) หมายถึงการวัดในระดับด้านล่างจากตำแหน่งน้ำขึ้นสูงสุด
- ความสูงจากระดับน้ำทะเล (+) หมายถึงการวัดในระดับด้านบนจากตำแหน่งน้ำขึ้นสูงสุด

3.2.1.1 อาคาร ค.ส.ล. 3 ชั้น ต. บ้านฉาง อ. บ้านฉาง จ.ระยอง

รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง ของอาคาร ค.ส.ล. 3 ชั้น ส่วนรูปที่ 3.2 เป็นภาพถ่ายจากสถานที่จริงเพื่อทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต โดยเก็บจากตำแหน่งคานและเสา ของอาคารค.ส.ล. 3 ชั้น โดยอาคารดังกล่าวตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ม.4 ต. บ้านฉาง อ. บ้านฉาง จ. ระยอง โดยมีระยะห่างจากชายฝั่งทะเลลึกเข้ามาในแผ่นดินเป็นระยะทาง 28 เมตร

ชนิดของโครงสร้าง : อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ชั้น

ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง : คานและเสาชั้นที่ 1

วันที่ทำการเก็บตัวอย่าง : 1 ตุลาคม 2559



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งที่ตั้งอาคาร ค.ส.ล. 3 ชั้น ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ต.บ้านฉาง อ.บ้านฉาง จ.ระยอง



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายสถานที่จริงอาคารค.ส.ล. 3 ชั้น โดยทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากคานและเสา

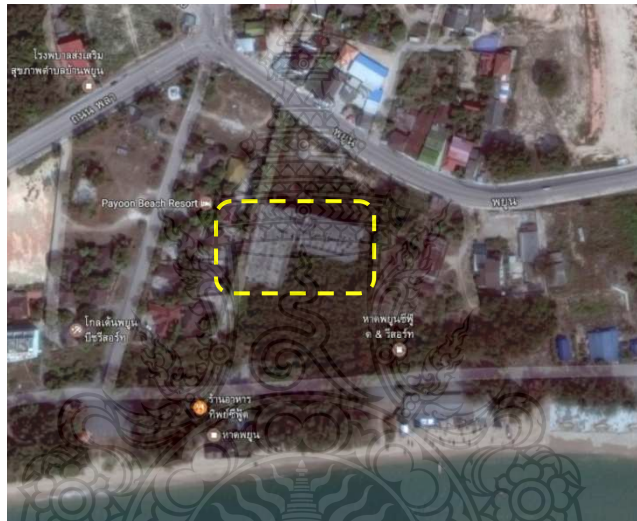
3.2.1.2 อาคาร ค.ส.ล. 5 ชั้น ต. บ้านฉาง อ. บ้านฉาง จ. ระยอง

รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง ของอาคาร ค.ส.ล. 5 ชั้น ส่วนรูปที่ 3.4 เป็นภาพถ่ายจากสถานที่จริงเพื่อทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต โคนเก็บจากผนัง ของอาคารค.ส.ล. 5 ชั้น โดยอาคารดังกล่าวตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ม.4 ต. บ้านฉาง อ. บ้านฉาง จ. ระยอง โดยมีระยะห่างจากชายฝั่งทะเลลึกเข้ามาในแผ่นดินเป็นระยะทาง 120 เมตร

ชนิดของ โครงสร้าง : อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ชั้น

ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง : ผนัง คสล. ชั้นที่ 1

วันที่ทำการเก็บตัวอย่าง : 1 ตุลาคม 2559



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งที่ตั้งของอาคาร คสล. 5 ชั้น บริเวณชายฝั่งทะเล ต.บ้านฉาง อ.บ้านฉาง จ.ระยอง



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายสถานที่จริงอาคารค.ส.ล. 5 ชั้น โดยทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากผนัง

3.2.1.3 ท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1) หมู่ที่ 5 ต. บ้านปลา อ. บ้านฉาง จ. ระยอง

รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง ของท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1) ส่วนรูปที่ 3.6 เป็นภาพถ่ายจากสถานที่จริงเพื่อทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต โดยเก็บจากคาน เสา และราวกันตกโดยอาคารดังกล่าวนั้นตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ม. 5 ต. ปลา อ. บ้านฉางจ. ระยอง โดยมีระยะห่างจากชายฝั่งทะเลเล็กน้อยเข้ามาในแผ่นดินเป็นระยะทาง 210 เมตร

ชนิดของโครงสร้าง : ท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1)

ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง : คาน เสา และราวกันตก

วันที่ทำการเก็บตัวอย่าง : 1 ตุลาคม 2559



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งที่ตั้งของท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1) ซึ่งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล หมู่ที่ 5 ต. ปลา อ. บ้านฉาง จ. ระยอง



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายสถานที่จริงท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1) โดยทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากคาน เสา และราวกันตก

3.2.1.4ท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 2) หมู่ที่ 5 ต. บ้านปลา อ. บ้านฉาง จ. ระยอง

รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง ของท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 2) ส่วนรูปที่ 3.8 เป็นภาพถ่ายจากสถานที่จริงเพื่อทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต โดยเก็บจากคาน เสา และราวกันตกโดยอาคารดังกล่าวนั้นตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ม. 5 ต. ปลา อ. บ้านฉาง จ. ระยอง โดยมีระยะห่างจากชายฝั่งทะเลลึกเข้ามาในแผ่นดินเป็นระยะทาง -4 เมตร

ชนิดของโครงสร้าง : ท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 2)

ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง : คาน และ เสา

วันที่ทำการเก็บตัวอย่าง : 2 ตุลาคม 2559



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งที่ตั้งของท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 2) ซึ่งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล หมู่ที่ 5 ต.ปลา อ.บ้านฉาง จ.ระยอง



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายสถานที่จริงท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 2) โดยทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากคาน และเสา

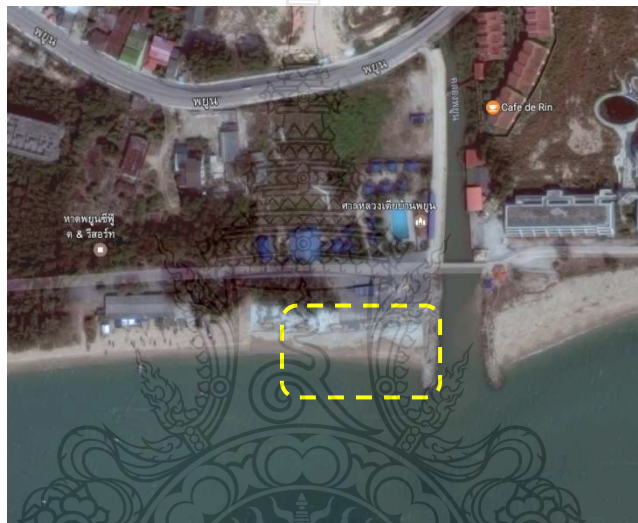
3.2.1.5 เชื้อนป้องกันตลิ่ง หมู่ที่ 4 ต. บ้านฉาง อ. บ้านฉาง จ. ระยอง

รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง ของเชื้อนป้องกันตลิ่ง ส่วนรูปที่ 3.10 เป็นภาพถ่ายจากสถานที่จริงเพื่อทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต โดยเก็บจากผนังโดยอาคารดังกล่าวตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ม. 4 ต. พลา อ. บ้านฉาง จ. ระยอง โดยมีระยะห่างจากชายฝั่งทะเลลึกเข้ามาในแผ่นดินเป็นระยะทาง ± 0 เมตร

ชนิดของโครงสร้าง : เชื้อนป้องกันตลิ่ง

ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง : ผนัง

วันที่ทำการเก็บตัวอย่าง : 2 ตุลาคม 2559



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งที่ตั้งของเชื้อนป้องกันตลิ่งซึ่งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล หมู่ที่ 4 ต. บ้านฉาง อ.บ้านฉาง จ.ระยอง

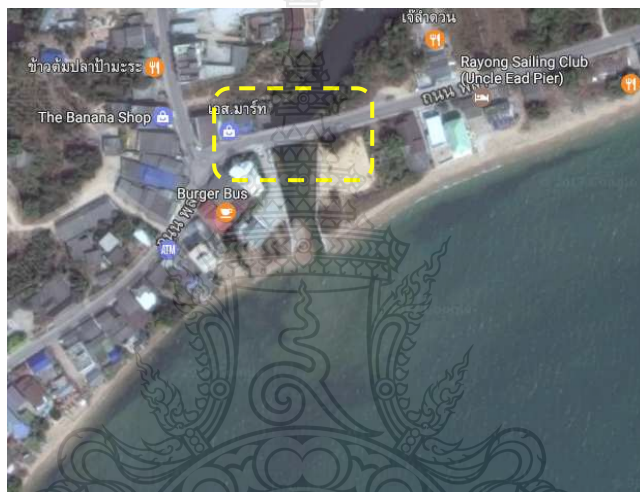


รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายสถานที่จริงเชื้อนป้องกันตลิ่ง โดยทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากผนัง

3.2.1.6 สะพาน ค.ส.ล. หมู่ที่ 5 ต. พลา อ. บ้านฉาง จ. ระยอง

รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างของสะพาน คสล. ส่วนรูปที่ 3.12 เป็นภาพถ่ายจากสถานที่จริงเพื่อทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต โดยเก็บจากคาน และเสา โดยอาคารดังกล่าวตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ม. 5 ต. พลา อ. บ้านฉาง จ. ระยอง โดยมีระยะห่างจากชายฝั่งทะเลเล็กน้อยเข้ามาในแผ่นดินเป็นระยะทาง +65 เมตร

ชนิดของโครงสร้าง : สะพาน ค.ส.ล.
ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง : คาน และ เสา
วันที่ทำการเก็บตัวอย่าง : 2 ตุลาคม 2559



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งที่ตั้งของสะพาน คสล. ซึ่งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ต.พลาอ.บ้านฉาง จ.ระยอง



รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายสถานที่จริงสะพาน คสล. โดยทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากผนังเสาตอม่อและคาน

3.2.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีแบบไม่ทำลาย

โดยการวัดค่า Rebound number ด้วยเครื่อง Schmidt hammer โดยกดลงไปที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จดบันทึกค่า Rebound number จำนวน 32 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยและคำนวณหาลังอัดของคอนกรีตโครงสร้างเสริมเหล็กที่ตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างผกคอนกรีต ณ จุดนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยใช้สมการ(3.2)

$$F_{c'} = -18 + (1.27 \times RN) \quad (3.2)$$

โดย $f_{c'}$ คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (MPa)
RN คือ Rebound number



รูปที่ 3.13 การวัดค่า Rebound number ด้วยเครื่อง Schmidt hammer ที่ผิวหน้าของโครงสร้าง

3.2.3 วิธีการเก็บตัวอย่างผกคอนกรีต

ทำการขีดผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตตรงตำแหน่งที่ต้องการเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องขีดผิวคอนกรีตเพื่อเก็บผงฝุ่นคอนกรีตที่ผิวหน้า โดยจำกัดความลึกของการขีดไว้ไม่ให้เกิน 2 มิลลิเมตร และใช้ภาชนะดักเก็บตัวอย่างพลาสติกรองรับผงฝุ่นคอนกรีตที่ขีดออกมาและนำไปเก็บลงในถุงพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ต่อจากนั้นทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยสว่านเจาะคอนกรีต โดยใช้ดอกสว่านขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ทำการเจาะที่ละชั้น ลึกชั้นละ 1 เซนติเมตร ซึ่งต้องเจาะให้ได้ประมาณ 12 รู เป็นอย่างน้อยจึงจะได้ตัวอย่างหนัก 5 กรัม ทำการแยกเก็บตัวอย่างแต่ละชั้นลงในถุงพลาสติก

จากนั้นก็เพิ่มความลึกของการเจาะอีก 1 เซนติเมตร แล้วทำการเก็บตัวอย่างแบบเดียวกันนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงระดับความลึกที่ 5 เซนติเมตร จากผิวหน้า แสดงในรูปที่ 3.15

จากนั้นนำตัวอย่างผงคอนกรีตมาทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ในคอนกรีต ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงการกระจายตัวของสารแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตนั้น ซึ่งในการเก็บข้อมูลครั้งนี้ จะไม่พิจารณาถึงสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 3.14 การขุดผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต



รูปที่ 3.15 การเจาะตัวอย่างผงคอนกรีตเพื่อหาการกระจายตัวของสารแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในศึกษา

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้ในการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต (ไม่สามารถที่จะต่อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้) แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องเจียร์ไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขัดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบและเก็บตัวอย่างผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เครื่องเจียร์ไฟฟ้า

สว่านไฟฟ้า (Electric drill) เพื่อใช้เจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตในระดับที่ ความลึกต่างๆ ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 สว่านไฟฟ้า

