

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา

๓ แส่นสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์

(Prediction of chloride penetration in concrete under chloride environment)

แผนงานวิจัย

การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพและการพัฒนาคอนกรีตที่คงทนต่อการทำลาย
เนื่องจากคลอไรด์

(Repair of deteriorated reinforced-concrete structures and development of durable concrete to
chloride attack)

โดย

ผศ.ดร. ทวีชัย สำราญวานิช

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

24 ธ.ค. 2552

264618

กันยายน 2552

Handwritten signature

เชิงปริกา

19 ส.ค. 2553

สนับสนุนโดยทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2551

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแบบจำลองเพื่อการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ โดยแบบจำลองพัฒนาจากคำตอบของกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ ซึ่งมีค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตเป็นตัวแปรหลัก จากผลการศึกษาทดลองพบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด และประเภทสภาพแวดล้อมทะเลซึ่งแบ่งได้เป็นบนฝั่งและในทะเล ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ และอัตราส่วนเนื้อลดยต่อ วัสดุประสานของคอนกรีต และจากแบบจำลองที่พัฒนานี้สามารถทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ได้

Abstract

This research aims to develop a model for predicting the chloride penetration profile of reinforced concrete (RC) structures under chloride environment. The model is developed from the solution of the Fick's second law of diffusion, which surface chloride content of concrete and chloride diffusion coefficient of concrete are main parameters in the model. From the experimental study, it was found that the surface chloride content of concrete depends on water to binder ratios of concrete, exposure period in chloride environment, height from the highest sea level and type of marine environment which is classified as onshore or offshore. While, the chloride diffusion coefficient of concrete depends upon water to binder ratios of concrete, exposure period in chloride environment and fly ash to binder ratios of concrete. From this developed model, the chloride penetration profile of reinforced concrete structures under chloride environment can be predicted.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2551 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบคุณไว้เป็นอย่างสูง นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (Construction & Maintenance Technology Research Center, CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต และท่านศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำแก่ผู้วิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความคงทนของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล	3
2.2 กลไกการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยน้ำทะเล	4
2.3 แหล่งที่มาของคลอไรด์	10
2.4 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	11
2.5 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต	12
2.6 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต	14
2.7 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต	18
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1 การทดลอง	20
3.2 การวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย	46
4.1 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์	46
4.2 การกระจายตัวของ การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกในคอนกรีตจากตัวอย่างที่ได้มาจากโครงสร้างที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์	51
4.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีแบบไม่ทำลาย	67

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 การพัฒนาแบบจำลอง	71
5.1 การพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์	72
5.2 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s)	75
5.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีต (D_a)	85
บทที่ 6 การตรวจสอบแบบจำลอง	95
6.1 การตรวจสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดสอบจากการสำรวจจริง	95
6.2 การตรวจสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดสอบของนักวิจัยอื่น	118
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย	129
บรรณานุกรม	131

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete structures) เป็นโครงสร้างที่ใช้อย่างแพร่หลาย แต่เมื่อใช้งานโครงสร้างไประยะหนึ่งมักประสบปัญหาต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ปัญหาหนึ่งที่พบบ่อยคือ ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดจากเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล โดยเกลือคลอไรด์จะทำให้เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเกิดสนิมขึ้นและทำให้โครงสร้างเสื่อมสภาพลง ส่งผลให้อายุการใช้งานของโครงสร้างสั้นลงกว่าที่ได้ออกแบบใช้งานไว้ ดังนั้น ทราบถึงการแทรกซึมเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมแล้ว ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมากในประยุกต์ใช้งานคอนกรีตสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมเกลือคลอไรด์รุนแรง เช่น สิ่งแวดล้อมทะเลได้

สำหรับการวิเคราะห์การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลอย่างละเอียดนั้น มีกลไกการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ที่ต้องคำนึงถึงหลายอย่าง เช่น การแพร่ (Diffusion) การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) การดึงดูดแคปิลลารี (Capillary suction) และการซึมผ่าน (Permeability) เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาคูสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ด้วย เช่น ความสามารถเก็บกักเกลือคลอไรด์ (Chloride binding capacity) และการพัฒนาปฏิกิริยาของวัสดุประสานประกอบการวิเคราะห์อีกด้วย (Tangtermsirikul S., 2003) แต่ในทางปฏิบัติ เมื่อต้องการออกแบบคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการทำลายของเกลือคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเลแล้ว หากต้องพิจารณาถึงกลไกต่างๆ อย่างละเอียด จะไม่สะดวกในการใช้งาน ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) คำนวณหาการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตแทน (Poulsen E. and Mejlbro L., 2006) โดยเมื่อทราบปริมาณเกลือคลอไรด์ภายในคอนกรีต ณ เวลาเริ่มต้น ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีต อายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร และระยะหุ้มเหล็กเสริมแล้ว ก็จะสามารถหาค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริมได้

ซึ่งค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (Surface chloride content of concrete, C_s) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏ (Apparent chloride diffusion coefficient, D_a) เป็นปัจจัยที่สำคัญในการคำนวณหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏ และค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะห่างจากชายฝั่งและอายุของโครงสร้างนับจากเริ่มเผชิญกับคลอไรด์ เป็นต้น จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ และค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของ โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ได้นี้ไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง เพื่อใช้ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ และใช้ในออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ให้มีความคงทนต่อสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์
2. เพื่อใช้แบบจำลองนี้สำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อิงกับกลไกการแทรกซึมของคลอไรด์
2. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดลองที่ทดสอบ โดยคณะผู้วิจัยเอง และนักวิจัยท่านอื่นๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล

ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นปัญหาที่สำคัญ โดยโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลนั้น อาจเกิดการเสื่อมสภาพได้จากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น การกัดเซาะ การชะล้าง การตกผลึกของเกลือ การทำลายโดยซัลเฟต แต่ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ คือ ปัญหาซึ่งเกิดจากการทำลายโดยเกลือคลอไรด์ โดยเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อเหล็กเสริมภายในโครงสร้างนั้นๆ ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพลง

ทั้งนี้ในน้ำทะเลนั้นประกอบไปด้วย สารประกอบประเภทซัลเฟตและคลอไรด์ของโซเดียมและแมกนีเซียมเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบของน้ำทะเล (Mindess and Young, 1981)

Composition of seawater	Quantity (ppm)
Sodium chloride (NaCl)	27,000
Magnesium chloride (MgCl ₂)	3,200
Magnesium sulphate (MgSO ₄)	3,200
Calcium sulphate (CaSO ₄)	3,200
Calcium chloride (CaCl ₂)	500
Total dissolved salts	34,000

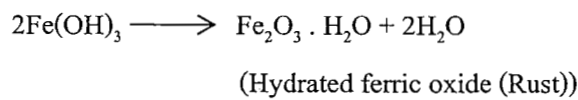
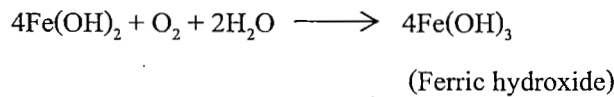
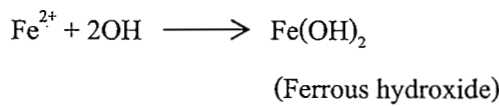
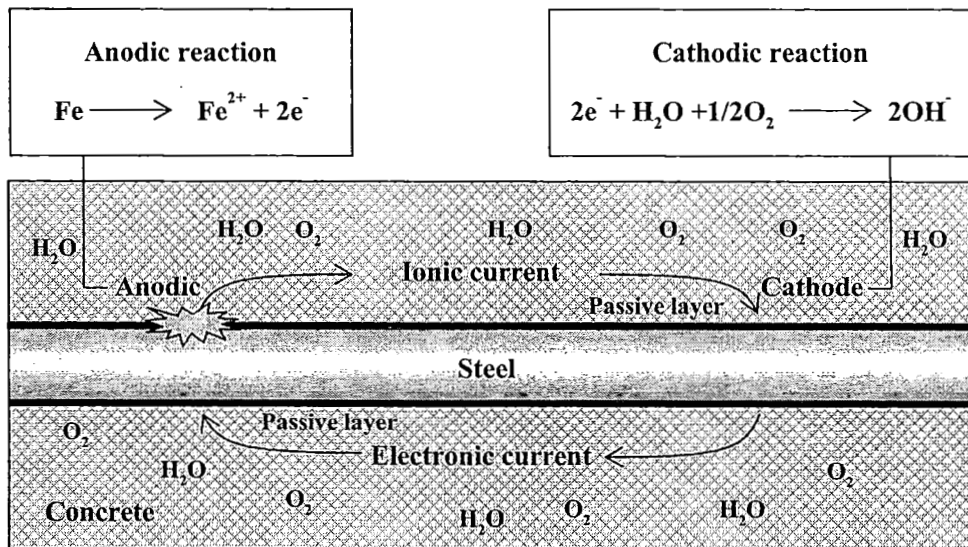
จากตารางที่ 2-1 พบว่า องค์ประกอบหลักของน้ำทะเลคือ โซเดียมคลอไรด์ ซึ่งมีปริมาณมากถึง 27,000 ส่วนในล้านส่วน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้คลอไรด์เป็นสาเหตุที่สำคัญในการทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลเสื่อมสภาพลง

2.2 กลไกการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยน้ำทะเล

การทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยน้ำทะเลนั้น จะเกิดขึ้นได้ทั้งจากเกลือซัลเฟต และเกลือคลอไรด์ โดยสาเหตุของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างนั้น จะมีสาเหตุจากเกลือคลอไรด์เป็นหลัก เนื่องจากน้ำทะเลมีสารละลายคลอไรด์อยู่เป็นส่วนใหญ่ (มากกว่า 90 %) เมื่อเปรียบเทียบกับซัลเฟต

ปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

เกลือคลอไรด์เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีชั้นของฟิล์มออกไซด์ (Protective passivity layer) บางๆ เคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กเสริม เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) แต่เมื่อใดก็ตามหากคลอไรด์ไอออนสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้ แสดงดังภาพที่ 2-1 และสะสมจนมีปริมาณเกินกว่าค่าระดับคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold level) ชั้นของฟิล์มออกไซด์จะถูกทำลาย ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และหากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีก็จะเกิดขึ้น เหล็กเสริมในบริเวณนั้นจะเกิดสนิม

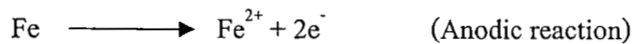


$$\frac{\text{Vol}_{\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}}{\text{Vol}_{\text{Steel}}} = 2 \rightarrow 10$$

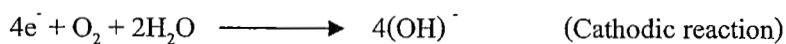
คอนกรีตแตกร้าว และ หลุดร่อน

ภาพที่ 2-1 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

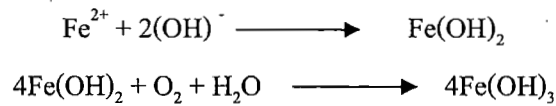
กล่าวคือ บริเวณที่ฟิล์มออกไซด์ถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ ซึ่งเรียกว่า “ปฏิกิริยาอโนด” (Anodic reaction) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



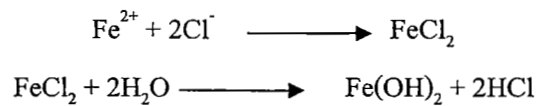
อิเล็กตรอน (e⁻) ที่เกิดขึ้นนี้ จะวิ่งผ่านไปยังฟิล์มที่ไม่ได้ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathodic) หากสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ และออกซิเจนได้ ก็จะเกิดเป็น “ไฮดรอกซิลไอออน ((OH)⁻)” ดังสมการทางเคมี ดังนี้



และในขณะเดียวกัน Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบ ส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจน จนกระทั่งได้ เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide) ดังสมการทางเคมี ดังนี้

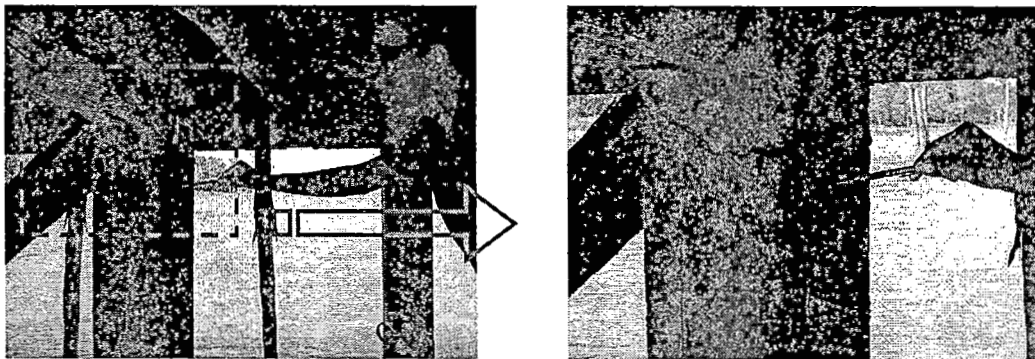


จากนั้น Fe^{2+} ที่เหลืออยู่อีกส่วนหนึ่งที่ขั้วลบนั้น จะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็น เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) และเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดสนิมเพิ่มเติมขึ้นมา ดังสมการทางเคมี ดังนี้



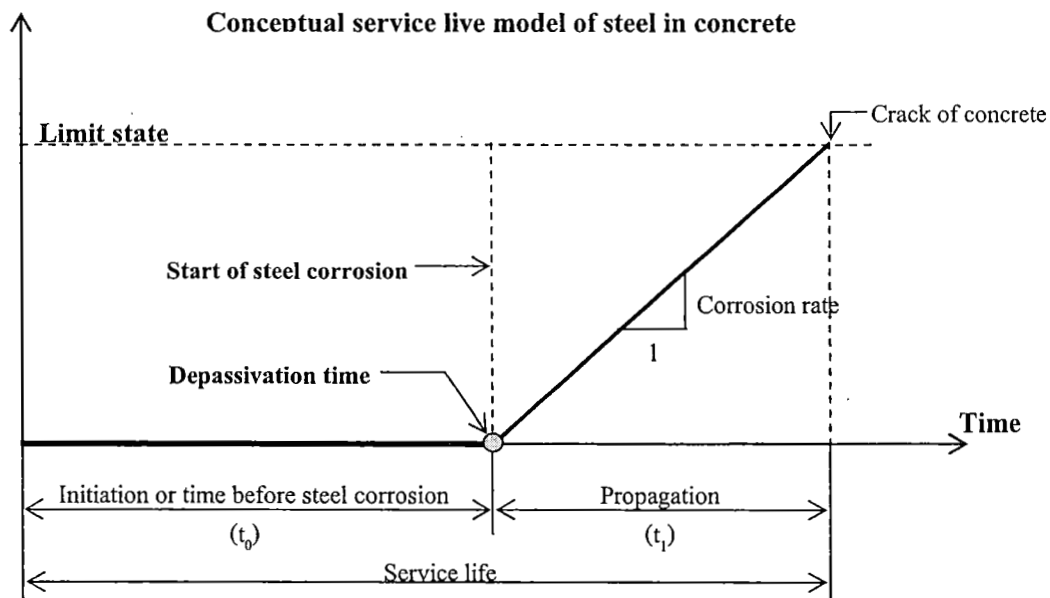
กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยคลอไรด์ (ชุมพล จันทรสม, 2540)

เกลือคลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ โดยคลอไรด์ไอออนเป็นตัวการที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เมื่อคลอไรด์ไอออนเข้าไปสะสมที่ผิวของเหล็กเสริมมากจนถึงจุดวิกฤตเหล็กเสริมจะเริ่มเกิดสนิมและพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ ดังแสดงดังภาพที่ 2-2 ซึ่งจะเป็ตัวอย่างของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมเนื่องมาจากเกลือคลอไรด์



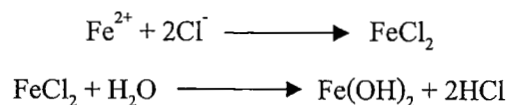
ภาพที่ 2-2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์

โดยกระบวนการในการเกิดสนิมจากสาเหตุของการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออนผ่านเนื้อคอนกรีตนั้น สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอนคือ Initial period และ Propagation period ดังแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต

1. Initial period หรือ ระยะเวลาช่วงแรก (t_0) หมายถึง ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่หล่อคอนกรีตเสร็จจนถึงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วงนี้คลอไรด์ไอออนจะแพร่ผ่านเข้ามาสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต นอกจากนั้นออกซิเจนและน้ำจะซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปยังเหล็กเสริมแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ดังสมการต่อไปนี้



ซึ่งระยะเวลาช่วงแรก (t_0) นี้จะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ความสามารถซึมผ่านได้ของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต และความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น

2. Propagation period หรือ ระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง (t_1) หมายถึง ช่วงระยะเวลาของการพัฒนาการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในคอนกรีต คือ เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งาน

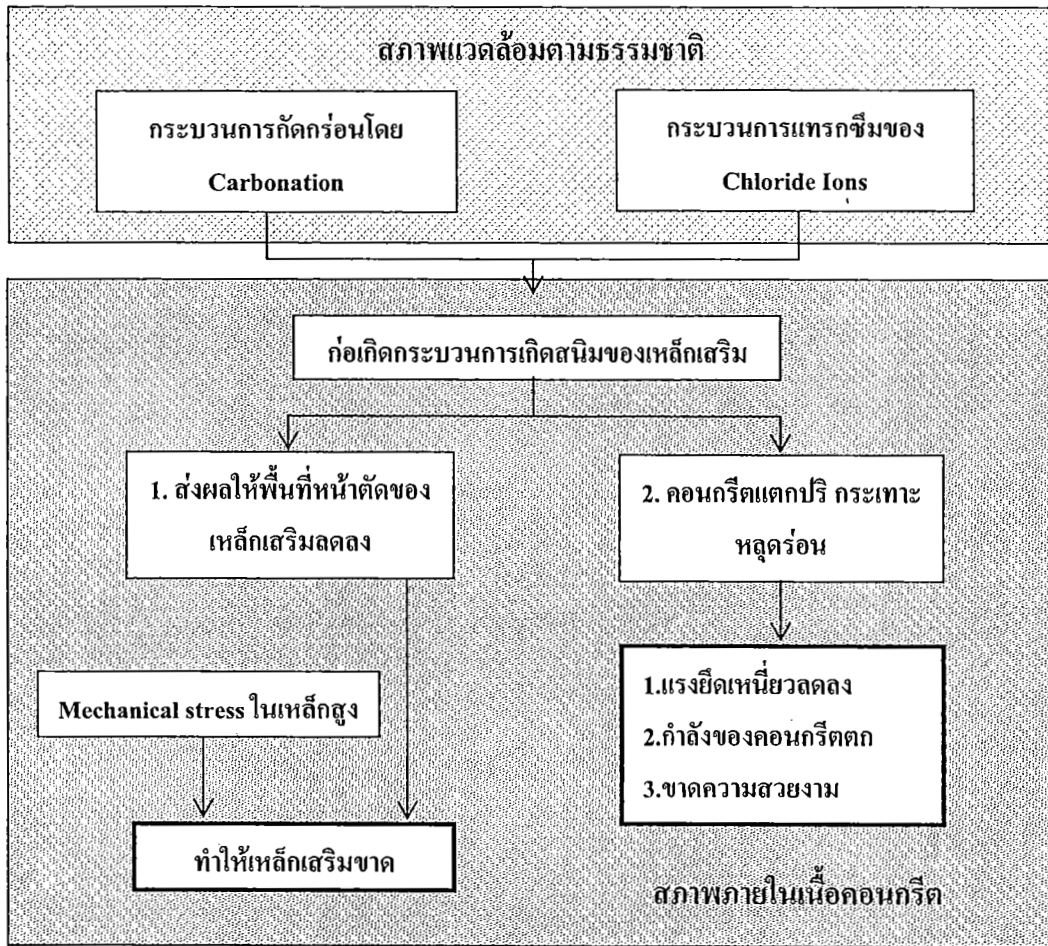
จะเห็นได้ว่า คลอไรด์ไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อยนั้นจะมีผลกระทบต่อการกระตุ้นให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ แต่สนิมเหล็กกลับไม่มีคลอไรด์ไอออนเป็นส่วนประกอบ

ซึ่งกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น จะทำให้เหล็กเสริมบริเวณขั้วลบถูกกัดกร่อนทำให้เหล็กเสริมมีขนาดหน้าตัดเล็กลง และเหล็กเสริมบริเวณขั้วบวกก็จะเกิดเป็นสนิม ซึ่งสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะมีการพัฒนาเพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ประมาณ 4-6 เท่า ดันให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่กระเทาะออก เมื่อการเกิดสนิมเพิ่มมากขึ้น คอนกรีตก็จะหลุดร่อนออกเป็นชั้นๆ (Delamination) ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เป็นผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนี้สูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่นคง แข็งแรงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง อัตราการพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ความรุนแรงของสภาพแวดล้อมรอบโครงสร้างนั้นๆ ซึ่งภาพที่ 2-4 คือแผนภาพแสดงกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และ ภาพที่ 2-5 แสดงกระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

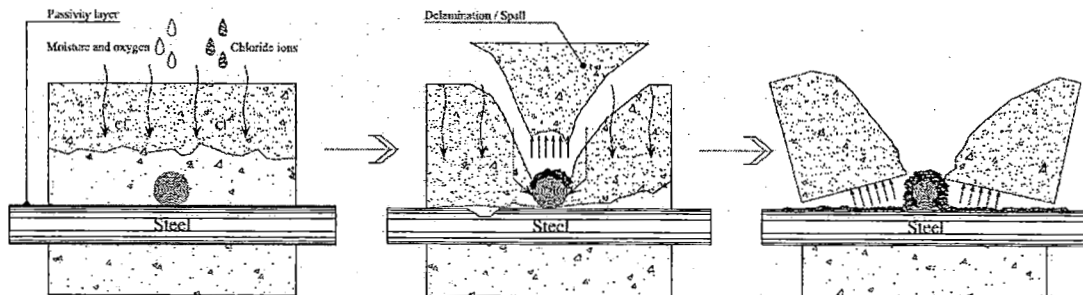
นอกจากการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออนผ่านเนื้อคอนกรีต จะเป็นสาเหตุของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว ปฏิริยาคาร์บอนชั้นยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งปฏิริยาคาร์บอนชั้นนี้จะลดความเป็นด่างของคอนกรีตลง ซึ่งความเป็นด่างของคอนกรีตนี้จะเป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมเกิดสนิม โดยปกติ ค่า pH ของคอนกรีตจะอยู่ระหว่าง 12-13 หากค่า pH ของคอนกรีตลดลงจนถึงจุดวิกฤต รวมทั้งมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม ได้ ซึ่งค่า pH ก็จะเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่ามีโอกาสเกิดสนิม ได้มากน้อยเพียงใด ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2-2 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่างๆ (Shamsad, 2003)

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



ภาพที่ 2-4 แผนภาพแสดงกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 2-5 แสดงกระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

Soroka (1993) กล่าวว่า คลอไรด์ไอออนจะเกิดขึ้นในน้ำ ดังนั้นจะเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ก็ต่อเมื่อมีน้ำอยู่ในระบบโพรง กลไกที่เกิดขึ้นจะเป็นทั้งการดูดซึมน้ำแบบคาพิลลารี (Capillary suction) หรือการแพร่อย่างง่ายของไอออนของน้ำในโพรงที่อยู่หนึ่ง ในกรณีแรกจะเกิดกับคอนกรีตที่มีลักษณะค่อนข้างแห้ง น้ำจะพาคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต ในกรณีหลังจะเกิดกับคอนกรีตที่อิ่มตัวหรือค่อนข้างอิ่มตัว น้ำจะเป็นเสมือนตัวกลางให้คลอไรด์ไอออนแพร่เข้าไปในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่ต้องอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง จะเกิดกลไกขึ้นได้ทั้งสองกรณีซึ่งอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

Funahashi M. (1990) กล่าวว่า การเกิดสนิมแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ 1. Initial period จะเริ่มเมื่อคลอไรด์ไอออนซึมผ่านเข้าไปสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤติ ซึ่งเป็นระดับที่ฟิล์มออกไซด์ที่เคลือบตามผิวเหล็กเสริมเสียหาย โดยมีค่าปริมาณของคลอไรด์ในช่วงตั้งแต่ 0.2 – 1.33 gm/m³ หรือตั้งแต่ 75 – 1175 ppm. ของคอนกรีต หลังจากนั้นตามด้วย 2. Propagation period ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กขึ้นอย่างต่อเนื่อง

Bakker (1988) กล่าวว่า ในกรณีที่คอนกรีตปนเปื้อนคลอไรด์ตั้งแต่ส่วนผสม การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ส่วนกรณีที่สัมพันธ์กับเกลือที่ละลายในน้ำทะเล ปริมาณของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามเวลา บางที่อาจนำไปสู่สภาวะที่คอนกรีตไม่สามารถปกป้องเหล็กเสริมจากการกัดกร่อนได้อีกต่อไป

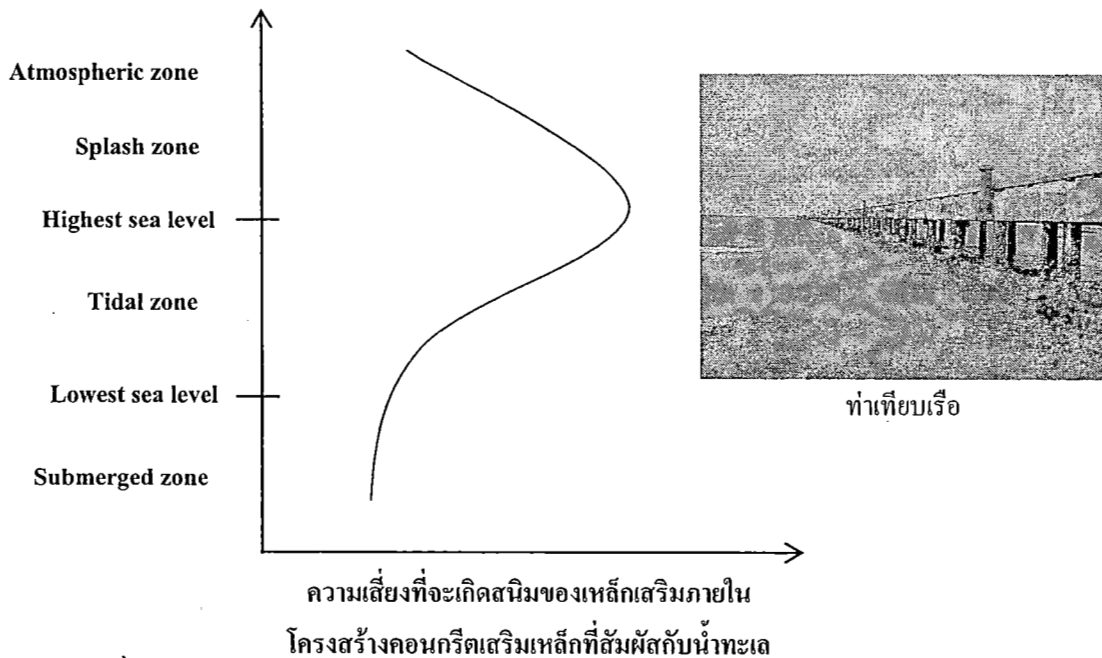
2.3 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์ในเนื้อของคอนกรีตนั้นอาจมีอยู่ในคอนกรีตเองหรือมาจากภายนอกโครงสร้างคอนกรีต ในช่วงเวลาที่ใช้งาน (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543) โดยคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเองนั้นอาจมาจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หิน ทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หิน ทราย จากแหล่งที่อยู่ใกล้ทะเล หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ซึ่งจะมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนมากจะมาจากคลอไรด์ภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาพแวดล้อมทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing salt)

โดยทั่วไปแล้ว แหล่งที่มาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น มาจากน้ำทะเล แต่สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น แม้คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้มาก แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน หรือมีออกซิเจนในปริมาณที่ไม่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างก็ไม่สามารถเกิดขึ้น ดังนั้นผลกระทบของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงมีไม่มากนัก

2.4 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ความเสี่ยงที่จะเกิดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีมาก ที่สุด ในบริเวณ โครงสร้างที่อยู่ในบริเวณคลื่นละอองน้ำ ร่องลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำ ขึ้นน้ำลง ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมบนเหล็กเสริมใน โครงสร้างได้น้อยมาก ซึ่งแสดง ดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

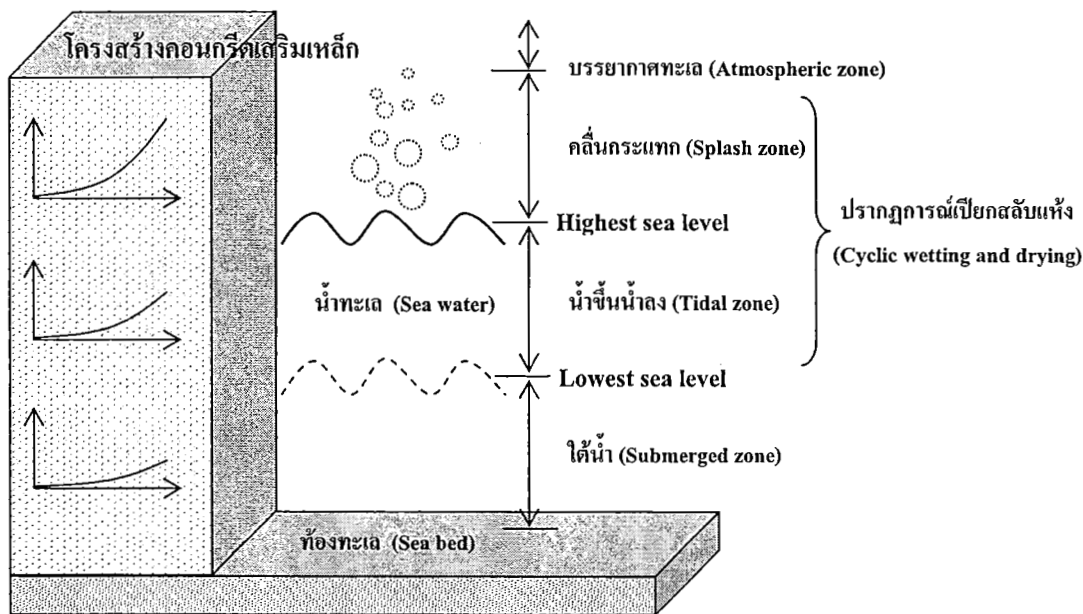
การที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมบนเหล็กเสริม ในโครงสร้างน้อยกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการ แพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำ เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตอิมด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนจะ ละลายในน้ำได้น้อยมาก เป็นผลทำให้อัตราการแพร่ในคอนกรีตเกิดขึ้นน้อย

ถึงแม้ว่า จะมีปริมาณออกซิเจนมากในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมภายในโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็กนั้นก็ถูกจำกัด ไปด้วย อัตราการแพร่ของออกซิเจนที่ต่ำ ผ่านช่องว่างที่อิมด้วยน้ำของ คอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่สภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีต ที่แห้งโดยการแพร่ หรือการซึมผ่าน จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิมตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอก เปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง น้ำที่ผิวของคอนกรีตจะระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพ เปียกอีกครั้งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจะสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อคลอไรด์อิมที่บริเวณ

ผิวหน้าของคอนกรีต มีความเข้มข้นสูงขึ้นไปเรื่อยๆ และกระจายเข้าสู่ภายในคอนกรีต ทำให้คลอไรด์เข้าสู่บริเวณผิวของเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติคอนกรีตจะเปียกได้เร็วแต่จะแห้งได้ช้า และภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้น การแพร่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปในคอนกรีตของคลอไรด์ไอออนในสภาพเปียกสลับแห้ง โดยภาพที่ 2-7 แสดงแบบจำลองของโครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียก และแห้ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางของลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และสภาพการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันในแต่ละส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกจะเร่งให้คลอไรด์ไอออนเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง โดยมีช่วงแห้งที่นานกว่านั้น จะมีโอกาสเกิดปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้มากกว่า และสนิมจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ผิวของเหล็กเสริมมีมากพอที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเริ่มเกิดสนิมได้



ภาพที่ 2-7 แบบจำลองของโครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

2.5 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ ชนิดของแคตไอออน และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้นๆ เผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ภายในเนื้อ

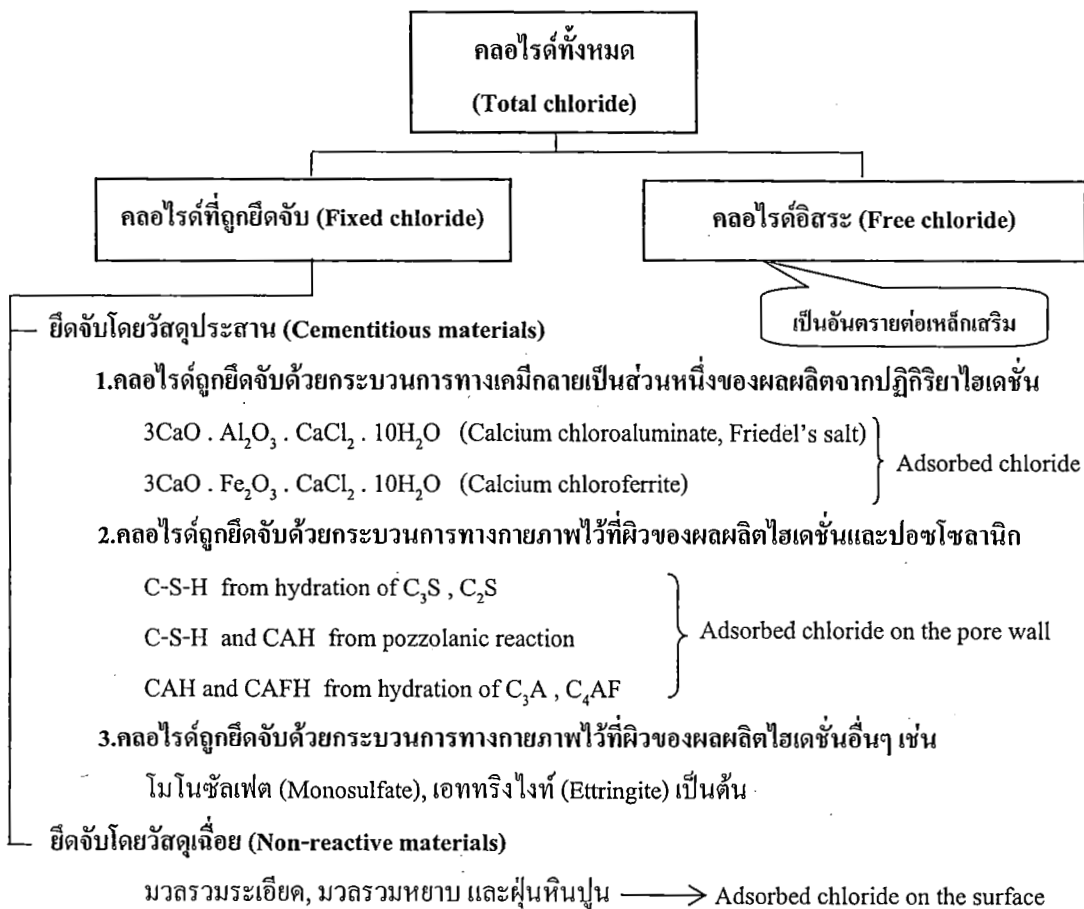
ของคอนกรีต (Total chloride) นั้น เป็นผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท (คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ, 2543) ได้แก่

1. คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้ คือ

1.1. Chemical binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดชัน (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)

1.2. Physical binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราช หิน หรือผงฟูหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

2. คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์อิสระนี้ไว้ได้ ก็จะสามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเริ่มเหล็กออกไปได้



ภาพที่ 2-8 แผนภาพแสดงชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต

2.6 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

เนื่องจากคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำทะเล จึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่างๆของคอนกรีตได้ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543) ซึ่งจะมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเสื่อมสภาพลง โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้น กลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไก ดังนี้

การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่นี้จะผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อิมมิดว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์ไอออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของไอออน โดยคลอไรด์ไอออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูง ไปยัง บริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนต่ำ ซึ่งจะเป็นไปตามกฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งแสดงดังสมการดังนี้

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial^2 x} \quad (2-1)$$

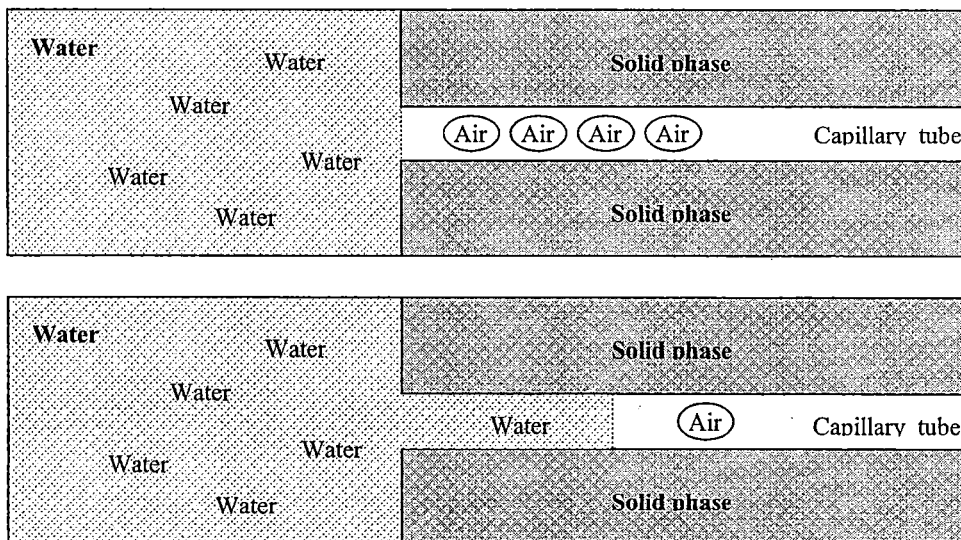
โดยที่	$C_i(x,t)$ คือ	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)
	$C_f(x,t)$ คือ	ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)
	D_a คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม. ² /ปี)
	x คือ	ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)
	t คือ	ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์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

ทั้งนี้ คำตอบของสมการที่ (2-1) สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2-2) ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

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

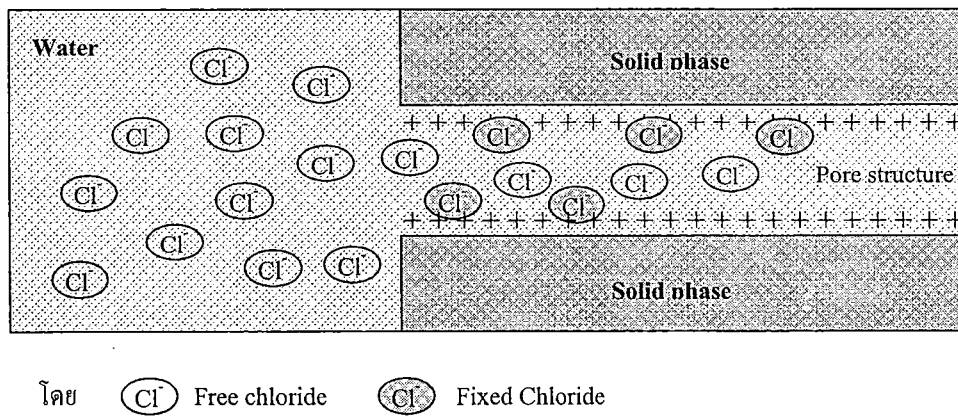
โดยที่	C_d	คือ	ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม (%โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
	C_s	คือ	ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (กก./ม ³)
	c	คือ	ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม.)
	D_a	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม. ² /ปี)
	t	คือ	อายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก (ปี)
	B	คือ	น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กก./ม. ³)

2. การดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) โดยการดึงดูดแบบคาพิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาอันสั้น



ภาพที่ 2-9 แผนภาพแสดงการดึงดูดแบบคาพิลลารี

3. การดูดซับไอออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต เท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดูดซับไอออนจะเกิดขึ้นเนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีต จะดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น



ภาพที่ 2-10 แผนภาพแสดงการดูดซับไอออนเข้าไปในคอนกรีต

4. แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ไอออน เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำ

และเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยที่ในคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตนั้นสัมผัสอยู่จะแพร่จากคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูง ไปสู่คอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำกว่า และเมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตแล้วคลอไรด์ก็จะแพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง ไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า จึงทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น และมีนักวิจัยหลายท่านที่ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์จากสิ่งแวดล้อมเข้าไปสู่คอนกรีต เช่น

Khatib and Mangat (2002) ทำการทดลองถึงผลกระทบของการบ่มที่อุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้วัสดุแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน โดยใช้อัตราส่วนผสมของคอนกรีต 3 อัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งอัตราส่วนผสมที่ 1 ใช้ซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุ

ประสาน และอัตราส่วนผสมที่ 2 และ 3 ใช้เถ้าลอย 20% และ ซิลิกาฟูม 9% แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์โดย น้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ผลการทดสอบของการแช่ ตัวอย่างในช่วงเวลาสั้นๆ พบว่า การบ่มในช่วงต้นจะส่งผลกระทบต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต และผลของอุณหภูมิที่สูง และความชื้นที่ต่ำส่งผลกระทบต่อการแทรกซึมของการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตในช่วงที่เผชิญเกลือคลอไรด์สั้นๆ มากกว่า ตัวอย่างที่อยู่ในอุณหภูมิปกติ และใช้วิธีการบ่มเปียก ทั้งนี้เนื่องจากการบ่มแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้น้ำที่ผิวหน้าของตัวอย่างสูญหายไป และปฏิกิริยาไฮเดรชันถูกจำกัด ผลกระทบของการบ่มจะส่งผลกระทบต่อตัวอย่างเผชิญกับคลอไรด์ ในช่วงเวลานานและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์จะลดลงเมื่อให้เถ้าลอย และซิลิกาฟูม แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต

Jooss and Reinhardt (2002) ทำการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถซึมผ่านได้ และการแพร่กระจายของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีต 11 ชนิด และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 20 และ 80 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ความสามารถซึมผ่านได้ และการแพร่กระจายมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และความสามารถซึมผ่านได้เพิ่มขึ้น 13-62% เมื่ออุณหภูมิถูกทำให้สูงขึ้นจาก 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส และ เพิ่มขึ้น 3-55% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 80 องศาเซลเซียส และการแพร่กระจายจะเพิ่มขึ้น 10-21% จาก 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส และ เพิ่มขึ้น 8-21% จาก 50 ถึง 80 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของคอนกรีตด้วย

Thomas et al. (1999) พบว่า เถ้าลอยส่งผลกระทบต่อการแทรกซึมของคลอไรด์สำหรับคอนกรีตในช่วงอายุสั้นๆ แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุยาวนานขึ้นเถ้าลอยจะช่วยปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้อย่างมาก

Dhir et al. (1998) ได้เสนอวิธีการทำนายการกระจายตัวของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดภายในคอนกรีต พบว่า การกระจายตัวของคลอไรด์ทั้งหมดสามารถแสดง ได้ด้วยฟังก์ชัน เอ็กโปเนนเชียลแบบน้อยลง

Wee et al. (1997) ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่าการกระจายตัวของปริมาณคลอไรด์ในวัสดุซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยคำนึงถึงผลของความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งพบว่าให้ผลการคำนวณเป็นที่น่าพอใจ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

Tumidajski et al. (1996) พบว่า สารซัลเฟตและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่จะปรากฏผลตรงกันข้ามในกรณีที่เป็นคอนกรีตที่ผสมตะกั่วแดงสูงเหล็ก

Kayyali et al. (1988) กล่าวว่า คอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมที่มีเกลือคลอไรด์ต้องการระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตที่มากเพียงพอ เนื่องจากการบ่มคอนกรีตที่นานเพียงพอจะทำให้โครงสร้างของ

โพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตมีขนาดเล็ก และส่งผลทำให้การแพร่ของ คอลลอยด์ในเนื้อของคอนกรีตเกิดขึ้นได้ยาก

Gjørv et al. (1979) พบว่า อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีตมีผลกระทบต่อปริมาณคอลลอยด์ในคอนกรีตส่วนที่อยู่ใกล้ผิวด้านนอกของคอนกรีตมากกว่าชนิดของปูนซีเมนต์ เมื่อช่วงระยะเวลาการแช่น้ำทะเลสั้นๆ แต่หากเมื่อระยะเวลาในการแช่น้ำทะเลมากขึ้นแล้ว ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในผสมของคอนกรีต จะมีผลกระทบต่อปริมาณคอลลอยด์ภายในเนื้อคอนกรีตส่วนที่อยู่ลึกเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีต มากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

2.7 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคอลลอยด์ และปริมาณคอลลอยด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต

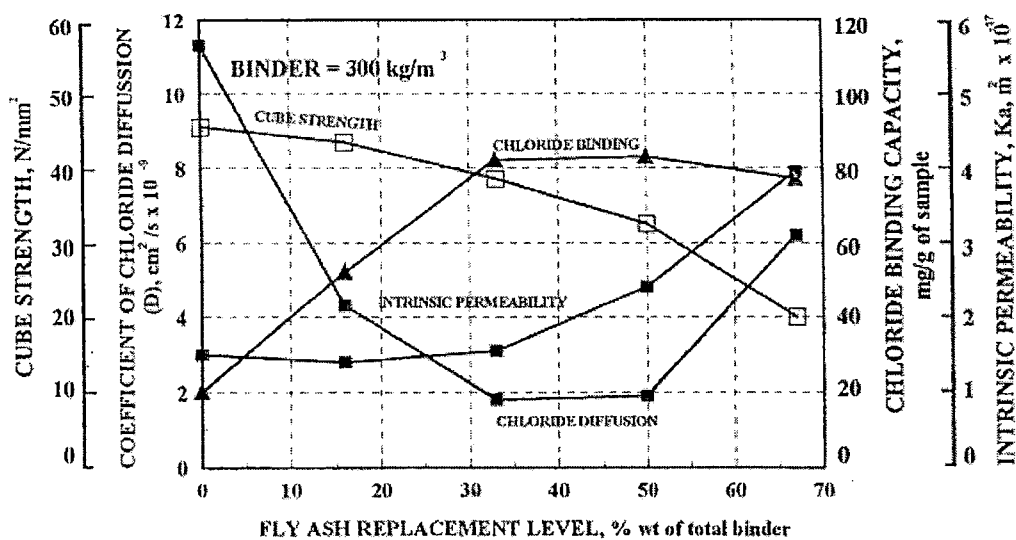
Song et al. (2008) ศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของเกลือคอลลอยด์ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคอลลอยด์ (D_u) และปริมาณเกลือคอลลอยด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s) ในคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคอลลอยด์ และ ปริมาณเกลือคอลลอยด์ที่ผิวหน้า จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคอลลอยด์มีค่าลดลง และปริมาณเกลือคอลลอยด์ที่ผิวหน้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออายุการใช้งานนานขึ้น เนื่องจากการพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคอลลอยด์ และปริมาณเกลือคอลลอยด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจะได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วนผสมของคอนกรีต ปริมาณโพรงช่องว่างในคอนกรีต วิธีการบ่ม ลักษณะการเผชิญกับน้ำทะเล และฤดูกาล เป็นต้น ส่วนในคอนกรีตที่ใช้วัสดุอื่นๆแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นวัสดุประสาน จะมีประโยชน์ในการทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคอลลอยด์ลดลง และจะส่งผลทำให้ปริมาณเกลือคอลลอยด์ที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนนั้นจะไปเติมโพรงช่องว่างของคอนกรีต และช่วยในการยึดจับเกลือคอลลอยด์ในคอนกรีต

Ann et al. (2009) ในงานวิจัยนี้ได้แสดงถึงปริมาณคอลลอยด์ไอออนบนผิวหน้าของคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่สภาวะต่างๆ เช่น สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง สภาวะละอองคลื่น และสภาวะบรรยากาศ โดยปริมาณคอลลอยด์ไอออนจะสะสมที่ผิวหน้ามากขึ้นตามอายุการใช้งาน และในการทำนายอัตราการเพิ่มขึ้นของเกลือคอลลอยด์ในคอนกรีตนั้น จะต้องอยู่ในรูปแบบของสมการที่เหมาะสมซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งาน และจากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า การใช้ปริมาณเกลือคอลลอยด์ที่ผิวเป็นค่าคงที่ จะส่งผลทำให้การแทรกซึมของเกลือคอลลอยด์มีค่ามากขึ้นไป ซึ่งเมื่อมีรูปแบบของสมการปริมาณเกลือคอลลอยด์ที่ผิวขึ้นอยู่กับเวลาในรูปแบบต่างๆจะทำให้ปริมาณเกลือคอลลอยด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเกลือคอลลอยด์นี้จะมีผลต่อความเสี่ยงของการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

วิเชียร ชาติ (2550) ศึกษาถึงผลกระทบของเถ้านหินต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคอลลอยด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณต่างๆ และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ และ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของคอนกรีต โดยใช้กฎข้อที่ 2 ของ ฟิค (Fick's second law) พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตทุกส่วนอัตราส่วนผสมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาแช่น้ำทะเลนานขึ้น และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตลดลงเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้น

Dhir et al. (1999) ในงานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาความต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยชนิดที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำในการศึกษา ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์และเพิ่มความสามารถในการยึดจับคลอไรด์ไอออน รวมถึงศึกษาถึงปริมาณการใช้เถ้าลอยในการใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต โดยปริมาณการใช้เถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุดจะใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณซีเมนต์ 30% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ซึ่งจะแสดงตัวอย่างผลการทดสอบดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 ผลกระทบของความสามารถซึมผ่านได้ ความสามารถเก็บกับเกลือคลอไรด์ กำลังรับแรงอัด และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ ของระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่างๆ

Mangat et al. (1994) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการเผชิญคลอไรด์ โดยเมื่อทดลองเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามเวลาแล้ว พบว่า การคำนวณการกระจายตัวของปริมาณคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากขึ้น

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย

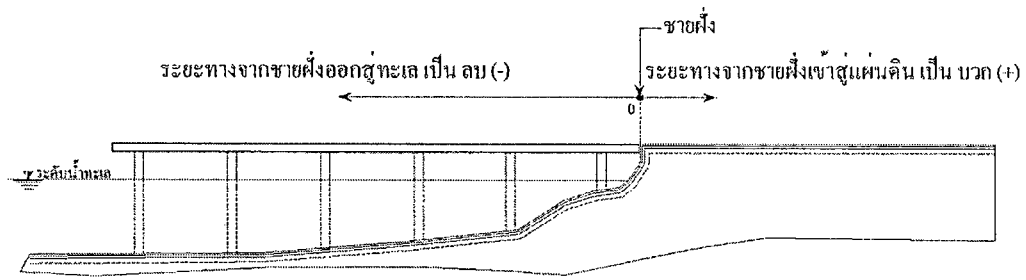
ขอบเขตของงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือ ส่วนของการทดลอง ซึ่งจะประกอบไปด้วยการหาค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้า และปริมาณการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกในคอนกรีต จากตัวอย่างที่ได้มาจากโครงสร้างที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล และผลการทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้มาวิเคราะห์ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น และส่วนที่ 2 คือ การวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ โดยการนำข้อมูลจากการทดลองส่วนที่ 1 มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง

3.1 การทดลอง

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต และการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายในชั้นส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่างๆ ที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย โดยมีรายละเอียดของการทดลอง ดังนี้

สถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง

สถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ทำการศึกษานี้ อยู่ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี ระยอง จันทบุรี และฉะเชิงเทรา โดยทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากโครงสร้างสะพาน กำแพงกันคลื่น ท่าเทียบเรือ เป็นต้น ส่วนตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างนั้นอาจเป็นชั้นส่วนคาน เสา และกำแพงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น โดยเลือกเก็บตัวอย่างเฉพาะตรงตำแหน่งที่รับลมทะเล (ทิศตะวันตกเฉียงใต้) ทำการบันทึกข้อมูลทั่วไปของโครงสร้างไปพร้อมกันด้วย อาทิเช่น อายุของโครงสร้าง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของโครงสร้าง ระดับความสูงของตำแหน่งที่เก็บกับระดับน้ำทะเลต่ำสุด และระยะทางจากชายฝั่ง เป็นต้น ทั้งนี้กำหนดให้ระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดินเป็นบวก และระยะทางจากชายฝั่งออกสู่ทะเลเป็นลบ ดังแสดงในภาพที่ 3-1 ส่วนข้อมูลประเภทและสถานที่ตั้งของโครงสร้างที่ทำการเก็บตัวอย่างในการศึกษานี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ลักษณะการวัดระยะทางจากชายฝั่ง

ตารางที่ 3-1 ประเภทและสถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและระยะทางจากชายฝั่งในการเก็บตัวอย่าง

ลำดับ ที่	ประเภทของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก	สถานที่ตั้งของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุของ โครงสร้าง (ปี)	ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง (เมตร)		สถานะของโครงสร้าง ส่วนที่เก็บตัวอย่าง	
				ระยะทาง	ความสูง		
1	สะพาน	ทางเลี้ยวเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี	5	-200	3.80	สภาวะบรรยากาศทะเล	
2			5	-200	1.10	สภาวะละอองคลื่น	
3			5	0	0.00	สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง	
4			5	0	-1.00		
5		อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	3	-400	0.60	สภาวะละอองคลื่น
6				5	-200	0.60	
7				3	0	0.60	
6		ทางเลี้ยวเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี	ทางเลี้ยวเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี	5	-200	3.30	สภาวะบรรยากาศทะเล
9				1	-200	5.00	
10				1	0	1.00	
11		ท่าเทียบเรือ	หมู่บ้านแฉมหนู จ.จันทบุรี	15	0	1.20	สภาวะละอองคลื่น
12			แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี	1	-150	0.70	
13			5	-150	2.70	สภาวะบรรยากาศทะเล	
14	ด.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี		ด.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	20	-240	0.60	สภาวะละอองคลื่น
15				20	-120	0.80	
16		20		-15	0.60		
12	ด.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	ด.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	15	-210	0.60		
18			15	-145	0.60		
19			15	0	0.60		
20	ด.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี	ด.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	-335	0.80	สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง	
21			20	-170	0.60		
22			10	-10	0.60		
23			10	-10	-0.30		
24			10	-10	-0.70		
25	10	-10	-1.20				

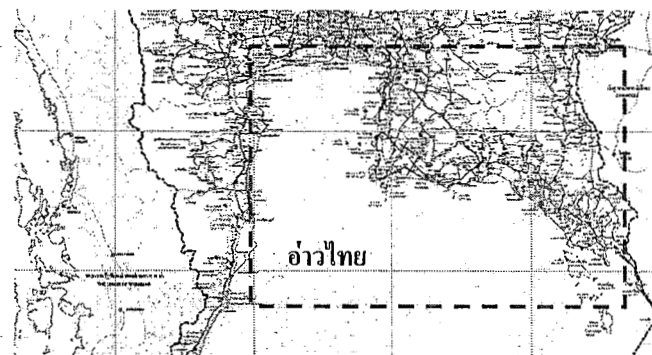
ตารางที่ 3-1 ประเภทและสถานที่ตั้งของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและระยะทางจากชายฝั่งใน การเก็บตัวอย่าง (ต่อ)

ลำดับ ที่	ประเภทของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก	สถานที่ตั้งของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุของ โครงสร้าง (ปี)	ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง (เมตร)		สถานะของโครงสร้าง ส่วนที่เก็บตัวอย่าง
				ระยะทาง	ความสูง	
26	ท่าเทียบเรือ	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	-20	1.00	สถานะละอองคลื่น
27	กำแพงกันคลื่น	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	0.00	สถานะละอองคลื่น
28		อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	0	1.20	
29		อ.บางละมุง จ.ชลบุรี	3	0	0.00	
30		ค.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี	1	0	1.00	
31			1	0	0.00	
32			1	0	-1.20	สถานะน้ำขึ้น-น้ำลง
33		แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง	0.50	8.5	0.00	สถานะน้ำขึ้น-น้ำลง
34		คู้งวิมาน อ.จันทร์บุรี	0.50	15	3.50	สถานะบรรยากาศทะเล
35	เสาไฟฟ้า	ค.บางพระ จ.ชลบุรี	10	100	1.50	
36		อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	200	1.60	
37			10	600	1.00	
38		อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	10	80	1.60	
39		อ.เมือง จ.ชลบุรี	1	600	1.70	
40			5	200	1.20	
41		แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง	15	60	3.50	
42		คู้งวิมาน อ.จันทร์บุรี	15	60	4.00	
43	คลองระบายน้ำ	ค.บางปลาสร้อย อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	1.00	ปิดทึบ
44	หอดูดาวของโรงไฟฟ้า	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	0	0.00	ด้านในอาคารหอดูดาว

หมายเหตุ : อายุของ โครงสร้างทั้งหมดเป็นอายุการใช้งาน โดยประมาณของ โครงสร้างนั้นๆ

ระยะทาง คือ ระยะทางจากชายฝั่งถึงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง โดยวัดจากตำแหน่งที่ไม่ได้รับผลกระทบจากคลื่น น้ำทะเล

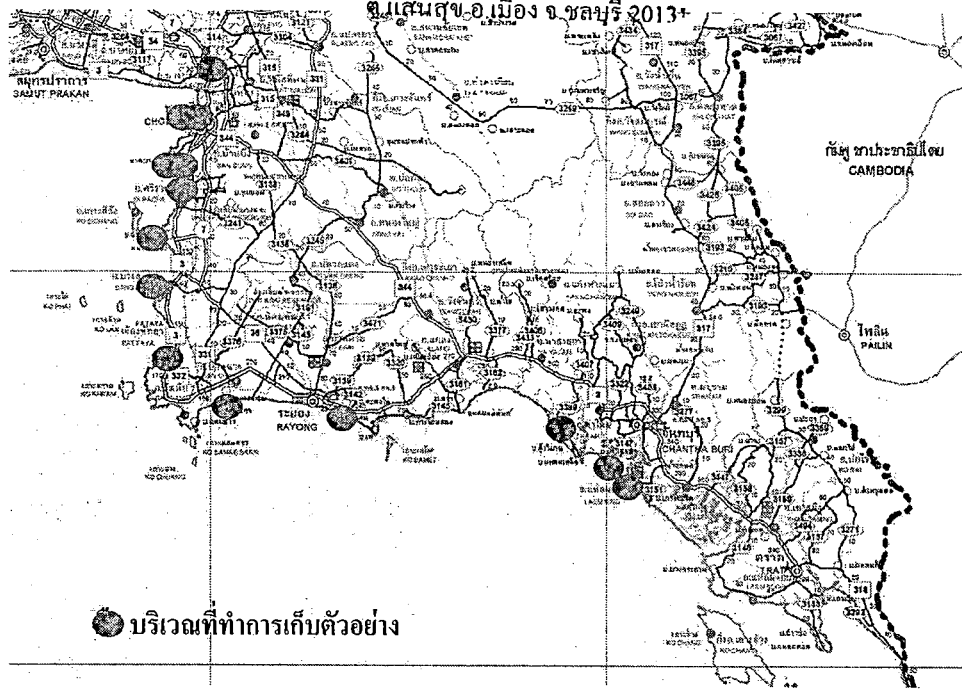
ความสูง คือ ความสูงวัดอ้างอิงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด



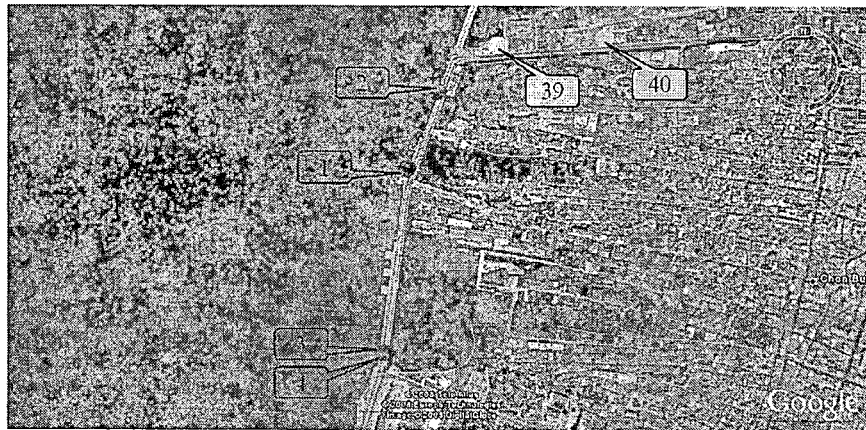
ภาพที่ 3-2 ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างโดยรวม

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา

ชุมชนสุข-อ.เมือง จ.ชลบุรี 2013+



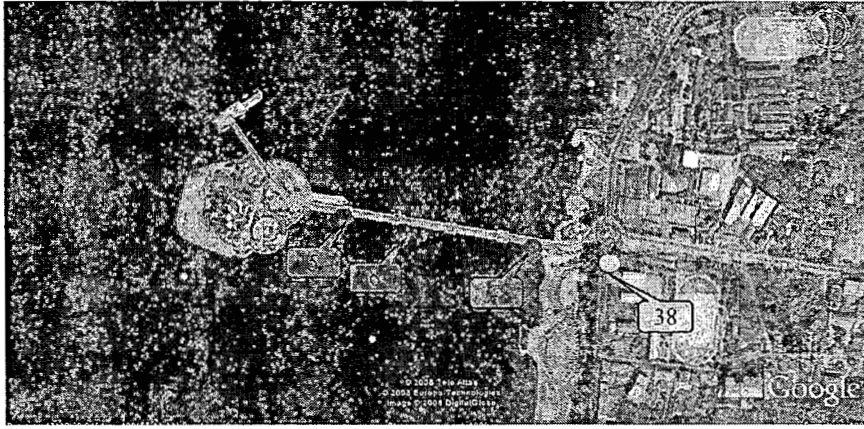
ภาพที่ 3-3 ภาพขยายตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างโดยรวมของประเทศไทย



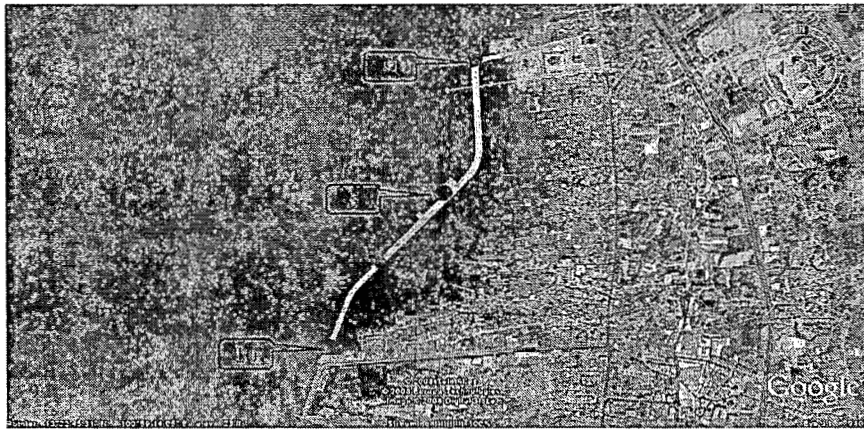
ภาพที่ 3-4 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ สะพาน ทางเลี้ยวเมือง (เก่า) อ.เมือง จ.ชลบุรี

26 46 18

620.136
๓193ก
ผ.3



ภาพที่ 3-5 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ สะพาน อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



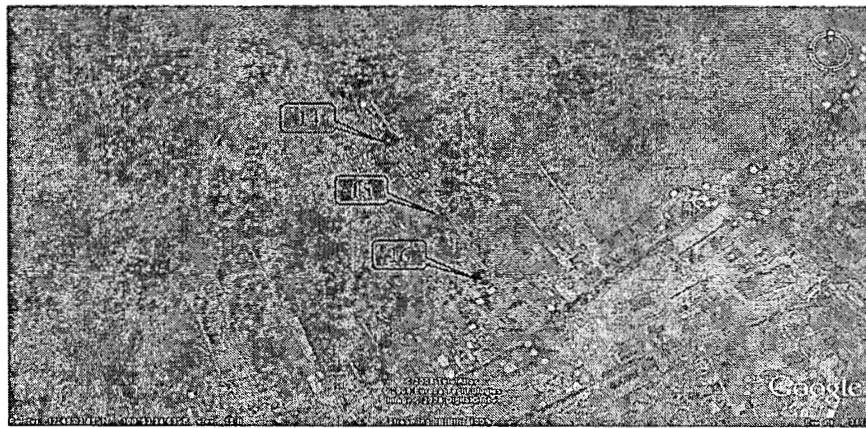
ภาพที่ 3-6 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ สะพาน ทางเลียงเมือง (ใหม่) อ.เมือง จ.ชลบุรี



ภาพที่ 3-7 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ สะพาน แคมหนู อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี



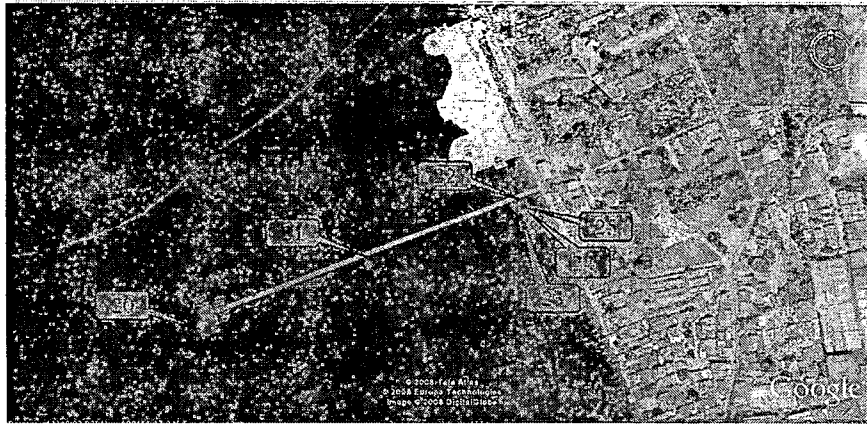
ภาพที่ 3-8 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ สะพาน แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี



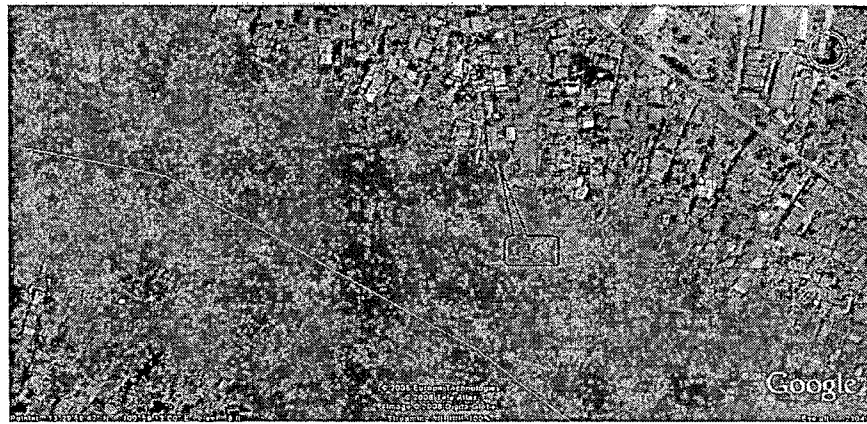
ภาพที่ 3-9 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ ท่าเทียบเรือ ต.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



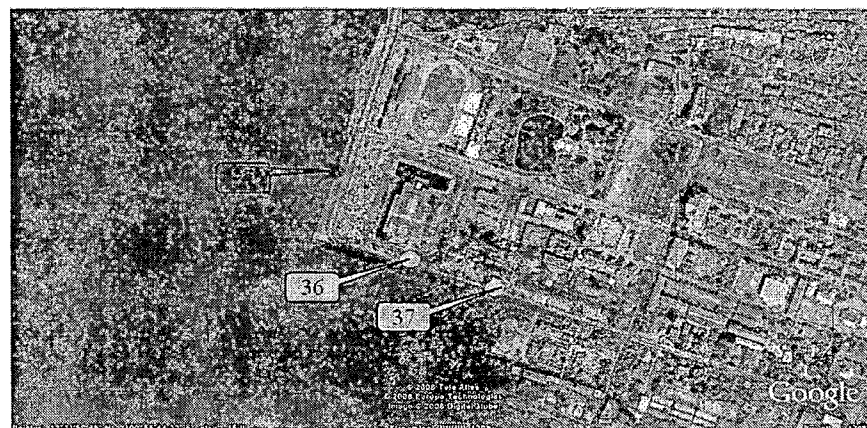
ภาพที่ 3-10 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ ท่าเทียบเรือ ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



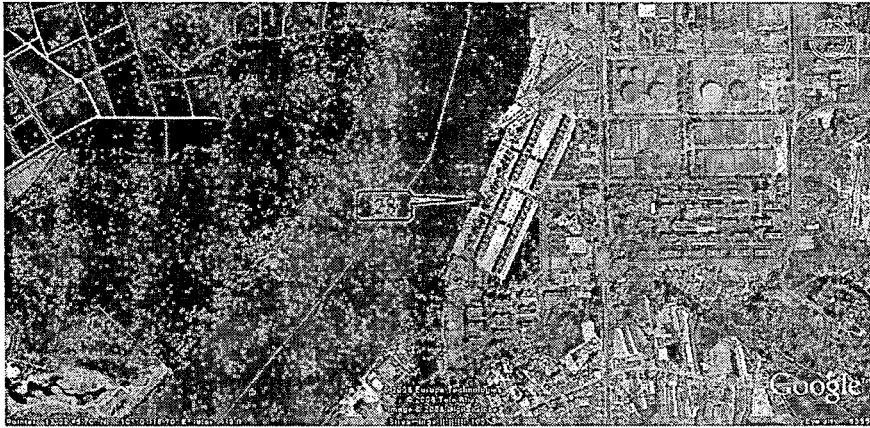
ภาพที่ 3-11 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ ท่าเทียบเรือ ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี



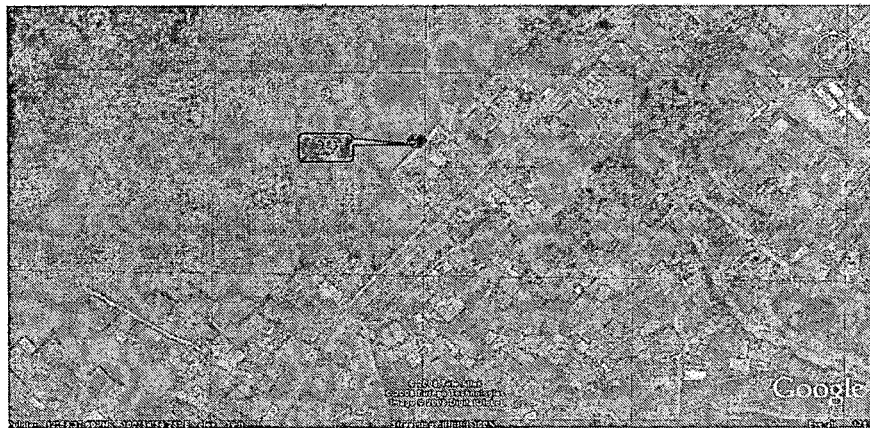
ภาพที่ 3-12 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ ท่าเทียบเรือ อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา



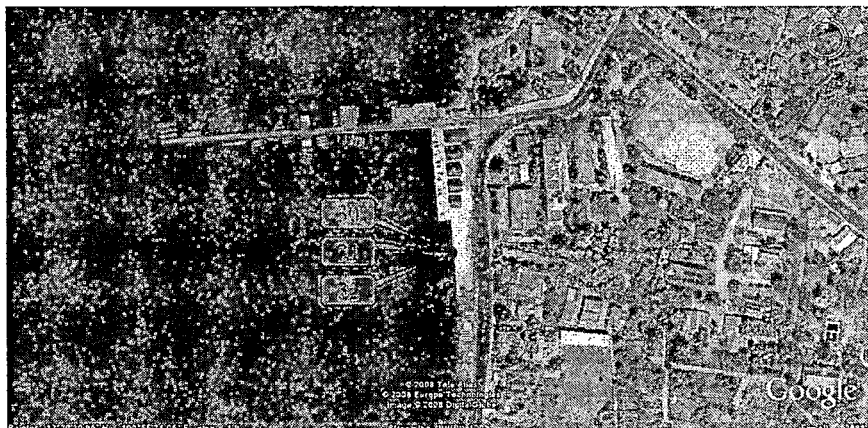
ภาพที่ 3-13 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ กำแพงกันคลื่น อ.เมือง จ.ชลบุรี



ภาพที่ 3-14 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ กำแพงกันคลื่น อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา



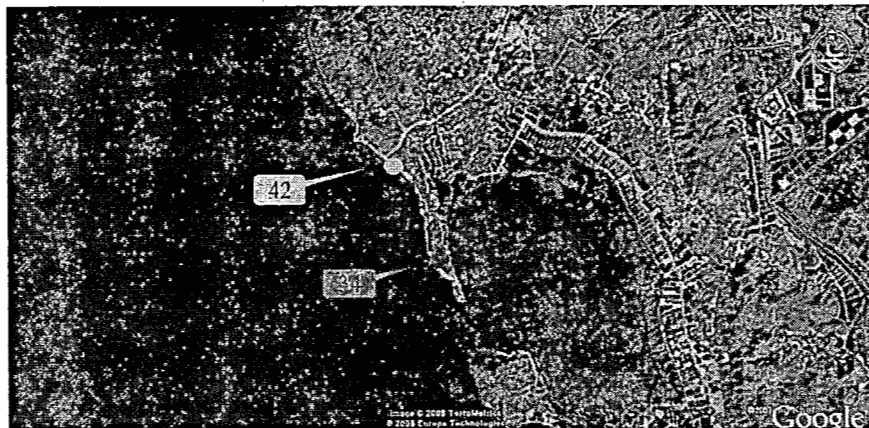
ภาพที่ 3-15 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ กำแพงกันคลื่น อ.บางละมุง จ.ชลบุรี



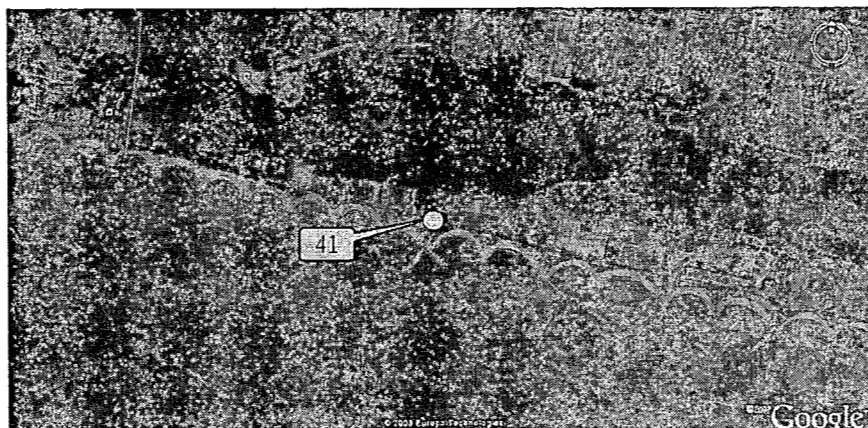
ภาพที่ 3-16 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ กำแพงกันคลื่น ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี



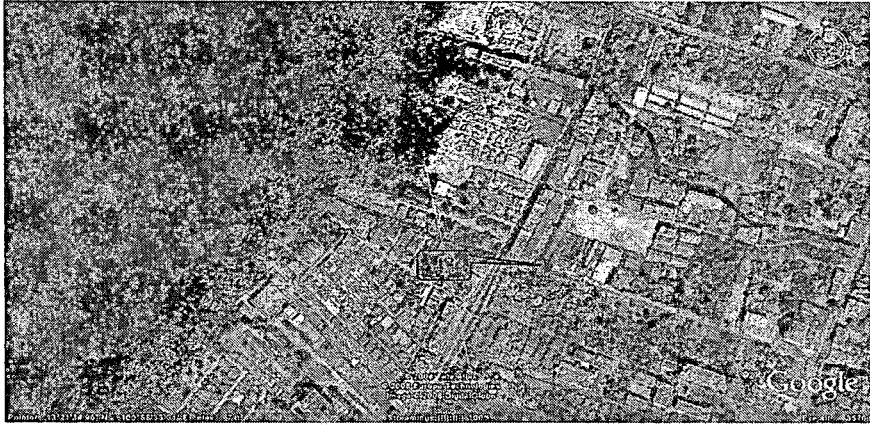
ภาพที่ 3-17 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ กำแพงกันคลื่น แหลมเจริญ จ.ระยอง



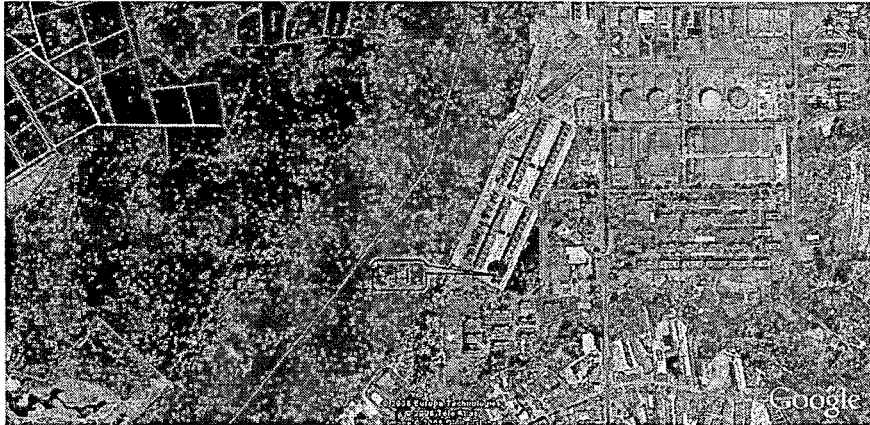
ภาพที่ 3-18 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณ กำแพงกันคลื่น คู่วังวาน จ.จันทบุรี



ภาพที่ 3-19 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณเสาไฟฟ้า แหลมเจริญ จ.ระยอง



ภาพที่ 3-20 ถ่ายทางอากาศของพื้นที่บริเวณคลองระบายน้ำ ต.บางปลาสร้อย อ.เมือง จ.ชลบุรี

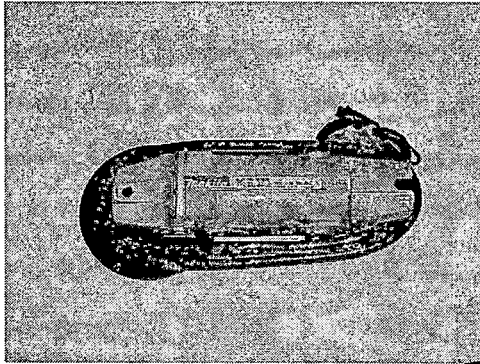


ภาพที่ 3-21 ภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่ บริเวณหอหล่อเย็นของโรงไฟฟ้า อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

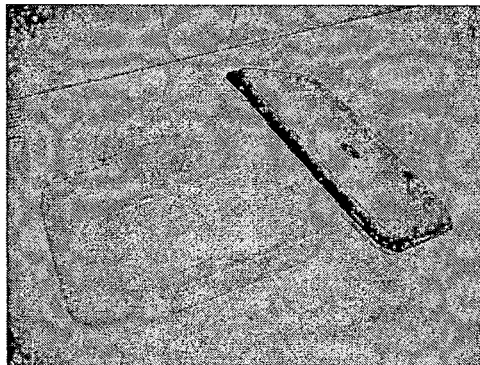
1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.1 เครื่องเก็บตัวอย่างผิวหนังของคอนกรีต ใช้ในการตัดผิวหนังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-22



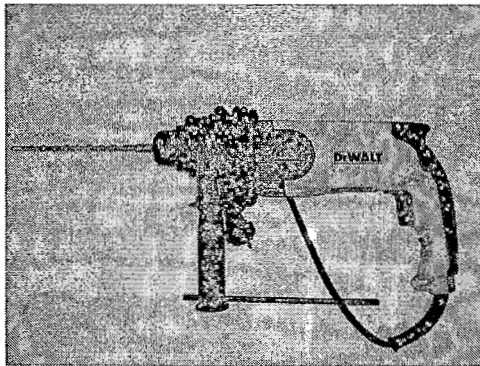
ภาพที่ 3-22 เครื่องเก็บตัวอย่างผิวหนังของคอนกรีต

1.2 ภาชนะดักเก็บตัวอย่างผิวหนังของตัวอย่างคอนกรีต ใช้รองรับตัวอย่างฝุ่นผงคอนกรีตที่ได้จากการตัดผิวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-23



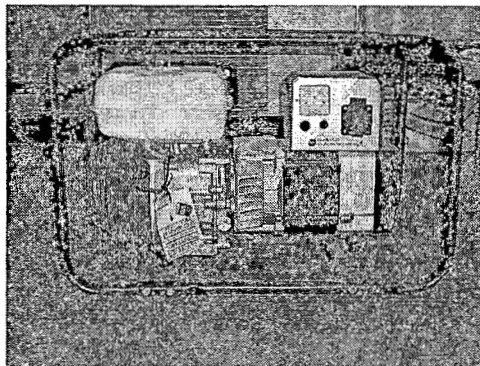
ภาพที่ 3-23 ภาชนะดักเก็บตัวอย่างผิวหนังของตัวอย่างคอนกรีต

1.3 ส่วนไฟฟ้า ใช้เจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตโดยต้องใช้ส่วนไฟฟ้าที่มีระบบเจาะกระแทก และมีกำลังสูง ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-24



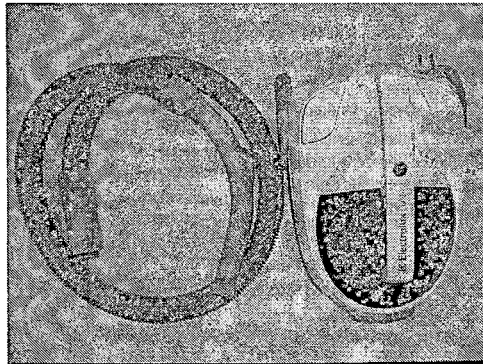
ภาพที่ 3-24 ส่วนไฟฟ้า

1.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ใช้ผลิตไฟฟ้าในการเก็บตัวอย่างคอนกรีต เพราะสถานที่เก็บตัวอย่างส่วนใหญ่จะไม่มีไฟฟ้าใช้บริเวณตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-25



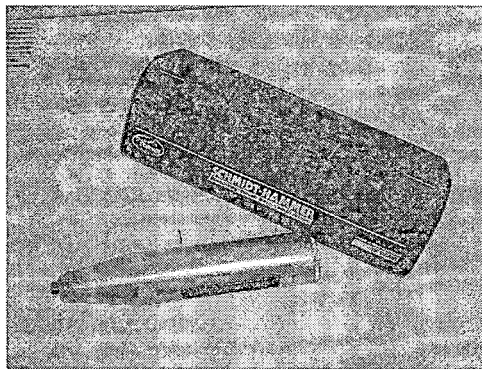
ภาพที่ 3-25 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.5 เครื่องดูดฝุ่น ใช้ทำความสะอาดฝุ่นของคอนกรีตที่ตกค้าง เพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของตัวอย่างในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-26