Schmidt hammer เป็นเครื่องมือใช้ในการตรวจสอบเพื่อประเมินกำลังอัดของ คอนกรีต โดย Rebound hammer เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) โดยอาศัย หลักการกระแทกและกระดอนกลับของมวลสปริง (Spring Mass) ค่า Rebound hammer ที่ได้จะขึ้นอยู่กับ ความแข็งของผิวที่ถูกระแทก ทั้งนี้คอนกรีตที่จะทำการทดสอบต้องมีผิวเรียบสม่ำเสมอและมี ความหนาไม่น้อยกว่า 10 ซม. โดยเครื่อง Schmidt hammer แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 Schmidt hammer

เครื่องดูด (Suction apparatus) ใช้ช่วยดูดสารละลายในการกรอง เพื่อความรวดเร็วในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เครื่องดูด (Suction apparatus)

เครื่องต้ม (Hot plate) ใช้ต้มสารละลายตัวอย่างก่อนนำไปหาปริมาณเกลือคลอไรด์ตัวอย่างผงคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเก็บตัวอย่างมาเพื่อทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เครื่องต้ม (Hot plate)

เครื่อง *Auto Titration* ใช้ในการหาปริมาณเกลือคลอไรด์ในตัวอย่างผงฝุ่น
ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเก็บตัวอย่างมาเพื่อทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 เครื่อง Auto Titration

เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล (*Digital balance*) ใช้ในการชั่งตัวอย่างผงฝุ่น
ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเก็บตัวอย่างมาเพื่อทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล (Digital balance)

เครื่องเป่าลม (Air blower) ใช้สำหรับในการทำความสะอาดตัวอย่างผงคอนกรีตที่ตกค้างในรูที่เจาะเพื่อไม่ให้ตัวอย่างผงคอนกรีตที่เจาะในแต่ละชั้นของการเก็บตัวอย่างมีการปนเปื้อนกัน

เทปวัดระยะทาง (Measuring Tapes) ใช้ในการวัดระยะทางจากชายฝั่งทะเลไปยังตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต ส่วนเทปชนิดสั้นจะใช้ในการวัดหาค่าระดับความสูงต่ำของตำแหน่งตัวอย่างผงคอนกรีต

ภาชนะดักเก็บตัวอย่าง ใช้ในการรองรับผงฝุ่นตัวอย่างที่ผิวหน้าของคอนกรีต และรองรับตัวอย่างผงของคอนกรีตจากการเจาะเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึกในแต่ละชั้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ถุงเก็บตัวอย่าง ใช้ในการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต

3.2.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา

กรดไนตริก (Nitric acid) แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 กรดไนตริก (Nitric acid)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

3.2.5 วิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในตัวคอนกรีต

นำตัวอย่างผงคอนกรีตที่ได้จากการเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล มาทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ภายในตัวอย่างคอนกรีตออกมาตามวิธี ASTM C1152 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acide-soluble chloride) และทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ภายในตัวอย่างคอนกรีตออกมาตามวิธีการของ ASTM C1218 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble chloride) [31],[32] ซึ่งการหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) และ ปริมาณสารคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งจะพิจารณาจุดยุติของปฏิกิริยาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกวิธีหาปริมาณคลอไรด์ นี้ว่า Potentiometric titration



รูปที่ 3.26 การหาปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธี Potentiometric titration

บทที่ 4

ผลการศึกษา

สำหรับในส่วนผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การทดสอบความสามารถในการการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ และส่วนที่ 2 ผลการศึกษาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างจริงของโครงสร้างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ความสามารถในการการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ

ในส่วนความสามารถในการการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ โดยใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด .ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุจากอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดในการศึกษาดังนี้

4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้

4.1.1.1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลน

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้า-ลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของวัสดุประสานดังกล่าวส่วนความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน (Blaine Fineness) แสดงดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

รายการ	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (ร้อยละ)	เถ้าลอย (ร้อยละ)	ตะกรันเตา		
			ถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน
			บดละเอียด (ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)
SiO ₂ ,	18.93	35.71	34.06	92	0.45
Al ₂ O ₃ ,	5.51	20.44	16.27	0.7	0.05
Fe ₂ O ₃ ,	3.31	15.54	1.7	1.2	0.03
CaO,	65.53	16.52	36.05	0.2	55.2
MgO,	1.24	2	7.38	0.2	0.34
Na ₂ O,	0.15	1.15	2.16	-	< 0.01
K ₂ O,	0.31	2.41	0.21	-	< 0.01
SO ₃ ,	2.88	4.26	1.09	1.5	0.01
LOI,	-	0.49	1.44	-	43.12
Free Lime,	1	1.71	-	-	-

ตารางที่ 4.2 ค่าความถ่วงจำเพาะความละเอียดโดยวิธีเบลนและของวัสดุประสานที่ใช้

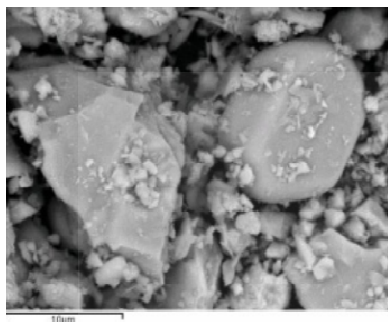
รายการ	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตา		
			ถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.53	2.96	2.21	2.69
ความละเอียดโดยวิธี เบลน (ชม. ² /ก.)	3,190	2,867	4,600	-	5,210

หมายเหตุ: เนื่องด้วยวิธีเบลนไม่สามารถใช้วัดความละเอียดของซิลิกาฟูมได้ (อาจใช้วิธี nitrogen absorption แทน)

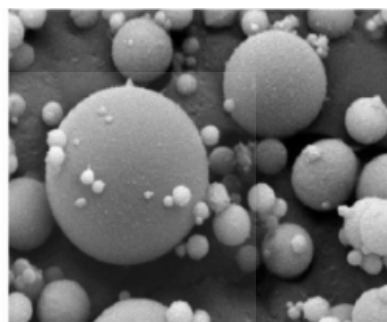
4.1.1.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้

ในการถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาค (ขยาย 3,500 เท่า) ของวัสดุที่ใช้ โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM) ซึ่งภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุ ดังกล่าวได้แสดงดังรูปที่ 1 พบว่า ลักษณะรูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว ส่วนกรณีของอนุภาค

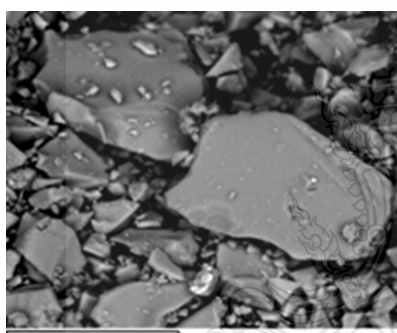
ของเถ้าลอยนั้น พบว่า มีลักษณะค่อนข้างกลมผิวเรียบ ส่วนรูปร่างของอนุภาคของตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียดละเอียด และของผงหินปูนจะมีลักษณะรูปร่างของอนุภาคคล้ายกับของปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



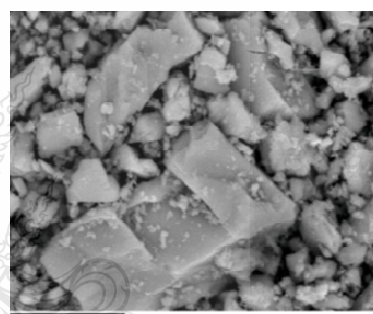
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) เถ้าลอย



ค) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดละเอียด



ง) ผงหินปูน

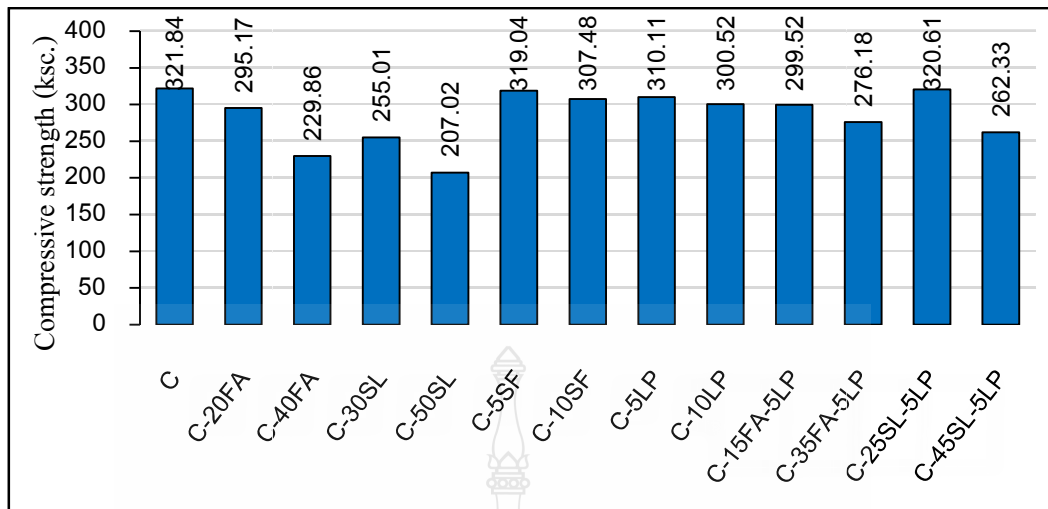
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดละเอียด และผงหินปูน

4.1.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กำลังอัดประลัย (Compressive strength) ของคอนกรีตผสม เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM C 109 ที่แช่ในน้ำปกติที่อายุ 28 วัน ทดสอบด้วยเครื่อง UTM (universal testing machine) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.5พบว่า ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสม เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่า ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ล้วน

ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสม เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก

ที่	สัญลักษณ์	ค่ากำลังอัดประลัย (ksc.)
1	C	321
2	C - 20FA	295
3	C - 40FA	229
4	C - 30SL	255
5	C - 50 SL	207
6	C - 5SF	319
7	C - 10SF	307
8	C - 5LP	310
9	C - 10LP	300
10	C - 15FA - 5 LP	299
11	C - 10FA - 10LP	310
12	C - 35FA - 5LP	276
13	C - 30FA - 10LP	257
14	C - 25SL - 5LP	320
15	C - 20SL - 10LP	306
16	C - 45SL - 5SF	262
17	C - 40SL - 10SF	242



รูปที่ 4.5 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสม เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และ ผงหินปูน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก

4.1.3 ความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต

ความสามารถกักเก็บคลอไรด์ (Chloride binding capacity) ของคอนกรีต หมายถึง ความสามารถของคอนกรีตในการยึดจับคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีตให้เป็นคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ในคอนกรีต ซึ่งมีเพียงคลอไรด์อิสระ (Free chloride) เท่านั้น ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม ดังนั้น ความสามารถกักเก็บคลอไรด์จึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตที่ช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทางทะเล [33]

ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตเป็นผลต่างระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีต ถ้านำปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับหารด้วยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดจะได้อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride ratio) โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ ในบทความนี้ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 กลอไรต์ทั้งหมด กลอไรต์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนกลอไรต์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีต ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

รายการ	ระยะจากผิว (ซม.)	ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน			ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน		
		Total Cl ⁻ (%)	Fixed Cl ⁻ (%)	Fixed Cl ⁻ ratio	Total Cl ⁻ (%)	Fixed Cl ⁻ (%)	Fixed Cl ⁻ ratio
C	0.5	7.79	4.95	0.64	17.70	9.20	0.52
	1.5	2.12	1.49	0.70	12.03	5.66	0.47
	2.5	0.64	0.42	0.67	7.79	5.66	0.73
	3.5	0.21	0.21	1.00	5.66	5.31	0.94
	4.5	0.00	0.00	-	4.25	4.25	1.00
C-20FA	0.5	9.20	5.66	0.62	14.16	9.20	0.65
	1.5	1.77	1.09	0.60	2.12	1.42	0.67
	2.5	0.71	0.71	1.00	1.42	1.42	1.00
	3.5	0.71	0.71	1.00	0.41	0.10	0.14
	4.5	0.35	0.35	1.00	0.35	0.35	1.00
C-40FA	0.5	9.91	7.08	0.71	10.62	7.79	0.73
	1.5	0.71	0.71	1.00	1.42	1.42	1.00
	2.5	0.71	0.71	1.00	0.71	0.71	1.00
	3.5	0.71	0.71	1.00	0.71	0.71	1.00
	4.5	0.35	0.35	1.00	0.35	0.35	1.00
C-30SL	0.5	9.20	5.66	0.62	11.33	7.08	0.63
	1.5	1.42	0.71	0.50	1.42	1.42	1.00
	2.5	1.06	1.06	1.00	0.41	0.64	0.90
	3.5	0.00	0.00	-	0.50	0.50	1.00
	4.5	0.00	0.00	-	0.35	0.35	1.00
C-50SL	0.5	7.79	5.66	0.73	9.20	6.37	0.69
	1.5	0.71	0.71	1.00	2.12	2.12	1.00
	2.5	0.35	0.35	1.00	0.71	0.71	1.00
	3.5	0.35	0.35	1.00	0.35	0.35	1.00
	4.5	0.28	0.28	1.00	0.00	0.00	-