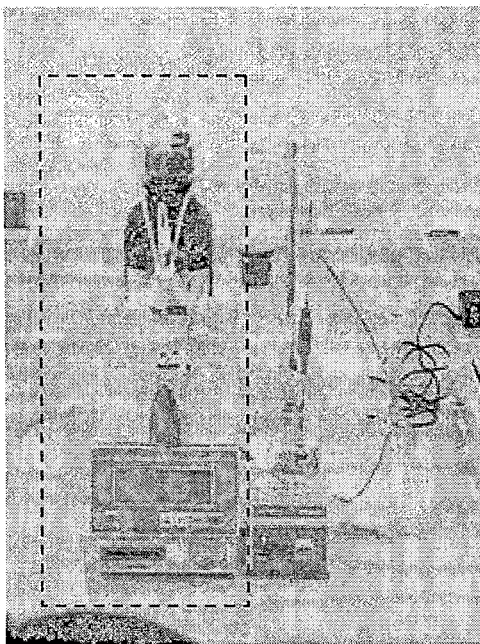
ภาพที่ 3-26 เครื่องดูดฝุ่น

1.6 Rebound hammer (Schmidt hammer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของโครงสร้างแต่ละแห่ง โดยอุปกรณ์จะถูกตรวจสอบความแม่นยำตามมาตรฐานของผู้ผลิตกำหนด ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-27



ภาพที่ 3-27 Rebound hammer (Schmidt hammer)

1.7 เครื่อง Auto titration รุ่น 721 Net titrimetrohm ใช้ในการหาปริมาณเกลือ คลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-28



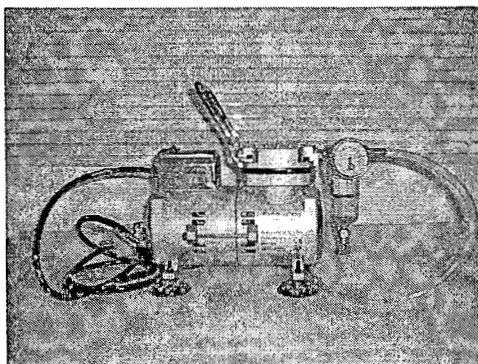
ภาพที่ 3-28 เครื่อง Auto titration รุ่น 721 Net titrimetrohm

1.8 เครื่องกวนแม่เหล็ก ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-29



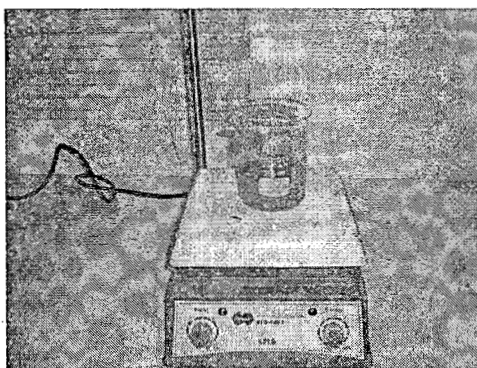
ภาพที่ 3-29 เครื่องกวนแม่เหล็ก

1.9 เครื่องดูด (Suction apparatus) ใช้ช่วยดูดสารละลายในการกรอง เพื่อความรวดเร็วในการทดสอบ ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-30



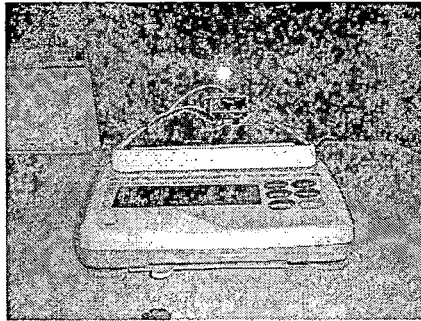
ภาพที่ 3-30 เครื่องดูด (Suction apparatus)

1.10 เครื่องต้ม (hot plate) ใช้ต้มสารละลายตัวอย่างก่อนนำไปหาปริมาณเกลือ คลอไรด์ในคอนกรีต ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-31



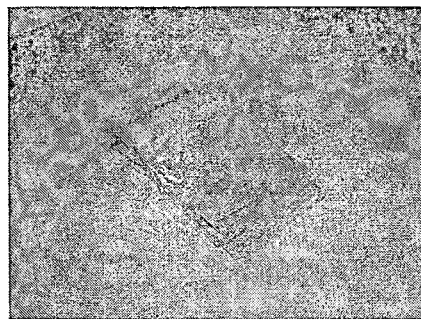
ภาพที่ 3-31 เครื่องต้ม (hot plate)

1.11 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล (Digital balance) ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-32



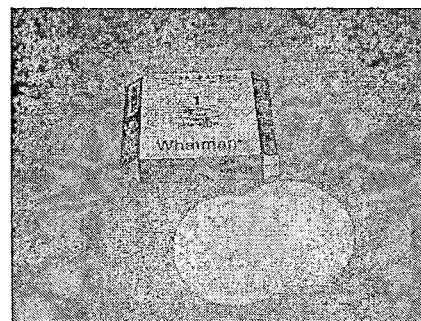
ภาพที่ 3-32 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล (Digital balance)

1.12 ถูเก็บตัวอย่าง ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-33



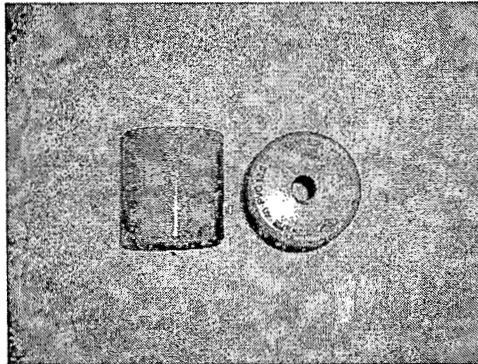
ภาพที่ 3-33 ถูเก็บตัวอย่าง

1.13 แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบ ขนาด 9 ซม. ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-34



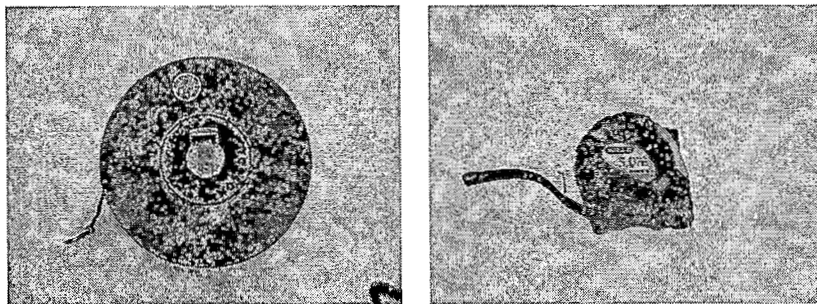
ภาพที่ 3-34 แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 ซม.

1.14 ฝาครอบ PVC ใช้ในการดักฝุ่นคอนกรีตไม่ให้กระจายในการเจาะเก็บตัวอย่างซึ่งแสดง
ในภาพที่ 3-35



ภาพที่ 3-35 ฝาครอบ PVC

1.15 เทปวัดระยะ ใช้ในการวัดระยะโดยเทปวัดระยะชนิดยาวจะใช้ในการวัดระยะทางจาก
ชายฝั่งของตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง และชนิดสั้นจะใช้วัดระดับความสูงของตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง ซึ่งแสดงใน
ภาพที่ 3-36



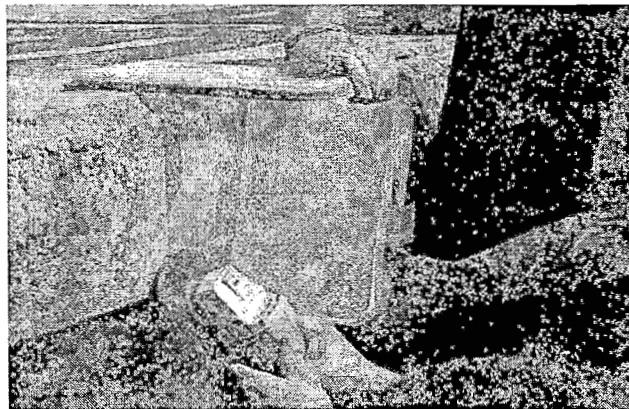
ภาพที่ 3-36 เทปวัดระยะ

- 1.16 TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar
- 1.17 บีกเกอร์ ขนาดต่างๆ
- 1.18 กระจกตวงขนาด 100 ml
- 1.19 ปิเปต ขนาด 25 ml
- 1.20 ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 ml
- 1.21 ขวดรูปชมพู่
- 1.22 แท่งแก้วคน

- 1.23 แผ่นกระดาษ
- 1.24 กรวยแก้ว
- 1.25 ขวดกรองแก้วก้น โปรง (Filtration flask)
- 1.26 ซ้อนตักสาร
2. สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ
 - 2.1 กรดไนตริก (Nitric Acid)
 - 2.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
 - 2.3 สารละลายมาตรฐาน 0.05 N NaCl
 - 2.4 สารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate)
 - 2.5 น้ำกลั่น

การหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ทำการขัดผิวหน้าของ โครงสร้างคอนกรีตตรงตำแหน่งที่ต้องการเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องขัดผิวคอนกรีตเพื่อเก็บผงฝุ่นคอนกรีตจากผิวหน้า โดยจำกัดความลึกของการขัดไว้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร และใช้ภาชนะดักเก็บตัวอย่างพลาสติกกรองรับผงฝุ่นคอนกรีตที่ขัดออกมาได้ดังภาพที่ 3-37 จากนั้นนำผงฝุ่นคอนกรีตมาทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดที่มีอยู่ในคอนกรีต ซึ่งค่าที่ได้คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

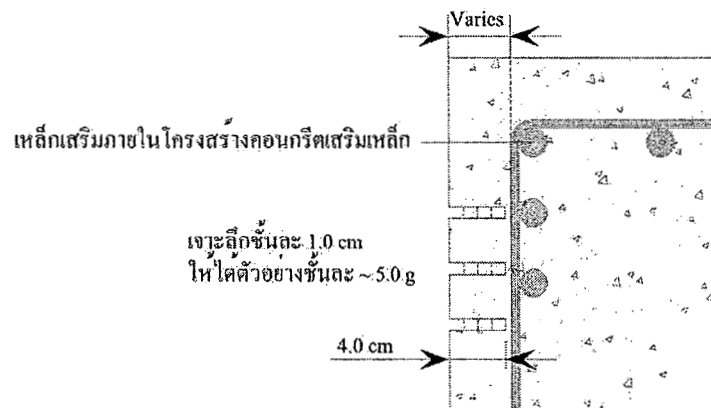


ภาพที่ 3-37 การขัดผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต

การหาการกระจายตัวของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริม

เหล็ก

ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยสว่านเจาะคอนกรีต ที่ใช้ดอกสว่านเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร โดยเจาะทีละชั้น ลึกชั้นละ 1 เซนติเมตร ซึ่งต้องเจาะประมาณ 9 รู จึงจะได้ตัวอย่างคอนกรีตหนักอย่างน้อย 5 กรัม ทำการแยกเก็บตัวอย่างแต่ละชั้นลงในถุงพลาสติก จากนั้นเพิ่มความลึกของการเจาะอีกทีละ 1 เซนติเมตร แล้วเก็บตัวอย่างแบบเดียวกันนี้ จนกระทั่งถึงระดับความลึก 4 เซนติเมตรจากผิวหน้า ดังแสดงในภาพที่ 3-38 จากนั้นนำตัวอย่างผงฝุ่นคอนกรีตที่ได้ในแต่ละชั้นมาทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงการกระจายตัวของการแทรกซึมของเกลือ คลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตนั้น โดยในการเก็บข้อมูลครั้งนี้จะไม่พิจารณาถึงสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 3-38 การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต

นำตัวอย่างผงฝุ่นคอนกรีตที่ได้จากการเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล มาทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ภายในตัวอย่างคอนกรีต ออกมาตามวิธี ASTM C1152 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) และทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ภายในตัวอย่างคอนกรีตออกตามวิธีการทดสอบของ ASTM C1218 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble chloride) [American Society for Testing and Materials, 2000] ซึ่งการหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) และ ปริมาณสารคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งจะพิจารณาจุดยุติของปฏิกิริยาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกวิธีหาปริมาณคลอไรด์นี้ว่า Potentiometric titration โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดในระบบ

คลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ในระบบของสารคอนกรีตก็คือ คลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดดังนี้ (ตามมาตรฐาน ASTM C1152 และมาตรฐาน C 114)

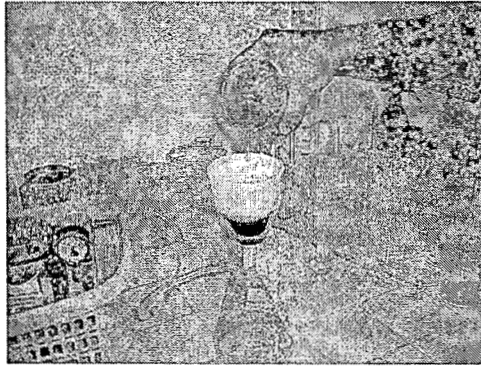
1.1 นำสารคอนกรีตตัวอย่างที่เก็บมาจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml

1.2 เติมน้ำลงไป 75 ml แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 ml ตามลงไปทันที โดยค่อยๆ เติมน้ำลงไป คอยคนก้อนซีเมนต์ที่จับตัวเป็นก้อน (lumps) ให้แยกออกจากกัน ถ้ามีกลิ่นของก๊าซไข่เน่า (hydrogen sulfide) ในระหว่างนี้ ให้เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 ml และหยด methyl orange indicator จำนวน 3 หยด ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระจกแล้ว ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ถ้ามีสีเหลืองถึงสีเหลืองส้มปรากฏบนด้านบนของของแข็งที่ตกตะกอนอยู่ แสดงว่าสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดไม่พอ ให้หยดสารละลายกรดไนตริกที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไปแล้ว คนไปพร้อมๆ กันจนกระทั่งปรากฏเป็นสีชมพูหรือสีแดงเล็กน้อย จากนั้นหยดสารละลายกรดไนตริกเกินต่อไปอีกจำนวน 10 หยด

1.3 ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาด้วยแผ่นกระจกด้วยการต้มให้เดือด อย่าให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (hot plate)

1.4 ล้างแผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 cm ด้วยน้ำเพิ่มขึ้นครั้งละ 25 ml จำนวน 4 ครั้งโดยใช้การกรองดูด (suction filtering) ด้วยกรวย (Büchner funnel) ขนาด 250 หรือ 500 ml และขวดกรองแก้วก้น โป่ง (filtration flask) เล็กการล้างแล้วทำการล้างขวดแก้วก้น โป่งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ประกอบเครื่องดูด (suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้าง บีกเกอร์และแผ่นกระดาษกรอง 2 ครั้งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ดังรูปที่ 3.10 ถ้าสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้น โป่งไปยังบีกเกอร์

ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วกับ โป่งทันทีด้วยน้ำบีกเกอร์อันแรกที่ใช้จำนวนมาให้ได้ทั้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้องปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml

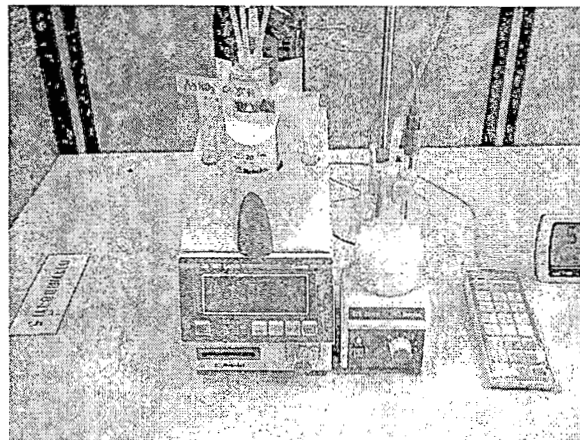


ภาพที่ 3-39 การกรองสารละลายตัวอย่าง

1.5 สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ว เติมสารละลายมาตรฐาน 0.05 N NaCl จำนวน 2 ml ด้วย pipet วางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แช่ electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode เริ่มการกวนช้าๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เติมไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ลงในหรืออยู่เหนือสารละลาย

1.6 เครื่อง Potentiometric titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Potentiometric titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ที่ใช้และประจุ

1.7 จุดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration



ภาพที่ 3-40 การไตเตรทโดยเครื่อง Potentiometric titration

2. การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระในระบบ

คลอไรด์ที่ละลายน้ำ (Water-soluble chloride) ในระบบของคอนกรีตก็คือ คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระดังนี้ (ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 และมาตรฐาน C 114)

2.1 นำสารคอนกรีตตัวอย่างที่เก็บมาจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml

2.2 เติมน้ำ (reagent water meeting Specification D 1193) ลงไป 50 ml ปิดด้วยกระจกนำไปต้มให้เดือด 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง กรองด้วยแรงโน้มถ่วงหรือการดูดผ่านกระดาษเนื้อละเอียด (a fine-texture, Type II, Class G filter paper of Specification E832) ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรอง (filtrate) ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml

2.3 เติมน้ำละลายกรดไนตริกที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 ml และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 ml ลงในสารละลายที่ผ่านการกรอง ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระจกแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือด อย่าให้เดือดนานเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (hot plate)

(ทำการทดสอบเหมือนวิธีการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ตั้งแต่ข้อ 4 เป็นต้นไป)

2.4 ล้างแผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 cm ด้วยน้ำเพิ่มขึ้นครั้งละ 25 ml จำนวน 4 ครั้ง โดยใช้การกรองดูด (suction filtering) ด้วยกรวย (Büchner funnel) ขนาด 250 หรือ 500 ml และขวดกรองแก้วกันโป่ง (filtration flask) เล็กการล้างแล้วทำการล้างขวดแก้วกันโป่งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ประกอบเครื่องดูด (suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้าง บีกเกอร์และแผ่นกระดาษกรอง 2 ครั้งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกันโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วกันโป่งทันทีด้วยน้ำ บีกเกอร์อันแรกที่ใช้จะนำมาใช้ได้ ทั้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml

2.5 สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ว เติมน้ำละลายมาตรฐาน 0.05 N NaCl จำนวน 2 ml ด้วย pipet วางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แห่ electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode เริ่มการกวนช้าๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ลงในหรืออยู่เหนือสารละลาย

2.6 เครื่อง Potentiometric titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Potentiometric titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ที่ใช้และประจุ

2.7 จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration

การทดสอบเพื่อกำลั้รับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีแบบไม่ทำลาย

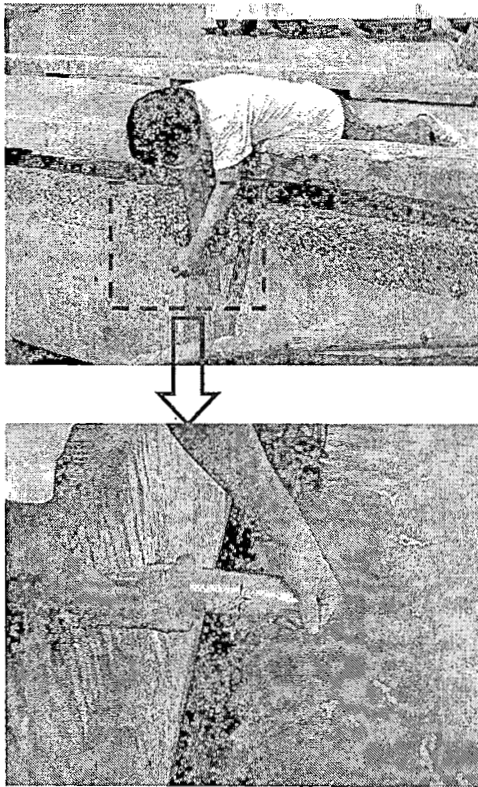
ทำการวัดค่า Rebound number ด้วยเครื่อง Schmidt hammer ที่ผิวหน้าตัวอย่างคอนกรีต โดยจะทำการจดบันทึกค่า Rebound Number จำนวน 10 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย และคำนวณเพื่อกำลั้รับแรงอัดของคอนกรีตของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นๆ โดยใช้สมการ (JSCE, 2005)

$$f_c' = -18 + (1.27 \times RN) \quad (3-1)$$

โดย f_c' คือ กำลั้รับแรงอัดของคอนกรีต (MPa)

RN คือ Rebound number

จากนั้นนำค่ากำลั้รับแรงอัดของคอนกรีตที่ทราบนี้ ไปใช้ในการประเมินค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างแต่ละตำแหน่งต่อไป ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3-41



ภาพที่ 3-41 การวัดค่า Rebound number ด้วยเครื่อง Schmidt hammer ที่ผิวหน้าตัวอย่างคอนกรีต

3.2 การวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์

การวิเคราะห์และพัฒนาเพื่อทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษา ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยการนำข้อมูลจากส่วนที่ 1 มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง

เนื่องจากการแพร่เป็นกลไกหลักของการเคลื่อนที่ ของคลอไรด์ภายในเนื้อของคอนกรีต และสมมติฐานของการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ภายในเนื้อของคอนกรีตเป็นแบบ ทิศทางเดียว (One-dimension movement) ซึ่งจะเป็นไปตามคำตอบของสมการกฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function) ซึ่งแสดงดังสมการดังนี้

$$C_d = \frac{(C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_0}{B} \times 100 \quad (3-2)$$

โดยที่	C_d	คือ	ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
	C_s	คือ	ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (กก./ม ³)
	c	คือ	ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม.)
	D_a	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม. ² /ปี)
	t	คือ	อายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปี)
	B	คือ	น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กก./ม. ³)

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์และพัฒนา เพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์

ข้อมูลที่ใช้ จะนำข้อมูลความสัมพันธ์ของค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และค่าการกระจายตัวของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้า (Chloride profile) ของตัวอย่าง โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล มาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษา ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะพิจารณา

ถึงกับปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อค่าการกระจายตัวของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้า เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต, อายุการใช้งานของโครงสร้าง, ระยะทางจากชายฝั่ง, ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด และสถานะของโครงสร้างที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเล

ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์

1. นำข้อมูลปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (C_s) ที่เก็บตัวอย่างจากโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ตำแหน่งต่างๆ มาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้าง, ระยะเวลาที่โครงสร้างเผชิญในสถานะเกลือคลอไรด์ ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด และระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดินของตำแหน่งที่ทดสอบ ดังนั้น จากการพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้สามารถทราบค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ และจากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะสามารถนำค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ที่ได้นี้ไปใช้ในการคำนวณ เพื่อทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลต่อไป

2. นำข้อมูลความสัมพันธ์ของ ปริมาณเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล (Chloride profile) ของแต่ละตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่าง มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ภายในเนื้อของคอนกรีต (D_c) ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และอายุของโครงสร้างที่เผชิญคลอไรด์ เป็นต้น จากนั้นนำความสัมพันธ์นี้ มาสร้างสมการความสัมพันธ์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ และไปใช้ในการคำนวณ เพื่อทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษา ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลต่อไป

3. นำสมการความสัมพันธ์ของค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล และสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ภายในเนื้อของคอนกรีต ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ มาใช้ในการคำนวณหาอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษา ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้คำตอบของสมการกฎข้อที่ 2 ของ ฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งใช้สมการที่เป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function) เมื่อทราบค่าต่างๆ และจากความสัมพันธ์ของค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้า และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ก็จะสามารถคำนวณอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลได้ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในการ

พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการทำนายการแพร่กระจายของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้
สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ในบทที่ 5 การพัฒนาแบบจำลอง ต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

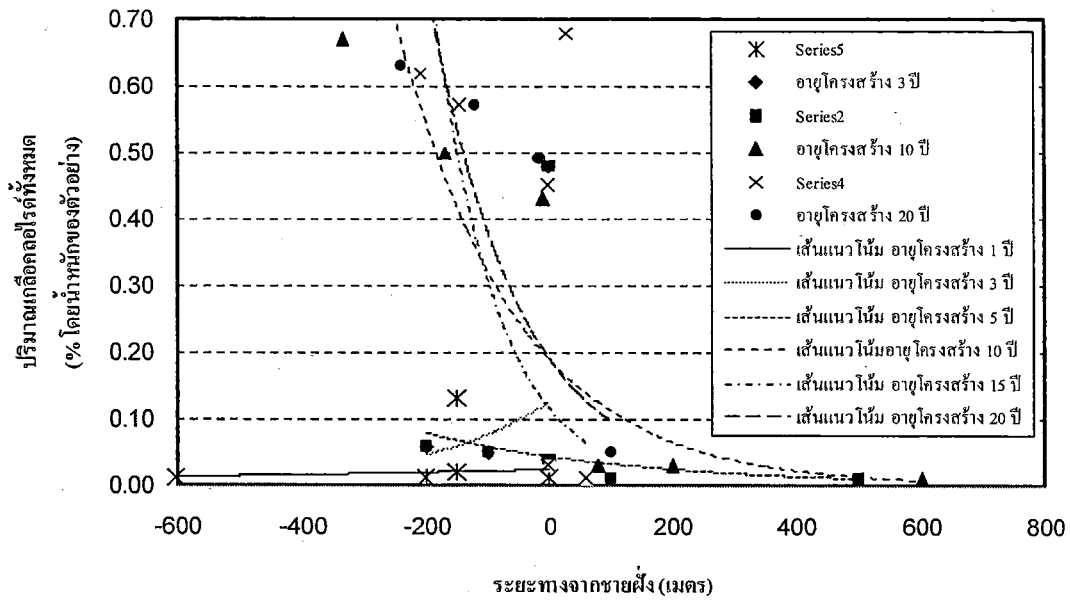
ผลการวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากตัวอย่างที่ได้มาจากโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล ส่วนที่ 2 คือ การกระจายตัวของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกในคอนกรีตจากตัวอย่างที่ได้มาจากโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล และส่วนที่ 3 คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยวิธีแบบไม่ทำลาย

4.1 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากตัวอย่างที่ได้มาจากโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล

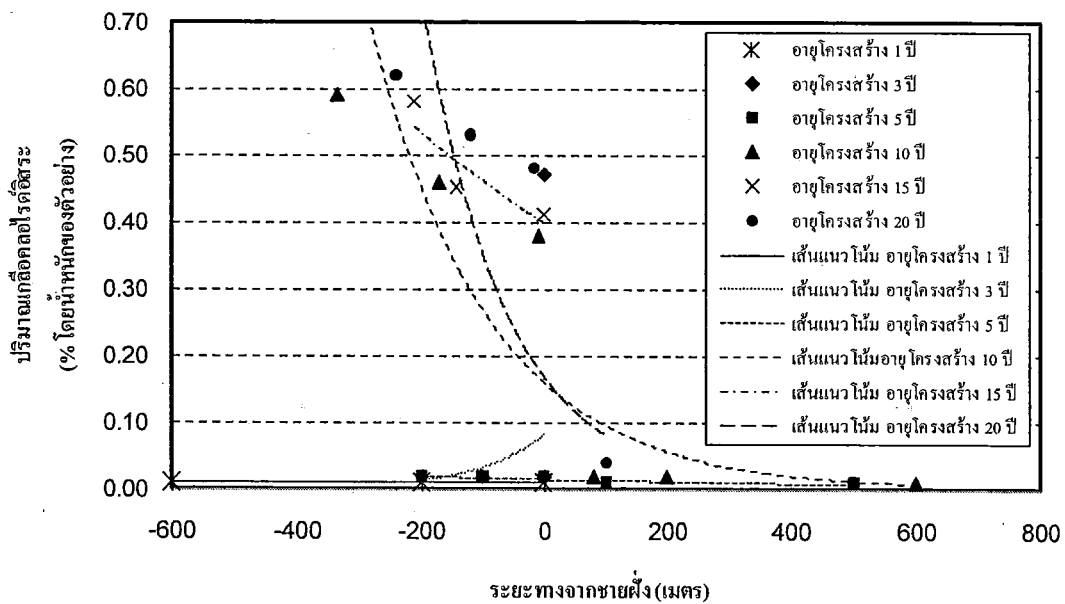
จากการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลตามในสถานที่ต่างๆ แล้วนำตัวอย่างมาทำการทดสอบเพื่อหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดในตัวอย่างของคอนกรีต (Total chloride) และ ปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในตัวอย่างของคอนกรีต (Free chloride) ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล

ประเภทของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก	สถานที่ตั้งของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุ (ปี)	ระยะทาง จากชายฝั่ง (เมตร)	ความสูง (เมตร)	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของตัวอย่าง)	ปริมาณคลอไรด์อิสระ ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของตัวอย่าง)
สะพาน	ทางเลี่ยงเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี	5	-200	3.80	0.06	0.02
		5	-100	1.10	0.05	0.02
		5	0	0.00	0.06	0.02
		5	0	-1.00	0.05	0.28
	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	3	-400	0.60	0.07	0.05
		3	-200	0.60	0.05	0.02
		3	0	0.60	0.07	0.02
	ทางเลี่ยงเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี (ใหม่)	5	-600	5.00	0.01	0.01
		5	-200	5.00	0.01	0.02
		1	0	1.00	0.01	0.02
	หมู่บ้านเขมหนู จ.จันทบุรี	15	0	1.20	0.05	0.03
	อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี	1	-150	0.70	0.05	0.02
5		-150	2.70	0.01	0.03	
สะพาน	ค.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	20	-240	0.80	0.63	0.63
		20	-120	0.80	0.57	0.53
		20	-15	0.60	0.49	0.48
	ค.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	20	-210	0.80	0.63	0.53
		20	-145	0.80	0.61	0.48
		20	0	0.60	0.45	0.02
	ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	-335	0.60	0.61	0.59
		10	-170	0.60	0.50	0.01
		10	-10	0.60	0.43	0.02
		10	-10	-0.30	0.61	0.28
		10	-10	-0.70	0.67	0.02
		10	-10	-1.20	0.65	0.02
	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	-10	1.00	0.63	0.59
กำแพงกันคลื่น	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	0.60	0.99	0.28
	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	0	1.20	0.07	0.02
	อ.บางละมุง จ.ชลบุรี	3	0	0.60	0.65	0.02
	ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี	1	0	3.60	0.43	0.59
		1	0	0.60	0.65	0.78
		1	0	-1.20	0.43	0.59
	แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง	0.5	8.5	0.50	0.57	0.07
คู่งวิมาน จ.จันทบุรี	0.5	15	3.50	0.57	0.07	
กำแพงกันคลื่น	ค.บางพระ จ.ชลบุรี	20	100	3.10	0.01	0.07
	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	200	2.00	0.05	0.07
		10	600	2.20	0.01	0.02
	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	10	80	2.20	0.05	0.02
	อ.เมือง จ.ชลบุรี	5	600	2.10	0.63	0.01
		5	500	2.40	0.01	0.01
	แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง	15	60	2.00	0.01	0.53
คู่งวิมาน จ.จันทบุรี	15	30	4.00	0.50	0.78	
คลองระบายน้ำ	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	1.00	1.57	1.43
หอดูดาวของโรงไฟฟ้า	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	0	0.00	0.61	0.01



ภาพที่ 4-1 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดที่ผิวหน้าเทียบกับระยะทางจากชายฝั่งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล ที่อายุของโครงสร้างต่างๆ

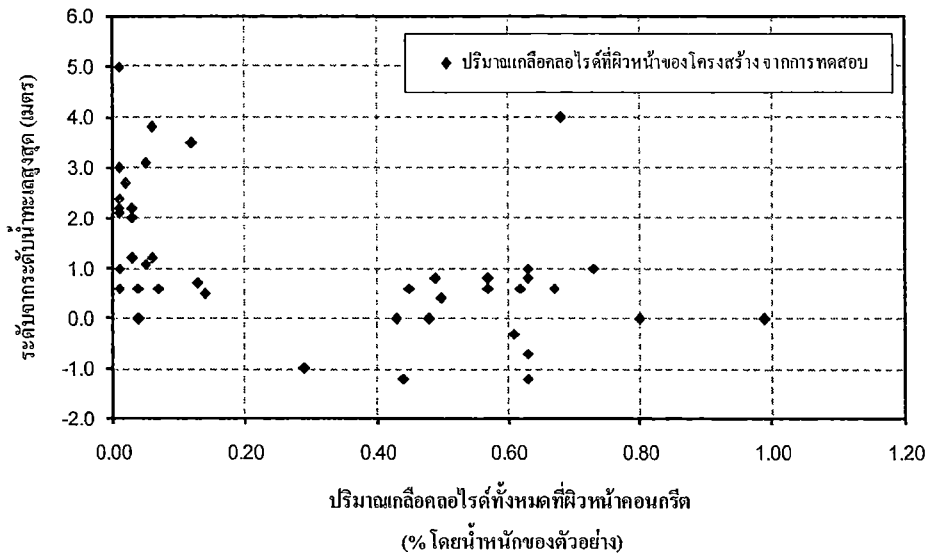


ภาพที่ 4-2 ปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระที่ผิวหน้าเทียบกับระยะทางจากชายฝั่งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล ที่อายุของโครงสร้างต่างๆ

จากภาพที่ 4-1 และ 4-2 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระที่ผิวหน้าของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลของจังหวัดชลบุรี ระยอง และ จันทบุรี ตามระยะทางจากชายฝั่งและอายุโครงสร้าง (ไม่รวมโครงสร้างที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงสูง เช่น คลองระบายน้ำซึ่งมีแผ่นพื้นปิด) พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะทางจากชายฝั่งออกสู่ทะเลมากขึ้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าเมื่อระยะทางจากชายฝั่งเท่ากันแล้วตามเส้นแนวโน้มพบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูงขึ้นเมื่อ โครงสร้างคอนกรีตนั้นมีอายุการใช้งานนานขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดต่อปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตในโครงสร้างที่มีอายุการใช้งาน และระยะห่างจากชายฝั่งทะเล เท่ากัน พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีต มีค่าแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระที่ผิวหน้าของโครงสร้างคลองระบายน้ำและหohl่อเย็นในตารางที่ 4-1 พบว่า มีปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตสูงมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างอื่นที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเลธรรมชาติ ทั้งนี้เพราะว่า คลองระบายน้ำซึ่งมีแผ่นพื้นปิดนี้มีการสัมผัสกับเกลือคลอไรด์ที่มาจากน้ำทะเลยามน้ำทะเลขึ้น และอาคารหohl่อเย็นมีการใช้น้ำจากแม่น้ำบางปะกงซึ่งเป็นน้ำกร่อยในการทำหohl่อเย็น จึงทำให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างมีค่าสูงมาก

และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลของจังหวัดชลบุรี ระยอง และจันทบุรี ในตำแหน่งที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลแตกต่างกัน พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ค่าที่แตกต่างกันตามระดับความสูงที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดที่ผิวหน้าของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ตำแหน่งความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดต่างๆ

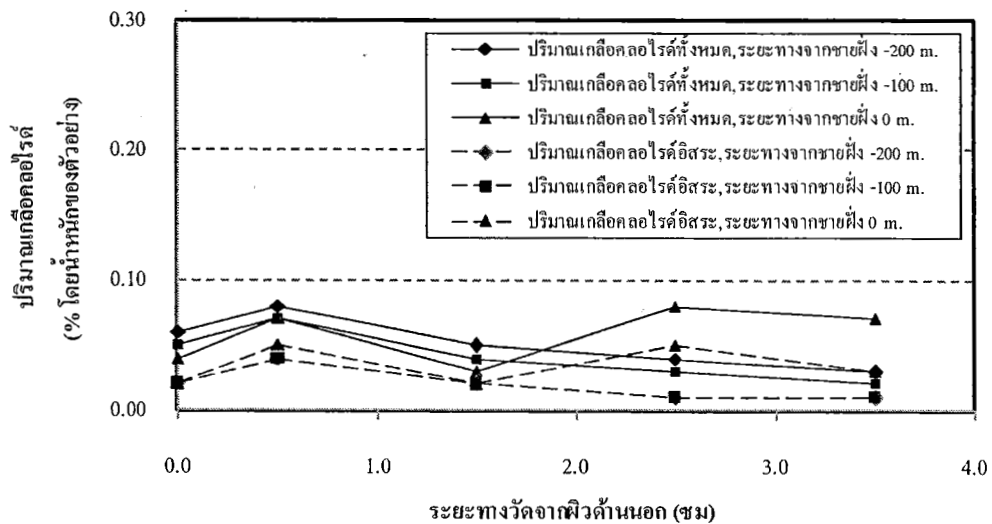
เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ได้จากการศึกษากับค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าที่แนะนำโดย Japan Society of Civil Engineer, JSCE (2005) ซึ่งกำหนดไว้ว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณคลื่นกระแทก (Splash zone) มีค่าเท่ากับ 13.0 กก./ม³ (หรือประมาณ 0.54 % โดยน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต) และปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างมีค่าลดลงตามระยะทางจากชายฝั่งทะเลเข้าสู่แผ่นดิน แต่ไม่ได้กำหนดว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้ามีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะทางจากชายฝั่งออกสู่ทะเล ซึ่งจากการศึกษาในที่นี้พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะทางจากฝั่งออกสู่ทะเลด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งานของโครงสร้าง และสภาพสิ่งแวดล้อมที่โครงสร้างนั้นเผชิญอยู่ อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงเมื่อโครงสร้างอยู่ห่างจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดินซึ่งมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับค่าที่กำหนดโดย JSCE

โดยในการศึกษานี้มิได้มุ่งหาค่าปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณผิวเหล็กเสริมโดยตรง แต่ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย ซึ่งจากข้อมูลที่ได้มาสามารถวิเคราะห์หาค่าปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ด้วยกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ทั้งนี้ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Chloride threshold) เป็นค่าปริมาณคลอไรด์ที่น้อยที่สุดของคอนกรีตบริเวณผิวของเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดเป็นสนิม โดยที่ค่าคลอไรด์วิกฤติตามมาตรฐาน Japan Society of Civil Engineer, JSCE (2005) กำหนดไว้เท่ากับ 1.20 กก./ม³ ซึ่งหากใช้ปริมาณวัสดุประสาน 300 กก. ต่อ คอนกรีต 1 ลบ.ม. แล้วค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติเท่ากับ

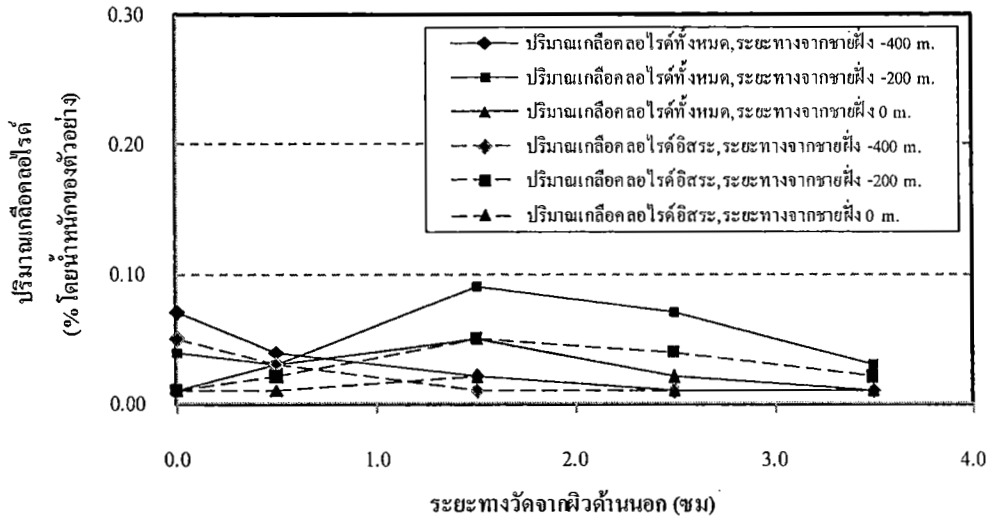
0.40% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และหากคอนกรีต 1 ลบ.ม. มีน้ำหนัก 2,400 กก. แล้วค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติเท่ากับ 0.05 % โดยน้ำหนักของคอนกรีต

4.2 การกระจายตัวของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกในคอนกรีตจากตัวอย่างที่ได้มาจากโครงสร้างที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์

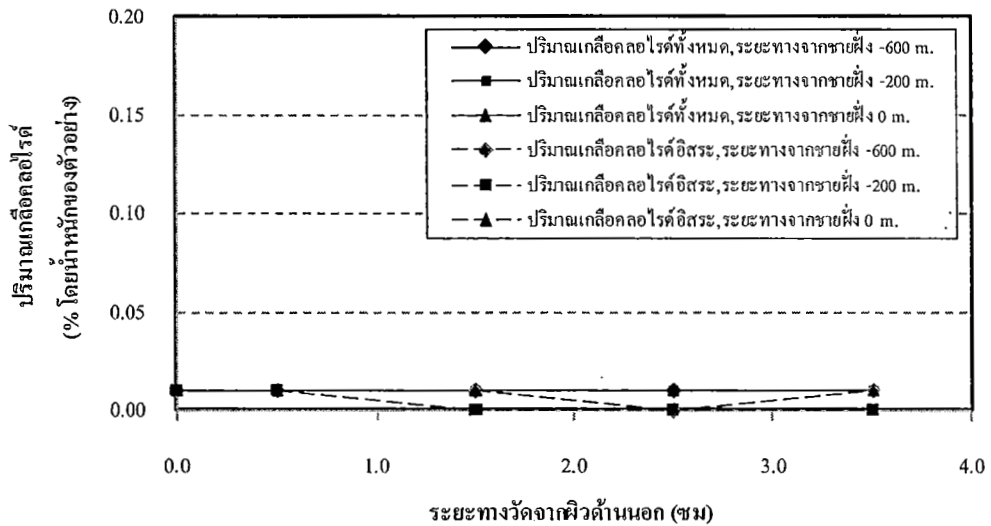
จากการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลตามในสถานที่ต่างๆ แล้วนำตัวอย่างในแต่ละระดับความลึกจากผิวหน้าของคอนกรีตมาทดสอบเพื่อหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดในตัวอย่างของคอนกรีต (Total chloride) และ ปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในตัวอย่างของคอนกรีต (Free chloride) ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



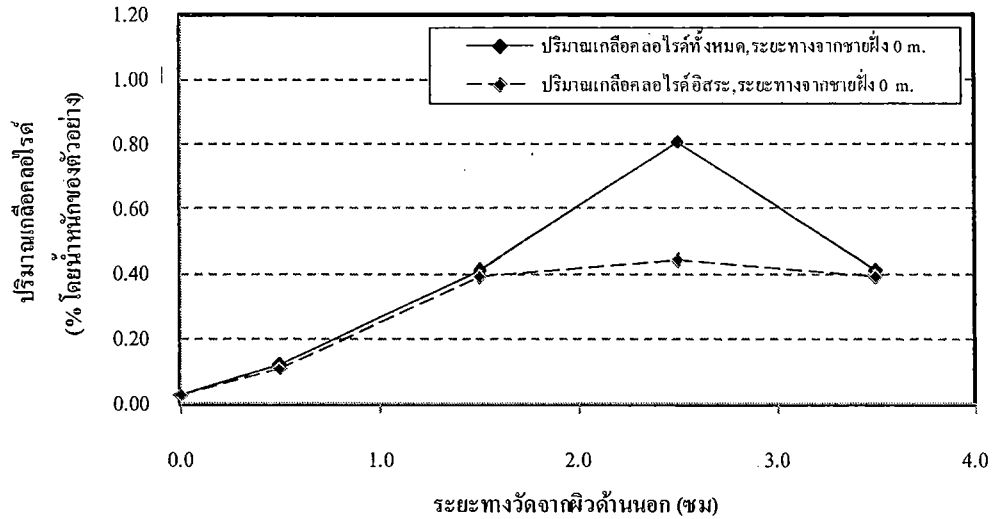
ภาพที่ 4-4 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน ที่ตำแหน่งคาน อายุ 5 ปี บริเวณทางเลียงเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี



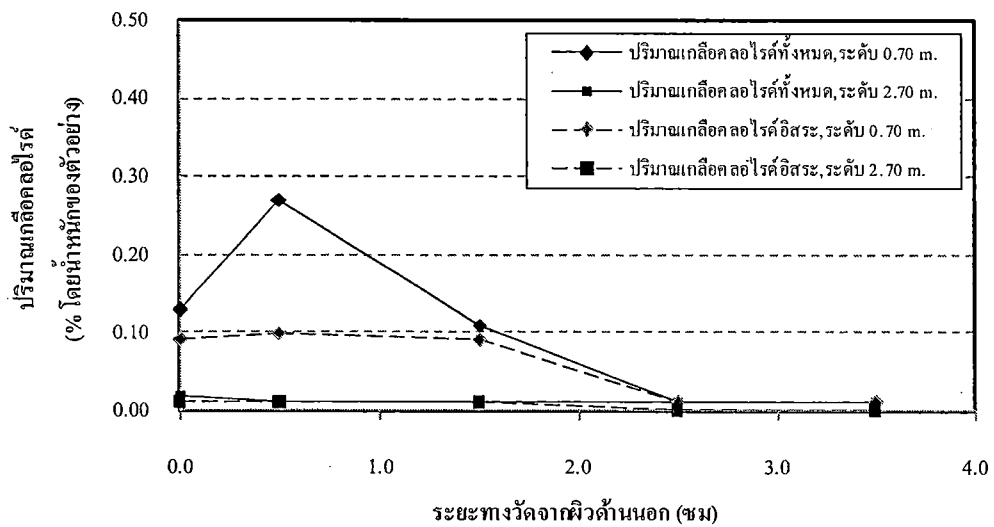
ภาพที่ 4-5 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณแก๊สคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากพืวด้านนอก ของสะพาน ที่ตำแหน่งคาน อายุ 3 ปี บริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



ภาพที่ 4-6 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณแก๊สคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากพืวด้านนอก ของสะพาน ที่ตำแหน่งคาน อายุ 1 ปี บริเวณ อ.เมือง จ.ชลบุรี



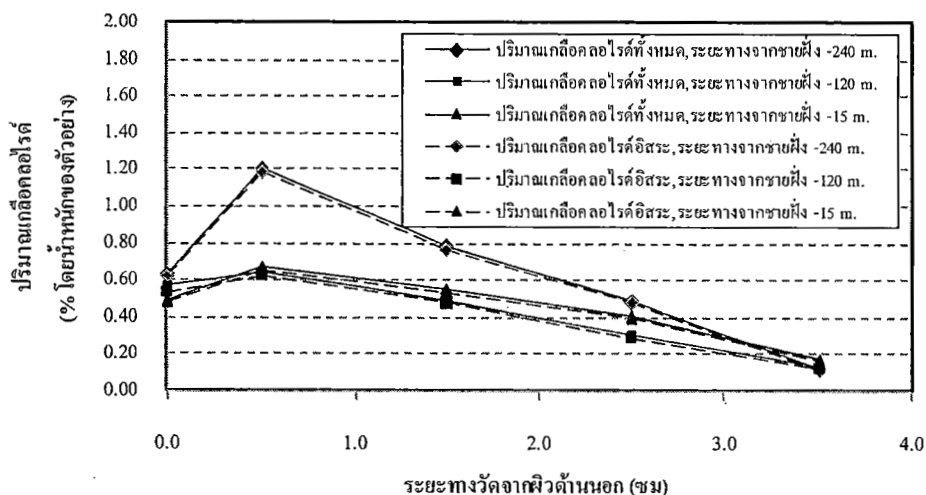
ภาพที่ 4-7 ปริมาณแก๊สคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและปริมาณแก๊สคลอโรฟิลล์ไอสสะท้อนเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน ที่ตำแหน่งคานรัศเสา อายุ 15 ปี บริเวณ หมู่บ้านแฉมหนู จ.จันทบุรี



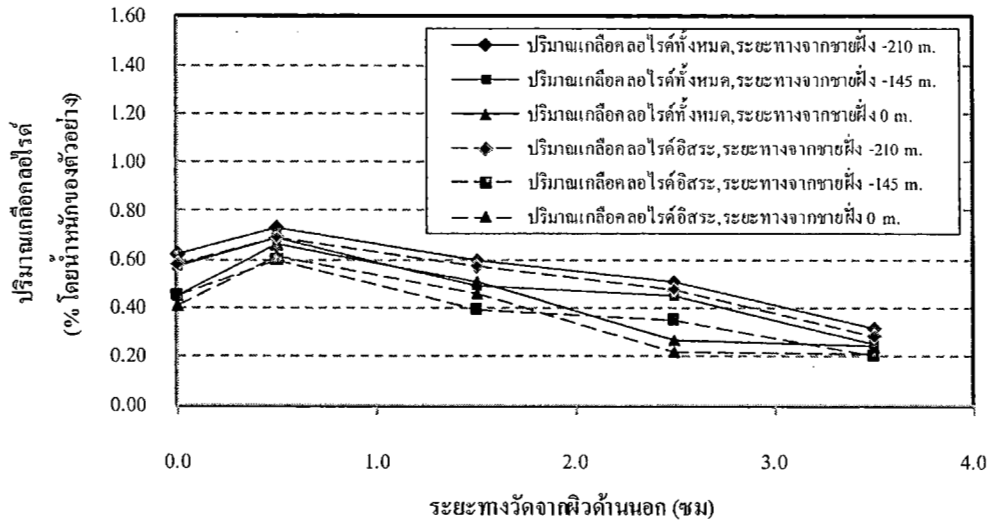
ภาพที่ 4-8 ปริมาณแก๊สคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและปริมาณแก๊สคลอโรฟิลล์ไอสสะท้อนเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน ที่ตำแหน่งตอม่อ และเสา อายุ 1 ปี บริเวณ อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี

จากภาพที่ 4-4 , 4-5, 4-6, 4-7 และ 4-8 เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของสะพานที่ขึ้นส่วนคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย โดยมีอายุของโครงสร้าง 15 ปี, 5 ปี, 3 ปี และ 1 ปี พบว่าการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของ โครงสร้างมากขึ้น และเมื่อพิจารณาจากผลกระทบของระยะทางจากชายฝั่งต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างสะพานอายุ 5 ปี พบว่าการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มีมากที่สุดที่ระยะทางจากชายฝั่ง 0 เมตร และ ในโครงสร้างสะพานอายุ 3 ปี พบว่า การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มีมากที่สุดที่ระยะทางจากชายฝั่ง -200 เมตร ที่เป็นเช่นนี้เพราะในบริเวณดังกล่าวอาจได้รับผลกระทบจากคลื่นน้ำทะเลซัดกระทบโครงสร้างมากที่สุด จึงทำให้มีปริมาณเกลือคลอไรด์มาก และในโครงสร้างสะพานอายุ 1 ปี พบว่า การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

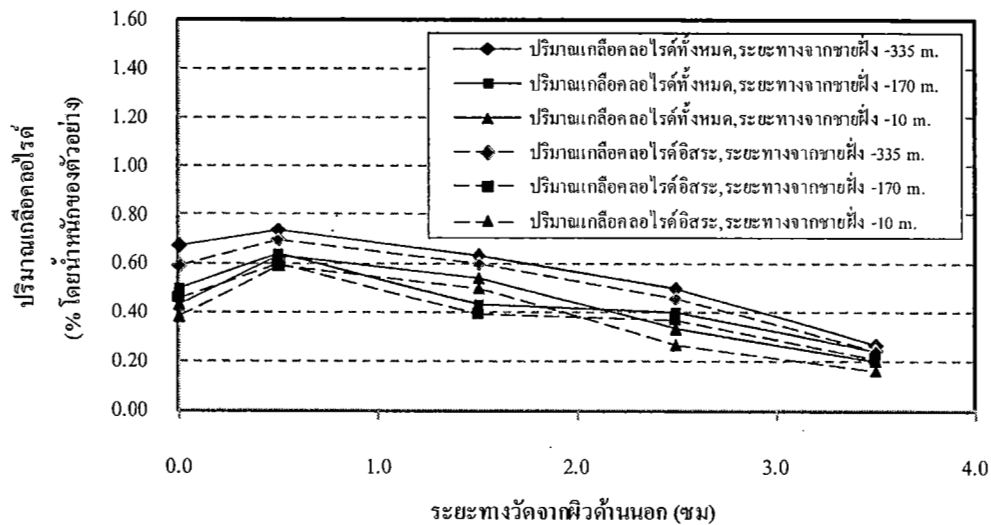
และเมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของโครงสร้างสะพานที่มีอายุการใช้งาน 1 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -150.00 เมตร และมีความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดแตกต่างกัน ดังภาพที่ 4-8 พบว่า มีการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายใน โครงสร้างคอนกรีตมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในตำแหน่งที่มีความสูงใกล้กับระดับน้ำทะเลสูงสุด จะมีการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เข้าไปในเนื้อของคอนกรีตมากกว่า



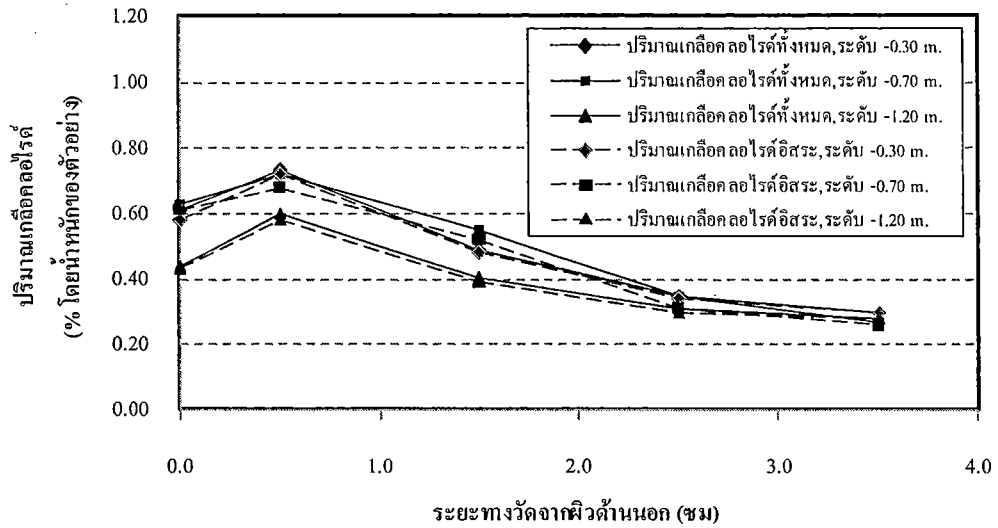
ภาพที่ 4-9 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ ที่ตำแหน่งคาน อายุ 20 ปี บริเวณ ต.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



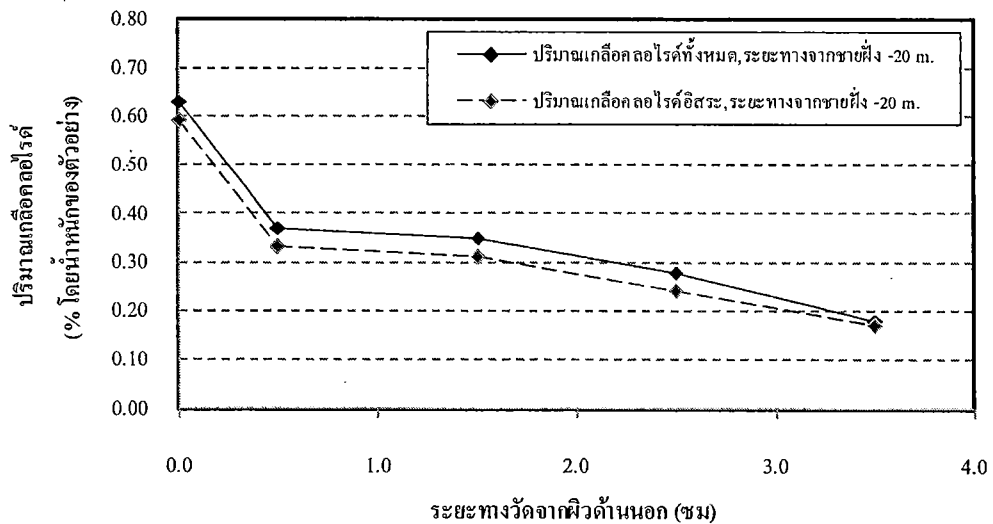
ภาพที่ 4-10 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากผิวหนังด้านนอก ของท่าเทียบเรือ ที่ตำแหน่งคาน อายุ 15 ปี บริเวณ ต.บางพระ จ.ชลบุรี



ภาพที่ 4-11 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากผิวหนังด้านนอก ของท่าเทียบเรือ ที่ตำแหน่งคาน อายุ 10 ปี บริเวณ ต.แสนสุข จ.ชลบุรี



ภาพที่ 4-12 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ ที่ตำแหน่งคาน อายุ 10 ปี ที่มีระยะทางจากชายฝั่ง -10.00 เมตร บริเวณ ต.แสนสุข จ.ชลบุรี

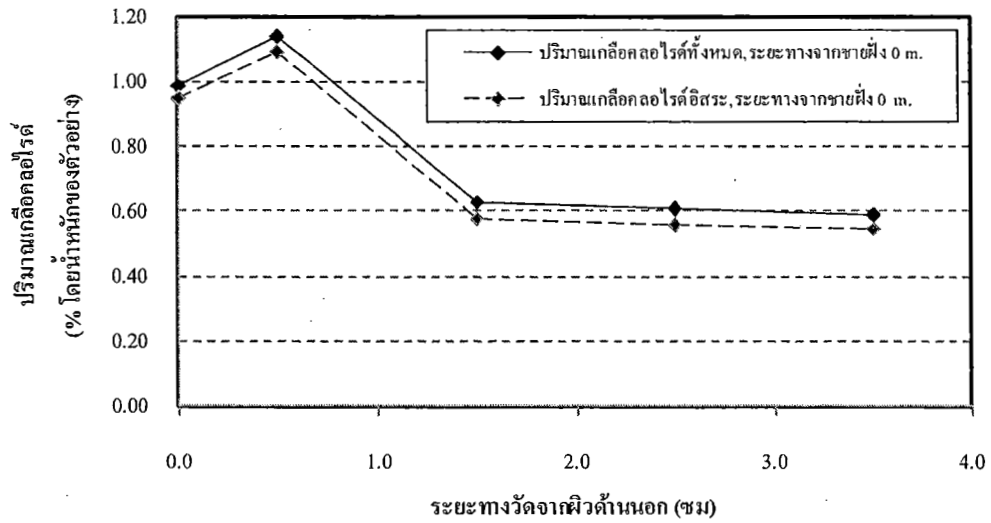


ภาพที่ 4-13 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ ที่ตำแหน่งคาน อายุ 10 ปี ริมฝั่งแม่น้ำบางปะกง อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา

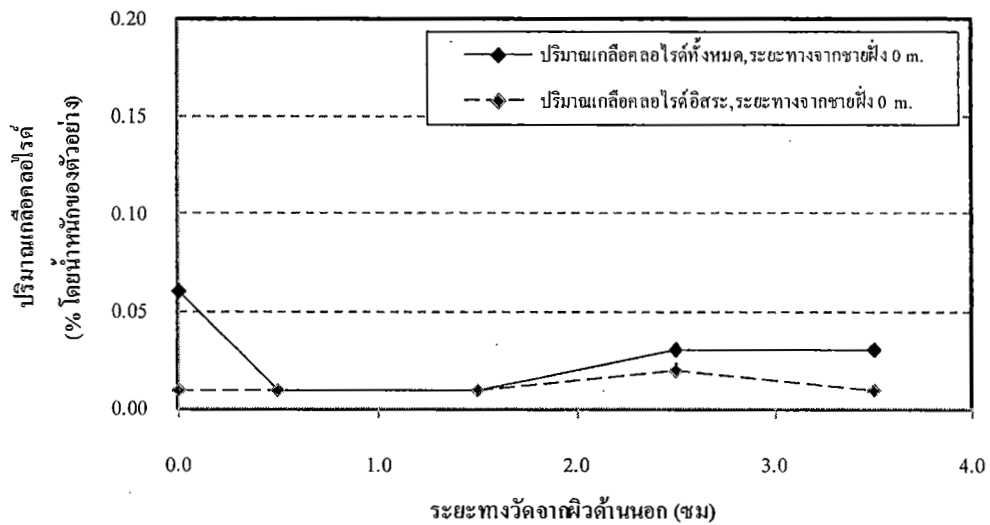
เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของ โครงสร้างทำ เทียบเรือที่มีอายุการใช้งานแตกต่างกัน คือ โครงสร้างทำเทียบเรือที่มีอายุการใช้งาน 20 ปี โครงสร้างทำเทียบ เรือที่มีอายุการใช้งาน 15 ปี และ โครงสร้างทำเทียบเรือที่มีอายุการใช้งาน 10 ปี ดังภาพที่ 4-9 ถึง 4-12 พบว่า โครงสร้างทำเทียบเรือที่มีอายุการใช้งานของ โครงสร้างนั้นๆมาก จะมีการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายใน เนื้อของคอนกรีตของ โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่มากกว่า โครงสร้างคอนกรีตที่มีอายุ การใช้งานน้อย

และเมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของ โครงสร้างทำเทียบเรือที่มีอายุการใช้งานเท่ากัน คือ โครงสร้างทำเทียบเรือที่มีอายุการใช้งาน 10 ปี แต่ตั้งอยู่ ในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยภาพที่ 4-11 แสดงการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ใน โครงสร้างที่ตั้งอยู่ใน สิ่งแวดล้อมทะเล และภาพที่ 4-13 แสดงการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ใน โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในริมฝั่งแม่น้ำบาง ปะกง ซึ่งพบว่า การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ใน โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลทะเลมี ความรุนแรงมากกว่า โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในริมฝั่งแม่น้ำ บางปะกง อาจเป็นเพราะเนื่องจากในบริเวณชายฝั่ง ทะเลมีความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในน้ำมากกว่าบริเวณริมฝั่งแม่น้ำบางปะกง และในบริเวณชายฝั่งทะเล อาจมีความรุนแรงของคลื่นน้ำที่มากกว่าบริเวณริมฝั่งแม่น้ำบางปะกง

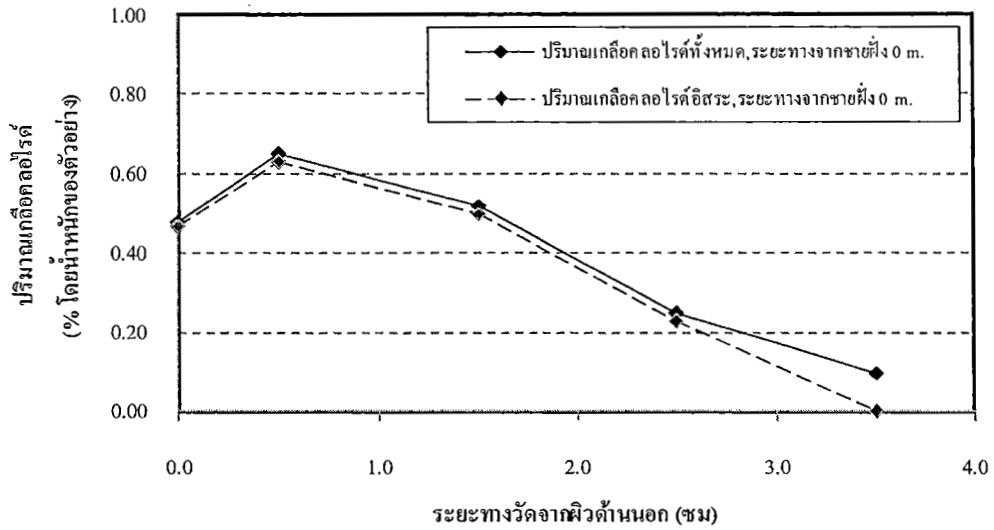
และเมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของ โครงสร้างทำเทียบเรือที่มีอายุการใช้งาน 10 ปี และ ระยะทางจากชายฝั่ง -10.00 เมตร และมีความสูงจาก ระดับน้ำทะเลสูงสุดแตกต่างกัน ดังภาพที่ 4-12 พบว่า มีการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายใน โครงสร้าง คอนกรีตใกล้เคียงกัน แต่มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อมีความสูงใกล้เคียงกับระดับน้ำทะเลสูงสุดมากขึ้น ทั้งนี้ อาจ เป็นเพราะความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดของแต่ละตำแหน่งแตกต่างกันไม่มาก



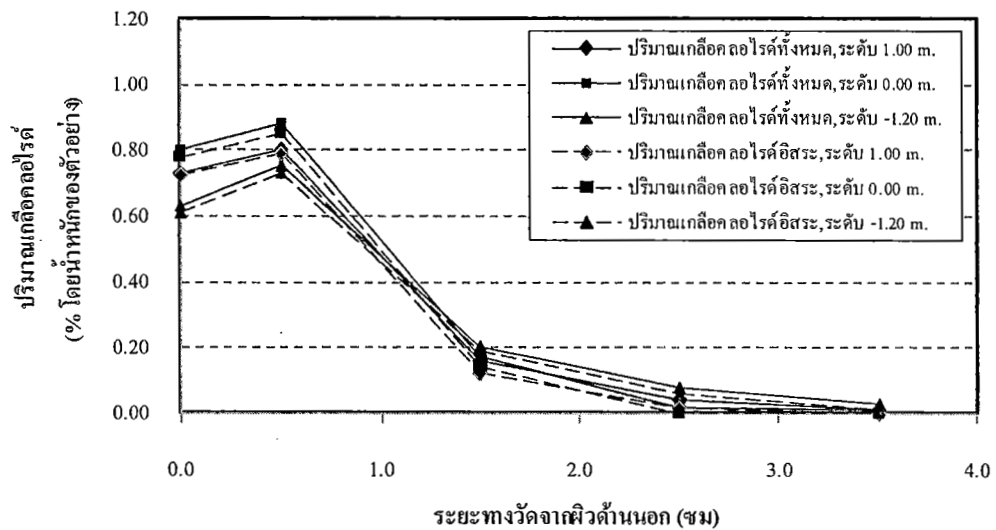
ภาพที่ 4-14 ปริมาณเกล็ดเลือดไวรัสทั้งหมดและปริมาณเกล็ดเลือดไวรัสอีสุระเทียบกับระยะทางจากผิวหนังด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 10 ปี บริเวณริมทะเล อ.เมือง จ.ชลบุรี



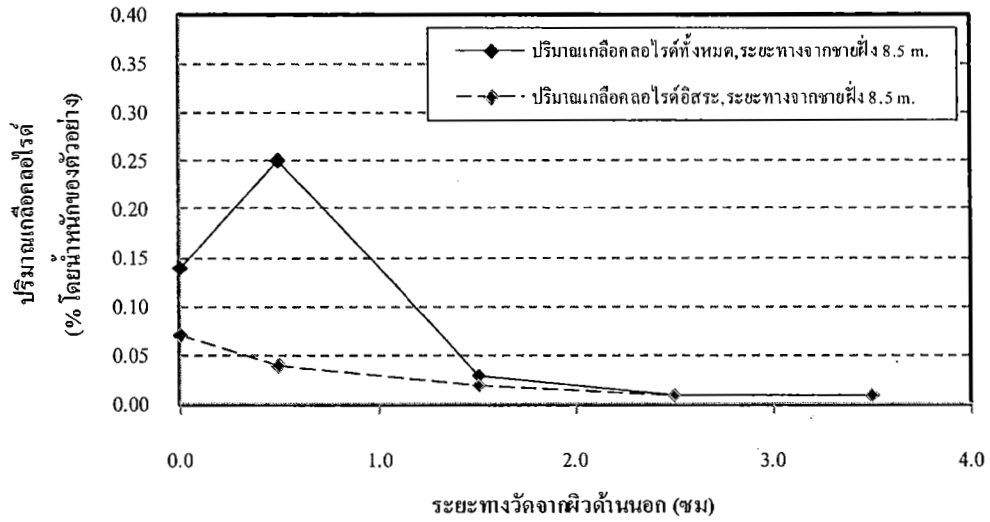
ภาพที่ 4-15 ปริมาณเกล็ดเลือดไวรัสทั้งหมดและปริมาณเกล็ดเลือดไวรัสอีสุระเทียบกับระยะทางจากผิวหนังด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 10 ปี บริเวณริมแม่น้ำบางปะกง อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา



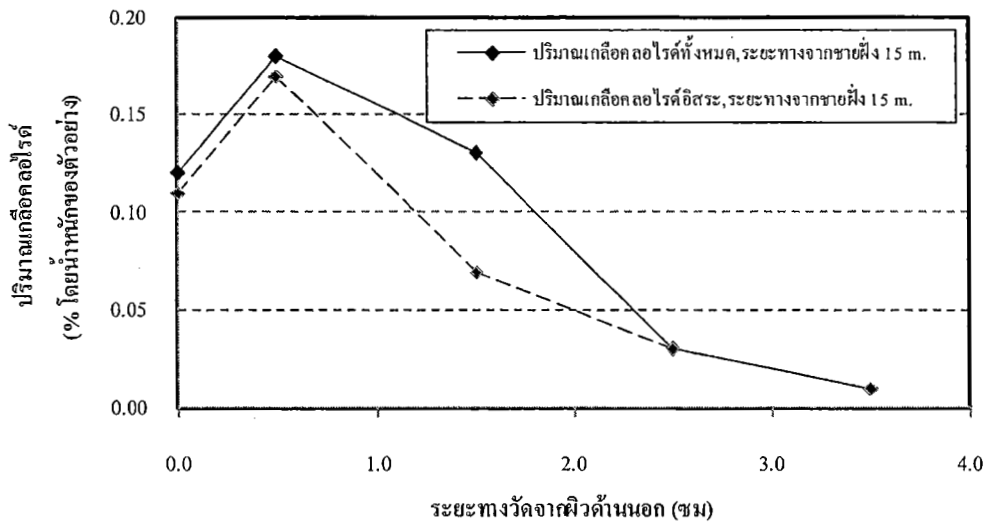
ภาพที่ 4-16 ปริมาณเกลือคอลลอยด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคอลลอยด์ไอสธระเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 3 ปี บริเวณริมทะเล อ.บางละมุง จ.ชลบุรี



ภาพที่ 4-17 ปริมาณเกลือคอลลอยด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคอลลอยด์ไอสธระเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 1 ปี บริเวณริมทะเล ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี



ภาพที่ 4-18 ปริมาณแก๊สคลอโรไฟต์ทั้งหมดและปริมาณแก๊สคลอโรไฟต์อิสระเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 0.5 ปี บริเวณริมทะเล แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง

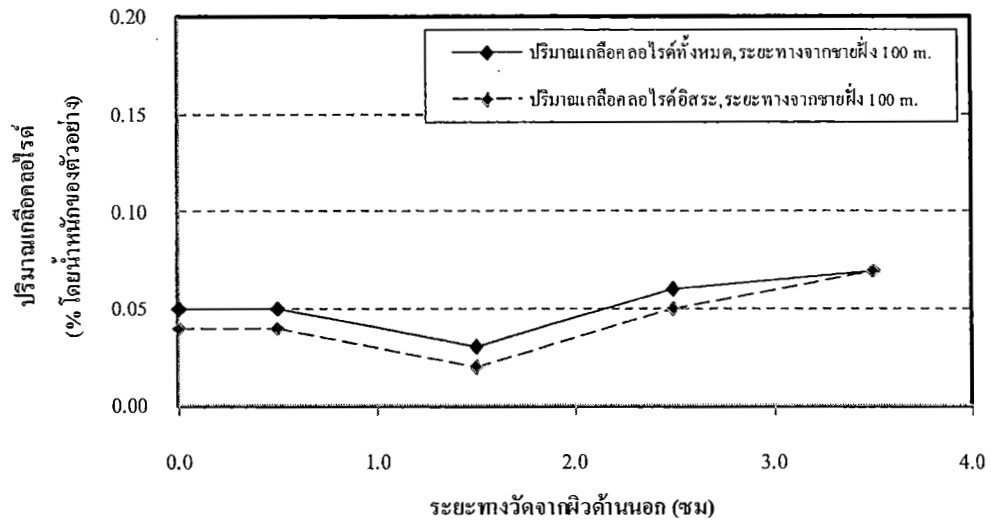


ภาพที่ 4-19 ปริมาณแก๊สคลอโรไฟต์ทั้งหมดและปริมาณแก๊สคลอโรไฟต์อิสระเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 0.5 ปี บริเวณริมทะเล คู้งวิมาน อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี

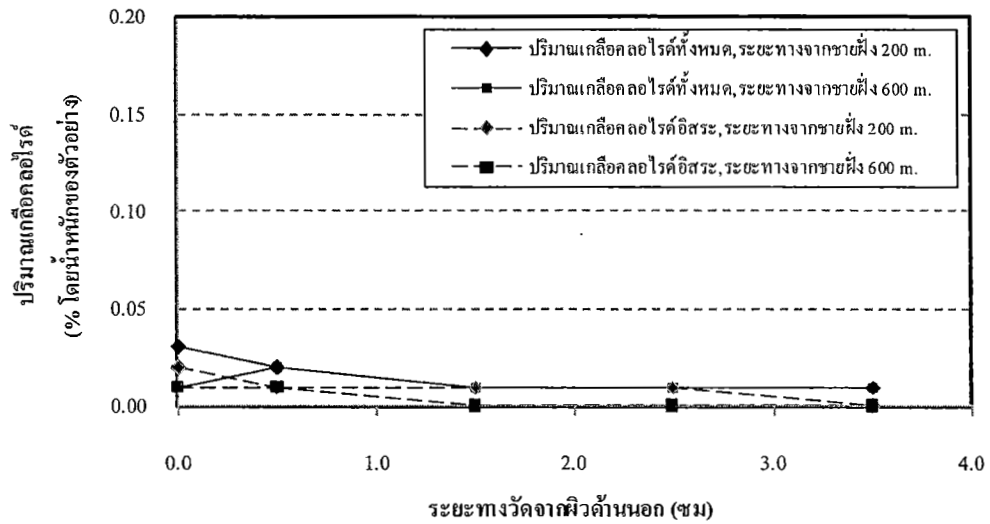
เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของโครงสร้างกำแพงกันคลื่นที่มีอายุการใช้งานเท่ากัน คือ โครงสร้างกำแพงกันคลื่นที่มีอายุการใช้งาน 10 ปี แต่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยภาพที่ 4-14 แสดงปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล และภาพที่ 4-15 แสดงปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ตั้งอยู่ริมฝั่งแม่น้ำบางปะกง พบว่า การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างกำแพงกันคลื่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลที่มีความรุนแรงมากกว่าสภาพแวดล้อมริมฝั่งแม่น้ำบางปะกง อาจเป็นเพราะเนื่องจากปริมาณคลอไรด์บริเวณชายฝั่งทะเลมีความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในน้ำมากกว่าบริเวณริมฝั่งแม่น้ำบางปะกง และในบริเวณภายในทะเลอาจมีความรุนแรงของคลื่นน้ำที่มากกว่าบริเวณริมฝั่งแม่น้ำบางปะกง

เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของโครงสร้างกำแพงกันคลื่นที่มีอายุการใช้งานแตกต่างกัน ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเช่นเดียวกัน คือ โครงสร้างกำแพงกันคลื่นที่มีอายุการใช้งาน 10 ปี ดังภาพที่ 4-14 โครงสร้างกำแพงกันคลื่นที่มีอายุการใช้งาน 3 ปี ดังภาพที่ 4-16 โครงสร้างกำแพงกันคลื่นที่มีอายุการใช้งาน 1 ปี ดังภาพที่ 4-17 และ โครงสร้างกำแพงกันคลื่นที่มีอายุการใช้งาน 0.5 ปี ดังภาพที่ 4-18 และ 4-19 พบว่า โครงสร้างกำแพงกันคลื่นคอนกรีตที่มีอายุการใช้งานของโครงสร้างมาก จะมีการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีตของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลมากกว่า โครงสร้างกำแพงกันคลื่นคอนกรีตที่มีอายุการใช้งานน้อย

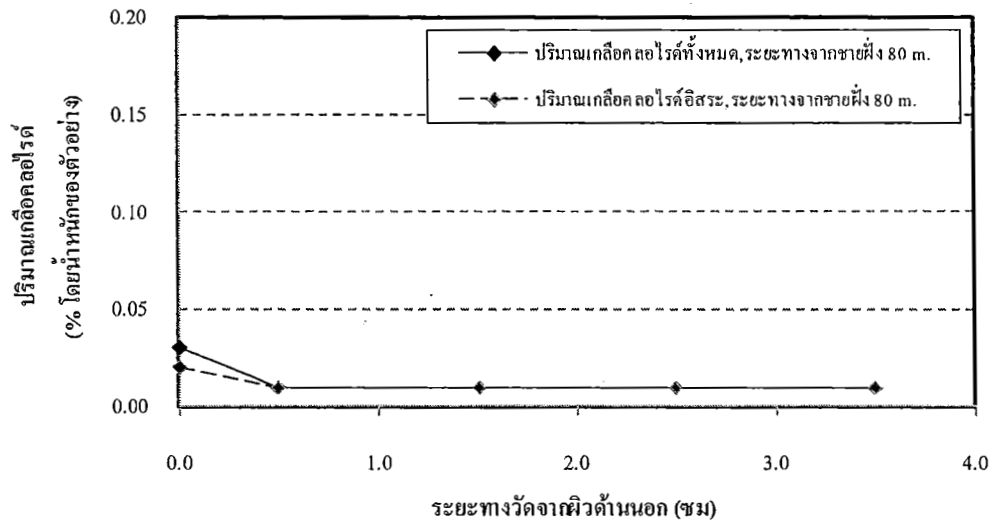
และเมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของโครงสร้างกำแพงกันคลื่นที่มีอายุการใช้งาน 1 ปี และมีความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดแตกต่างกัน ดังภาพที่ 4-17 พบว่า มีการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายในโครงสร้างคอนกรีตใกล้เคียงกัน แต่จะมีแนวโน้มของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มากที่สุด ที่ตำแหน่งความสูงเท่ากับระดับน้ำทะเลสูงสุด



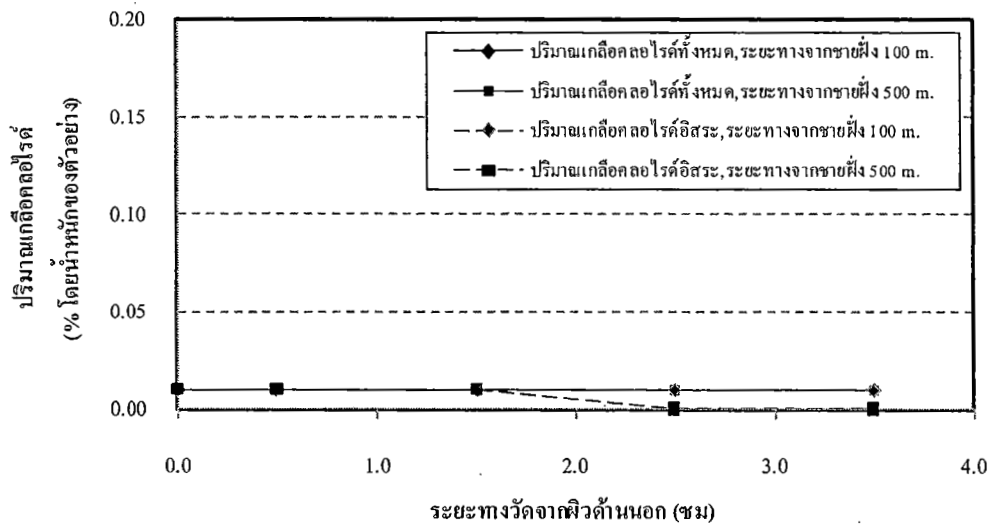
ภาพที่ 4-20 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์อิสระเทียบกับระยะทางจากฝั้วด้านนอก ของเสไฟฟ้า อายุ 20 ปี บริเวณ ต.บางพระ จ.ชลบุรี



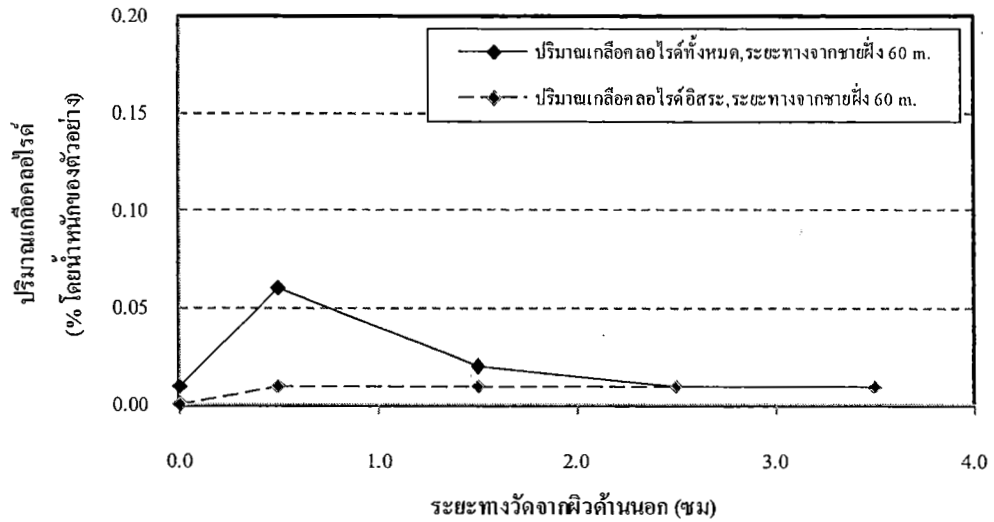
ภาพที่ 4-21 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์อิสระเทียบกับระยะทางจากฝั้วด้านนอก ของเสไฟฟ้า อายุ 10 ปี บริเวณ อ.เมือง จ.ชลบุรี



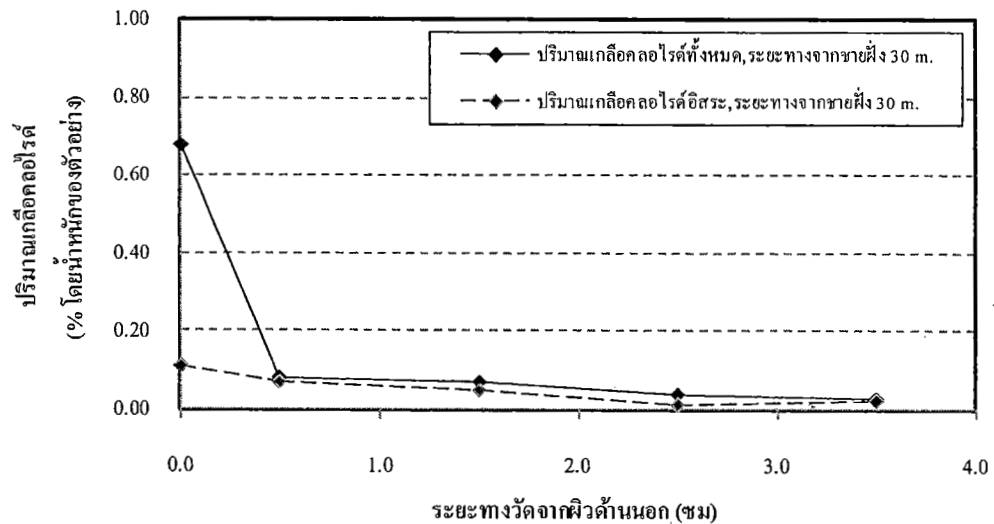
ภาพที่ 4-22 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจาก
 ศิวูดานนอก ของเสาไฟฟ้า อายุ 10 ปี บริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