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

รายการ	ระยะจาก ผิว (ซม.)	ระยะเวลาเผชิญคลอรีน 28 วัน			ระยะเวลาเผชิญคลอรีน 91 วัน		
		Total Cl ⁻ (%)	Fixed Cl ⁻ (%)	Fixed Cl ⁻ ratio	Total Cl ⁻ (%)	Fixed Cl ⁻ (%)	Fixed Cl ⁻ ratio
C-5SF	0.5	7.79	4.25	0.55	16.28	8.49	0.52
	1.5	1.42	0.71	0.50	7.79	4.25	0.55
	2.5	0.35	0.21	0.60	6.37	3.54	0.56
	3.5	0.21	0.14	0.67	4.25	2.12	0.50
	4.5	0.00	0.00	-	3.54	3.54	1.00
C-10SF	0.5	6.37	6.37	0.56	14.86	7.79	0.52
	1.5	3.54	2.12	0.60	6.37	3.54	0.56
	2.5	0.71	0.35	0.50	4.95	2.83	0.57
	3.5	0.21	0.14	0.67	4.25	3.54	0.83
	4.5	0.00	0.00	-	2.83	2.83	1.00
C-5LP	0.5	6.37	3.54	0.56	12.03	7.79	0.65
	1.5	2.12	1.42	0.67	2.83	2.12	0.75
	2.5	0.71	0.71	1.00	0.71	0.71	1.00
	3.5	0.71	0.71	1.00	0.71	0.71	1.00
	4.5	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
C-10LP	0.5	8.49	4.95	0.58	11.33	7.08	0.63
	1.5	3.54	2.12	0.60	2.83	2.12	0.75
	2.5	0.71	0.71	1.00	1.42	1.42	1.00
	3.5	0.71	0.71	1.00	0.71	0.71	1.00
	4.5	0.71	0.71	1.00	0.35	0.35	1.00
C-15FA-5LP	0.5	7.08	4.95	0.70	7.79	4.25	0.55
	1.5	0.71	0.35	0.50	2.12	1.42	0.67
	2.5	0.71	0.71	1.00	0.71	0.71	1.00
	3.5	0.71	0.71	1.00	0.57	0.57	1.00
	4.5	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

รายการ	ระยะจาก ผิว (ซม.)	ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน			ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน		
		Total CI (%)	Fixed CI (%)	Fixed CI ratio	Total CI (%)	Fixed CI (%)	Fixed CI ratio
C-35FA-5LP	0.50	9.91	6.37	0.64	12.39	8.14	0.66
	1.50	0.71	0.71	1.00	1.42	0.71	0.50
	2.50	0.57	0.57	1.00	0.71	0.71	1.00
	3.50	0.35	0.35	1.00	0.35	0.35	1.00
	4.50	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
C-25SL-5LP	0.50	10.62	7.08	0.67	12.03	8.49	0.71
	1.50	0.71	0.71	1.00	1.42	1.42	1.00
	2.50	0.71	0.71	1.00	0.07	0.07	1.00
	3.50	0.71	0.71	1.00	0.21	0.21	1.00
	4.50	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
C-45SL-5LP	0.50	10.62	8.49	0.80	10.97	8.14	0.74
	1.50	0.71	0.71	1.00	1.42	1.20	0.85
	2.50	0.00	0.00	1.00	0.71	0.71	1.00
	3.50	0.00	0.00	1.00	0.35	0.35	1.00
	4.50	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-

หมายเหตุ C หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน
 C-20FA หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20
 C-50SL หมายถึงคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50
 C-5SF หมายถึง คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5
 C-10LP หมายถึง คอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10
 C-35FA-5LP หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

รูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม คอนกรีตผสมผงหินปูน คอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน จากภาพพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นจากผิวหน้าของคอนกรีต เมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น ส่งผล

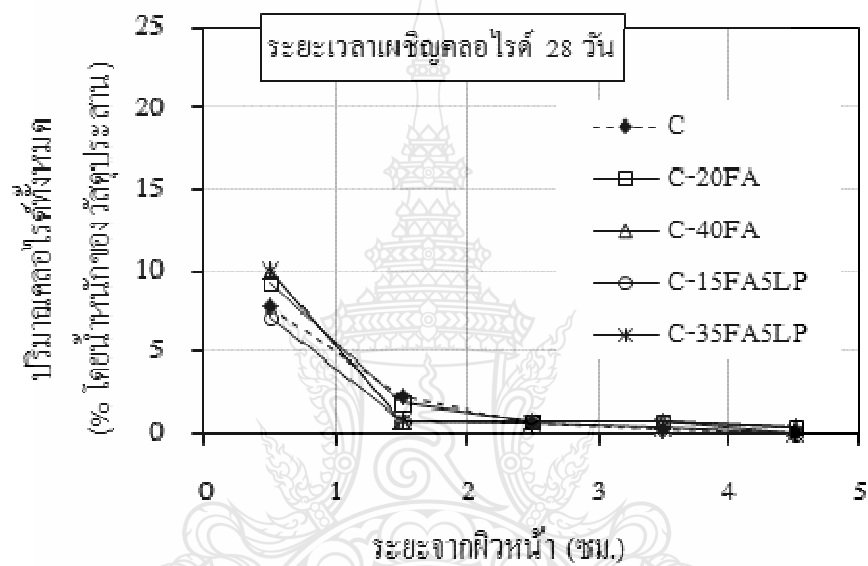
ให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตอิมมัลด้วยน้ำ คลอไรด์จะเกิดจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก ซึ่งจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ และมีการสะสมของปริมาณคลอไรด์จนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ [10]

รูปที่ 4.2ก และ รูปที่ 4.3ก แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย (C-20FA และ C-40FA) และคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน (C-15FA-5LP และ C-35FA-5LP) จากภาพจะเห็นว่า คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงชนิดเดียว โดยผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยนี้ เห็นผลอย่างชัดเจนที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น เนื่องจากการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำมากยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นผลของการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยที่ทำให้เกิดผลผลิตของ C-S-H เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ C-S-H ช่วยให้คอนกรีตมีโครงสร้างโพรงช่องว่างลดลง หรือการเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตของเถ้าลอยเป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้มากขึ้นตามไปด้วย [33-35] นอกจากนี้การแทนที่วัสดุประสานบางส่วนด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน การแทรกซึมคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวเช่นกัน โดยค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน ใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมเถ้าลอย

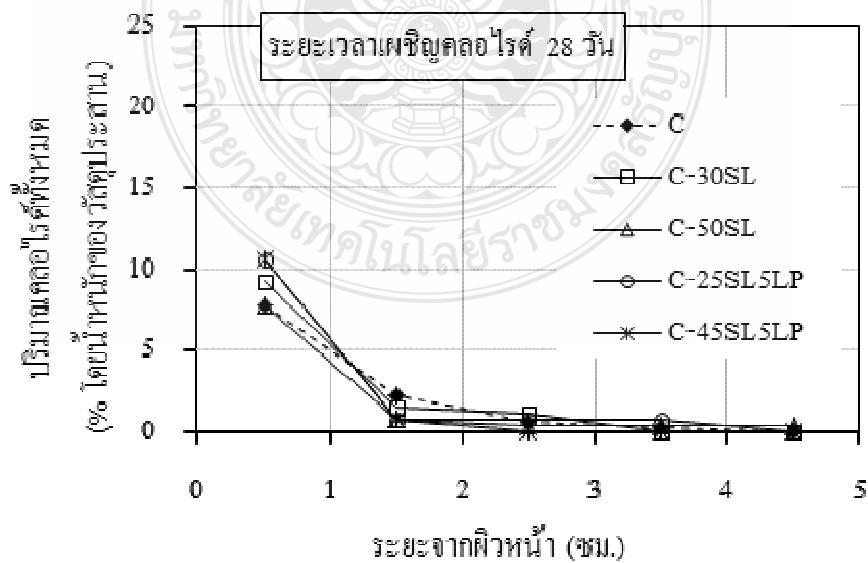
รูปที่ 4.2ข และ 4.3ข แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (C-30SL และ C-50SL) และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน (C-25SL-5LP และ C-45SL-5LP) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน จากภาพ พบว่าคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตล้วน นอกจากนี้การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนแทนที่บางส่วนของปูน ซีเมนต์ สามารถช่วยให้คอนกรีตต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้น เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดช่วยให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เกิดได้เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผลผลิตที่ได้จากทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของผลผลิตนี้ทำให้โครงสร้างโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตลดลง หรือ คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้น การแทรกซึมคลอไรด์จึงลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ การใช้ผงหินปูนยังช่วยลดความพรุนของคอนกรีตได้อีกด้วย เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของผงหินปูนจะทำหน้าที่เติมเต็มโพรงช่องว่างในคอนกรีต (Filler effect) ทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น การแทรกซึมของคลอไรด์จึงเป็นไปได้ยากตามไปด้วย [12]

รูปที่ 4.2ค และ 4.3ค แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่ม ร้อยละ 5 (C-5SF) และคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่ม ร้อยละ 10 (C-10SF) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์

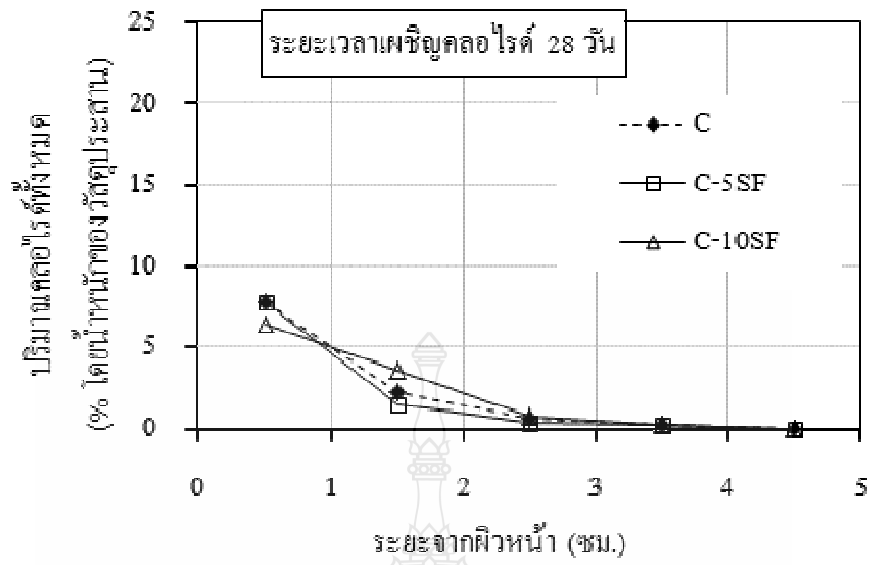
28 และ 91 วัน จากภาพพบว่า การใช้ซิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตได้ โดยเมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนซิกาฟุ่มต่อวัสดุประสาน พบว่า การใช้ซิกาฟุ่มร้อยละ 10 สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้มากกว่าการใช้ซิกาฟุ่มร้อยละ 5 โดยเห็นผลได้อย่างชัดเจนที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน เนื่องจากซิกาฟุ่มเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้การแทนที่ซิกาฟุ่มร้อยละ 10 มีความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ได้ดีกว่าการแทนที่ซิกาฟุ่มร้อยละ 5 [37]



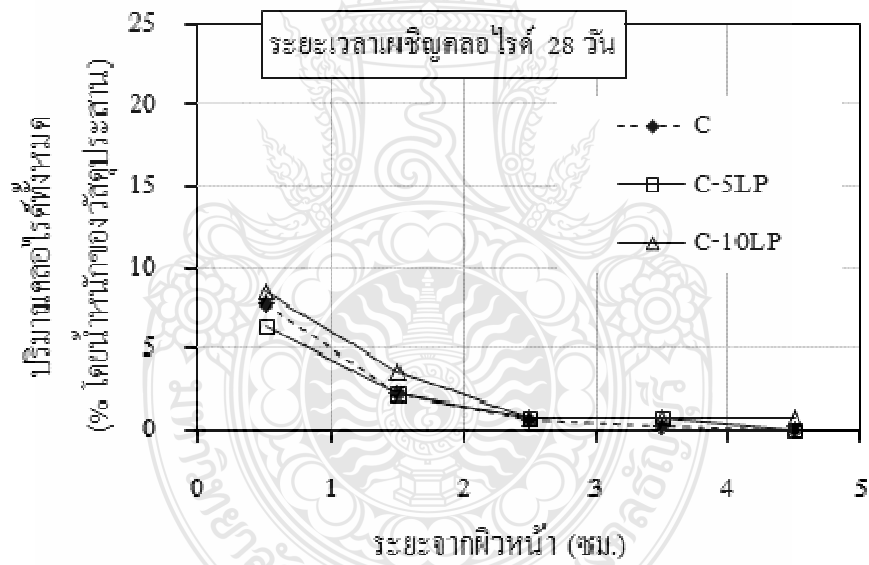
ก) คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน



ข) คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน



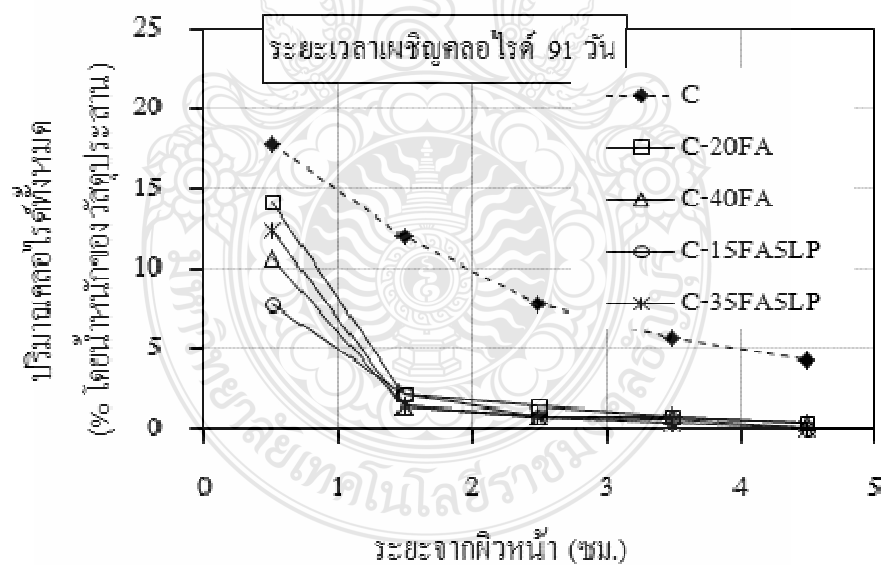
ค) คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม



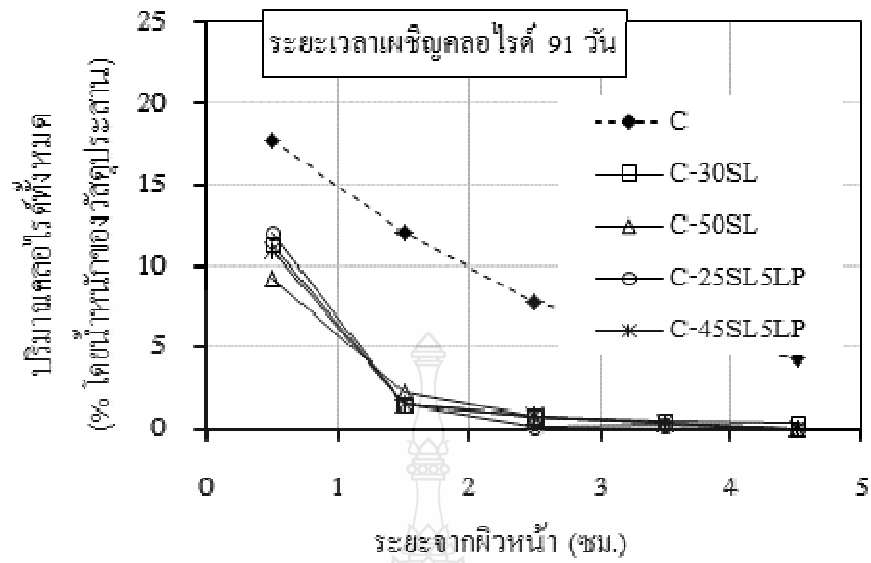
ง) คอนกรีตผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.2 การแทรกซึมคลอรีนของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอรีน 28 วัน

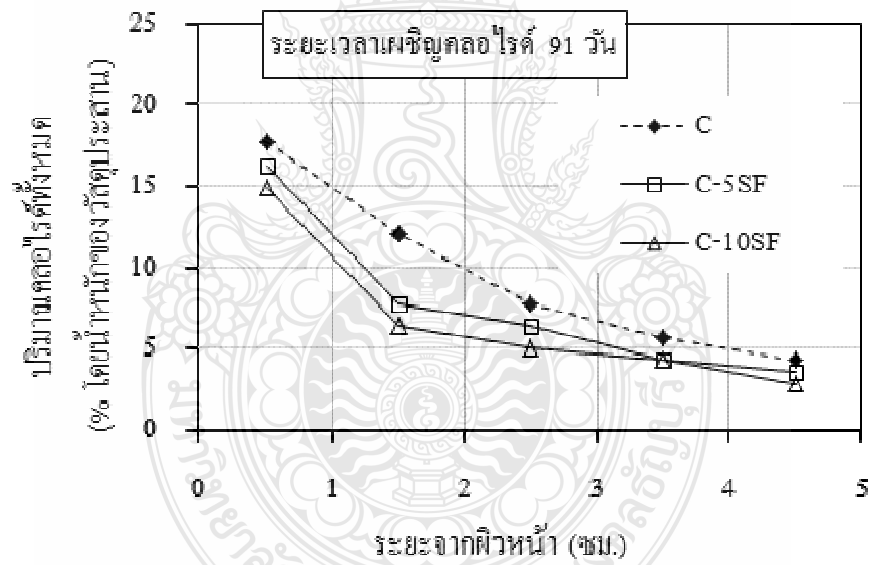
รูปที่ 4.2 ง และ 4.3 ง แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 5 (C-5LP) และคอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10 (C-10LP) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน จากภาพพบว่า คอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตได้ดีกว่าการใช้คอนกรีตล้วน และเมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน พบว่า เมื่อเพิ่มการใช้ผงหินปูนจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเห็นผลได้อย่างชัดเจนที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน เนื่องจากการใช้ผงหินปูนในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยลดความพรุนของคอนกรีตได้ เนื่องจาก อนุภาคขนาดเล็กของผงหินปูนจะทำหน้าที่เติมเต็มโพรงช่องว่างในคอนกรีต (Filler effect) ทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น การแทรกซึมของคลอไรด์จึงเป็นไปได้ยาก [38] แต่จากการทดลองพบว่า การใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ทำให้การแทรกซึมคลอไรด์ได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุมาจากการใช้ผงหินปูน ไม่ได้เป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งเมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้เหลือปริมาณของปูนซีเมนต์ในระบบวัสดุประสานน้อยลงเรื่อยๆ ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงลดลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นเหตุให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำตาล การแทรกซึมคลอไรด์เป็นไปได้ง่ายขึ้น



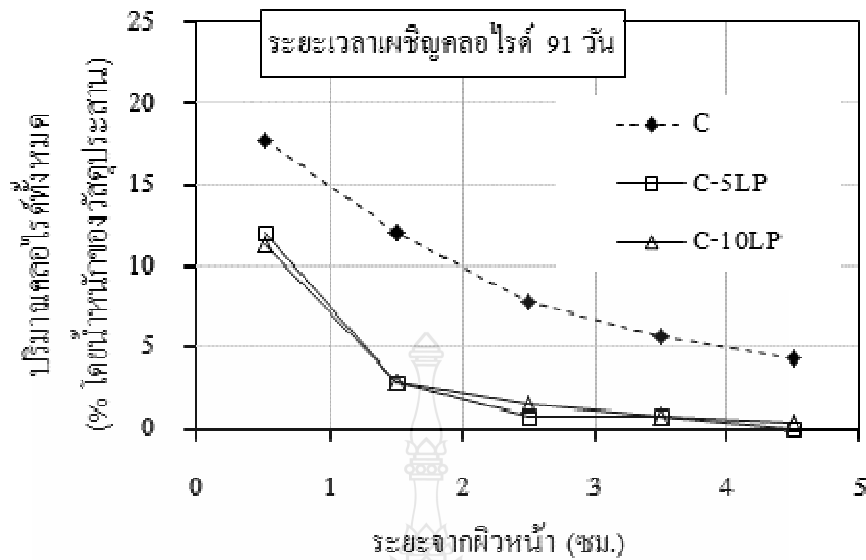
ก) คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน



ข) คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน



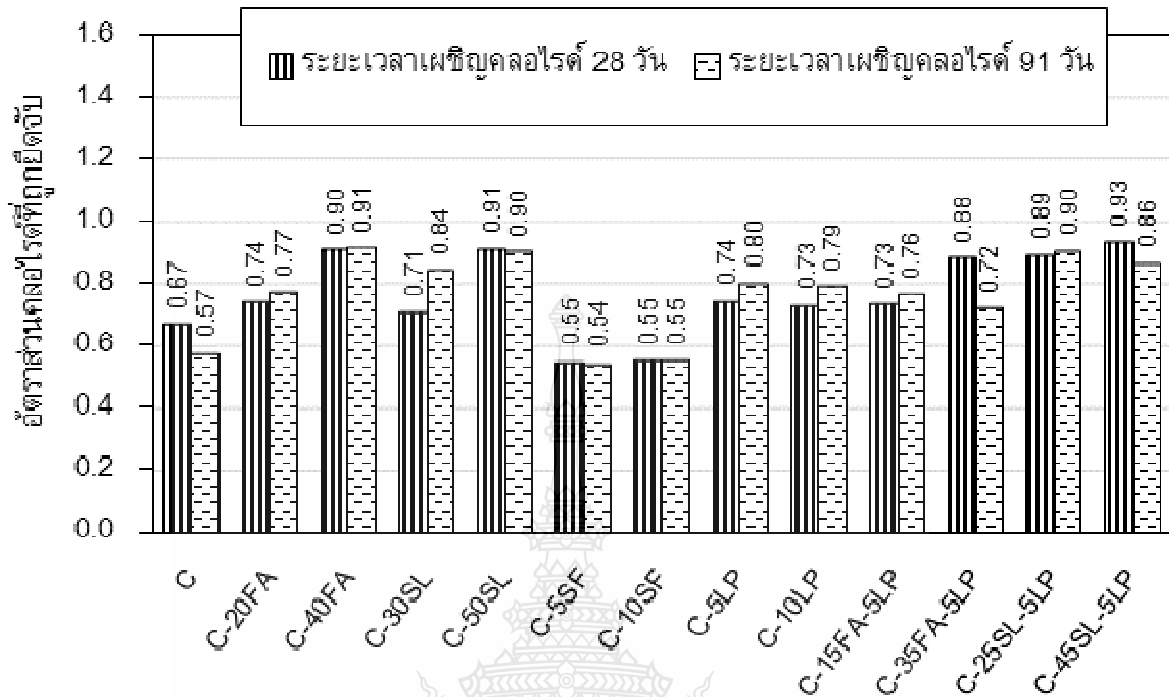
ค) คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม



ง) คอนกรีตผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

รูปที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride ratio) ของคอนกรีต โดยแสดงทั้งคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน โดยค่าอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเป็นค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของระยะจากผิวหน้าของคอนกรีตชั้นที่ 1 (1 ซม.) 2 (2 ซม.) และ 3 (3 ซม.) เนื่องจาก ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของทั้ง 3 ชั้นดังกล่าว มีปริมาณคลอไรด์ที่มากระดับหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวแทนของอัตราส่วนคลอไรด์ที่ยึดจับได้ (ในขณะที่ชั้นที่ 4 (4 ซม.) และ 5 (5 ซม.) นั้น ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีน้อยหรือไม่มีเลย ดังนั้นทั้ง 2 ชั้นที่กล่าวมาจึงไม่ได้นำมาพิจารณา) จากภาพพบว่า อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน คอนกรีตผสมตะกั่วแดงเคลือบเคลือบเคลือบ คอนกรีตผสมตะกั่วแดงเคลือบเคลือบเคลือบและผงหินปูน และคอนกรีตผสมผงหินปูน (ทั้งในระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน) มีค่ามากกว่าคอนกรีตล้วน เนื่องจากซิลิกา (Si_2O_3) และอลูมินา (Al_2O_3) จะทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้เป็น C-S-H และ C-A-H เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของผลผลิตนี้ ส่งผลต่อความสามารถกักเก็บคลอไรด์ทางกายภาพอีกด้วย กล่าวคือ คลอไรด์จะถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิก [27, 38] ส่งผลให้อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมมีค่าไม่แตกต่างกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