ภาพที่ 4-23 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจาก
 ศิวูดานนอก ของเสาไฟฟ้า อายุ 5 ปี บริเวณ อ.เมือง จ.ชลบุรี

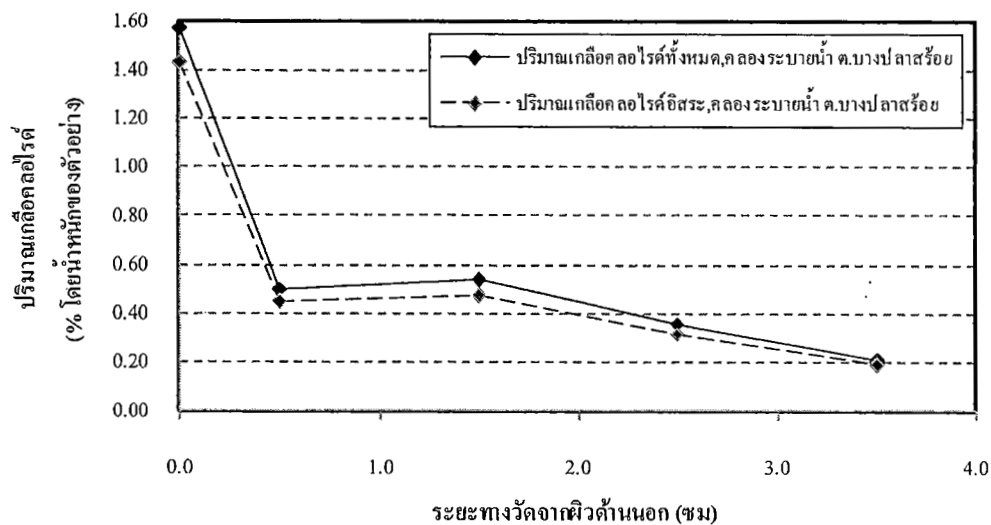


ภาพที่ 4-24 ปริมาณเชื้อคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเชื้อคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากพีด้านนอก ของเสาไฟฟ้า อายุ 15 ปี บริเวณ แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง

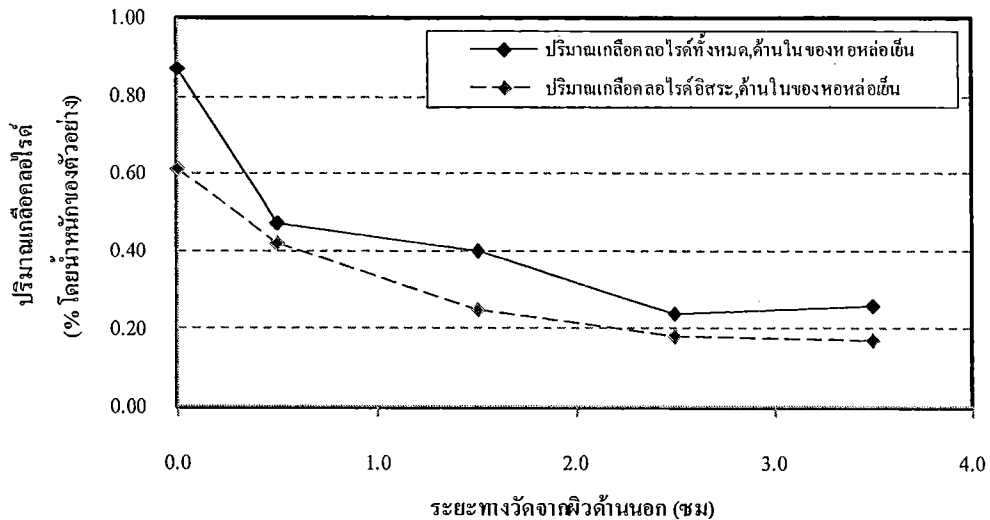


ภาพที่ 4-25 ปริมาณเชื้อคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเชื้อคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากพีด้านนอก ของเสาไฟฟ้า อายุ 15 ปี บริเวณ กิ่งวิมาน อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี

เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของเสาไฟฟ้าคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสภาวะบรรยากาศทะเลที่มีระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดินและอายุการใช้งานที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4-20 ถึง 4-25 พบว่า การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในเสาไฟฟ้าที่มีอายุการใช้งานของโครงสร้างนานๆ (15-20 ปี) มีการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มากกว่ากลุ่มเสาไฟฟ้าที่มีอายุของโครงสร้างน้อย (5-10 ปี) แต่ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตนั้นก็ยังมีค่าไม่มากนัก และเมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของคลอไรด์ของเสาไฟฟ้าที่มีระยะทางจากชายฝั่งทะเลเข้าสู่แผ่นดินที่ต่างกัน พบว่า ระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดินส่งผลกระทบต่อ การแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายในคอนกรีตของเสาไฟฟ้ากับโครงสร้างประเภทอื่นๆ เช่น สะพาน กำแพงกันคลื่น พบว่า การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายในคอนกรีตของเสาไฟฟ้ามีค่าที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ โครงสร้างประเภทอื่นๆ เนื่องจากโครงสร้างเสาไฟฟ้าตั้งอยู่บนแผ่นดินซึ่งไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงเช่นเดียวกับ โครงสร้างประเภทอื่น แต่โครงสร้างเสาไฟฟ้าได้รับเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลโดยมากับละอองน้ำทะเลในอากาศที่พัดเข้าหาแผ่นดิน



ภาพที่ 4-26 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของคลองระบายน้ำ อายุ 10 ปี บริเวณ ต.บางปลาสร้อย อ.เมือง จ.ชลบุรี



ภาพที่ 4-27 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของหอหล่อเย็น อายุ 10 ปี บริเวณ อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา

เมื่อพิจารณาการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระในโครงสร้างของคลองระบายน้ำและหอหล่อเย็น ดังแสดงในภาพที่ 4-26 และ 4-27 พบว่า มีการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างประเภทอื่นที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเล ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของคลองระบายน้ำและหอหล่อเย็นต้องเผชิญสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมากกว่าดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงส่งผลทำให้มีการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตได้มากกว่าโครงสร้างประเภทอื่น

เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทยกับผลจากการศึกษาของ Oh and Jang (2007) พบว่า ปริมาณของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางวัดจากผิวด้านนอกของโครงสร้างมากขึ้น เช่นเดียวกัน แต่จากการศึกษาในที่นี้พบว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล จะมีค่าน้อยกว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ระยะ 1 เซนติเมตร แรกจากผิวด้านหน้าของคอนกรีตในหลายโครงสร้าง ทั้งนี้อาจได้รับผลกระทบจากการชะล้างของน้ำฝนจึงทำให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตต่ำกว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ข้างในเนื้อของคอนกรีตได้

4.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีแบบไม่ทำลาย

จากการวัดค่า Rebound number ด้วยเครื่อง Schmidt hammer ที่ผิวหน้าคอนกรีตของตัวอย่าง โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และคำนวณหา กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยวิธีแบบไม่ทำลายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ละตำแหน่ง ซึ่งได้ผลของการทดสอบหา กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในแต่ ละโครงสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีแบบไม่ทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ตำแหน่งต่างๆ

ประเภทของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก	สถานที่ตั้งของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุ (ปี)	ระยะทางจากชายฝั่ง (เมตร)	ความสูง (เมตร)	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (กก./ซม ²)	
สะพาน	ทางเลี่ยงเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี	5	-200	3.80	283	
		5	-100	1.10	283	
		5	0	0.00	283	
		5	0	-1.00	283	
	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	5	-200	0.60	283
			3	-200	0.60	373
			5	0	0.60	283
	ทางเลี่ยงเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี (ใหม่)	ทางเลี่ยงเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี (ใหม่)	1	-600	3.30	283
			1	-200	3.30	283
			1	0	3.30	283
			1	0	3.30	283
	หมู่บ้านแชนพูน จ.จันทบุรี	หมู่บ้านแชนพูน จ.จันทบุรี	15	0	1.20	283
			1	-150	0.70	426
อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี	อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี	1	-100	2.70	283	
		1	-100	2.70	283	
สะพาน	ด.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	20	-240	0.80	233	
		20	-120	0.80	406	
		20	-15	3.80	283	
	ด.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	ด.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	20	-200	0.60	283
			20	-145	0.60	377
			20	0	0.60	283
	ด.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี	ด.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	-335	0.60	378
			10	-100	0.60	283
			10	-10	0.00	378
			10	-10	-0.30	378
			10	-10	-0.70	378
			10	-10	-1.20	378
	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	20	-20	3.30	283
20			-20	3.30	283	
กำแพงกันคลื่น	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	0.60	378	
		10	0	1.20	378	
	อ.บางละมุง จ.ชลบุรี	อ.บางละมุง จ.ชลบุรี	5	0	0.30	406
			5	0	1.20	233
	ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี	ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี	1	0	0.00	406
			1	0	-1.20	406

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยวิธีแบบไม่ทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (ต่อ)

ประเภทของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	สถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุ (ปี)	ระยะทางจากชายฝั่ง (เมตร)	ความสูง (เมตร)	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (กก./ซม ^๒)
กำแพงกันคลื่น	แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง	0.5	8.5	0.50	404
	ทุ่งวิมาน จ.จันทบุรี	0.5	15	3.50	258
เสาไฟฟ้า	ต.บางพระ จ.ชลบุรี	20	100	3.10	334
	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	100	2.00	444
		10	600	2.20	404
	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	10	80	2.20	444
	อ.เมือง จ.ชลบุรี	5	600	2.10	404
		5	100	2.40	461
	แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง	15	60	3.00	477
	ทุ่งวิมาน จ.จันทบุรี	15	30	4.00	461
คลองระบายน้ำ	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	1.00	477
หอนหล่อเย็นของโรงไฟฟ้า	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	100	0.00	461

จากข้อมูลที่แสดงให้เห็นในตารางที่ 4-2 เมื่อทราบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในแต่ละแห่ง จะทำการวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อคำนวณหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้ในการผสมคอนกรีต โดย

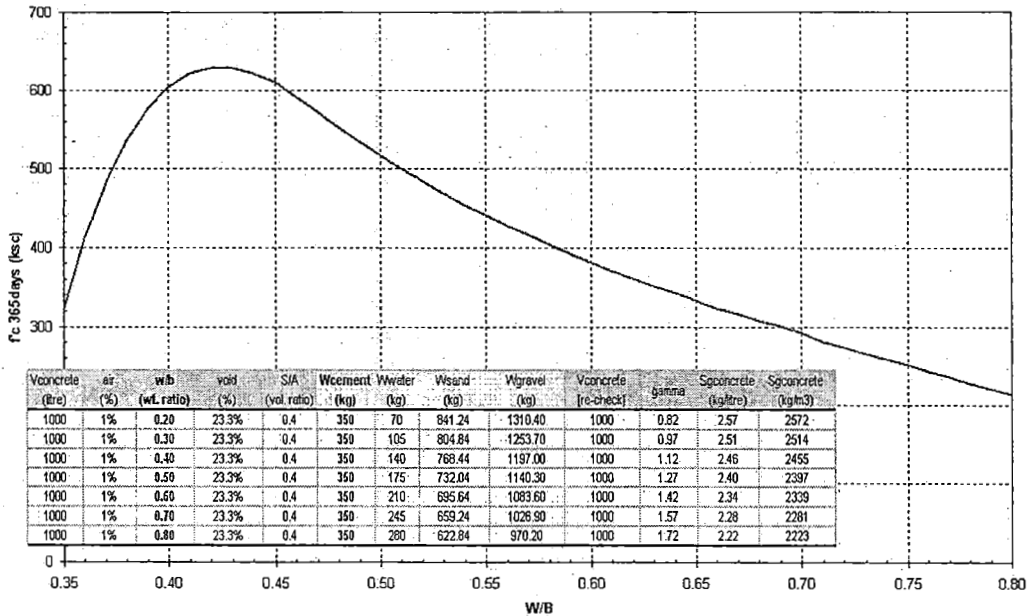
สมมุติ คอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างทุกสถานที่ใช้ ซีเมนต์ล้วน เป็นวัสดุประสาน
 ใช้ ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 350 กก/ม³
 หิน เท่ากับ 1,100 กก/ม³
 ทราย เท่ากับ 800 กก/ม³

และ คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด มากกว่า 300 กก/ม² ที่อายุ 28 วัน ให้ใช้สารลดปริมาณน้ำในอัตราส่วนผสมของคอนกรีต และ คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด น้อยกว่า 300 กก/ม² ที่อายุ 28 วัน จะไม่ใช้สารลดปริมาณน้ำในอัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ทำการวิเคราะห์ย้อนกลับโดยใช้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ “FACOMP T2.0” โดยจะพิจารณาถึงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 ปี ทำโดยการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆกัน ซึ่งจะได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีอายุ 1 ปี ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4-28 และจากผลการสำรวจอายุการใช้งานของโครงสร้างแต่ละแห่งนั้นมีอายุของโครงสร้างมากกว่า 1 ปี แต่ในการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อายุมากกุนั้น ให้ใช้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 ปีในการวิเคราะห์ เนื่องจากการพัฒนา กำลังของคอนกรีตมีค่าที่น้อยมากเมื่ออายุของคอนกรีตมากก และยังมีผลกระทบจากการทำลายคอนกรีตจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ ซึ่งอาจทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้ เมื่ออายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะสมมุติให้การสูญเสียกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่อ โครงสร้างนั้นๆ ได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม

โดย กำหนดให้ ช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

- 3-5 ปี มีการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ประมาณ 5 %
- 6-10 ปี มีการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ประมาณ 10 %
- 11 ปีขึ้นไป มีการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ประมาณ 15 %



ภาพที่ 4-28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 ปี และ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ได้จากการคำนวณโดย “FACOMP T2.0”

ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของโครงสร้างที่อายุการใช้งานต่างๆ และการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ในร้อยละของการสูญเสียกำลังของอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อายุการใช้งานต่างๆ สามารถสรุปเป็นตารางแสดงข้อมูลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ปรับแก้ ($f'_{c, Adjust}$) และ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ข้อมูลต่างๆ ในการเก็บตัวอย่างของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ

ประเภทของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก	สถานที่ตั้งของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุ (ปี)	ระยะทางจากชายฝั่ง (เมตร)	ความสูง (เมตร)	f_c' (ksc)	f_c' adjust (ksc)	W/B
สะพาน	ทางเลียเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี	5	-200	3.80	283	297.9	0.690
		5	-100	1.10	283	297.9	0.690
		5	0	0.00	283	297.9	0.690
		5	0	-1.00	283	297.9	0.690
	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	3	-400	0.00	373	392.6	0.585
		5	-400	0.60	373	392.6	0.585
		3	0	0.00	373	392.6	0.585
	ทางเลียเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี (ใหม่)	3	-200	3.00	323	323.0	0.665
		1	-200	5.00	323	323.0	0.690
		1	0	5.00	323	323.0	0.585
	หมู่บ้านแถมหนู จ.จันทบุรี	15	0	1.10	369	434.1	0.555
	อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี	1	-150	0.70	426	426.0	0.560
		1	-150	2.70	426	426.0	0.560
สะพาน	ด.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	20	-200	0.80	406	477.6	0.585
		20	-100	0.00	406	477.6	0.555
		20	-15	0.80	426	477.6	0.585
	ด.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	20	-150	0.00	377	443.5	0.560
		20	-145	0.60	377	443.5	0.560
		20	0	0.80	377	443.5	0.560
	ด.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	-335	0.00	378	420.0	0.585
		10	-150	0.00	378	420.0	0.565
		10	-10	0.00	378	426.0	0.585
		10	-15	-0.30	378	420.0	0.585
		10	-10	-0.30	378	420.0	0.565
	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	-20	1.00	332	368.9	0.690
	กำแพงกันคลื่น	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	0.00	377	420.0
อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา		10	0	1.20	360	377.8	0.605
อ.บางละมุง จ.ชลบุรี		3	0	0.00	426	427.4	0.565
ด.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี		1	0	1.00	406	406.0	0.560
		1	0	0.00	426	426.0	0.580
		1	0	-1.20	406	406.0	0.560
แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง		0.5	8.5	0.60	406	404.0	0.580
ทุ่งวิมาน จ.จันทบุรี	0.5	15	3.50	258	258.0	0.735	
กำแพงกันคลื่น	ด.บางพระ จ.ชลบุรี	10	100	3.10	334	334.4	0.650
	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	200	2.00	444	444.4	0.560
		10	100	2.20	444	444.4	0.650
	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	10	80	2.20	242	242.4	0.760
	อ.เมือง จ.ชลบุรี	5	100	2.10	461	461.2	0.535
		5	100	2.40	461	461.2	0.585
	แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง	15	60	3.00	477	476.8	0.525
ทุ่งวิมาน จ.จันทบุรี	15	60	4.00	504	503.9	0.520	
คลองระบายน้ำ	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	1.00	378	364.4	0.690
หอล้อเซ็นของโรงไฟฟ้า	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	0	0.00	446	495.6	0.520

บทที่ 5

การพัฒนาแบบจำลอง

การวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ ทำโดยการนำข้อมูลจากการเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างจริงที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลมาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระ ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ไปแล้วในบทที่ 3 และ 4 ซึ่งได้ใช้ข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองต่อไป

เนื่องจากการแพร่เป็นกลไกหลักของการเคลื่อนที่ ของคลอไรด์ภายในเนื้อของคอนกรีต หากตั้งสมมติฐานของการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ภายในเนื้อของคอนกรีตเป็นแบบทิศทางเดียว (One-dimension movement) ดังนั้นจากกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งแสดงดังสมการดังนี้

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial^2 x} \quad (5-1)$$

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)

หากกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการพิจารณา คือ

$$C_x = C_s, \quad x = 0, \quad t > 0$$

และเงื่อนไขเริ่มต้น คือ

$$C_x = 0, \quad x > 0, \quad t = 0$$

จะได้คำตอบของสมการที่ (5-1) ซึ่งแสดงในสมการที่ (5-2) ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

$$C_d = \frac{(C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_0}{B} \times 100 \quad (5-2)$$

โดยที่	C_d	คือ	ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
	C_s	คือ	ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (กก./ม ³)
	c	คือ	ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม.)
	D_a	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม. ² /ปี)
	t	คือ	อายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปี)
	B	คือ	น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กก./ม. ³)

5.1 การพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์

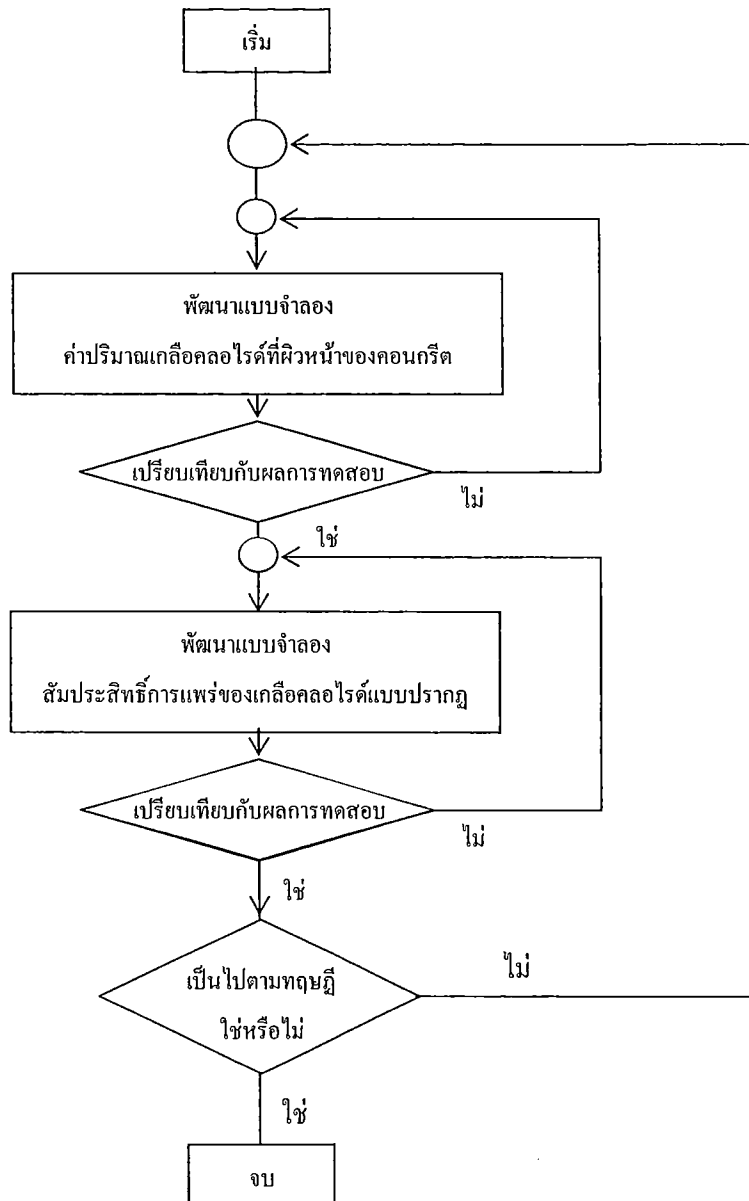
การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ สามารถทำนายโดยใช้คำตอบของสมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ นั้น ซึ่งต้องทราบถึงค่าของตัวแปรต่างๆ ดังที่แสดงไว้ดังสมการที่ 5-2 ซึ่งตัวแปรที่สำคัญในการใช้คำตอบของสมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ ในการทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

โดยจากงานวิจัยของ Song et al. (2008) พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์นั้นมีค่าขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ การบ่มคอนกรีต สภาพแวดล้อมที่โครงสร้างเผชิญ ความสูงจากระดับน้ำทะเล และปริมาณโพรงช่องว่างในคอนกรีต ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ และปริมาณโพรงช่องว่างในคอนกรีต แต่ในความเป็นจริงแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของคอนกรีตอีก เช่น อายุของโครงสร้าง สถานที่ตั้งของโครงสร้าง (โครงสร้างที่ตั้งห่างออกจากชายฝั่งทะเลและโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนแผ่นดิน) ทิศทางลม ตำแหน่ง

ความสูง ปริมาณความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในทะเล และความสูงของคลื่น เป็นต้น (ปรัชญา จุฬาลง และคณะ, 2551)

จากการศึกษาวิจัยต่างๆ จึงนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ในบริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยจากผลการทดสอบของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ได้จากการศึกษาในที่นี้พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด และประเภทสภาพแวดล้อมทะเลซึ่งแบ่งได้เป็นบนฝั่งและในทะเล ส่วนการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ และอัตราส่วนถ้ำลยต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ซึ่งการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตจะนำไปใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตต่อไป

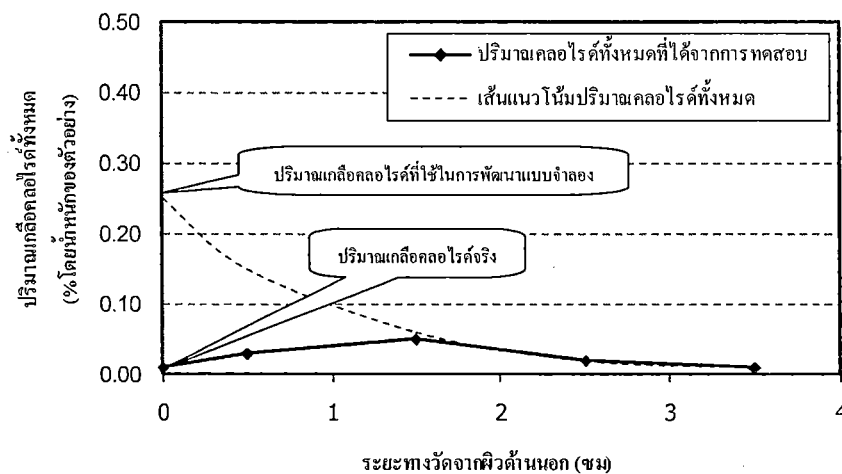
ซึ่งปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนั้นจะต้องเป็นค่าที่สอดคล้องกัน โดยมีแผนภาพโดยรวมแสดงการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้ในการทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาดังนี้



ภาพที่ 5-1 แผนภาพโดยรวมแสดงการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษา

5.2 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C₂)

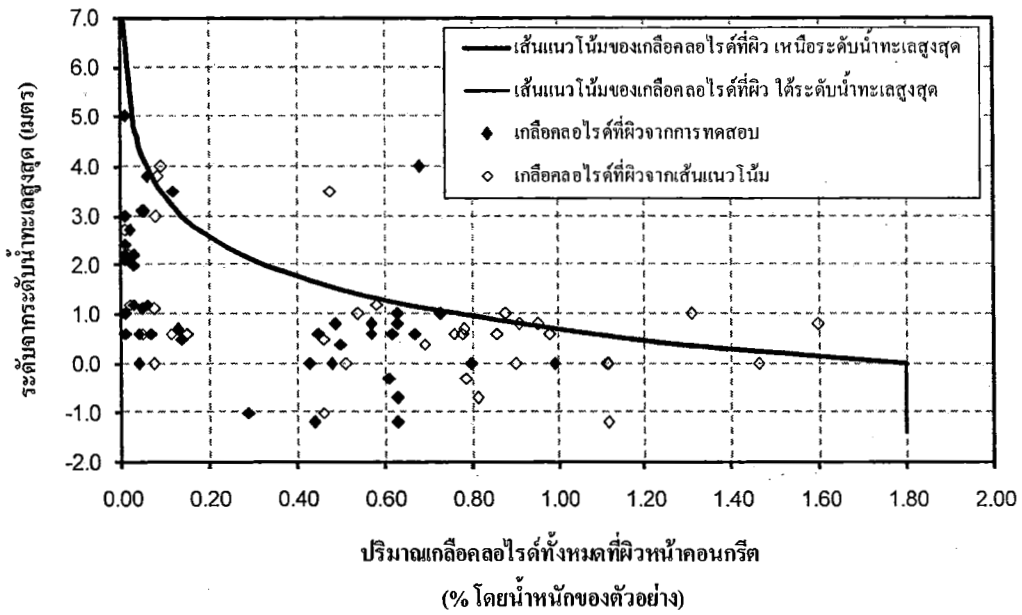
จากผลการทดลองปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตจากการสำรวจจริง พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดที่ผิวหน้าของคอนกรีตมีน้อยกว่าค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ ถัดเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีต ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่สำรวจได้จริงมาคำนวณหาปริมาณเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกภายในเนื้อของคอนกรีตได้ด้วยสมการ กฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากอาจมีการชะล้างของเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจาก น้ำทะเลและน้ำฝน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีตที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้ม ของการกระจายตัวปริมาณเกลือคลอไรด์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้าของคอนกรีตแทน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ปริมาณเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกภายในเนื้อคอนกรีตต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 5-2 ซึ่งในการพิจารณา ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของคอนกรีตนั้น จะใช้ วิธีแทนค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและ สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตในคำตอบของสมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ ซึ่งจะ ใช้วิธีผลรวมของผลต่างกำลังสองน้อยสุดในการเปรียบเทียบ โดยในการพิจารณานั้นจะไม่นำผลการทดสอบ ของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้า และค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ภายในเนื้อของคอนกรีตในชั้นถัดไปที่ไม่ เหมาะสมมาพิจารณา ซึ่งแสดงการหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตในภาคผนวก ข และจะได้ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงใน ตารางที่ 5-1



ภาพที่ 5-2 ตัวอย่างการหาค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต

ตารางที่ 5-1 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตและข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองที่ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างต่างๆ

ประเภทของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	สถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุ (ปี)	ระยะทางจากชายฝั่ง (เมตร)	ความสูง (เมตร)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)	ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง (C _i)
สะพาน	ทางเลี้ยวเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี	5	-200	3.80	0.690	0.086
		5	-100	1.10	0.690	0.086
		5	0	0.00	0.690	0.075
		5	0	-1.00	0.690	0.460
	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	5	-400	0.80	0.585	0.075
		3	-200	0.60	0.585	0.152
		3	0	0.60	0.585	0.114
	ทางเลี้ยวเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี (ใหม่)	1	-600	5.00	0.665	0.460
		1	-200	5.00	0.585	0.114
		1	0	1.00	0.665	0.010
	หมู่บ้านแหลมหนู จ.จันทบุรี	15	0	1.20	0.585	0.114
	อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี	1	-150	0.50	0.560	0.152
		1	-150	2.70	0.560	0.010
	สะพาน	ด.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	20	-240	0.80	0.525
20			-120	0.60	0.525	0.010
20			-15	0.60	0.525	0.152
ด.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี		15	-210	0.60	0.550	0.858
		15	-145	0.80	0.550	0.460
		15	0	0.60	0.690	0.114
ด.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี		10	-335	0.60	0.585	0.980
		10	-100	0.40	0.585	0.692
		10	-10	0.60	0.565	0.460
		10	-10	-0.30	0.565	0.789
		10	-10	-0.70	0.585	0.814
		10	-10	-1.20	0.585	0.460
อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา		10	-10	1.00	0.620	0.541
กำแพงกันคลื่น		อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	0.60	0.585
	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	0	1.20	0.605	0.114
	อ.บางละมุง จ.ชลบุรี	1	0	0.00	0.565	1.115
	ด.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี	1	0	5.00	0.690	0.114
		1	0	0.00	0.560	0.152
		1	0	-1.20	0.560	0.010
	แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง	0.5	8.5	0.50	0.560	0.152
คุ้มวิมาน จ.จันทบุรี	0.5	15	3.50	0.735	0.114	
เสาไฟฟ้า	ด.บางพระ จ.ชลบุรี	20	100	3.10	0.650	0.152
		10	200	2.00	0.550	0.010
	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	600	2.20	0.650	0.010
		10	80	2.20	0.760	0.010
	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	5	200	2.10	0.585	0.114
		5	500	2.00	0.550	0.010
	แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง	15	60	3.80	0.525	0.980
คุ้มวิมาน จ.จันทบุรี	15	30	4.00	0.520	0.094	
คลองระบายน้ำ	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	1.00	0.690	0.114
หอดูดาวเขื่อนโรงไฟฟ้า	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	0	0.60	0.520	0.460

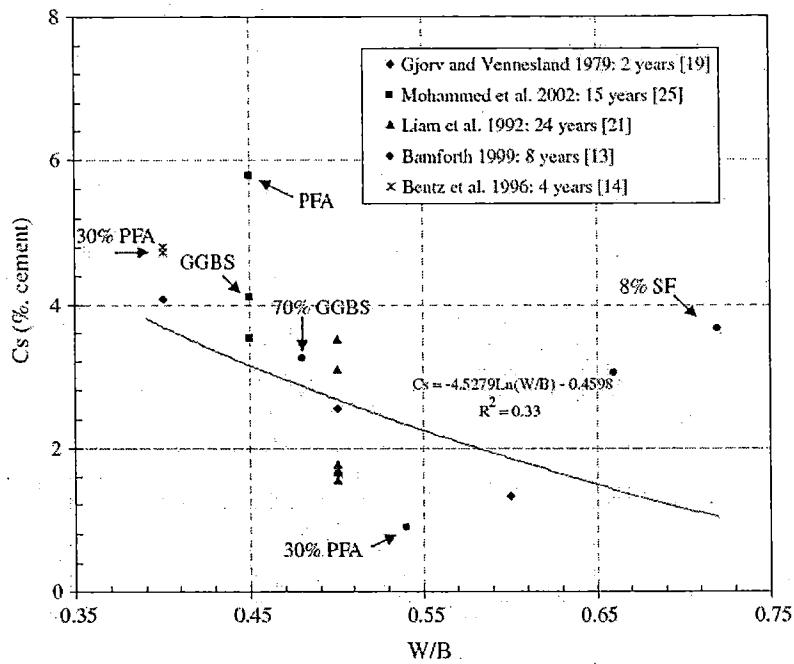


ภาพที่ 5-3 แนวโน้มปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดที่ผิวหน้าของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล
ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดต่างๆ

จากข้อมูลปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้ม พบว่า มีค่าที่แตกต่างกันไปตาม ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด และลักษณะสภาพแวดล้อมทะเลซึ่งแบ่งเป็น โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในทะเลและโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนแผ่นดิน

จากงานวิจัยของ Song et al. (2008) พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นแล้วปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างมีค่าลดลง ซึ่งมีสมการของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต แสดงดังภาพที่ 5-4 ขึ้นอยู่กับระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต โดยเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์มากขึ้นปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้น และขึ้นอยู่กับความสูงจากระดับน้ำทะเล โดยเมื่อความสูงจากระดับน้ำทะเลมากขึ้นปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตมีค่าลดลง

และจากแนวโน้มต่างๆ ดังกล่าวจึงนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ โดยในการพิจารณาจะคำนึงถึงผลของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้เป็นไปตามแนวโน้มเช่นเดียวกับข้อมูลและการศึกษาของนักวิจัยท่านอื่นๆ เป็นสำคัญ

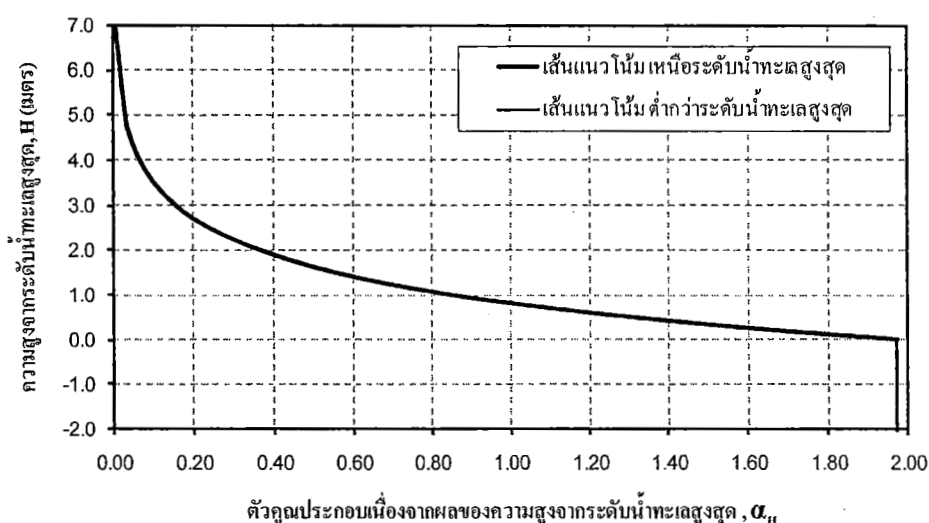


ภาพที่ 5-4 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตและแนวโน้มของปริมาณเกลือคลอไรด์ จากงานวิจัยของ Song et al. (2008)

ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตในโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์นั้น จะพิจารณาข้อมูลโดยการทดลองแทนค่าข้อมูลของปัจจัยต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาวิจัยในสมการทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่างๆ ให้มีปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่คำนวณได้จากสมการนั้นๆ ใกล้เคียงกับปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบในแต่ละตำแหน่งมากที่สุด โดยแบ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามลักษณะที่ตั้งของโครงสร้างเป็น 2 ลักษณะ คือ โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในทะเล และโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนแผ่นดิน ซึ่งโครงสร้างทั้ง 2 ลักษณะมีปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าแตกต่างกันมาก โดยมีรายละเอียดของการพัฒนาแบบจำลองดังนี้

1. โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในทะเล จะพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสมการที่พัฒนาขึ้นนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของโครงสร้าง, อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ โดยใช้สมการที่เสนอโดย Song et al. (2008) ดังแสดงในภาพที่ 5-4 ซึ่งเป็นสมการของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตในการพิจารณา และหารูปแบบของสมการที่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต และความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด ซึ่งปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล จะมีค่ามากที่สุดในช่วง สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง สภาวะละอองคลื่น และสภาวะบรรยากาศทะเล ตามลำดับ โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตเมื่อความ

สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดเปลี่ยนแปลงนั้น แสดงในผลการทดสอบข้างต้น ดังภาพที่ 5-3 โดยนำไปใช้ในการหาตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด โดยความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดเฉลี่ยของตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างทั้งหมด เท่ากับ 0.80 เมตร ซึ่งกำหนดให้ตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด เท่ากับ 1.00 ดังภาพที่ 5-5 ซึ่งพบว่าแนวโน้มของอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาของโครงสร้างของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ไม่เป็นไปตามทฤษฎี จึงจำเป็นต้องปรับรูปแบบของสมการใหม่จนกระทั่งได้สมการที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ได้ ซึ่งจะแสดงสมการต่อไป



ภาพที่ 5-5 ตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด

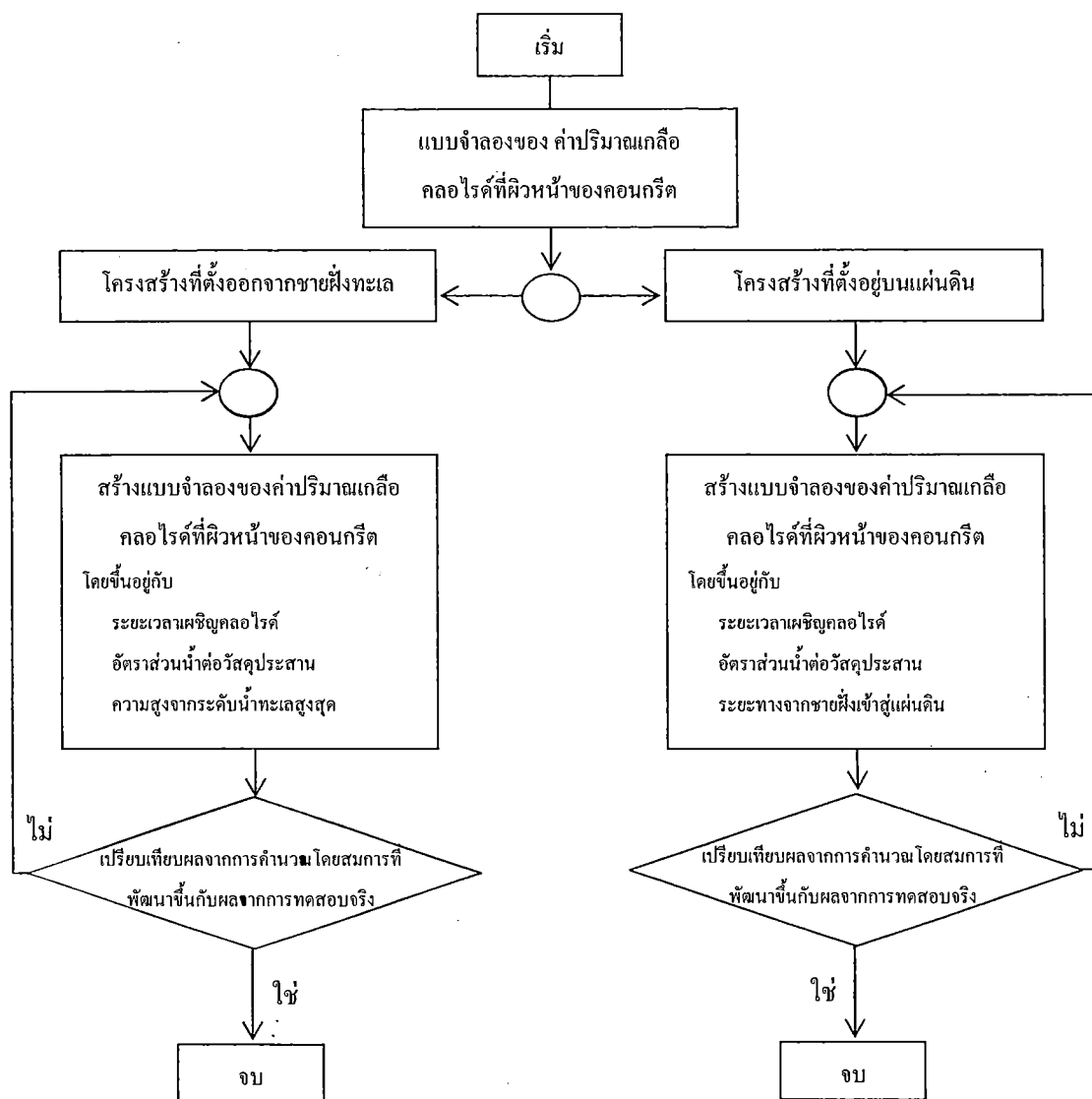
2. โครงสร้างที่ตั้งอยู่บนแผ่นดิน จะพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสมการที่พัฒนาขึ้นนี้ จะมีค่าขึ้นอยู่กับ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต และระยะทางจากชายฝั่งเข้าแผ่นดิน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ และใช้สมการที่เสนอโดย Song et al. ในการพัฒนาแบบจำลอง เช่นเดียวกับการพัฒนาแบบจำลองของปริมาณเกลือคลอไรด์ของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในทะเล และหารูปแบบของสมการที่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต และระยะทางจากชายฝั่งเข้าแผ่นดินที่เหมาะสม โดยระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดินนั้นจะใช้ข้อมูลตามมาตรฐาน JSCE (JSCE, 2000) เป็นข้อมูลที่นำมาใช้ในการพัฒนาสมการ โดยจากมาตรฐาน JSCE ได้กำหนดให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนแผ่นดินจะมีค่าลดลง เมื่อมีระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดินมากขึ้น และมีค่าคงที่เมื่อโครงสร้างนั้นๆ ตั้งอยู่ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง โดยมีปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต ตามมาตรฐาน JSCE ดังแสดง