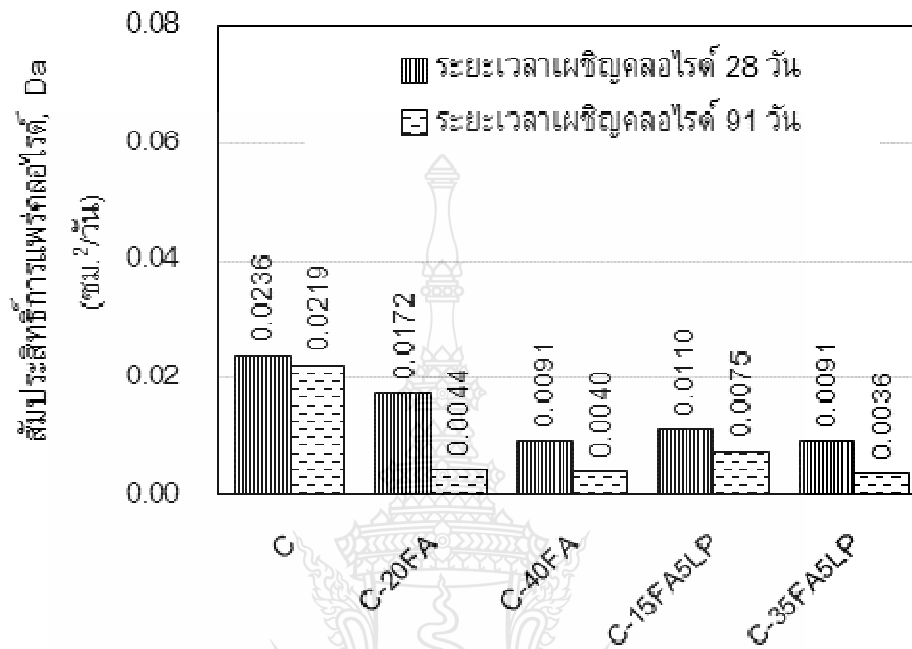


รูปที่ 4.4 อัตราส่วนคองกรีตที่ถูกยึดจับของคอนกรีต ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

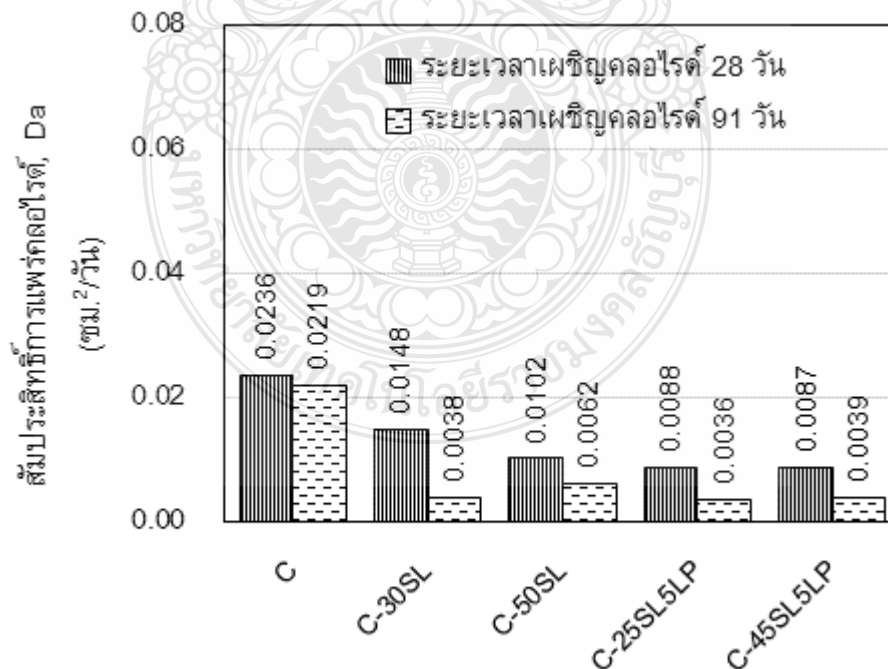
รูปที่ 4.5 ก แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน จากภาพพบว่า การใช้เถ้าลอย และผงหินปูน แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์สามารถลดสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ได้มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน โดยจะเห็นผลอย่างชัดเจนที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น เนื่องจากการใช้เถ้าลอยและผงหินปูน แทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ขนาดและโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีตเกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น ทำให้โครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยลดลง นอกจากนี้เถ้าลอยยังสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ที่ทำให้เกิดผลผลิตของ C-S-H และ C-A-H เพิ่มมากขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของผลผลิตนี้ ก็ส่งผลดีต่อโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีตอีกด้วย [15] เมื่อโครงสร้างโพรงช่องว่างลดลง สัมประสิทธิ์การแพร่จึงลดลงตามไปด้วยและรูปที่ 4.5 ข ที่เป็นการแสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ก็มีแนวโน้มเดียวกันกับรูปที่ 4.5 ก

รูปที่ 4.5 ค แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม จากภาพเมื่อพิจารณาเฉพาะระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 91 วัน พบว่า คอนกรีตผสมผงหินปูนที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด

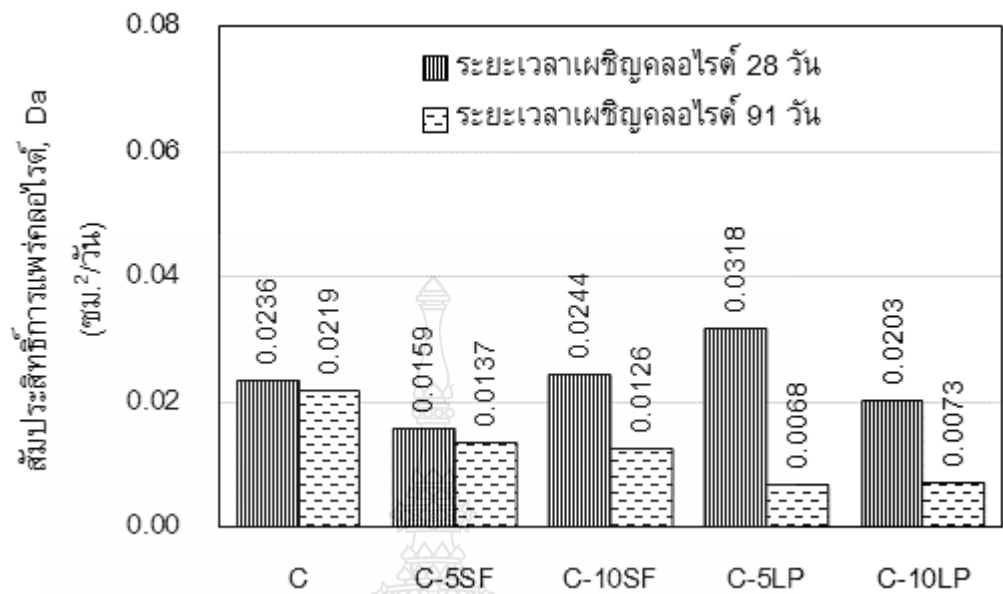
เนื่องจากผงหินปูนเป็นวัสดุผงละเอียดที่สามารถช่วยในการเติมเต็มโพรงช่องว่างในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าลดลง



ก) คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน



ข) คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน



ค) คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

4.2 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างจริงของโครงสร้างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง

4.2.1 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีต

จากการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตของโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลของจังหวัดระยอง แล้วนำผงตัวอย่าง (โดยใช้ผงตัวอย่างที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีต โดยจำกัดความลึกของการขีดไว้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร) มาทำการทดสอบเพื่อหาปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต ซึ่งจะหาปริมาณเกลือคลอไรด์อยู่ 2 ชนิด คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ในคอนกรีต และปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีต (Free Chloride) โดยตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตที่ได้จากการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตในสภาพแวดล้อม ทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง

ตารางที่ 4.5 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง

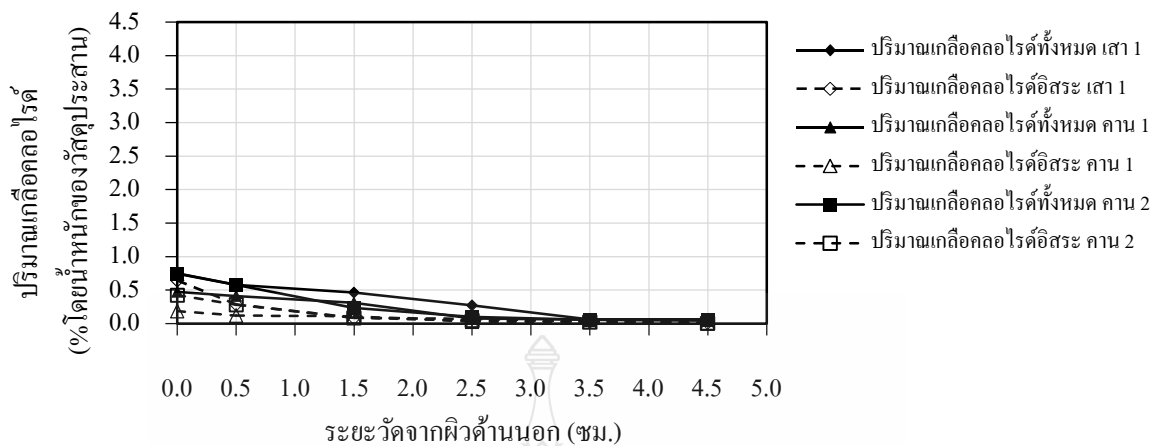
ลำดับ	ประเภท โครงสร้าง คอนกรีต และสถานที่ตั้ง	ตำแหน่งใน การเก็บ อย่างผง คอนกรีต คอนกรีต	อายุ โครง สร้าง (ปี)	ระยะ ทาง จากชาย ฝั่ง ทะเล (ม.)	ความสูง จากระดับ น้ำทะเล สูงสุด (ม.)	สภาวะ สิ่งแวดล้อม ทะเลใน จุดที่ เก็บตัวอย่าง ผงคอนกรีต	ปริมาณ	ปริมาณ
							เกลือ คลอไรด์ ทั้งหมด (%โดย น้ำหนักของ วัสดุ ประสาน)	เกลือ คลอไรด์ อิสระ (%โดย น้ำหนัก ของวัสดุ ประสาน)
1	อาคาร ค.ส.ล. 3 ชั้น	เสา ชั้นที่ 1	30	28	+5.00	*	0.749	0.648
2	ม.4 ต.บ้านฉาง	คานา1 ชั้นที่ 2	30	28	+5.00	*	0.475	0.185
3	อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	คานา2 ชั้นที่ 2	30	27	+5.00	*	0.746	0.428
4	อาคาร ค.ส.ล. 5 ชั้น	ผนัง1 ชั้นที่ 1	30	120	+12.00	*	0.156	0.066
5	ม.4 ต.บ้านฉาง	ผนัง2 ชั้นที่ 1	30	120	+12.00	*	0.23	0.014
6	อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	ผนัง3ชั้นที่ 1	30	121	+11.00	*	0.427	0.233
7	ท่าเทียบเรือสะพาน	คานา1 ชั้นที่ 1	40	-210	-1.50	**	1.591	1.285
8	ปลา(ตัวที่ 1) ม.5	เสา ชั้นที่ 1	40	-210	-1.00	**	3.483	1.5
9	อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	คานา2 ชั้นที่ 2	40	-210	+0.50	*	1.664	1.21
10	ท่าเทียบเรือสะพาน	เสา 1	30	-4	-0.20	**	1.756	0.753
11	(ตัวที่ 2) ม.5 ต.พลา	เสา 2	30	-4	± 0.00	**	2.534	1.132
12	อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	เสา 3	30	-4	+0.50	*	1.409	0.747
13		คานา	30	-2	+1.00	*	1.869	0.846
14	เขื่อนป้องกันตลิ่ง	ผนัง 1	3	0	± 0.00	**	1.058	0.361
15	อ.บ้านฉาง จ.ระยอง	ผนัง 2	3	0	± 0.00	**	0.478	0.065
16	สะพาน	เสา 1	40	65	-0.50	**	1.145	0.976
17	ม.5 ต.พลา	เสา 2	40	65	± 0.00	**	1.355	0.72
18	อ.บ้านฉาง	เสา 3	40	65	+0.50	*	2.524	1.533
19	จ.ระยอง	คานา	40	65	+1.00	*	0.217	0.147

หมายเหตุ * สภาวะบรรยากาศทะเล

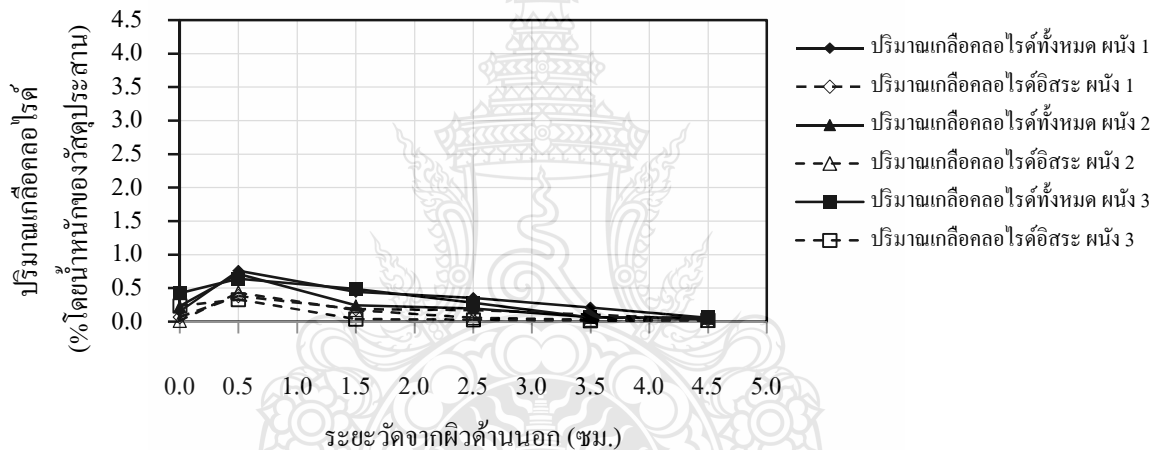
** สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง

รูปที่ 4.4 แสดงการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของอาคาร ค.ส.ล. 3 ชั้น โดยเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตจากเสา 1 ตำแหน่ง และ คาน 2 ตำแหน่ง อาคารดังกล่าวตั้งอยู่บริเวณบนชายฝั่งทะเล ห่างจากฝั่งเข้ามาในแผ่นดิน 28 เมตร หมู่ที่ 4 ตำบลบ้านฉาง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง ซึ่งถือเป็นโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ภายใต้สภาวะบรรยากาศทะเล โดยมีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ประมาณ 30 ปี จากภาพพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นจากผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งคลอไรด์ที่แทรกซึมในโครงสร้างดังกล่าวนี้ เกิดจาก *กระบวนการแพร่ (Diffusion)* เป็นหลัก โดยแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ และมีการสะสมของปริมาณคลอไรด์จนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ [10] ส่วนปริมาณของคลอไรด์อิสระ พบว่า มีค่าน้อยกว่าของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และมีปริมาณไปในแนวโน้มเดียวกับปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมด

รูปที่ 4.5 แสดงการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของอาคาร ค.ส.ล. 5 ชั้น โดยเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตจากผนัง 3 ตำแหน่ง อาคารดังกล่าวตั้งอยู่บริเวณบนชายฝั่งทะเล ห่างจากฝั่งเข้ามาในแผ่นดิน 120 เมตร หมู่ที่ 4 ตำบลบ้านฉาง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง ซึ่งถือเป็นโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ภายใต้สภาวะบรรยากาศทะเล โดยมีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ประมาณ 30 ปี จากภาพพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นจากผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งคลอไรด์ที่แทรกซึมในโครงสร้างดังกล่าวนี้ เกิดจาก *กระบวนการแพร่ (Diffusion)* เป็นหลัก โดยแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ และมีการสะสมของปริมาณคลอไรด์จนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ [10] ส่วนปริมาณของคลอไรด์อิสระ พบว่า มีค่าน้อยกว่าของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และมีปริมาณไปในแนวโน้มเดียวกับปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมด เช่นเดียวกับอาคาร ค.ส.ล. 3 ชั้น



รูปที่ 4.4 การแทรกซึมของเชื้อคลอไรด์ของอาคาร ค.ส.ล. 3 ชั้น บริเวณหมู่ที่ 4 ตำบลบ้านฉาง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง

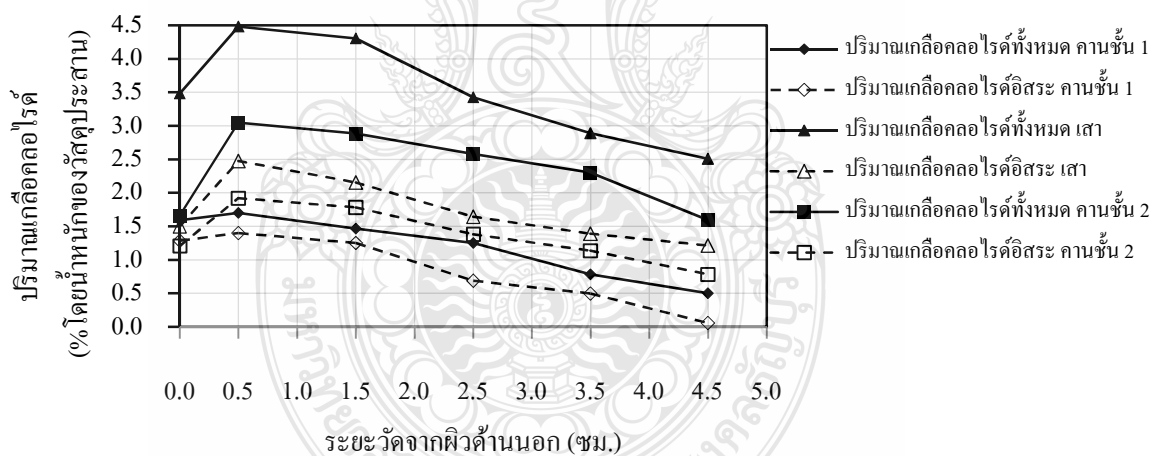


รูปที่ 4.5 การแทรกซึมของเชื้อคลอไรด์ของอาคาร ค.ส.ล. 5 ชั้น บริเวณหมู่ที่ 4 ตำบลบ้านฉาง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง

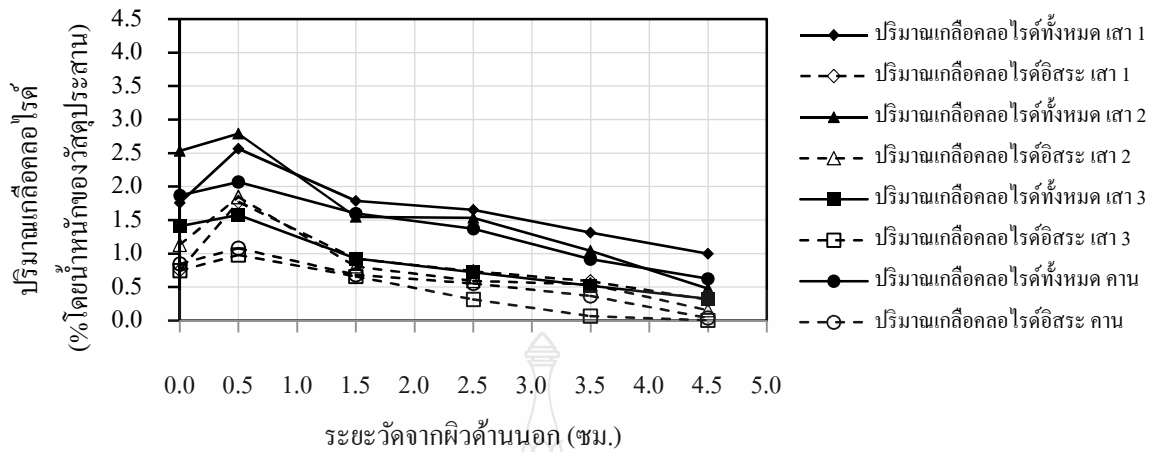
รูปที่ 4.6 แสดงการแทรกซึมของเชื้อคลอไรด์ในน้ำทะเล ซึ่งเป็นการเก็บผงตัวอย่าง ทำเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1) โดยเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตจากเสา 1 ตำแหน่ง และ คาน 2 ตำแหน่ง อาคารดังกล่าวตั้งอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลออกไป -210 เมตร หมู่ที่ 5 ตำบลพลา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง ตัวอย่างอาคารดังกล่าวตั้งอยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเล ในสภาพสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยมีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ประมาณ 40 ปี ซึ่งคลอไรด์ที่แทรกซึมในโครงสร้างดังกล่าวนี้ จึงเกิดจากกระบวนการดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) เป็นหลัก น้ำเกลือคลอไรด์จะถูกดึงผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กน้อยในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต ซึ่งกลไกนี้ก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใ้ระยะเวลาอันสั้น จากภาพพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นจากผิวหน้าของ

คอนกรีต ส่วนปริมาณของคลอไรด์อิสระ พบว่ามีค่าน้อยกว่าของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และมีปริมาณไปในแนวโน้มนี้นี้เดียวกับปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมด

รูปที่ 4.7 แสดงการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล ซึ่งเป็นการเก็บพงตัวอย่าง ทำเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 2) โดยเก็บพงตัวอย่างคอนกรีตจากเสา 3 ตำแหน่ง และ คาน 1 ตำแหน่ง อาคารดังกล่าวตั้งอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลออกไป -4 เมตร หมู่ที่ 5 ตำบลพลา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง ด้วยอาคารดังกล่าวตั้งอยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเล ในสภาพสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยมีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ประมาณ 40 ปี ซึ่งคลอไรด์ที่แทรกซึมในโครงสร้างดังกล่าวนี้ จึงเกิดจากกระบวนการดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) เป็นหลัก น้ำเกลือคลอไรด์จะถูกดึงผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆ ในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาอันสั้น จากภาพพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นจากผิวหน้าของคอนกรีต ส่วนปริมาณของคลอไรด์อิสระ พบว่ามีค่าน้อยกว่าของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และมีปริมาณไปในแนวโน้มนี้นี้เดียวกับปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมด เช่นเดียวกับทำเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1)

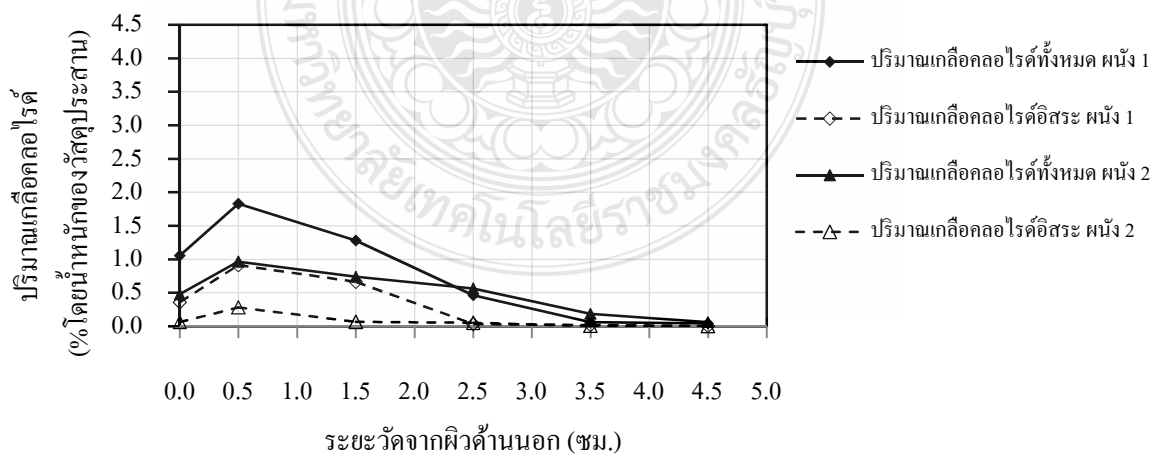


รูปที่ 4.6 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ บริเวณทำเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 1) หมู่ที่ 5 ตำบลพลา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง



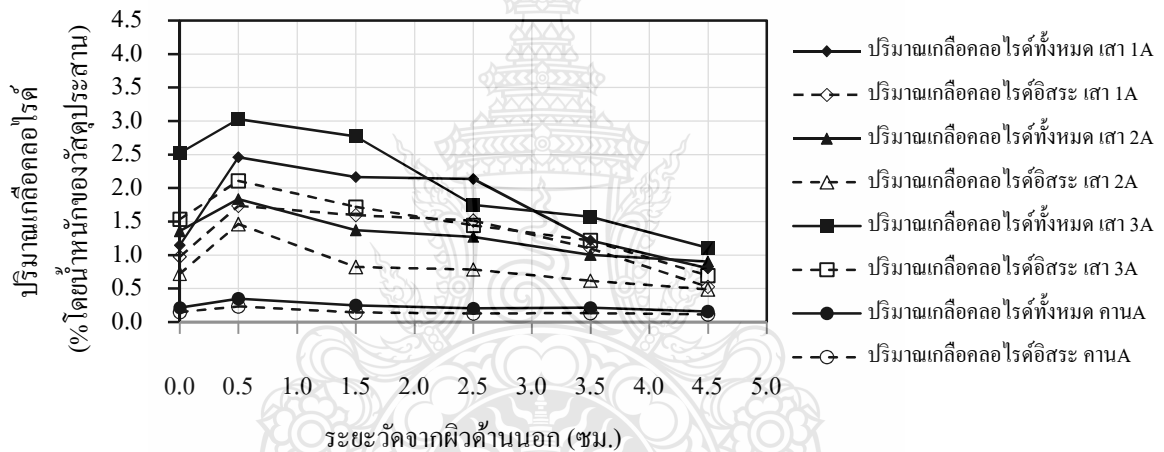
รูปที่ 4.7 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ บริเวณท่าเทียบเรือสะพานปลา (ตัวที่ 2) หมู่ที่ 5 ตำบลพลา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง

รูปที่ 4.8 แสดงการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของเขื่อนป้องกันตลิ่ง โดยเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตจากผนัง 2 ตำแหน่ง อาคารดังกล่าวตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล เพื่อป้องกันการกัดเซาะชายฝั่ง หมู่ที่ 4 ตำบลบ้านฉาง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง ซึ่งถือเป็นโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ภายใต้สภาพอากาศคลื่นและละอองน้ำทะเล โดยมีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ประมาณ 3 ปี ซึ่งคลอไรด์ที่แทรกซึมในโครงสร้างดังกล่าวนี้ จึงเกิดจากแรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ จากภาพพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นจากผิวหน้าของคอนกรีต ส่วนปริมาณของคลอไรด์อิสระ พบว่า มีค่าน้อยกว่าของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และมีปริมาณไปในแนวโน้มเดียวกับปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมด



รูปที่ 4.8 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของเขื่อนป้องกันตลิ่ง บริเวณหมู่ที่ 4 ตำบลบ้านฉาง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง

รูปที่ 4.9 แสดงการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล ซึ่งเป็นการเก็บผงตัวอย่าง สะพาน โดยเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตจากเสา 3 ตำแหน่ง และ คาน 1 ตำแหน่ง สะพานดังกล่าวตั้งอยู่ ห่างจากชายฝั่งทะเลลึกมาในแผ่นดิน 65 เมตร พื้นที่เป็นลักษณะปากแม่น้ำ หมู่ที่ 5 ตำบลพลา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง ด้วยอาคารดังกล่าวตั้งอยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเล ในสภาพสภาวะเปียก สลับแห้ง โดยมีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ประมาณ 40 ปี ซึ่งคลอไรด์ที่แทรกซึมในโครงสร้างดังกล่าว นี้ จึงเกิดจาก กระบวนการดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) เป็นหลัก น้ำเกลือคลอไรด์จะถูก ดึงผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆ ในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ ระยะเวลาอันสั้น จากภาพพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นจาก ผิวหน้าของคอนกรีต ส่วนปริมาณของคลอไรด์อิสระ พบว่า มีค่าน้อยกว่าของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และมีปริมาณไปในแนวโน้มเดียวกับปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมด



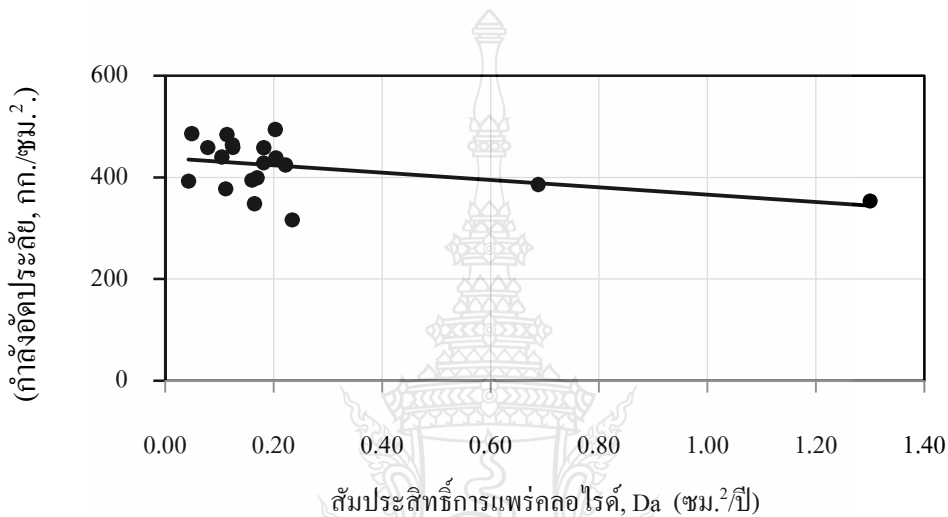
รูปที่ 4.9 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ บริเวณสะพานปากแม่น้ำ หมู่ที่ 5 ตำบลพลา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง

4.2.2 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตกับกำลังอัดประลัย และเวลาของคอนกรีต ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล

จากการนำข้อมูลที่ได้จากการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีต มาหาค่าการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในระดับความลึกต่างๆ ทำให้ค่าที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient: D_c) ของคอนกรีต โดยการแพร่ของคลอไรด์เกิดจากความแตกต่าง ความเข้มข้นของคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีต กล่าวคือคลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง ไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากคำตอบของสมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของ ฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งจะทำได้ค่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ และ

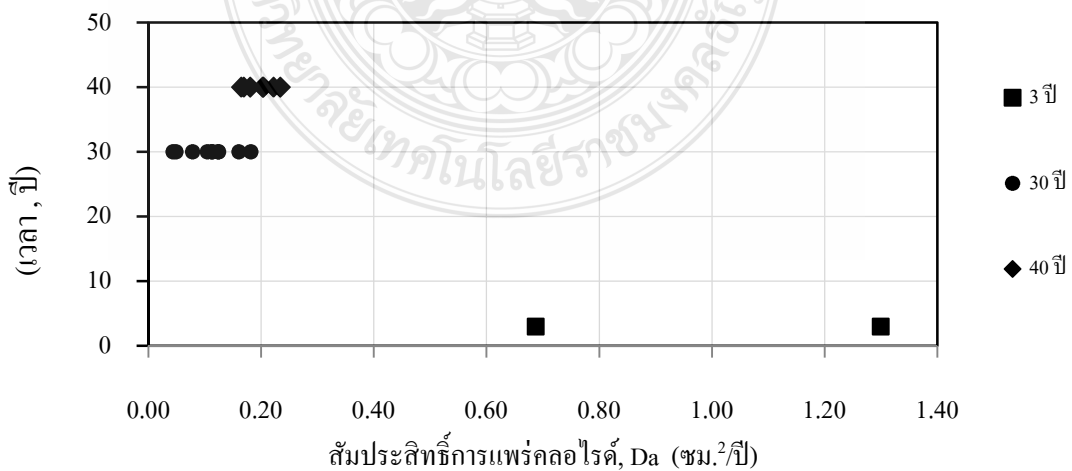
นำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.10

จากรูปที่ 4.10 เมื่อนำมาเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมทะเล พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ จะมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อกำลังอัดคอนกรีตมีค่าน้อยลง



รูปที่ 4.10 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

หากนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตกับเวลา พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ มีค่าลดลงเมื่ออายุการใช้งานนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตกับเวลา

บทที่ 5

สรุปผลศึกษา

จากการศึกษาการแทรกซึมเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมในห้องปฏิบัติการ และการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างจริงของคอนกรีตภายใต้สภาวะสภาพแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นจากผิวหน้าของคอนกรีต เมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเพิ่มขึ้น
2. คอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน สามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้มากกว่าคอนกรีตล้วน โดยเห็นผลอย่างชัดเจนที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น
3. อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดยึดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน มีค่ามากกว่า ในขณะที่ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม มีค่าไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตล้วน
4. การใช้เถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถลดสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ได้มากกว่า ในขณะที่การใช้ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ก็ยังมีแนวโน้มว่าสามารถลดสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ได้มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน โดยจะเห็นผลอย่างชัดเจนที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น
5. โครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเลนั้น ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระ ลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นจากผิวหน้าของคอนกรีต โดยปริมาณคลอไรด์อิสระมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกับปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมด
6. โครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเลนั้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตลดลงเมื่อมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น
7. โครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเลนั้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตค่าน้อยลง เช่นเดียวกับคอนกรีตที่สัมผัสเกลือคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการ

บรรณานุกรม

- [1] Krammart P. and Tangtermsirikul S. (2002). Strength Reduction and Expansion of Mortars with Fly Ash. Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, V.13, No.3 pp. 9-16.
- [2] การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์ (ออนไลน์). Available:
http://maemoh.egat.com/index_maemoh.php?content=sara&topic=2.
- [3] เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต (2552), การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยฝุ่นหินปูน และสารขยายตัว, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552, นครราชสีมา.
- [4] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย, 2555.
- [5] American Society for Testing and Materials , ASTM C618-00 , Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete , Annual Book of ASTM Standards , 2001 , Vol. 04.02 , Philadelphia , 310-313.
- [6] กระทรวงอุตสาหกรรม, “กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต” มาตรฐาน มอก.2135-2545 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2546 หน้า 3.
- [7] สหภาพ หอมวุฒิวงศ์, ดิลก คูรัตนเวช และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, “การทดสอบและแปรผลการทดสอบต่อคุณสมบัติต่อเถ้าถ่านหิน,” การสัมมนาทางวิชาการเรื่องการนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต, ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [8] ฉัฐมนต์ กัมปนานนท์ จุลเศรษฐ์ ฤกษ์ภักดี. (2545).เอกสารประกอบการอบรมเทคนิคและวิธีการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตในสนาม. เทคโนโลยีการทดสอบคอนกรีต. สถาบันราชภัฏนครราชสีมา.
- [9] ทวีชัย สำราญวานิช. (2004). Introduction to Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete[online] Available [URL://www.bucc4.buu.ac.th~twc](http://www.bucc4.buu.ac.th~twc).
- [10] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. (2004). ความคงทนของคอนกรีต. กรุงเทพฯ : บริษัทจุดทองจำกัด

บรรณานุกรม (ต่อ)

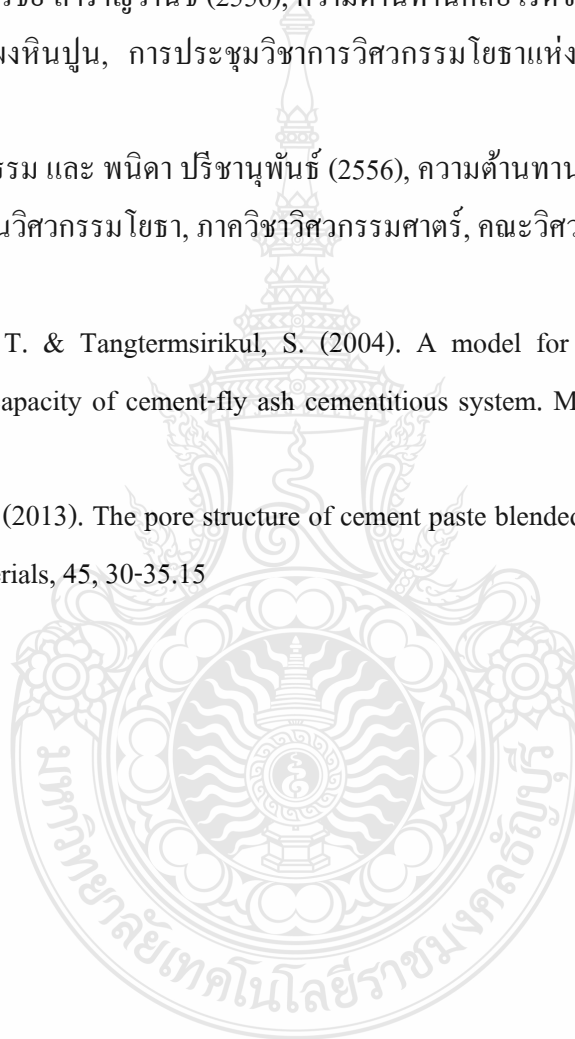
- [11] ชัยชาญ โชติถนอม. (2004). การศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยค้ำขนาด. ขอนแก่น : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [12] Shamasd A (2003). Reinforcement corrosion in concrete structure its monitoring and service life prediction. Cement & concrete composites, 25 459-474.
- [13] Soloka I. (1990). Concrete in hot environments. Great Britain : Alden Press.
- [14] Funahashi M. (1990). Predicting corrosion – free service life of a concrete structure in a chloride environments. ACI Mat. J87(6) : 584-587.
- [15] Bakker RFM. (1988). Corrosion of steel in concrete. New York : Chapman and Hall, p.22-55.
- [16] Dhir R. K., Jones M.R. (1999). Development of chloride – resisting concrete using fly ash. Fuel, 78, 137-142
- [17] วิเชียร ชาลี. (2550) สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเล. ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 3 34-26 ตุลาคม 2550 (หน้า MAT 103 – 109)
- [18] Ann K.Y., Ahn J.H., Ryou J.S. (2009). The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures. Construction and building Materials, 23, 239-245.
- [19] Song H – W, Hong C and Ann K Y. (2008). Factors influencing chloride transport in concrete Structure exposed to marine environment. Cement & Concrete Composites., Vol. 30, 113-121
- [20] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : บริษัทจุดทอง จำกัด.
- [21] Thomas M.D.A. (1996). Chloride thresholds in marine concrete. Cement and Concrete Research, 26, 513-519
- [22] Alonso C., Andrade C., Castellote M. and Castro P. (2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. Cement and Concrete Research; Vol. 30, 1047-1055
- [23] Khatib J.M and Mangat P.S. (2000). Influence of high-temperature and low-humidity curing on chloride penetration in blended cement concrete. Vol.32, 1743-1753