ในตารางที่ 5-2 ซึ่งเมื่อนำสมการนี้ไปใช้ พบว่าแนวโน้มอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาของโครงสร้างของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ไม่เป็นไปตามทฤษฎี จึงจำเป็นต้องปรับรูปแบบของสมการใหม่จนกระทั่งได้สมการที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ได้ ซึ่งจะแสดงสมการต่อไป

ตารางที่ 5-2 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (กก./ม³)

บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง	ทิศทางฝั่ง	ระยะทางจากชายฝั่ง (เมตร)			
		100	250	500	1,000
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

จากนั้นเมื่อนำปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น มาใช้ในการคำนวณเพื่อทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ที่อัตราส่วนผสมของคอนกรีตต่างๆ จากการคำนวณโดยใช้สมการต้องทำให้อายุการใช้งานที่คำนวณได้นั้นมีแนวโน้มที่เป็นไปตามทฤษฎี ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นต้องทำการปรับแก้สมการดังกล่าวใหม่ ไปจนกระทั่งได้สมการคำตอบของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตที่เหมาะสม ซึ่งสามารถสรุปเป็นแผนภาพขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต ดังภาพที่ 5-6



ภาพที่ 5-6 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

จากการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์นั้น ผู้วิจัยได้เสนอสมการเบื้องต้นเพื่อใช้ประมาณปริมาณเกลือ คลอไรด์ที่ผิวของคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ในโครงสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยแบ่งตามลักษณะที่ตั้งของโครงสร้างเป็น 2 ลักษณะ คือ โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในทะเล และ โครงสร้างที่ตั้งอยู่บนแผ่นดิน ซึ่งแสดงดังสมการที่ 5-3 และ 5-4 ดังนี้

สำหรับโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในทะเล

$$C_s = [(-0.5 \times (W/B)) + 1.5] \times 0.12t^{0.72} \times \alpha_H \quad (5-3)$$

สำหรับโครงสร้างที่ตั้งบนแผ่นดิน

$$C_s = [(-0.5 \times (W/B)) + 1.5] \times 0.08e^{0.05} \times (e^{-0.01d} + 0.153) \quad (5-4)$$

โดยที่

W/B คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

d คือ ระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน (เมตร)

โดยเริ่มวัดจากตำแหน่งที่ไม่ได้รับผลกระทบจากคลื่นทะเล

α_H คือ ตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด
เมื่อ ตำแหน่งอยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเลสูงสุด เป็นระยะ H (เมตร)

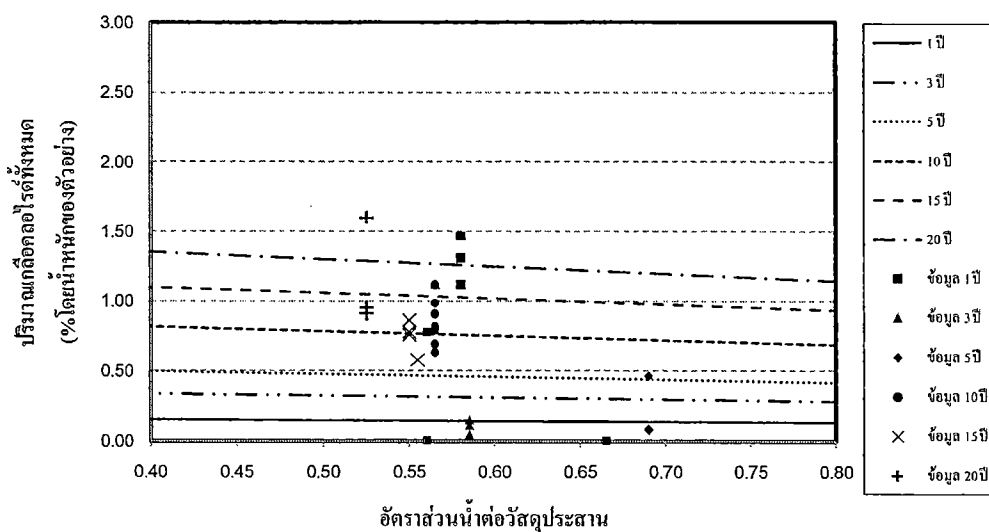
$$\alpha_H = 1.973e^{-0.85H}, \quad 0 \leq H \leq 5 \quad (5-5)$$

เมื่อ ตำแหน่งอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลสูงสุด เป็นระยะ H (เมตร)

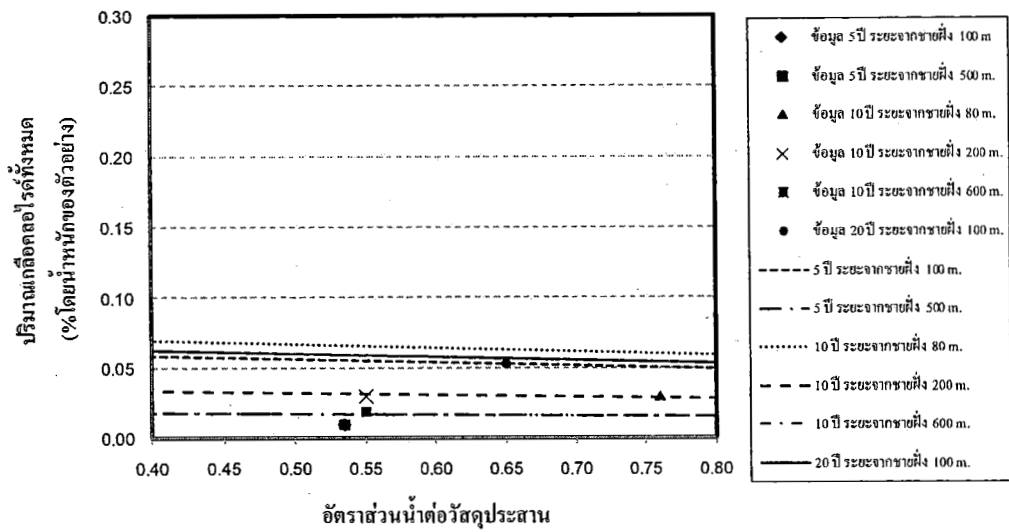
$$\alpha_H = 1.973, \quad H < 0, H \geq -2 \quad (5-6)$$

จากนั้นตรวจสอบความต่อเนื่องของสมการสำหรับ โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในทะเลและ โครงสร้างที่ตั้งบนแผ่นดินในตำแหน่งที่มีระยะทางจากชายฝั่ง 0 ม. ซึ่งการเก็บตัวอย่างคอนกรีตของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนแผ่นดินนั้นจะมีความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดเฉลี่ย เท่ากับ 2.65 ม. ซึ่งเมื่อใช้สมการทั้งสองในการคำนวณเปรียบเทียบจะใช้ความสูงเฉลี่ยนี้แทนในสมการสำหรับ โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในทะเล พบว่า ในช่วงระยะเวลาเผชิญกับคลอไรด์ไม่มาก (ประมาณ 1 ปี) จะมีความแตกต่างของค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่คำนวณได้จากสมการทั้งสองไม่มาก แต่เมื่อระยะเวลาเผชิญกับคลอไรด์มากขึ้นก็จะทำให้มีความแตกต่างของค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่คำนวณได้จากสมการทั้งสองมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นที่เป็นเช่นนี้เพราะ โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในทะเลนั้นจะมีสภาพแวดล้อมคลอไรด์รุนแรงมากกว่าซึ่งเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์มากขึ้น ก็จะมีการสะสมของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตมากขึ้น จากผลของการตรวจสอบความต่อเนื่องของสมการทั้งสองจะสามารถนำสมการที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้งานได้ต่อไป

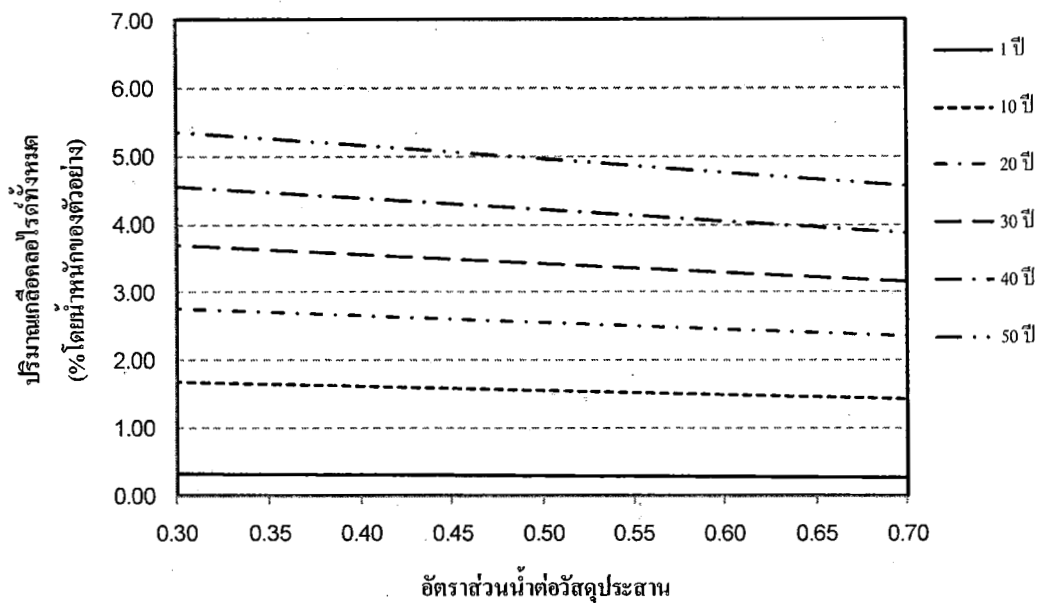
จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด และระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้นกับปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบจริง ดังภาพที่ 5-7 และ 5-8 พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ได้จากการสำรวจมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการการคำนวณ และเมื่อนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้นี้ ใช้ในการทำนายปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเมื่อมีอายุการใช้งานต่างๆ แสดงดังภาพที่ 5-9 และ 5-10



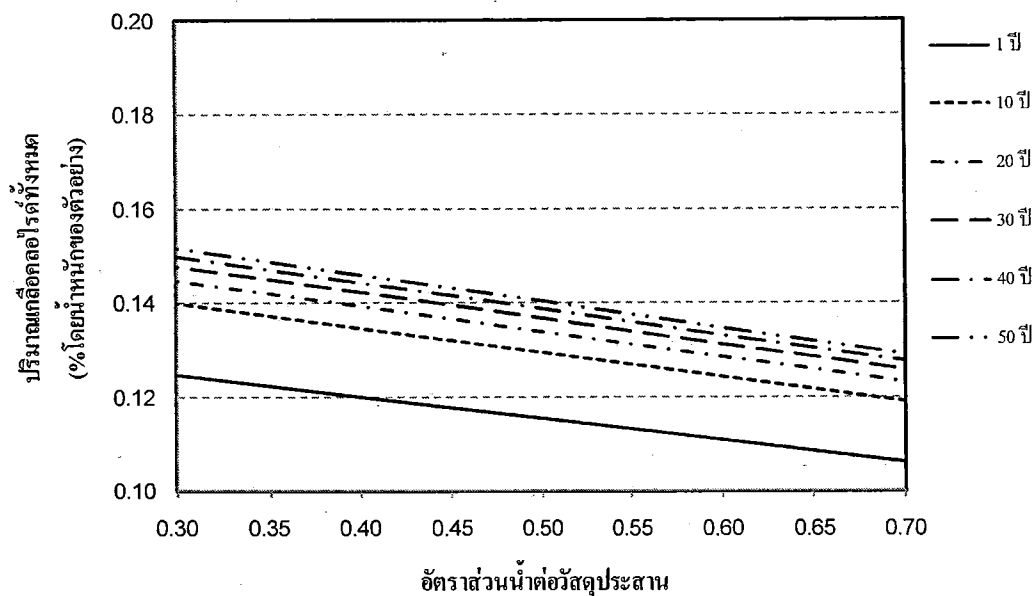
ภาพที่ 5-7 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการสำรวจเทียบกับ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณของ โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในทะเล



ภาพที่ 5-8 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการสำรวจเทียบกับ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณของ โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่บนแผ่นดิน



ภาพที่ 5-9 ตัวอย่างปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณที่ระยะเวลา เชนิคลอไรด์ต่างๆ ของ โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในทะเล ในตำแหน่งระดับน้ำทะเลสูงสุด



ภาพที่ 5-10 ตัวอย่างปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่างๆของโครงสร้างต่างๆที่ตั้งอยู่บนแผ่นดินที่ระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน 100 เมตร

ทั้งนี้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีกดังที่กล่าวข้างต้น เช่น ความสูงจากระดับน้ำทะเล ระยะทางจากชายฝั่งทะเล ชนิดของวัสดุประสาน ลักษณะสภาพแวดล้อม เป็นต้น (Song et al., 2008) ซึ่งต้องมีการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ในเชิงลึกอีกต่อไปในอนาคต

5.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีต (D_a)

จากการทดสอบในที่นี้ เป็นการเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ที่มีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์แตกต่างกัน และเป็นการยากที่จะทำให้เราสามารถทราบถึงอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้งาน โครงสร้างนั้นได้ ดังนั้น ในที่นี้จะกำหนดให้คอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างในแต่ละแห่งที่เก็บตัวอย่างนั้นใช้ซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน

สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน

ในการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ภายในเนื้อของคอนกรีตนั้นสามารถหาได้จากสมการกฎข้อที่ 2 ของฟิคส์ ซึ่งเป็นการคำนวณหาค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกต่างๆ ในคอนกรีต (Chloride penetration profile) โดยนำปริมาณเกลือคลอไรด์ที่คำนวณได้ในแต่ละระดับความลึกมา

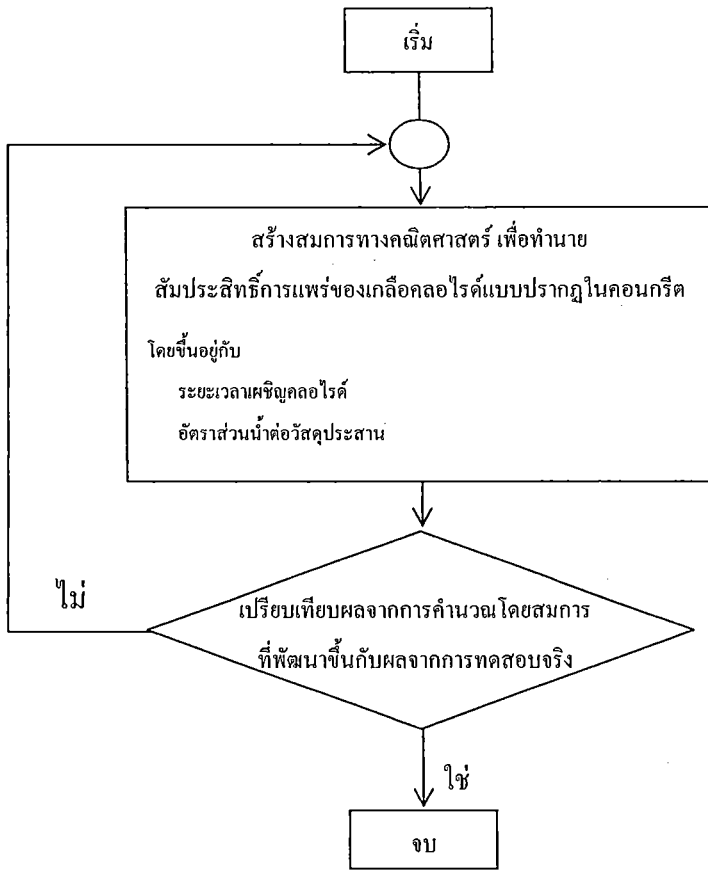
เปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่วัดได้จริงจากการเจาะเอาตัวอย่างมาทดสอบ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีตนั้น ทำโดยเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏ (Apparent chloride diffusion coefficient, D_a) ที่ใช้ในการคำนวณจนกระทั่งปริมาณเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกในคอนกรีตที่คำนวณได้ มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณเกลือคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตที่วัดได้จริง โดยในการคำนวณนั้นจะใช้ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจากสมการที่พัฒนาขึ้นซึ่งได้กล่าวไปข้างต้น และทำให้ทราบสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีตที่มีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ ซึ่งแสดงข้อมูลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในภาคผนวก ค ซึ่งสรุปสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีต (D_a) ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองในตำแหน่งต่างๆ ดังตารางที่ 5-3 ทั้งนี้ D_a เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีต กล่าวคือการแพร่ของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ ของคอนกรีต มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ผ่านมา (Time-dependent)

ตารางที่ 5-3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีต (D_a) ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองที่ตำแหน่งต่างๆ

ประเภทของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	สถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุ (ปี)	ระยะทางจากชายฝั่ง (เมตร)	ความสูง (เมตร)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีต (D_a)
สะพาน	ทางเลียงเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี	5	-200	3.80	0.690	-
		5	-100	1.10	0.690	0.35
		5	0	0.00	0.690	0.40
		5	0	-1.00	0.690	0.50
	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	3	-400	0.80	0.585	0.35
		5	-100	0.60	0.585	0.70
		3	0	0.60	0.585	0.70
	ทางเลียงเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี (ใหม่)	1	-600	5.00	0.665	-
		1	-200	5.00	0.665	-
		1	0	1.00	0.665	0.40
	หมู่บ้านแหลมหนู จ.จันทบุรี	15	0	1.20	0.555	-
	อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี	1	-150	0.80	0.560	0.40
		1	-100	2.70	0.560	5.00
สะพาน	ต.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	20	-240	0.80	0.525	0.30
		20	-120	0.80	0.585	0.70
		20	-15	0.80	0.585	0.30
	ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	15	-210	0.60	0.550	0.35
		15	-145	0.80	0.550	0.40
		15	0	0.60	0.550	0.35
	ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	-335	0.80	0.565	0.30
		10	-100	0.60	0.585	0.35
		10	-10	0.00	0.665	0.25
		10	-10	-0.30	0.585	0.25
		10	-10	-0.70	0.585	0.25
		10	-10	-1.20	0.585	0.25
	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	-20	1.00	0.690	0.35
กำแพงกันคลื่น	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	0.20	0.585	0.70
	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	0	1.20	0.605	0.35
	อ.บางละมุง จ.ชลบุรี	3	0	0.20	0.585	0.25
	ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี	1	0	1.00	0.580	5.00
		1	0	0.00	0.580	0.25
		1	0	-1.20	0.580	5.00
	แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง	0.5	8.5	0.50	0.565	3.00
คุ้มวิมาน จ.จันทบุรี	0.5	15	3.50	0.735	5.00	
เสาไฟฟ้า	ต.บางพระ จ.ชลบุรี	20	100	1.50	0.690	-
		10	200	1.80	0.550	0.35
	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	600	1.60	0.550	0.60
		10	80	1.60	0.550	0.60
	อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	5	100	1.70	0.535	0.40
		5	600	1.70	0.585	0.60
	แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง	15	60	3.00	0.525	0.15
คุ้มวิมาน จ.จันทบุรี	15	30	4.00	0.550	0.35	
คลองระบายน้ำ	อ.เมือง จ.ชลบุรี	10	0	1.60	0.690	0.35
หอหล่อเย็นของโรงไฟฟ้า	อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา	10	0	3.00	0.525	0.60

ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกล็ดคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีตของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลนั้นจะพิจารณาข้อมูล โดยการทดลองแทนค่าข้อมูลของปัจจัยต่างๆที่ได้จากการสำรวจ ในสมการทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่างๆ ให้มีสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกล็ดคลอไรด์ที่คำนวณได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับ สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกล็ดคลอไรด์ในคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบในแต่ละตำแหน่งมากที่สุด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของโครงสร้าง และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และคำตอบที่คำนวณได้จากสมการที่พัฒนาขึ้นนั้นต้องมีแนวโน้มเช่นเดียวกับคำตอบที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกล็ดคลอไรด์จากมาตรฐาน JSCE

เมื่อนำสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกล็ดคลอไรด์ในคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ที่อัตราส่วนผสมของคอนกรีตต่างๆ ต้องทำให้อายุการใช้งานที่คำนวณได้นั้นมีแนวโน้มที่เป็นไปตามทฤษฎี ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นต้องทำการปรับแก้สมการ ไปจนกระทั่งได้สมการคำตอบของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกล็ดคลอไรด์ในคอนกรีตที่เหมาะสม ที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ได้ ซึ่งสามารถสรุปเป็นแผนภาพขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกล็ดคลอไรด์ในคอนกรีต ดังภาพที่ 5-11



ภาพที่ 5-11 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีตของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

จากข้อมูลทั้งหมดสามารถหาสมการความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสานกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และเวลาต่างๆ ดังสมการที่ 5-7

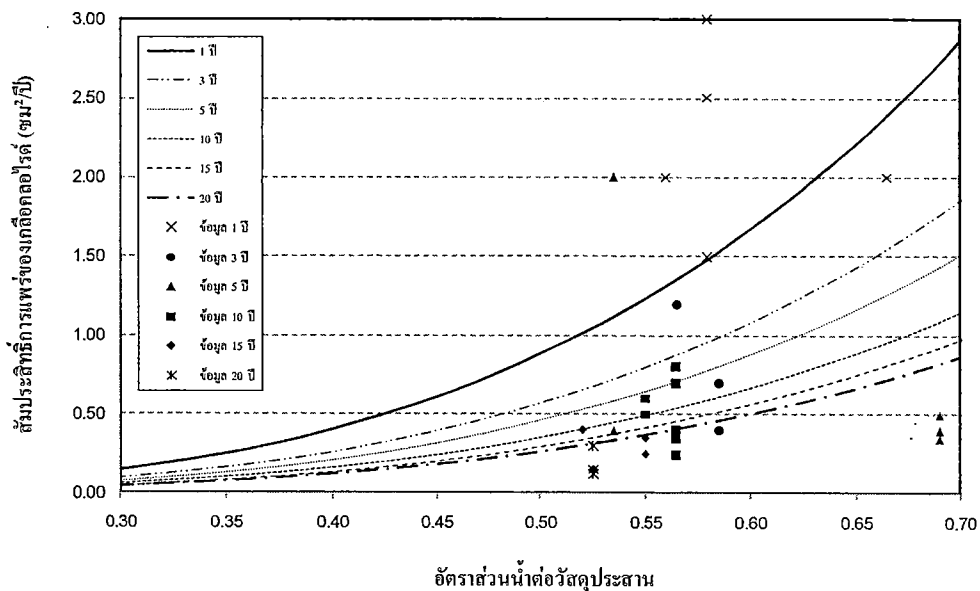
$$D_a = (W / B)^{3.5} \times 10 \left(\frac{1}{t} \right)^{0.40} \quad (5-7)$$

โดยที่

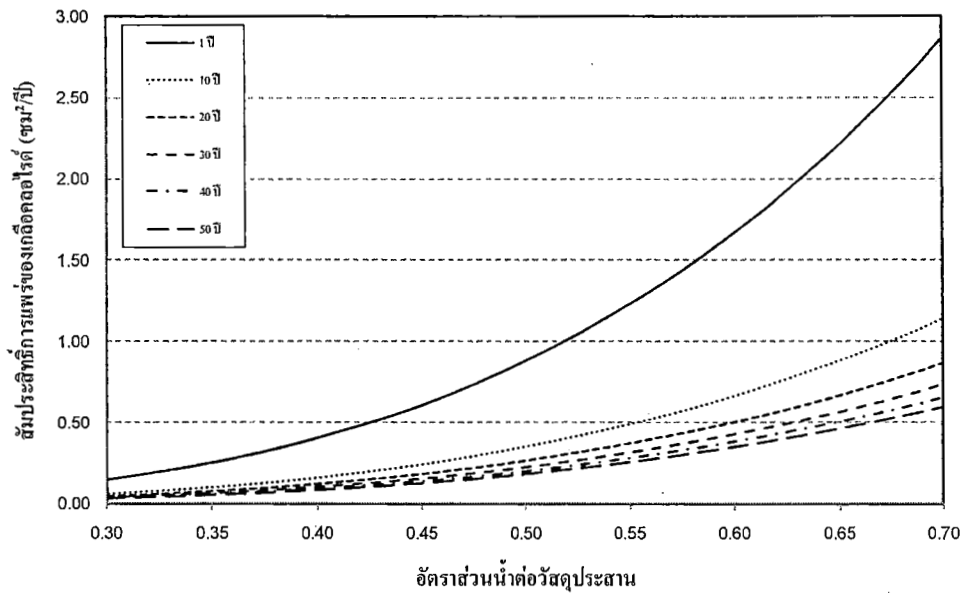
W/B คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่คำนวณได้จากสมการที่พัฒนาขึ้น กับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ จนกระทั่งปริมาณเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกในคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่วัด ได้จริงในการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในขั้นต้น ดังแสดงในภาพที่ 5-12 พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏมีความแตกต่างกันอยู่พอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ยังมีไม่มากนัก ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาและเก็บข้อมูลต่างๆ ให้มากขึ้นต่อไปในอนาคต เพื่อพัฒนาสมการให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกัน จึงสามารถนำสมการนี้ไปใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอายุการใช้งานของโครงสร้างต่างๆ ได้ดังแสดงในภาพที่ 5-13



ภาพที่ 5-12 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่หาได้เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 5-13 ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น ของโครงสร้างที่มีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่างๆ

สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์และเถ้าลอย เป็นวัสดุประสาน

จากข้อมูลการศึกษาของนักวิจัยอื่น ได้นำค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกต่างๆ ในคอนกรีต (Chloride penetration profile) ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ และอัตราส่วนการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่างๆ มาศึกษาหาสมการความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม โดยการหาตัวคูณประกอบ เนื่องจากผลของเถ้าลอยคูณร่วมกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน

ในการหาตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของเถ้าลอยนั้นทำโดยการหาค่าคงที่ คูณกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน จนกระทั่งปริมาณเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกในคอนกรีตที่คำนวณได้ มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณเกลือคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตที่ทดสอบได้จริง โดยในการคำนวณนั้นจะใช้ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจากสมการที่พัฒนาขึ้นซึ่งได้กล่าวไปข้างต้น ซึ่งค่าคงที่ที่ได้จะเป็นตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของเถ้าลอยของแต่ละตัวอย่าง โดยจะแสดงรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ง จากข้อมูลต่างๆ จะทำให้ทราบค่าตัวคูณประกอบเนื่องจากผลกระทบจากเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ เวลานั้นจากเริ่มเผชิญคลอไรด์ ซึ่งจะนำไปใช้ใน

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีตที่มีเกลือแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อไป

จากข้อมูลทั้งหมดสามารถหาสมการความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือแบบปรากฏในคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์และเกลือเป็นวัสดุประสาน ดังสมการที่ 5-8 และค่าตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของเกลือนั้นจะมีค่าที่ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนเกลือต่อวัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งแสดงตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของเกลือของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเกลือต่อวัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ ของคอนกรีตอายุ 1 ปี ดังภาพที่ 5-14

$$D_a = \left[(W / B)^{3.5} \times 10 \left(\frac{1}{t} \right)^{0.40} \right] \times \alpha_f \quad (5-8)$$

โดยที่

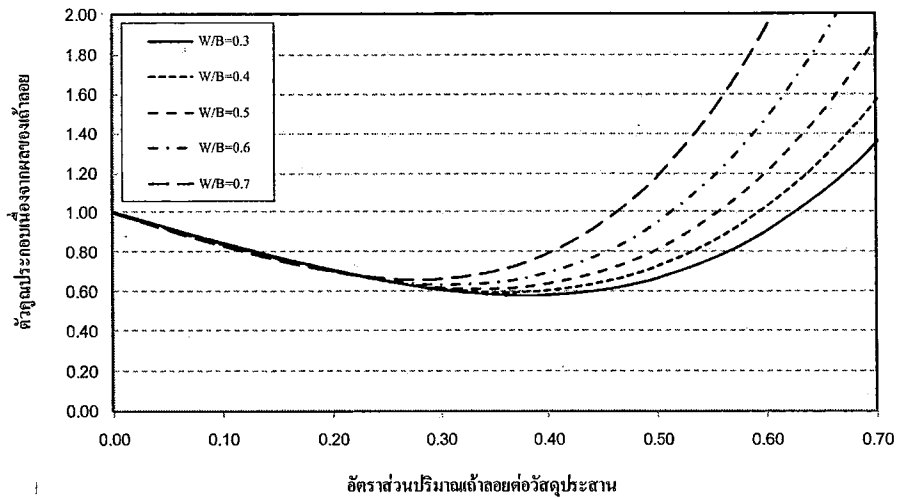
W/B คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

f/b คือ อัตราส่วนปริมาณเกลือต่อวัสดุประสาน

t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

α_f คือ ตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของเกลือ

$$\alpha_f = \left\{ \left[3.5 \times \left(\frac{1}{1 - (W/B)} \right) \times (f/b)^{3.5} \right] - \left[1.5 \times \left(\frac{1}{1 - (W/B)} \right)^{0.10} \times (f/b) \right] + 1 \right\} \times \left[\frac{1}{t} \left[\left(\frac{-3}{e^{((f/b) \times 3)}} \right) \times (f/b) \right] \right] \quad (5-9)$$

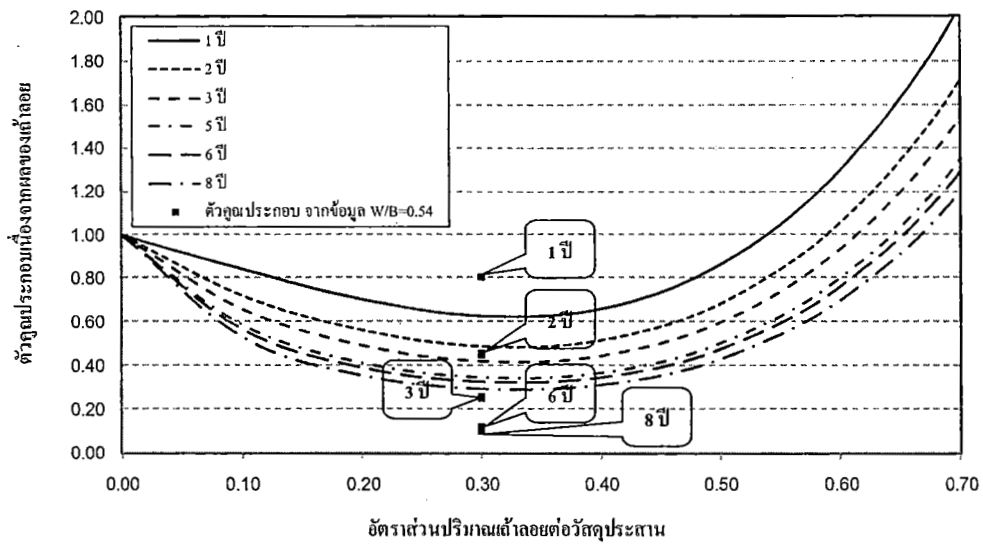


ภาพที่ 5-14 ตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของน้ำต่อของคอนกรีตอายุ 1 ปี ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

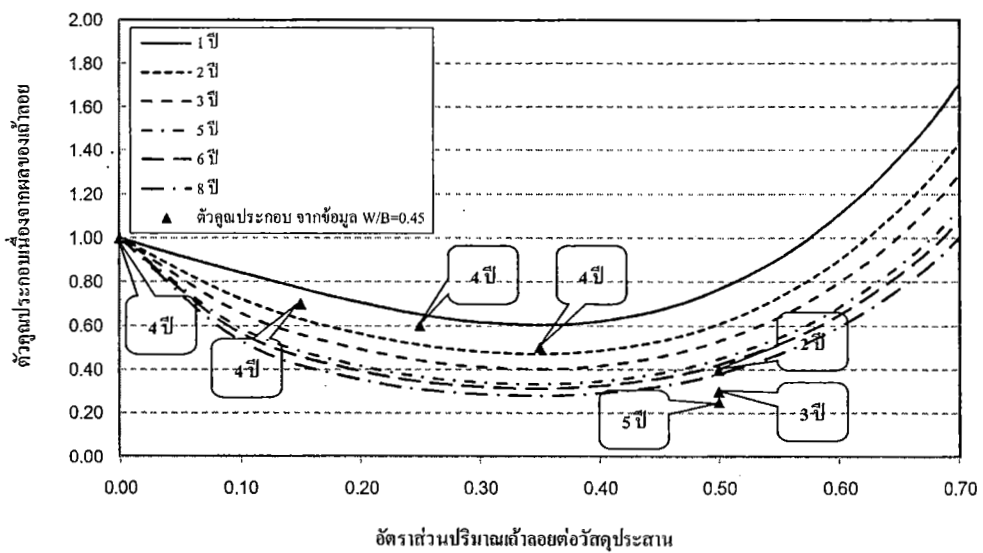
เมื่อเปรียบเทียบตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของน้ำต่อที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้นและตัวคูณประกอบที่ได้จากการแทนที่ค่าคงที่ดังกล่าวข้างต้น ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และเวลานับจากเริ่มเผชิญคลอไรด์ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 5-15 และ 5-16 พบว่า มีค่าที่แตกต่างกันพอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาสมการนั้นยังมีไม่มากนัก ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาให้มากขึ้นต่อไปในอนาคต เพื่อพัฒนาสมการให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสมการที่พัฒนาขึ้นนี้มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกัน จึงสามารถนำสมการนี้ไปใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญ คลอไรด์ของโครงสร้างต่างๆ ได้

หมายเหตุ

ในการพัฒนาแบบจำลองของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีต ได้จากการเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างที่มีระยะเวลาเผชิญกับคลอไรด์ต่างๆกัน ซึ่งจะไม่ใช่อายุการใช้งานที่ปลดการบำรุงรักษาของ โครงสร้าง แต่ในการพัฒนาแบบจำลองได้นี้ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นี้มาใช้ในการพิจารณา ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้งาน จะกำหนดให้ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นี้ก็คือ อายุการใช้งานที่ปลดการบำรุงรักษาของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5-15 เปรียบเทียบตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของเถ้าลอยที่ได้จากการคำนวณ และข้อมูลจากการทดสอบ ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.54 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่างๆ



ภาพที่ 5-16 เปรียบเทียบตัวคูณประกอบเนื่องจากผลของเถ้าลอยที่ได้จากการคำนวณ และข้อมูลจากการทดสอบ ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่างๆ

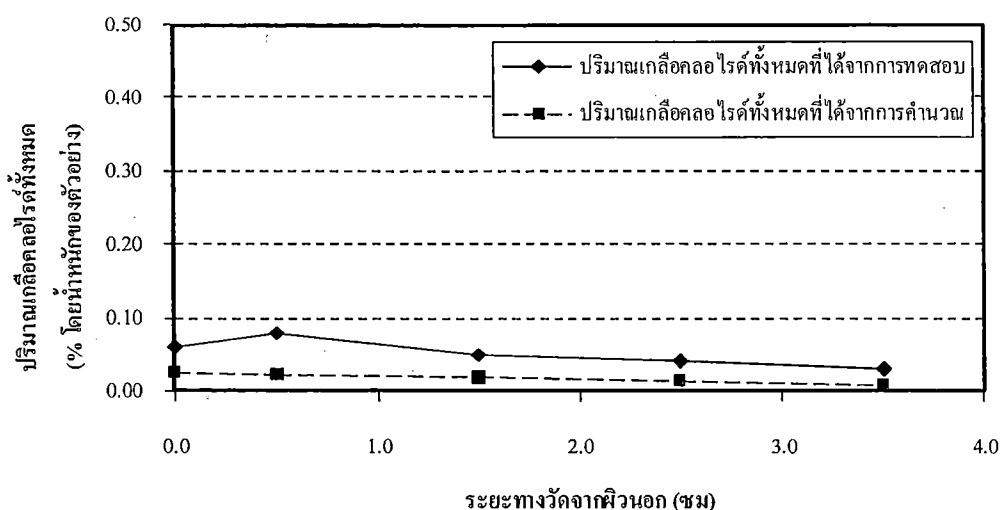
บทที่ 6

การตรวจสอบแบบจำลอง

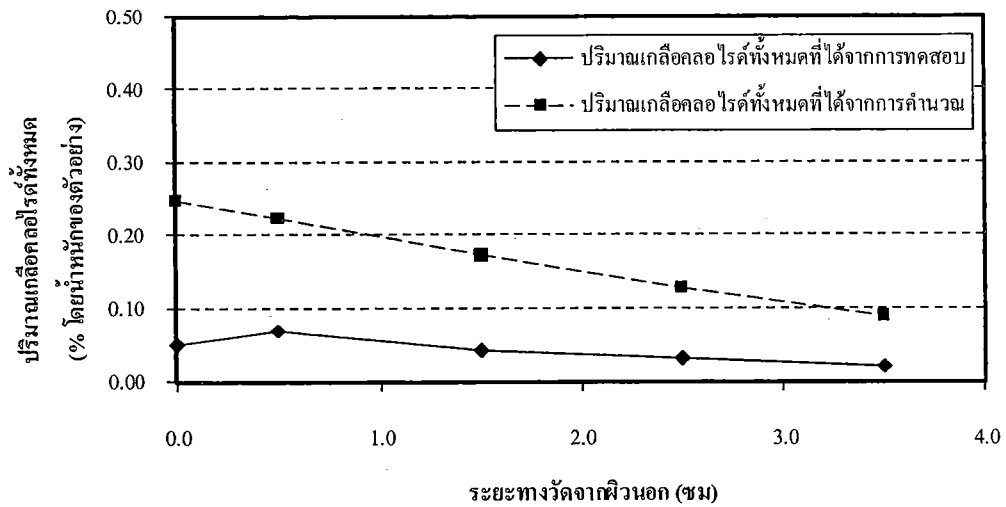
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นนั้น ทำการตรวจสอบโดยการนำข้อมูลการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าที่ได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น โดยจะทำการเปรียบเทียบจากข้อมูลที่ได้จากการสำรวจจริง และจากข้อมูลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่นๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

6.1 การตรวจสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดสอบจากการสำรวจจริง

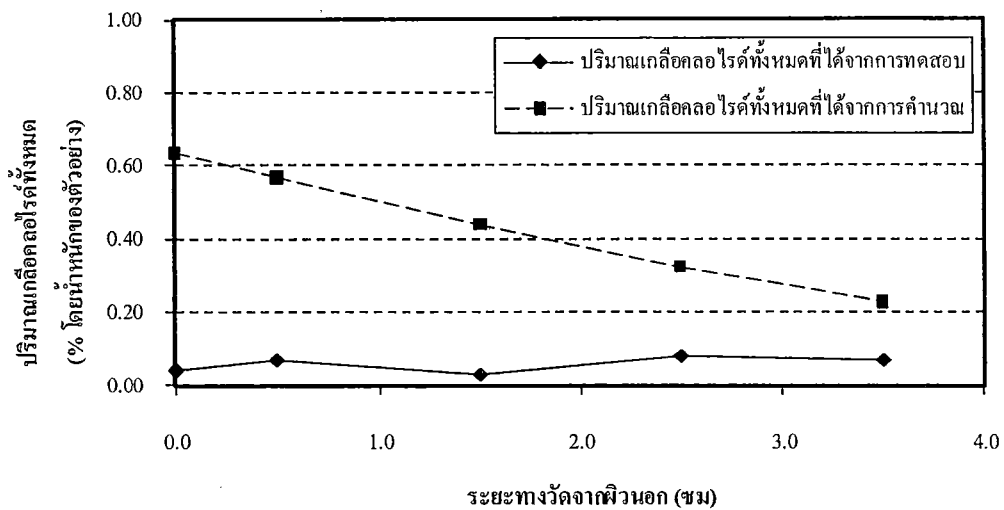
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น กระทำโดยการเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลจากการสำรวจจริง กับการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าที่คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งได้กล่าวไปข้างต้น โดยผลของการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 6-1 ถึง 6-44



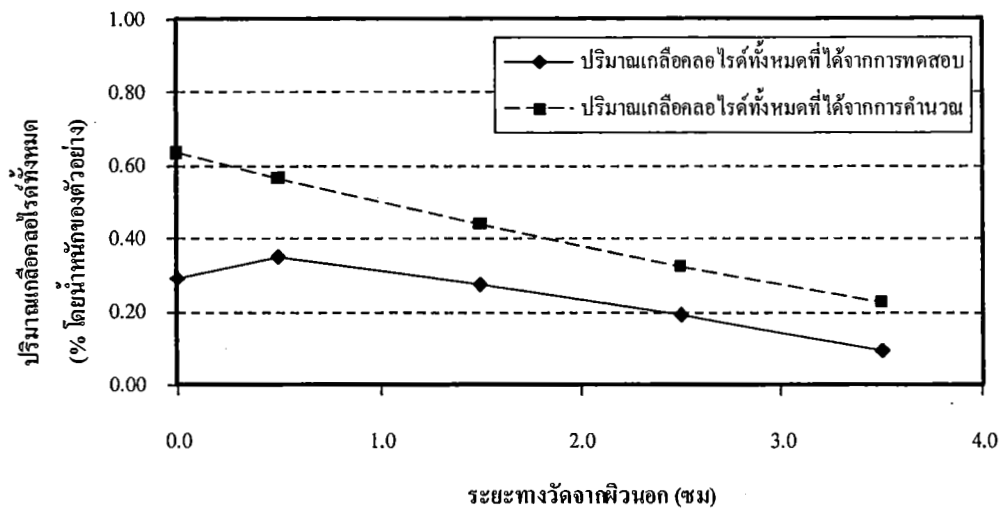
ภาพที่ 6-1 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 5 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -200 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 3.80 ม. บริเวณ ทางเลี้ยวเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี



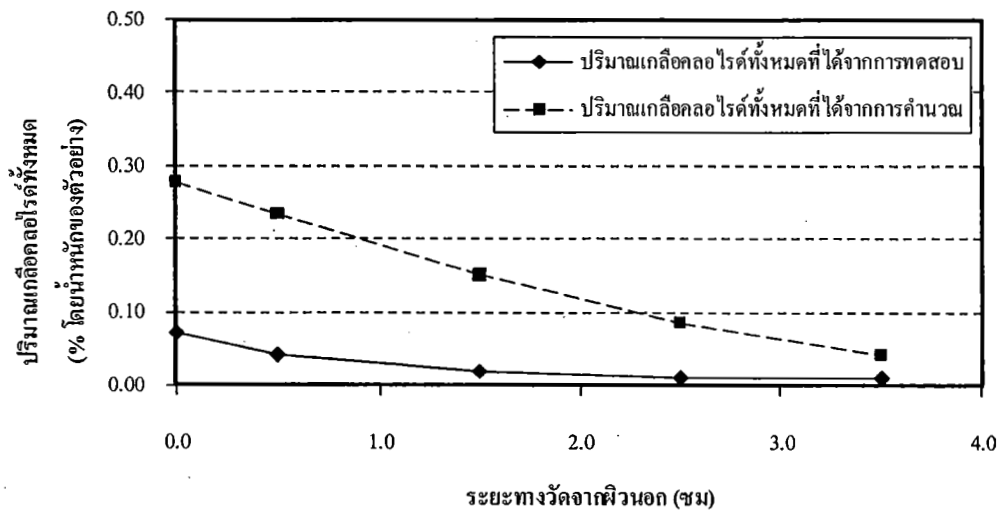
ภาพที่ 6-2 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 5 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -100 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.10 ม. บริเวณ ทางเลี้ยวเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี



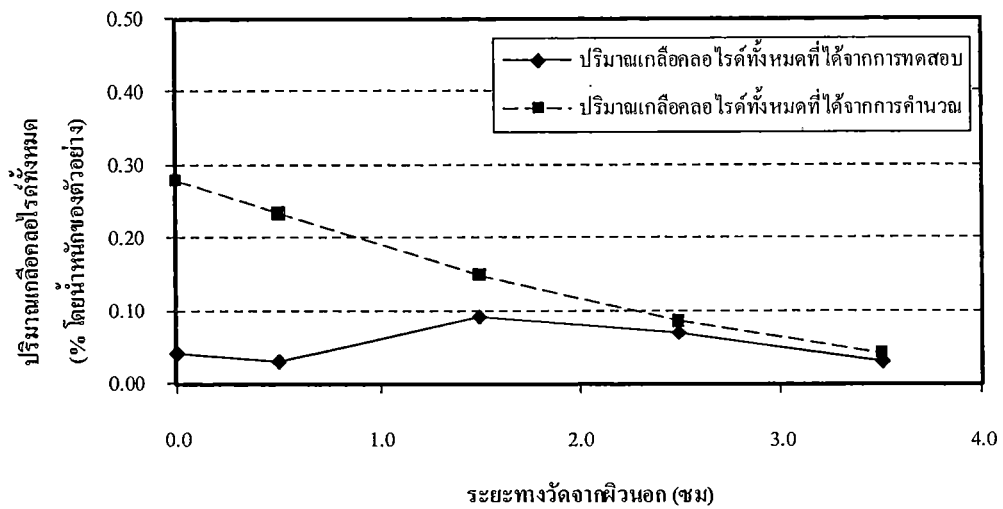
ภาพที่ 6-3 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 5 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0.0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.0 ม. บริเวณ ทางเลี้ยวเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี



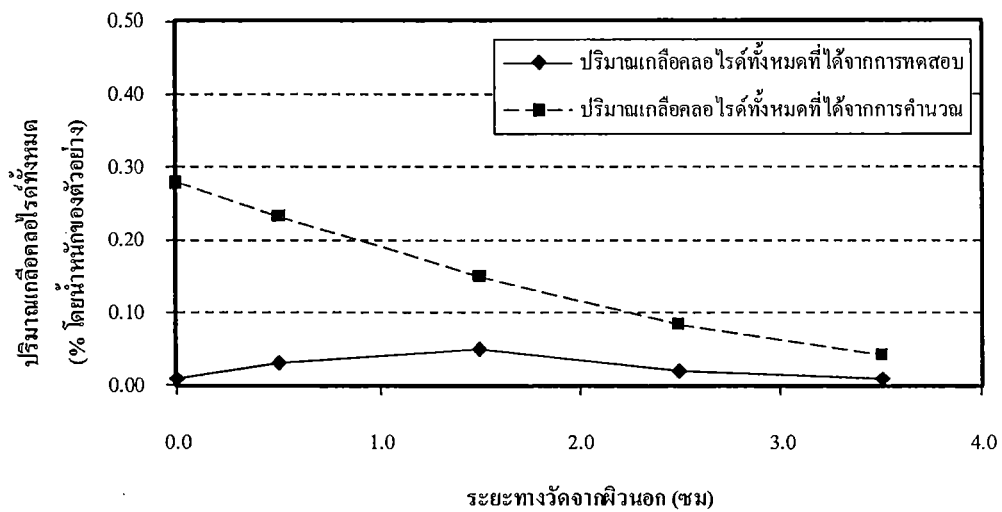
ภาพที่ 6-4 ปริมาณแก๊สพิษทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 5 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0.0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด -1.00 ม. บริเวณ ทางเลี้ยวเมือง อ.เมือง จ.ชลบุรี



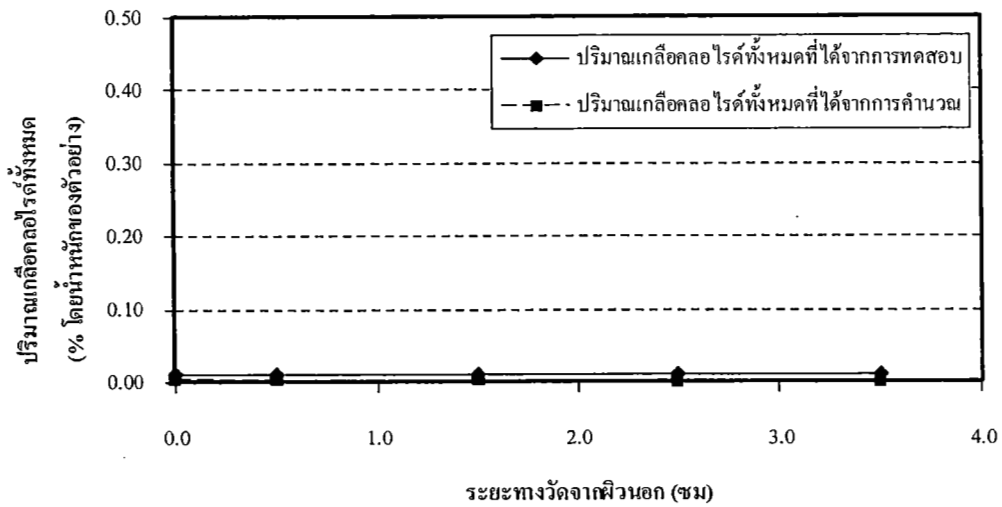
ภาพที่ 6-5 ปริมาณแก๊สพิษทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 3 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -400 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.60 ม. บริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



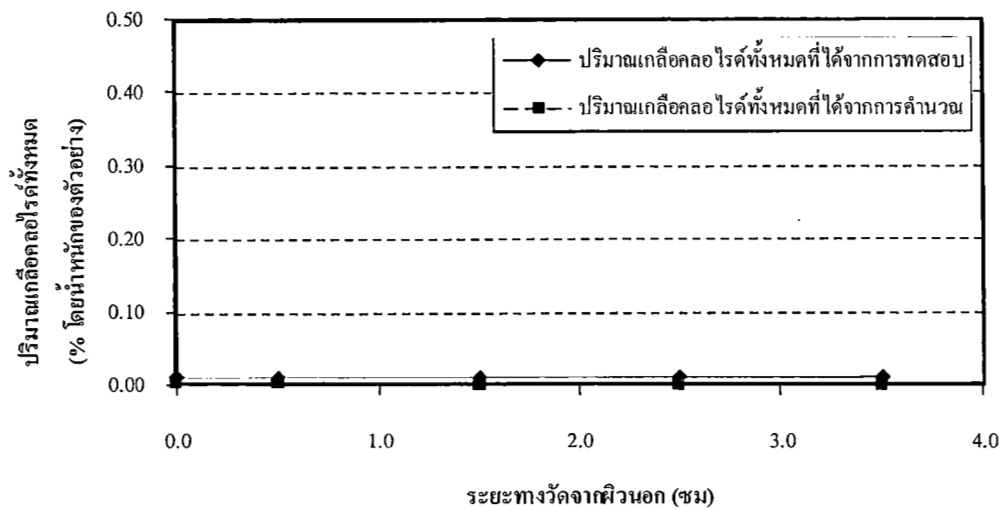
ภาพที่ 6-6 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 3 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -200 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.60 ม. บริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



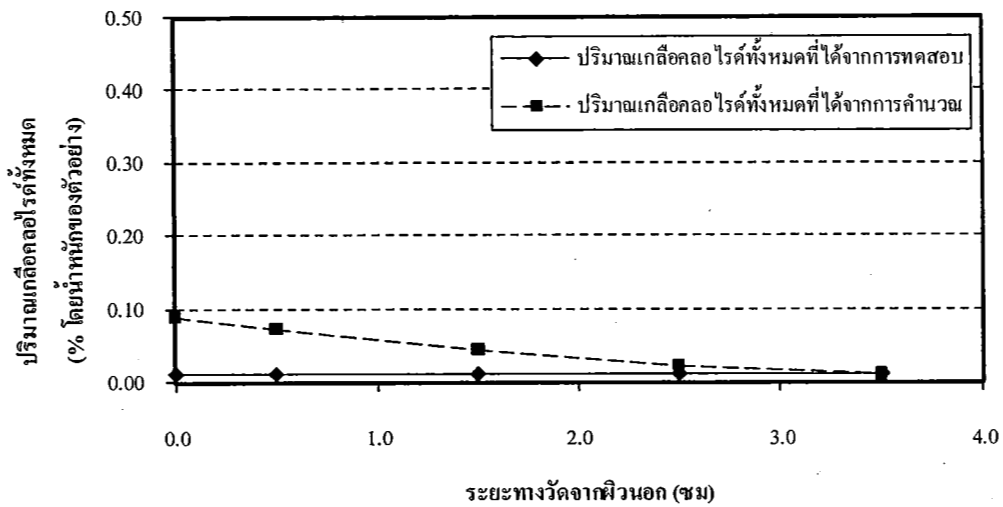
ภาพที่ 6-7 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 3 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0.0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.60 ม. บริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



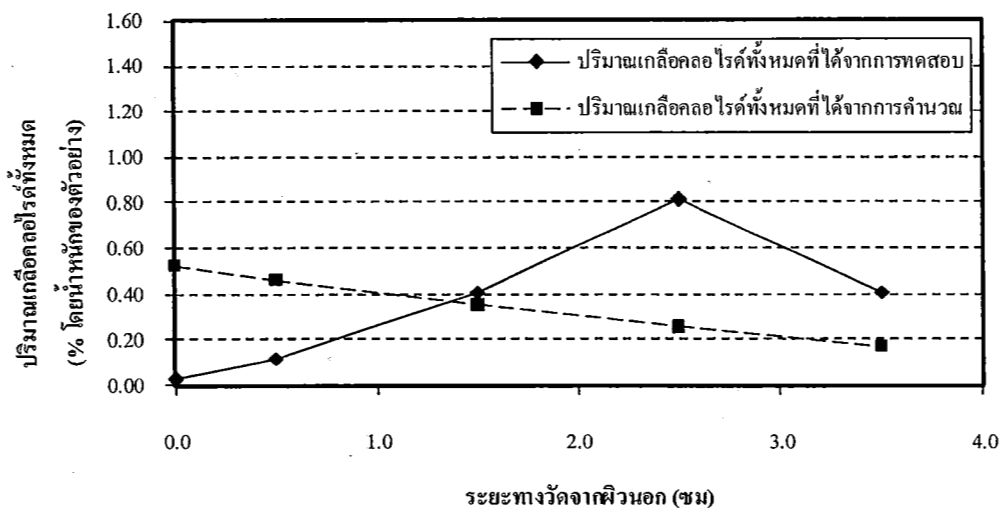
ภาพที่ 6-8 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 1 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -600 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 5.00 ม. บริเวณ ทางเลี้ยวเมือง (ใหม่) อ.เมือง จ.ชลบุรี



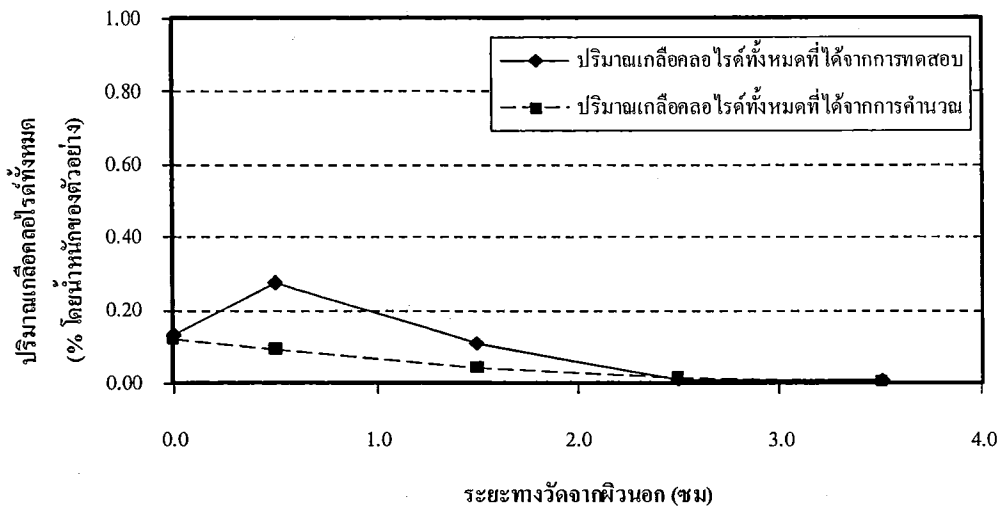
ภาพที่ 6-9 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 1 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -200 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 5.00 ม. บริเวณ ทางเลี้ยวเมือง (ใหม่) อ.เมือง จ.ชลบุรี



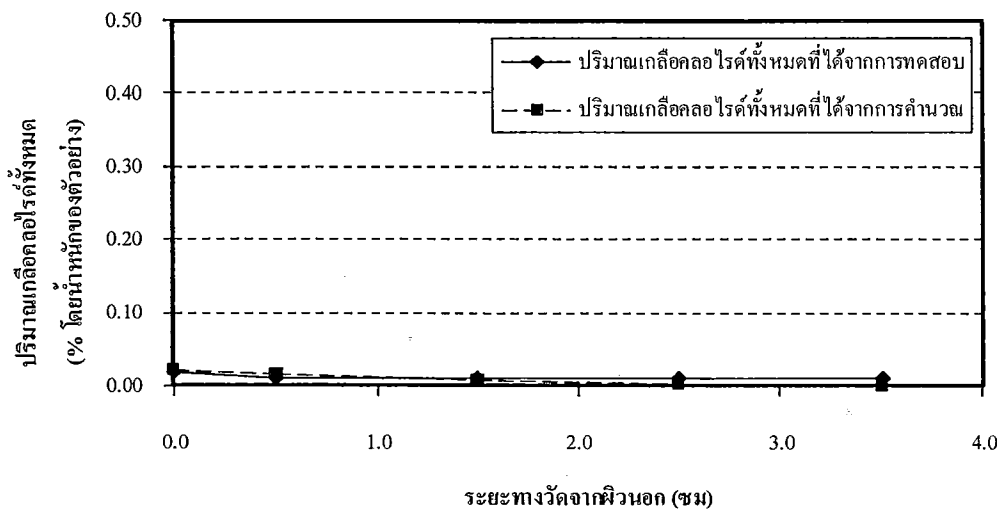
ภาพที่ 6-10 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 1 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.00 ม. บริเวณ ทางเลียงเมือง (ใหม่) อ.เมือง จ.ชลบุรี



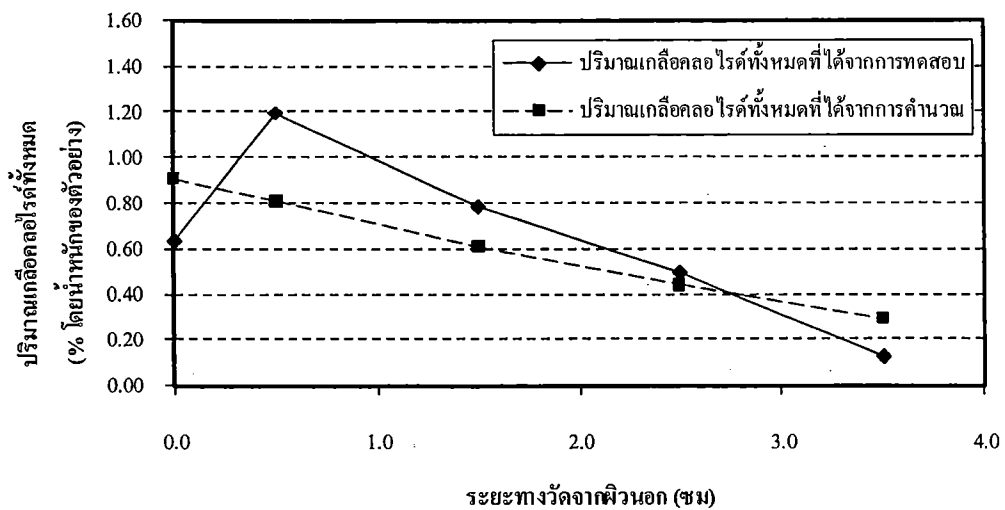
ภาพที่ 6-11 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 15 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.20 ม. บริเวณ หมู่บ้านแฉมหนู จ.จันทบุรี



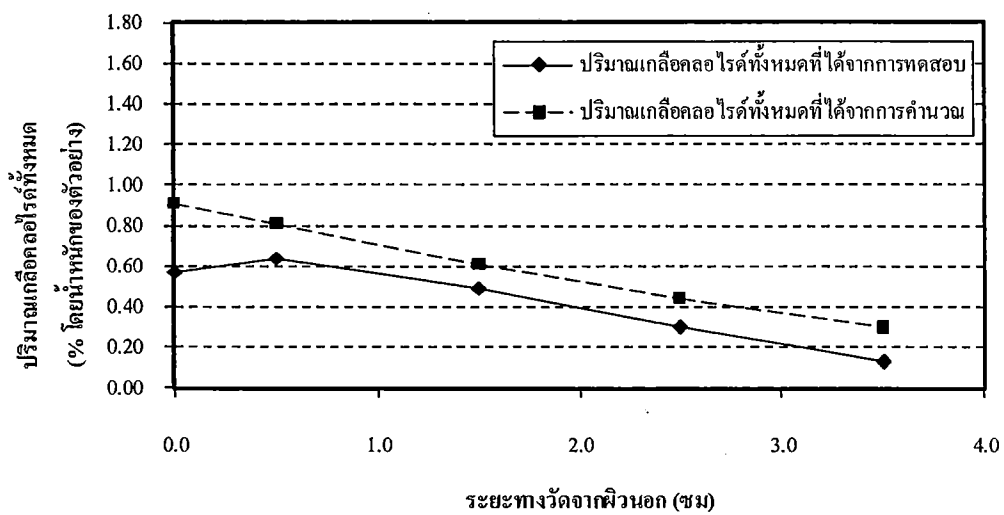
ภาพที่ 6-12 ปริมาณแก๊สคลอโรไฟต์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 1 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -150 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.70 ม. บริเวณ อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี



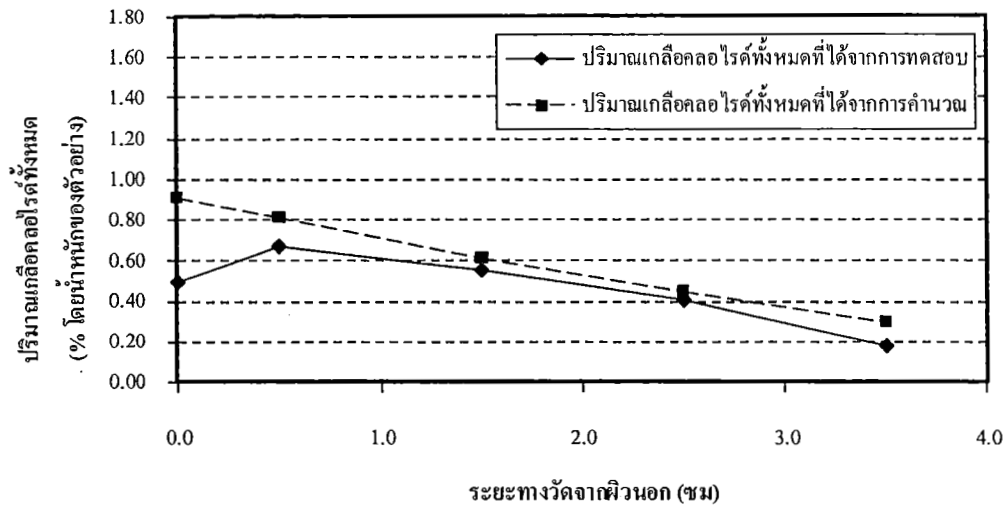
ภาพที่ 6-13 ปริมาณแก๊สคลอโรไฟต์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของสะพาน อายุ 1 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -150 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 2.70 ม. บริเวณ อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี



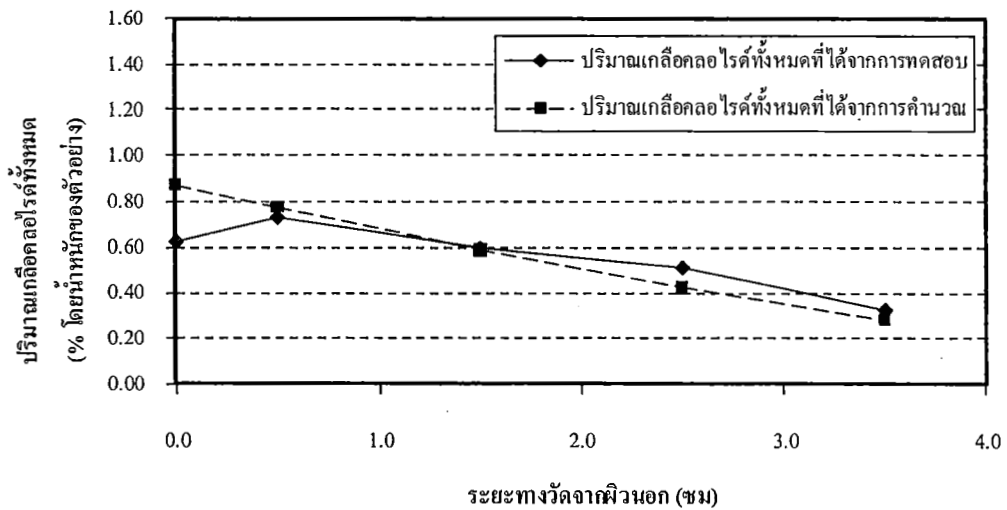
ภาพที่ 6-14 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 20 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -240 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.80 ม. บริเวณ ต.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



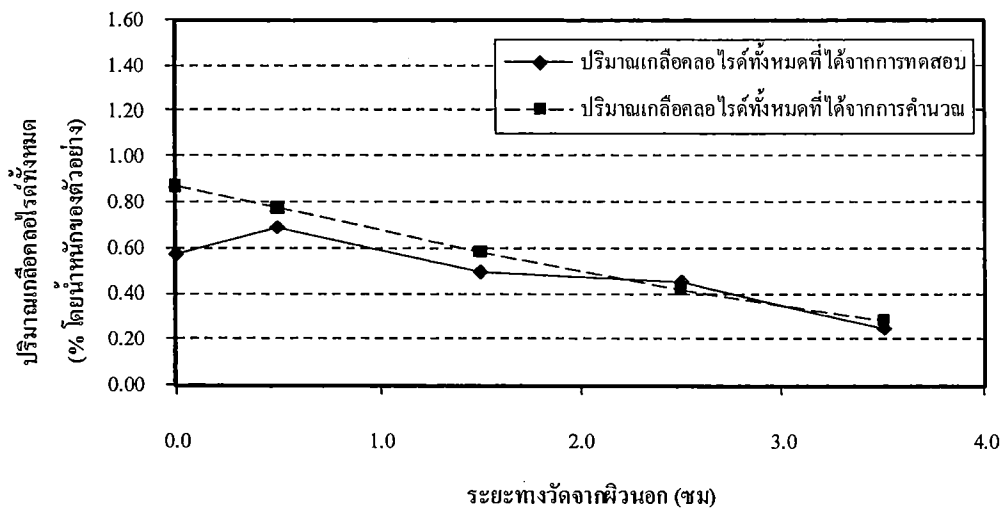
ภาพที่ 6-15 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 20 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -120 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.80 ม. บริเวณ ต.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



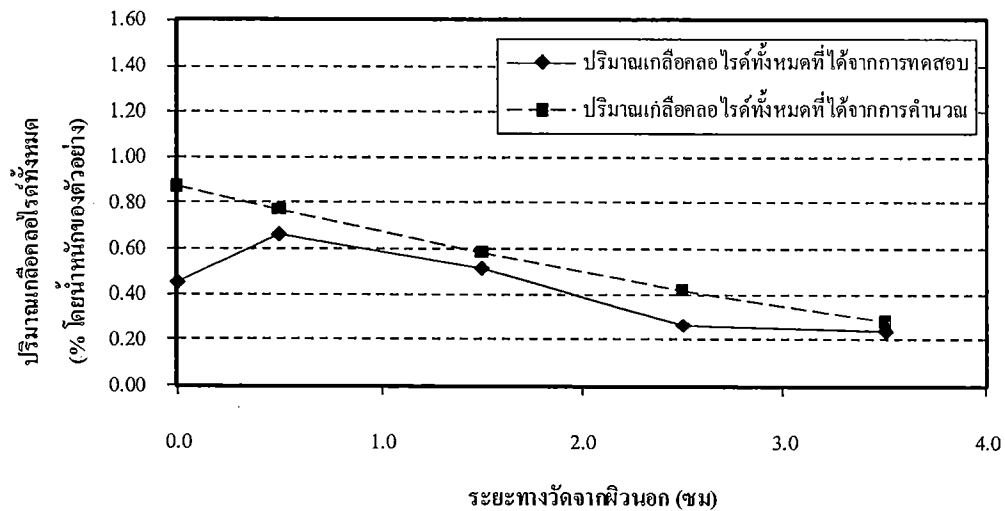
ภาพที่ 6-16 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 20 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -15 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.80 ม. บริเวณ ต.บางเสร่ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



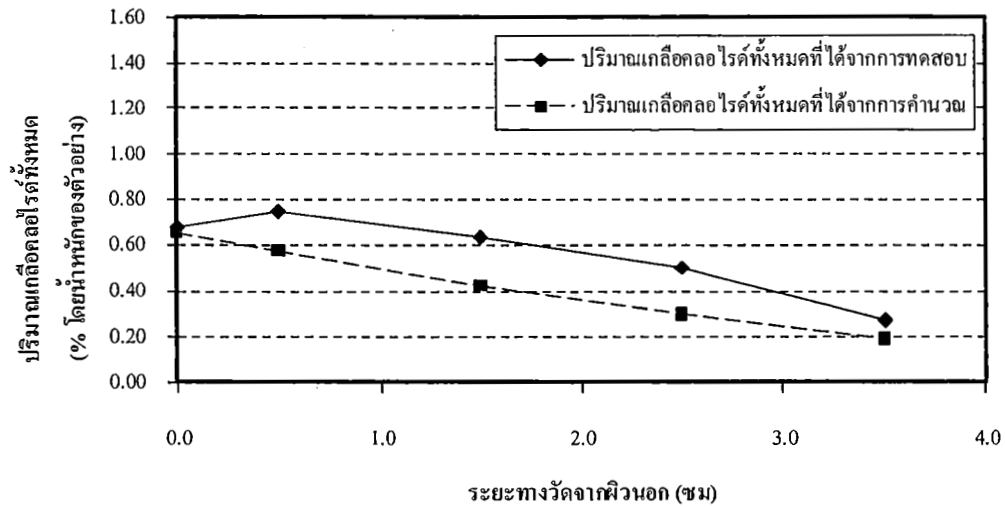
ภาพที่ 6-17 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 15 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -210 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.60 ม. บริเวณ ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



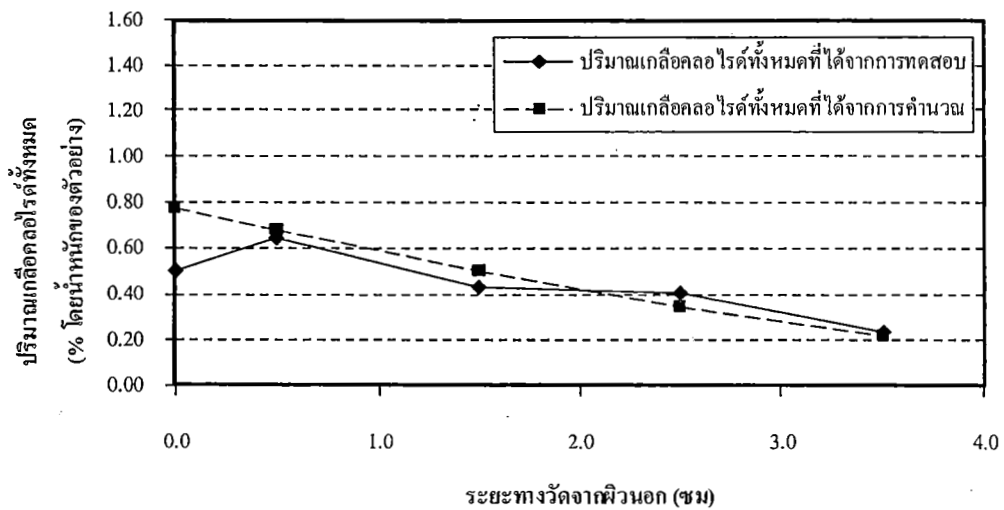
ภาพที่ 6-18 ปริมาณแก๊สคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 15 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -145 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.60 ม. บริเวณ ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



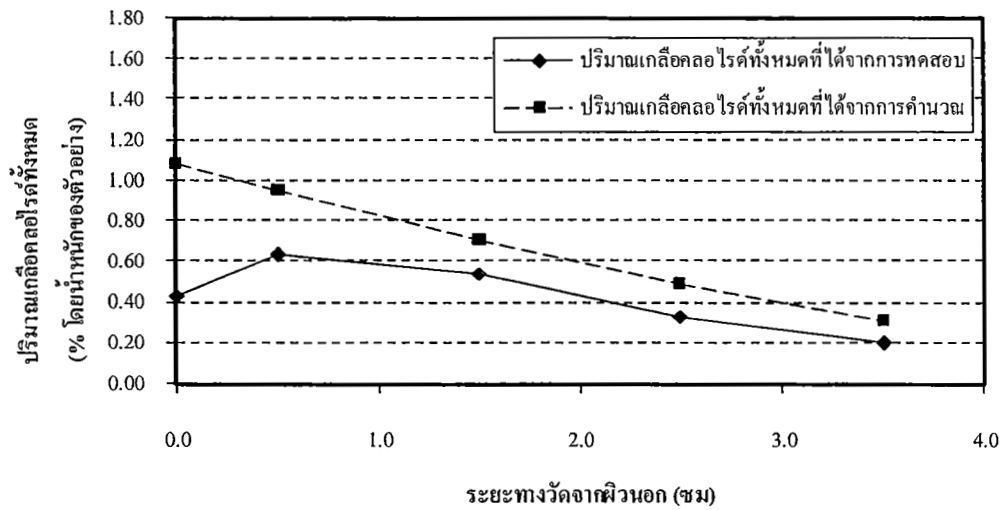
ภาพที่ 6-19 ปริมาณแก๊สคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 15 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0.0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.60 ม. บริเวณ ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



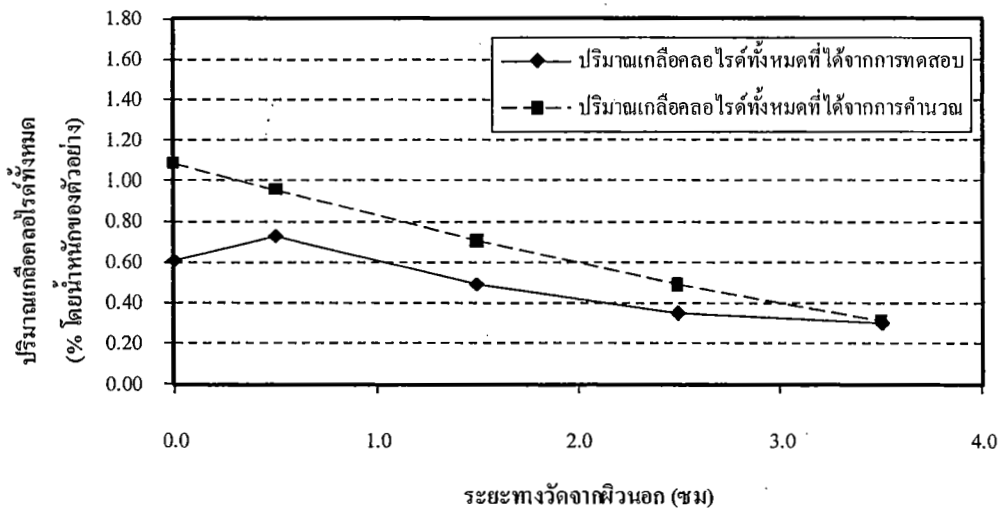
ภาพที่ 6-20 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -335 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.60 ม. บริเวณ ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี



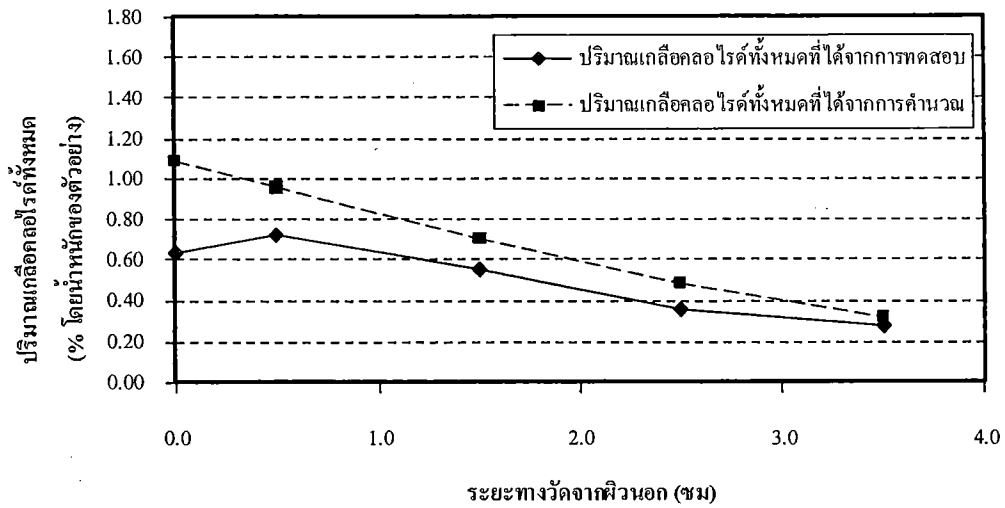
ภาพที่ 6-21 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -170 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.40 ม. บริเวณ ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี



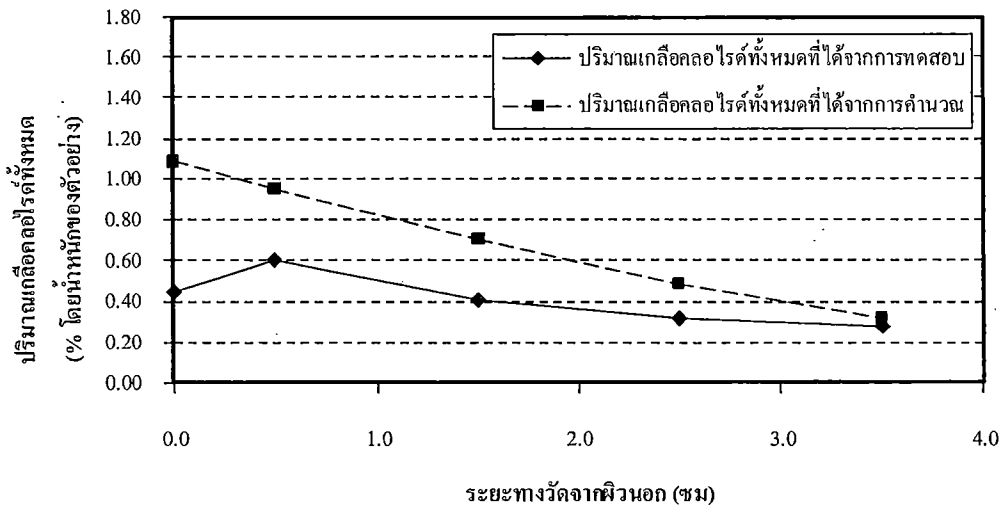
ภาพที่ 6-22 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -10 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.00 ม. บริเวณ ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี



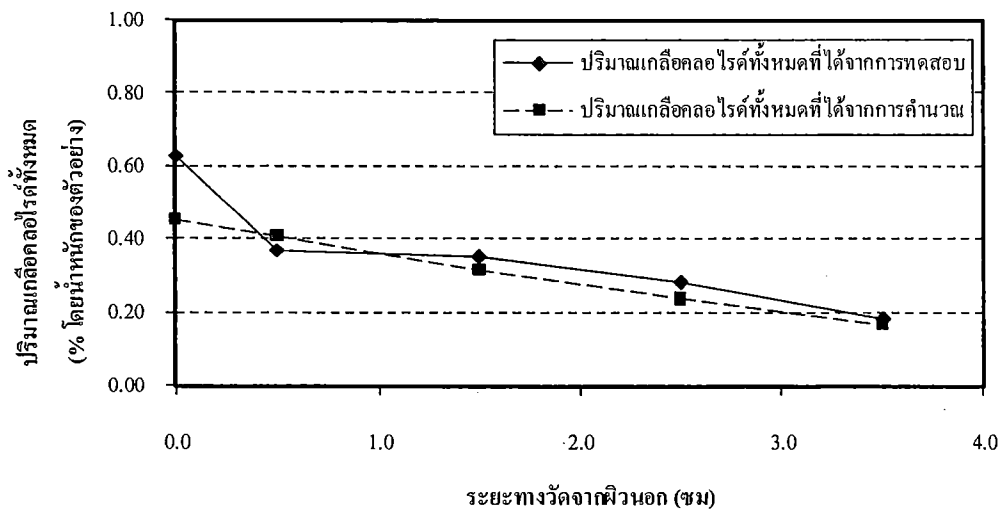
ภาพที่ 6-23 ปริมาณแก๊สคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -10 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด -0.30 ม. บริเวณ ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี



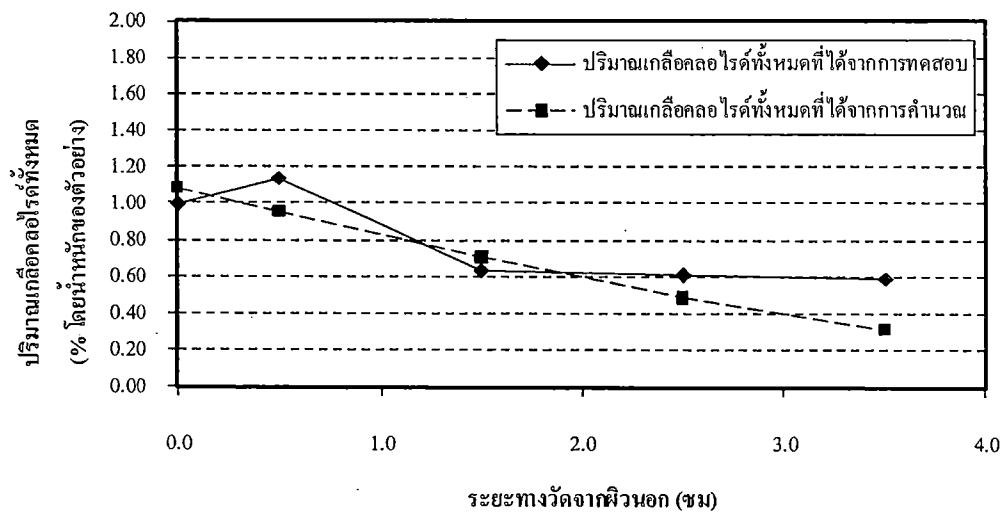
ภาพที่ 6-24 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -10 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด -0.70 ม. บริเวณ ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี



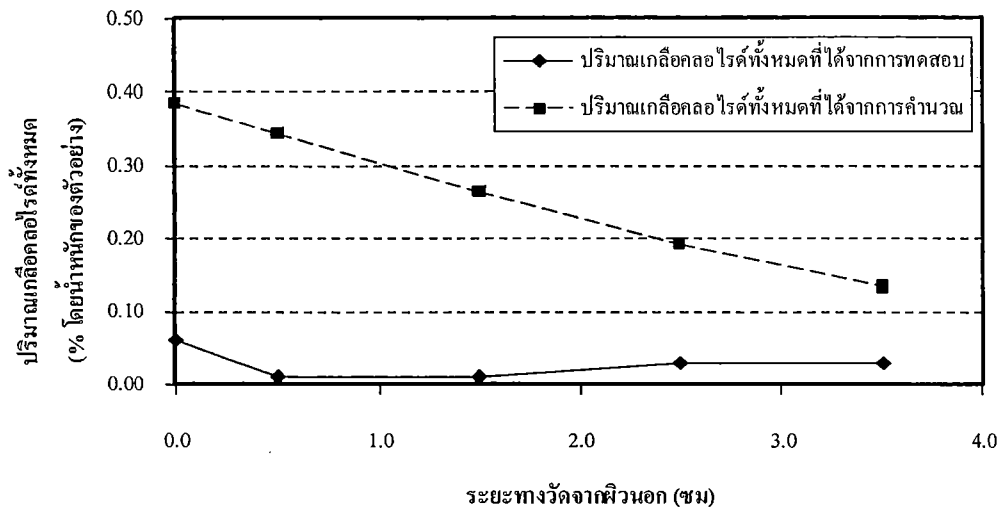
ภาพที่ 6-25 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -10 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด -1.20 ม. บริเวณ ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี