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [24] Thomas M.D.A., Bamforth P.B. (1999). Modeling chloride diffusion in concrete : effect of fly ash and slag. *Cement and concrete Research*, 29,487-495
- [25] Dhir R. K. and B. J Magee. (1998). Impact of BS EN 450 PFA on concrete construction in the UK. Vol.12, 59-74.
- [26] Gjorv O.E. (1979). Diffusion of chloride ions from seawater into concrete. Vol.9,229-238
- [27] Wee T.H., Wong S.F., Swaddiwudhipong S., Lee S.L. (1997). A Prediction method for long-term chloride concentration profiles in hardened cement matrix materials. *ACI materials Journal*, 94, 565-576
- [28] American Society for Testing and Materials, ASTM C 33 – 99a (1995): Standard Specification for Concrete Aggregates, *Annual Book of ASTM Standards*.4
- [29] American Society for Testing and Materials, ASTM C 188 – 95 (1995): Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, *Annual Book of ASTM Standards*.5
- [30] American Society for Testing and Materials, ASTM C 204 – 00 (2000): Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, *Annual Book of ASTM Standards*.6
- [31] American Society for Testing and Materials, ASTM C 1152 – 03 (2003): Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.7
- [32] American Society for Testing and Materials, ASTM C1218 / C1218M - 15 (2015): Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.8
- [33] Simcic, T., Pejovnik, S., Schutter, G. De., & Bosiljkov, V. B. (2015). Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting-drying cycles. *Construction and Building Materials*.9
- [34] Thomas, M. & Matthews, J. (2004). Performance of pfa concrete in a marine environment - 10-year results. *Cement and Concrete Composites*, 26, 5-20.10

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [35] Leng, F., Feng, N., & Lu, X. (2000). Experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 989-992.11
- [36] ลีน่า ปรีก และ ทวีชัย สำราญวานิช (2556), ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, พฤษภาคม 2556, เชียงใหม่ 12
- [37] กรรภิรมย์ ศรีสุวรรณ และ พนิดา ปรีชานุพันธ์ (2556), ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม, โครงการวิศวกรรมโยธา, ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา13
- [38] Sumranwanich, T. & Tangtermsirikul, S. (2004). A model for predicting time-dependent chloride binding capacity of cement-fly ash cementitious system. *Materials and Structures*, 37, 387-396.14
- [39] Yu, Z. & Ye, G. (2013). The pore structure of cement paste blended with fly ash. *Construction and Building Materials*, 45, 30-35.15





ภาคผนวก ก

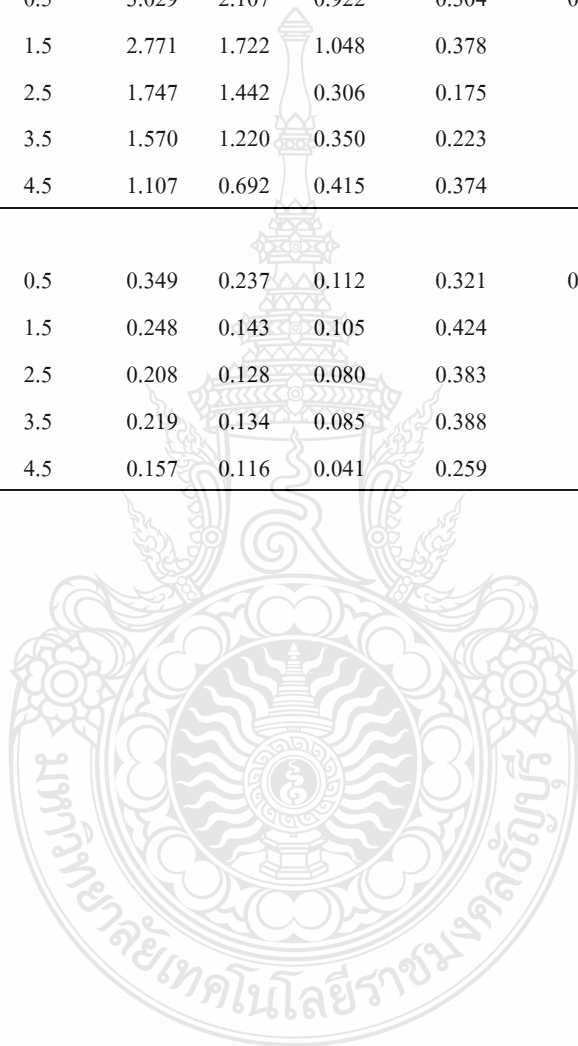
ข้อมูลการห้ามประสิทธิการแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

No.	Mix Designation	Distance from surface (cm)	30 - 40 year chloride exposure				Average fixed cl ratio%	Da (cm ² /years)	Chloride exposure period (years)
			Total Cl	Free Cl	Fixed Cl	Fixed Cl Ratio			
1	อาคาร ก.ศ.ล. 3 ชั้น (เสา1)	0.5	0.580	0.289	0.291	0.503	0.686	0.112	30
		1.5	0.467	0.087	0.380	0.813			
		2.5	0.276	0.071	0.204	0.741			
		3.5	0.064	0.029	0.035	0.552			
		4.5	0.062	0.014	0.047	1.000			
2	อาคาร ก.ศ.ล. 3 ชั้น (คาน1)	0.5	0.415	0.120	0.294	0.710	0.655	0.079	30
		1.5	0.312	0.112	0.200	0.641			
		2.5	0.077	0.030	0.047	0.614			
		3.5	0.058	0.029	0.030	0.510			
		4.5	0.049	0.015	0.034	0.688			
3	อาคาร ก.ศ.ล. 3 ชั้น (คาน2)	0.5	0.580	0.283	0.297	0.512	0.543	0.043	30
		1.5	0.235	0.089	0.146	0.623			
		2.5	0.102	0.052	0.050	0.494			
		3.5	0.057	0.027	0.030	0.528			
		4.5	0.050	0.009	0.041	0.823			
4	อาคาร ก.ศ.ล. 5 ชั้น (ผนัง1)	0.5	0.760	0.383	0.378	0.497	0.527	0.124	30
		1.5	0.445	0.188	0.257	0.578			
		2.5	0.355	0.175	0.180	0.507			
		3.5	0.211	0.105	0.106	0.502			
		4.5	0.061	0.029	0.032	0.528			
5	อาคาร ก.ศ.ล. 5 ชั้น (ผนัง2)	0.5	0.712	0.429	0.283	0.398	0.466	0.049	30
		1.5	0.246	0.175	0.071	0.288			
		2.5	0.199	0.057	0.142	0.713			
		3.5	0.068	0.028	0.040	0.583			
		4.5	0.041	0.014	0.026	0.650			
6	อาคาร ก.ศ.ล. 5 ชั้น (ผนัง3)	0.5	0.641	0.333	0.308	0.480	0.763	0.105	30
		1.5	0.488	0.039	0.449	0.920			
		2.5	0.285	0.032	0.253	0.888			
		3.5	0.064	0.014	0.050	0.778			
		4.5	0.064	0.021	0.043	0.667			

No.	Mix Designation	Distance from surface (cm)	30 - 40 year chloride exposure				Average fixed cl ratio%	Da (cm ² /years)	Chloride exposure period (years)
			Total Cl	Free Cl	Fixed Cl	Fixed Cl Ratio			
7	ทำเทียบเรือ	0.5	1.702	1.401	0.301	0.177	0.258	0.165	40
	สะพานปลา	1.5	1.468	1.254	0.213	0.145			
	(ตัวที่ 1)	2.5	1.253	0.689	0.564	0.450			
	คาน 1	3.5	0.784	0.499	0.286	0.364			
	ชั้นที่ 1	4.5	0.501	0.057	0.443	0.886			
8	ทำเทียบเรือ	0.5	4.479	2.474	2.005	0.448	0.489	0.222	40
	สะพานปลา	1.5	4.304	2.154	2.151	0.500			
	(ตัวที่ 1)	2.5	3.425	1.643	1.782	0.520			
	เสา	3.5	2.888	1.392	1.496	0.518			
	ชั้นที่ 1	4.5	2.507	1.214	1.293	0.516			
9	ทำเทียบเรือ	0.5	3.046	1.923	1.123	0.369	0.405	0.234	40
	สะพานปลา	1.5	2.885	1.782	1.103	0.382			
	(ตัวที่ 1)	2.5	2.580	1.382	1.198	0.464			
	คาน 2	3.5	2.302	1.140	1.162	0.505			
	ชั้นที่ 2	4.5	1.597	0.787	0.811	0.508			
10	ทำเทียบเรือ	0.5	2.564	1.772	0.792	0.309	0.450	0.182	30
	สะพานปลา	1.5	1.787	0.921	0.866	0.485			
	(ตัวที่ 2)	2.5	1.652	0.735	0.917	0.555			
	เสา 1	3.5	1.315	0.590	0.726	0.552			
		4.5	1.001	0.310	0.691	0.691			
11	ทำเทียบเรือ	0.5	2.792	1.845	0.946	0.339	0.477	0.124	30
	สะพานปลา	1.5	1.549	0.809	0.740	0.478			
	(ตัวที่ 2)	2.5	1.536	0.594	0.943	0.614			
	เสา 2	3.5	1.045	0.540	0.505	0.483			
		4.5	0.477	0.156	0.321	0.672			
12	ทำเทียบเรือ	0.5	1.579	0.980	0.599	0.379	0.410	0.114	30
	สะพานปลา	1.5	0.930	0.662	0.268	0.288			
	(ตัวที่ 2)	2.5	0.724	0.317	0.407	0.562			
	เสา 3	3.5	0.523	0.068	0.455	0.869			
		4.5	0.328	0.008	0.320	0.977			

No.	Mix Designation	Distance from surface (cm)	30 - 40 year chloride exposure				Average fixed cl ratio%	Da (cm ² /years)	Chloride exposure period (years)
			Total Cl	Free Cl	Fixed Cl	Fixed Cl Ratio			
13	ท่าเทียบเรือ สะพานปลา (ตัวที่ 2) กาน	0.5	2.068	1.079	0.988	0.478	0.549	0.160	30
		1.5	1.603	0.685	0.918	0.573			
		2.5	1.373	0.556	0.817	0.595			
		3.5	0.918	0.368	0.550	0.599			
		4.5	0.629	0.039	0.590	0.938			
14	เขื่อนป้องกันตลิ่ง หน้า 1	0.5	1.831	0.914	0.917	0.501	0.637	0.687	3
		1.5	1.283	0.664	0.618	0.482			
		2.5	0.466	0.033	0.432	0.929			
		3.5	0.064	0.019	0.045	0.701			
		4.5	0.043	0.006	0.036	0.854			
15	เขื่อนป้องกันตลิ่ง หน้า 2	0.5	0.965	0.285	0.681	0.705	0.838	1.299	3
		1.5	0.743	0.069	0.674	0.907			
		2.5	0.564	0.055	0.509	0.903			
		3.5	0.189	0.007	0.181	0.961			
		4.5	0.064	0.006	0.059	0.911			
16	สะพาน (เสา 1)	0.5	2.462	1.735	0.727	0.295	0.148	0.181	40
		1.5	2.165	1.596	0.569	0.263			
		2.5	2.135	1.513	0.623	0.292			
		3.5	1.220	1.099	0.122	0.100			
		4.5	0.801	0.526	0.276	0.344			
17	สะพาน (เสา 2)	0.5	1.836	1.461	0.374	0.204	0.102	0.204	40
		1.5	1.370	0.823	0.547	0.399			
		2.5	1.273	0.787	0.486	0.382			
		3.5	1.002	0.618	0.384	0.383			
		4.5	0.904	0.488	0.416	0.460			

No.	Mix Designation	Distance from surface (cm)	30 - 40 year chloride exposure				Average fixed cl ratio%	Da (cm ² /years)	Chloride exposure period (years)
			Total Cl	Free Cl	Fixed Cl	Fixed Cl Ratio			
18	3)	0.5	3.029	2.107	0.922	0.304	0.152	0.169	40
		1.5	2.771	1.722	1.048	0.378			
		2.5	1.747	1.442	0.306	0.175			
		3.5	1.570	1.220	0.350	0.223			
		4.5	1.107	0.692	0.415	0.374			
19	4)	0.5	0.349	0.237	0.112	0.321	0.161	0.203	40
		1.5	0.248	0.143	0.105	0.424			
		2.5	0.208	0.128	0.080	0.383			
		3.5	0.219	0.134	0.085	0.388			
		4.5	0.157	0.116	0.041	0.259			





ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายชูวฤทธิ์ ชะวิญชาญ
วัน เดือน ปีเกิด	24 พฤศจิกายน 2520
ที่อยู่	127 ม.4 ต.ป่าแลวหลวง อ.สันติสุข จ.น่าน 55210
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปี 2545
ประสบการณ์ทำงาน	วิศวกรสนาม บมจ. เอ็นแอล ดีเวลลอปเม้นต์ 2546 - 2549 วิศวกรโยธา ระดับ 3 เทศบาลตำบลจันทวี จ.เชียงราย 2549 วิศวกรโยธา ระดับ 4 เทศบาลตำบลจันทวี จ.เชียงราย 2551 วิศวกรโยธา ระดับ 5 เทศบาลตำบลเวียงชัย จ.เชียงราย 2553 วิศวกรโยธา ระดับ 6 เทศบาลตำบลบ้านฉาง จ.ระยอง 2557 ปัจจุบัน วิศวกรโยธาชำนาญการ องค์การบริหารส่วนจังหวัดน่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน 55000
เบอร์โทรศัพท์	08-4617-6472
E-mail	choovarit24@hotmail.com