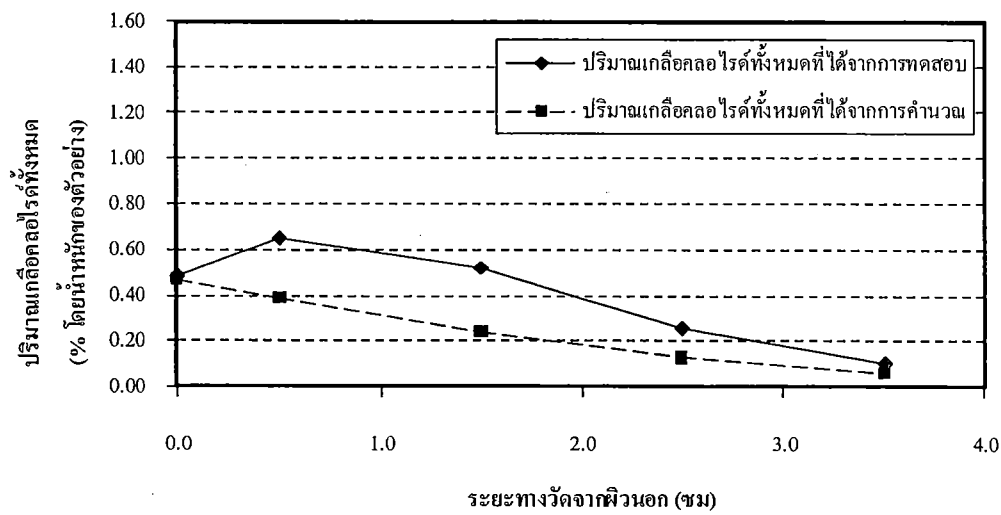
ภาพที่ 6-26 ปริมาณแก๊สโคลไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากฝิวด้านนอก ของท่าเทียบเรือ อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง -20 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.00 ม. บริเวณ อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา



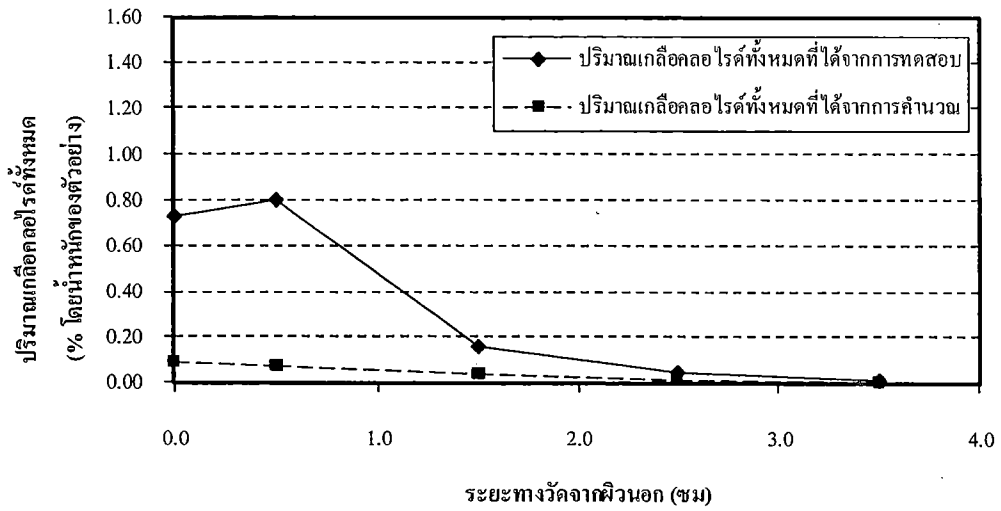
ภาพที่ 6-27 ปริมาณแก๊สโคลไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากฝิวด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.00 ม. บริเวณ อ.เมือง จ.ชลบุรี



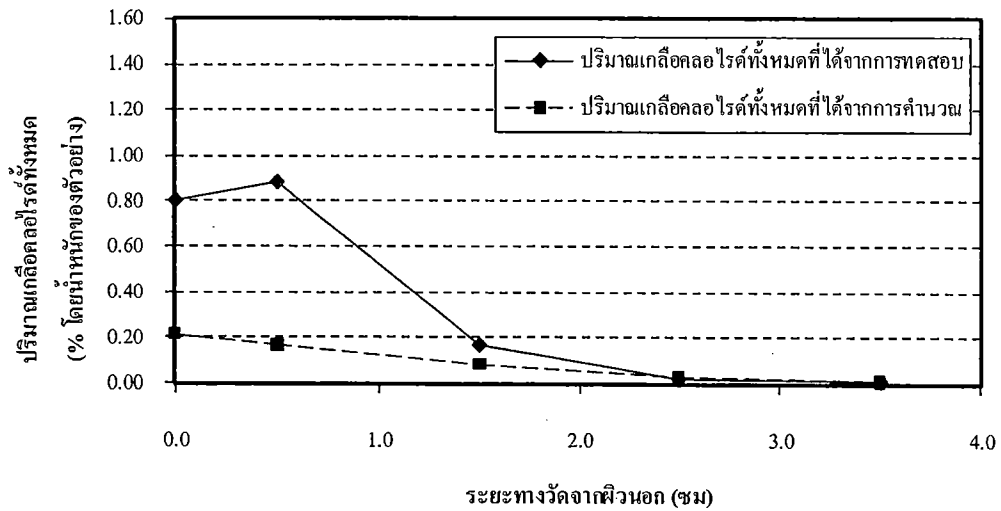
ภาพที่ 6-28 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.20 ม.
บริเวณ อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา



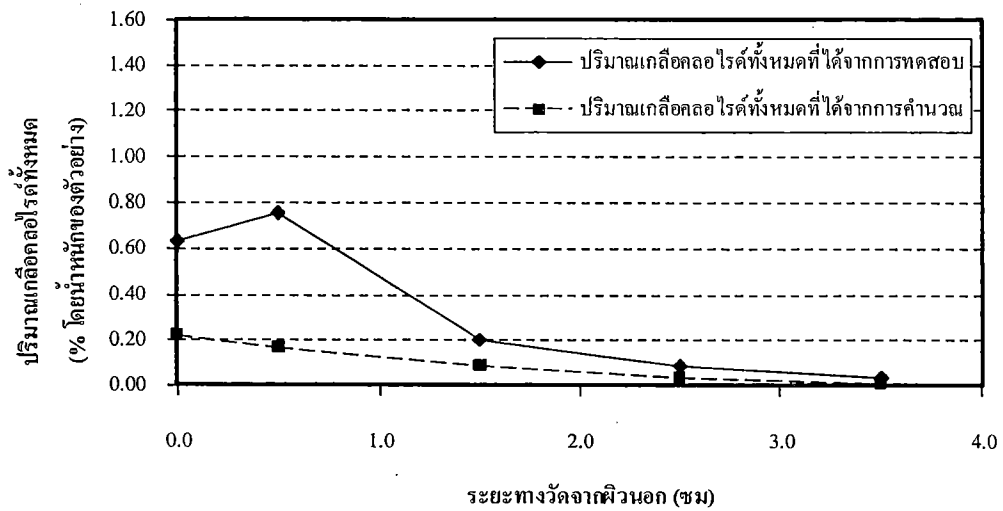
ภาพที่ 6-29 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 3 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.0 ม.
บริเวณ อ.บางละมุง จ.ชลบุรี



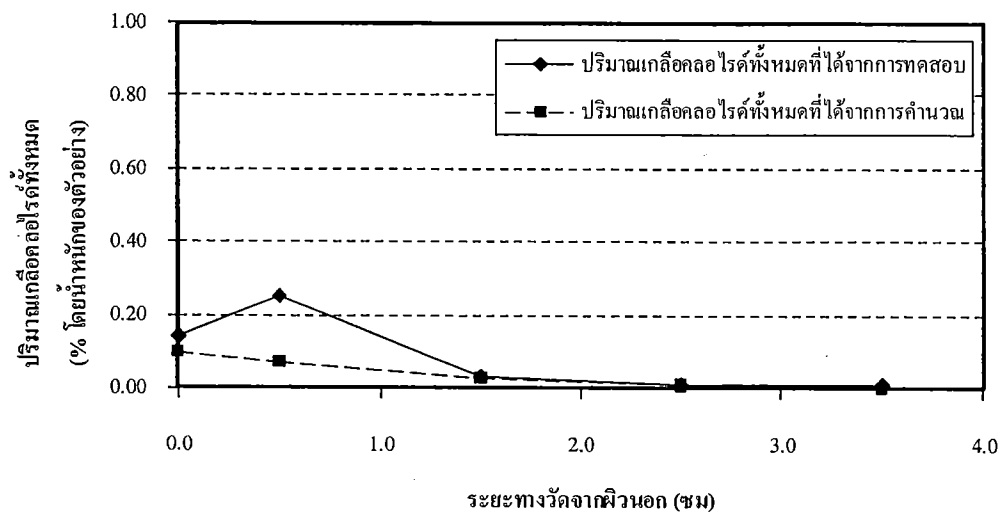
ภาพที่ 6-30 ปริมาณแก๊สออกคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากฟิวด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 1 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.00 ม.
บริเวณ ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี



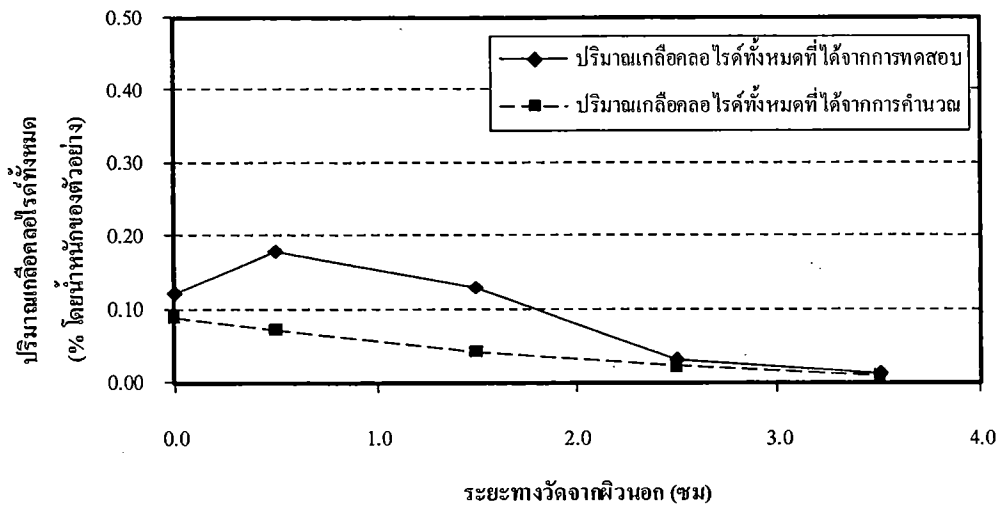
ภาพที่ 6-31 ปริมาณแก๊สออกคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากฟิวด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 1 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.0 ม.
บริเวณ ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี



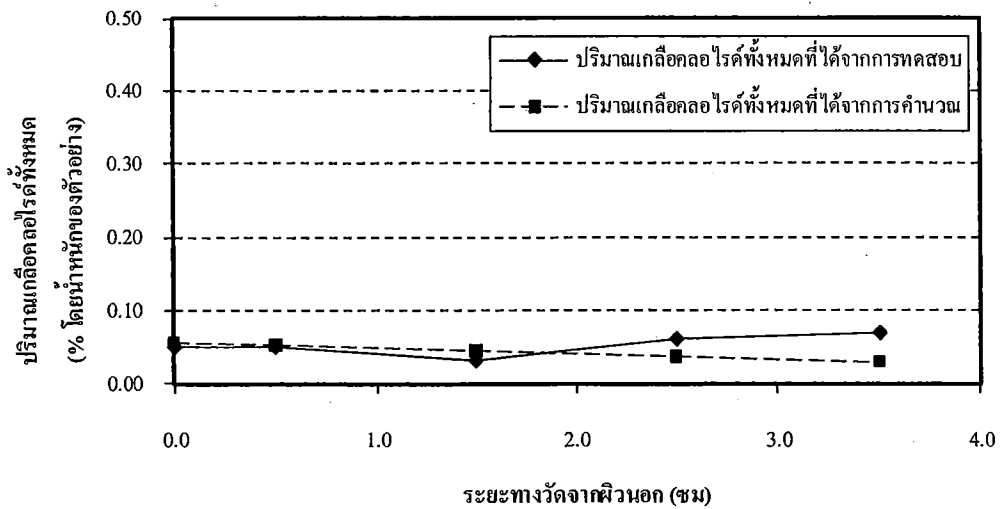
ภาพที่ 6-32 ปริมาณเกลือคอลลอยด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากฝิวด้านนอก ของกำแพงกั้นคลื่น อายุ 1 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด -1.20 ม. บริเวณ ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี



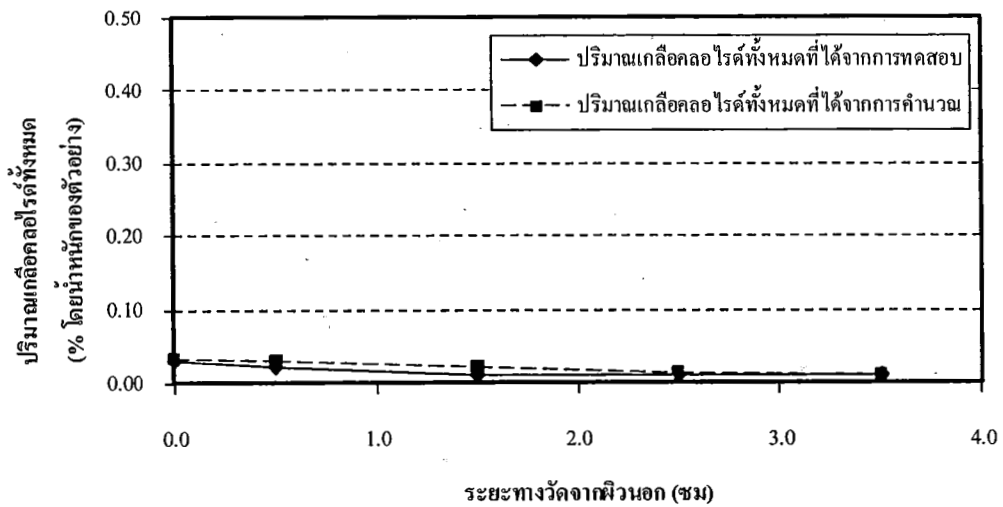
ภาพที่ 6-33 ปริมาณเกลือคอลลอยด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากฝิวด้านนอก ของกำแพงกั้นคลื่น อายุ 0.5 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 8.50 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.50 ม. บริเวณ แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง



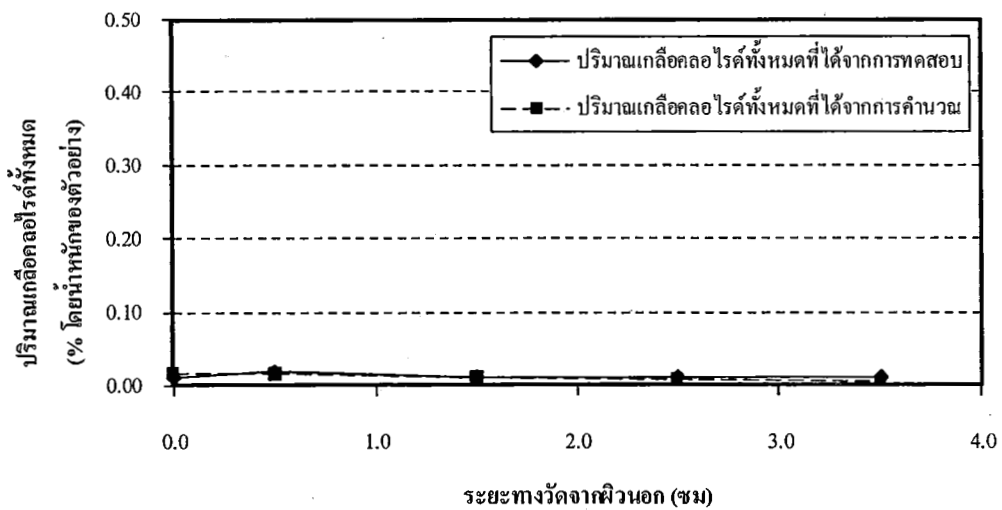
ภาพที่ 6-34 ปริมาณแก๊สตะกั่วทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของกำแพงกันคลื่น อายุ 0.5 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 15.00 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 3.50 ม. บริเวณ กุ้งวิมาน จ.จันทบุรี



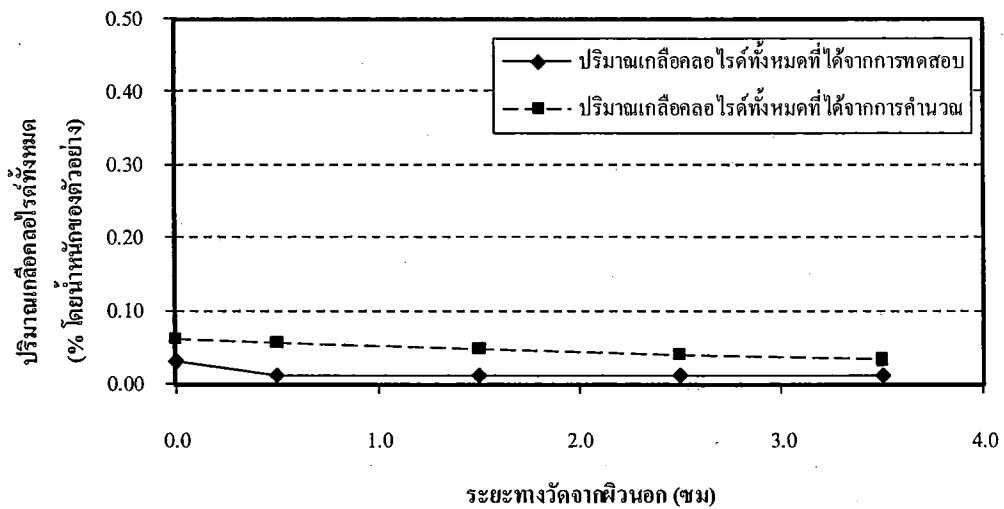
ภาพที่ 6-35 ปริมาณแก๊สตะกั่วทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของเสาไฟฟ้า อายุ 20 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 100 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 3.10 ม. บริเวณ ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



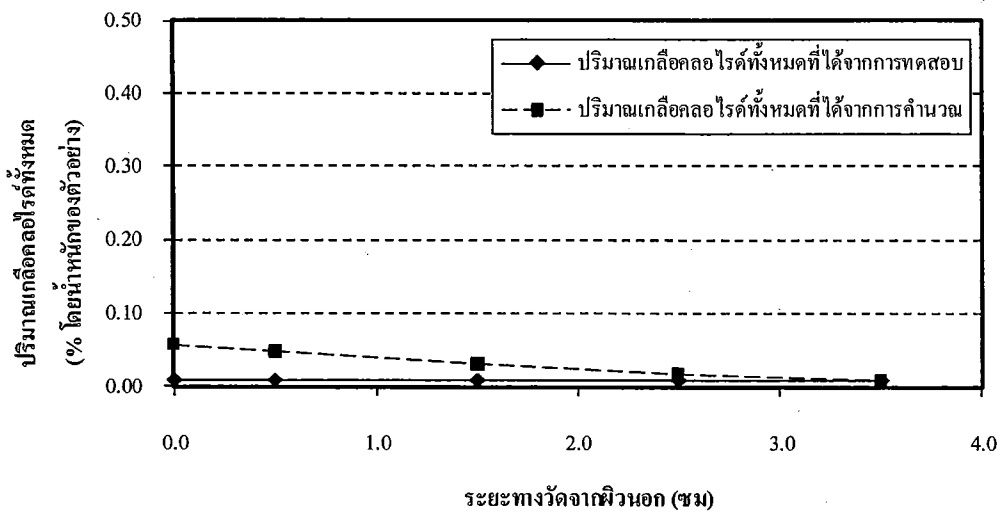
ภาพที่ 6-36 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากฟิวทอนนอก ของเสาไฟฟ้า อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 200 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 2.00 ม. บริเวณ อ.เมือง จ.ชลบุรี



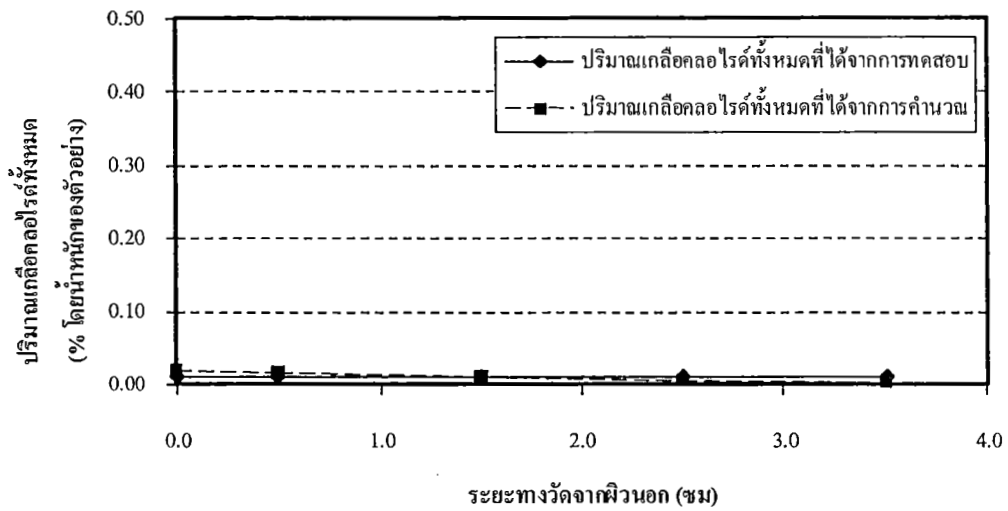
ภาพที่ 6-37 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากฟิวทอนนอก ของเสาไฟฟ้า อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 600 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 2.20 ม. บริเวณ อ.เมือง จ.ชลบุรี



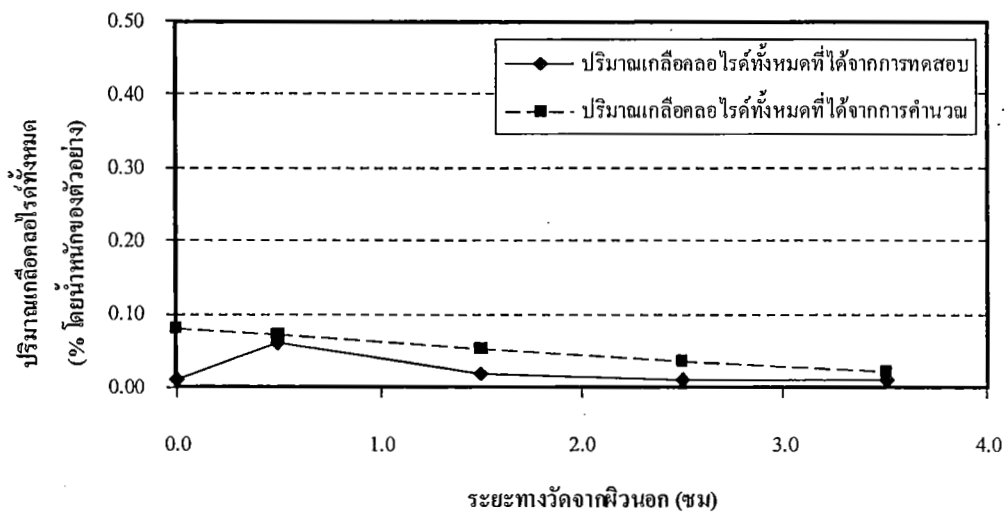
ภาพที่ 6-38 ปริมาณแก๊สตะกั่วไรต์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของเสาไฟฟ้า อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 80 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 2.20 ม. บริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



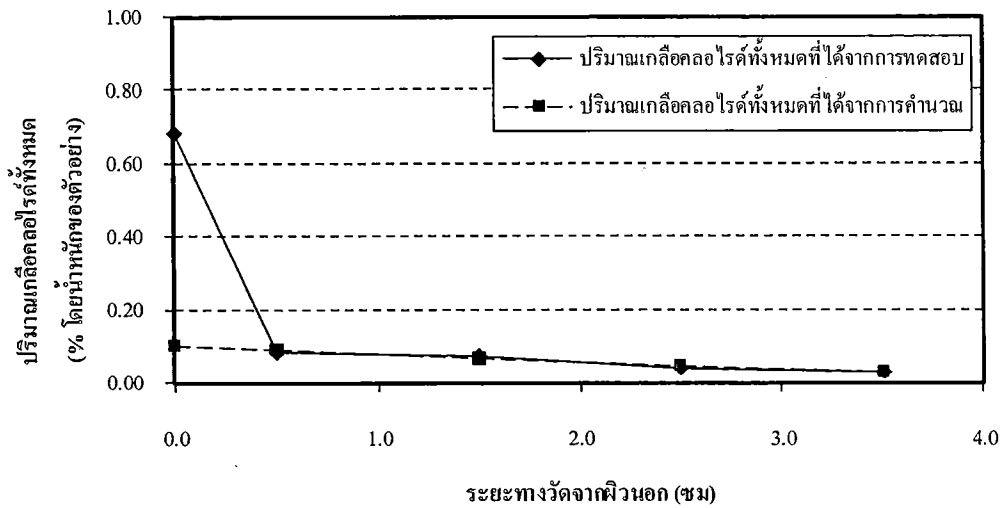
ภาพที่ 6-39 ปริมาณแก๊สตะกั่วไรต์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของเสาไฟฟ้า อายุ 5 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 100 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 2.10 ม. บริเวณ อ.เมือง จ.ชลบุรี



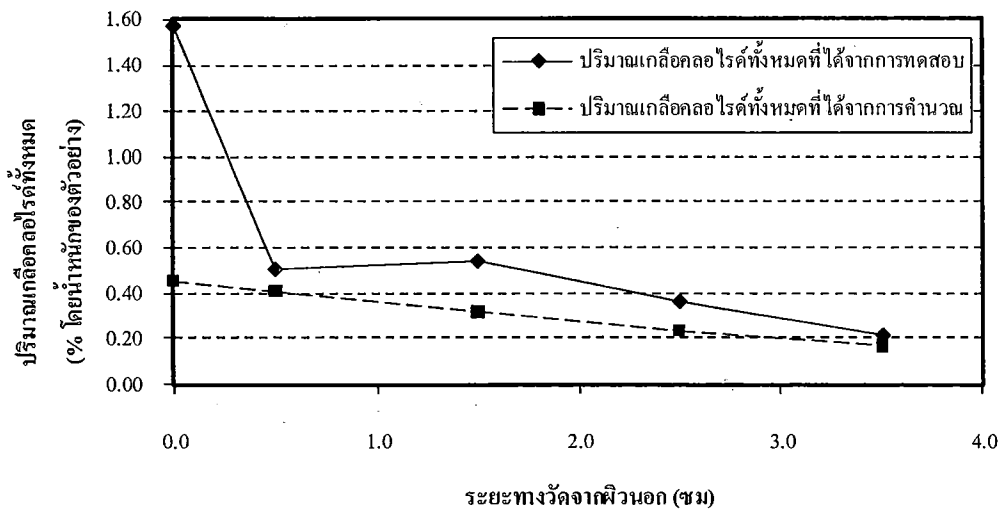
ภาพที่ 6-40 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากฟิวด้านนอก ของเสาไฟฟ้า อายุ 5 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 500 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 2.40 ม. บริเวณ อ.เมือง จ.ชลบุรี



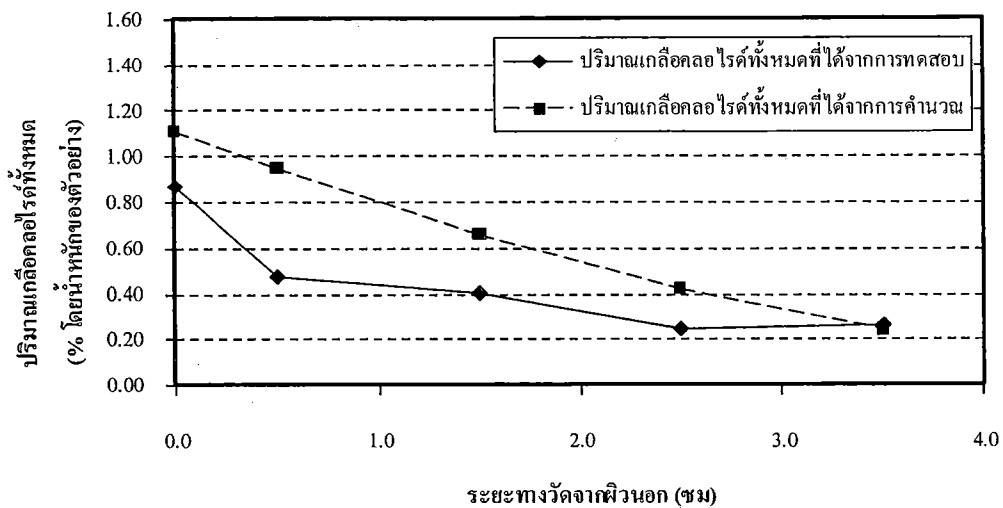
ภาพที่ 6-41 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากฟิวด้านนอก ของเสาไฟฟ้า อายุ 15 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 60 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 3.00 ม. บริเวณ แหลมเจริญ อ.เมือง จ.ระยอง



ภาพที่ 6-42 ปริมาณแก๊สคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของเส้าไฟฟ้า อายุ 15 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 30 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 4.00 ม. บริเวณ กิ่งวิมาน จ.จันทบุรี



ภาพที่ 6-43 ปริมาณแก๊สคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของคลองระบายน้ำ อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.00 ม. บริเวณ ต.บางปลาสร้อย อ.เมือง จ.ชลบุรี



ภาพที่ 6-44 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ของหล่อเย็น อายุ 10 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0 ม. สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0 ม. บริเวณ โรงไฟฟ้าบางปะกง อ.บางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา

จากการเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดตามระดับความลึกจากผิวหน้าของ โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลจากการสำรวจจริงและการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 6-1 ถึง 6-44 พบว่า มีค่าแตกต่างกันที่บริเวณใกล้ผิวหน้าคอนกรีต แต่มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อ ลึกเข้าไปในคอนกรีต ดังนั้นจึงสามารถนำสมการที่ใช้ในการหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของ คอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ไปใช้ทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต เสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้

6.2 การตรวจสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดสอบของนักวิจัยอื่น

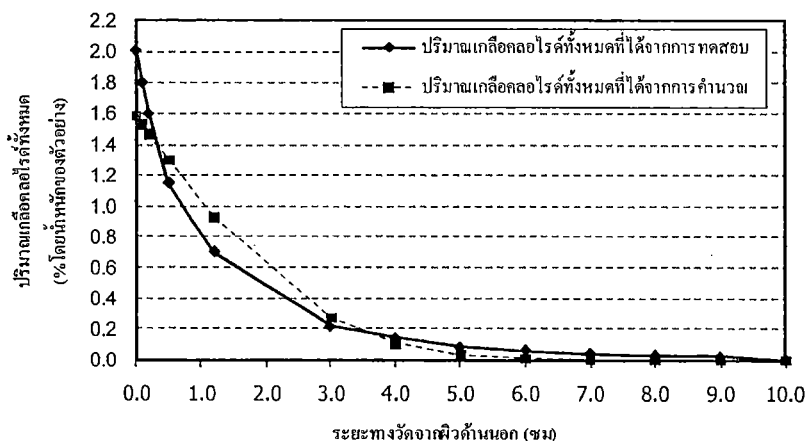
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น กระทำโดยการเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าจากการทดสอบของนักวิจัยท่านอื่น กับการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าที่คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น โดยข้อมูลการทดสอบของนักวิจัยอื่น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6-1

ตารางที่ 6-1 สรุปข้อมูลการทดสอบของนักวิจัยอื่น

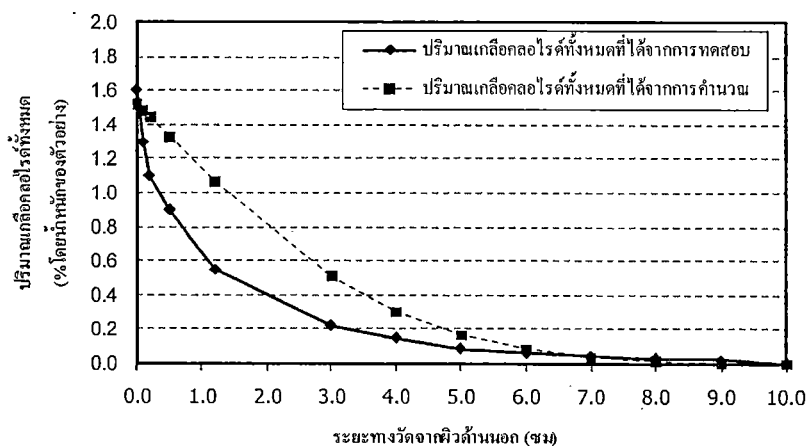
ลำดับที่	อ้างอิง	อายุของโครงสร้าง (ปี)	W/B	f/b	ปริมาณวัสดุประสาน (กก./ม3)	ระยะทางจากชายฝั่ง	ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด	สถานะของโครงสร้าง
1	Oh and Jang (2007)	10	0.45	-	449	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
2		10	0.55	-	449	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
3	Tang and Joost (2007)	10	0.30	-	300	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง*
4		10	0.30	0.20	350	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง*
5	Thomas and Bamforth (1999)	2	0.66	-	288	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
6		3	0.66	-	288	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
7		3	0.54	0.30	325	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
8		6	0.54	0.30	325	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
9		8	0.54	0.20	325	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
10	Chalee et al. (2007)	2	0.45	0.50	478	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
11		3	0.45	0.50	478	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
12		5	0.45	0.30	478	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
13		6	0.45	-	478	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
14		3	0.45	0.15	478	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
15		4	0.45	0.25	478	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
16		4	0.45	0.35	478	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง
17	4	0.45	0.50	478	0*	0*	สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง	

หมายเหตุ * คือ ข้อมูลที่สมมติเพื่อใช้ในการคำนวณ

จากการศึกษาของ Oh and Jang (2007) นำการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดตามระดับความลึกจากผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบในอัตราส่วนผสมของคอนกรีตและสภาพแวดล้อมต่างๆ มาเปรียบเทียบกับ การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดตามระดับความลึกที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 6-45 ถึง 6-46

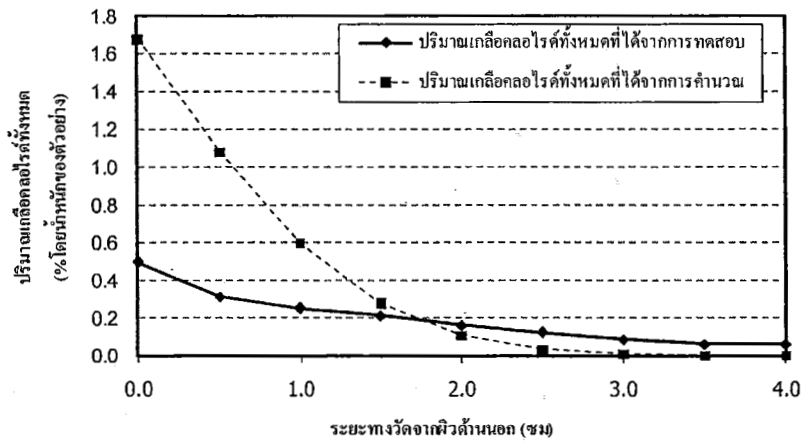


ภาพที่ 6-45 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 10 ปี
W/B = 0.45 f/b = 0 ปริมาณวัสดุประสาน 449 kg/m³ สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง

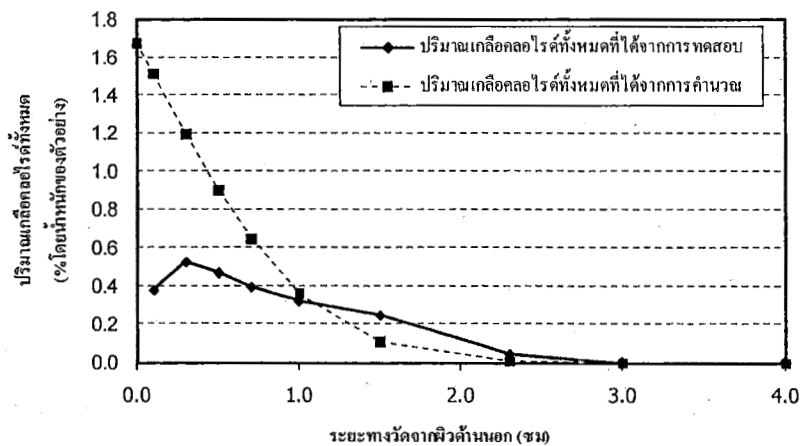


ภาพที่ 6-46 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 10 ปี
W/B = 0.55 f/b = 0 ปริมาณวัสดุประสาน 449 kg/m³ สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง

จากการศึกษาของ Tang and Joost (2007) นำการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดตามระดับความลึกจากผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบในอัตราส่วนผสมของคอนกรีตและสภาพแวดล้อมต่างๆ มาเปรียบเทียบกับ การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดตามระดับความลึกที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 6-47 ถึง 6-48

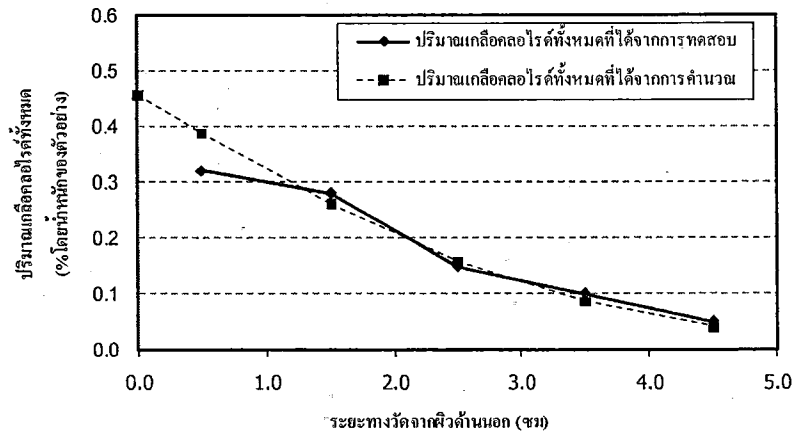


ภาพที่ 6-47 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 10 ปี
 $W/B = 0.30$ $f/b = 0$ ปริมาณวัสดุประสาน 300 kg/m^3 สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง

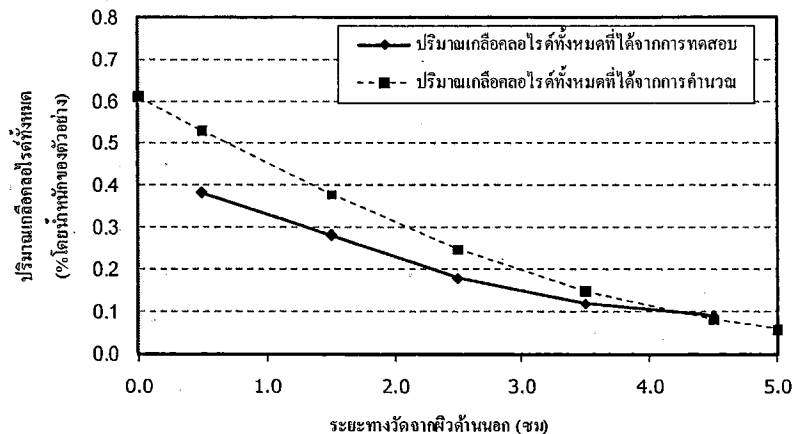


ภาพที่ 6-48 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 10 ปี
 $W/B = 0.30$ $f/b = 0.20$ ปริมาณวัสดุประสาน 350 kg/m^3 สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง

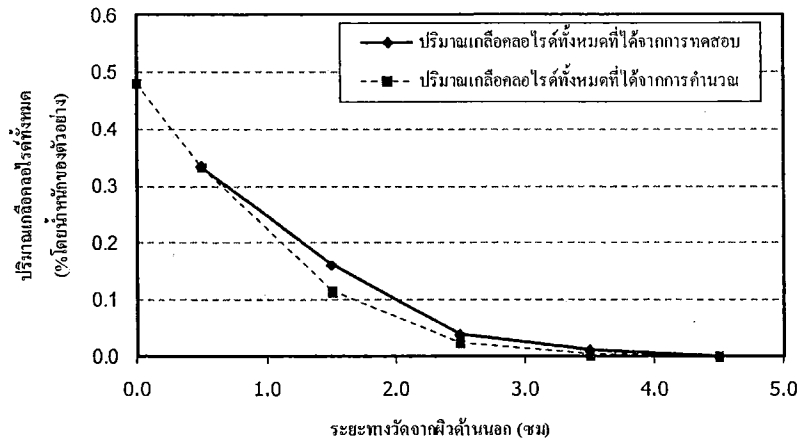
จากการศึกษาของ Thomas and Bamforth (1999) นำการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดตามระดับความลึกจากผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบในอัตราส่วนผสมของคอนกรีตและสภาพแวดล้อมต่างๆ มาเปรียบเทียบกับ การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดตามระดับความลึกที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 6-49 และ 6-54



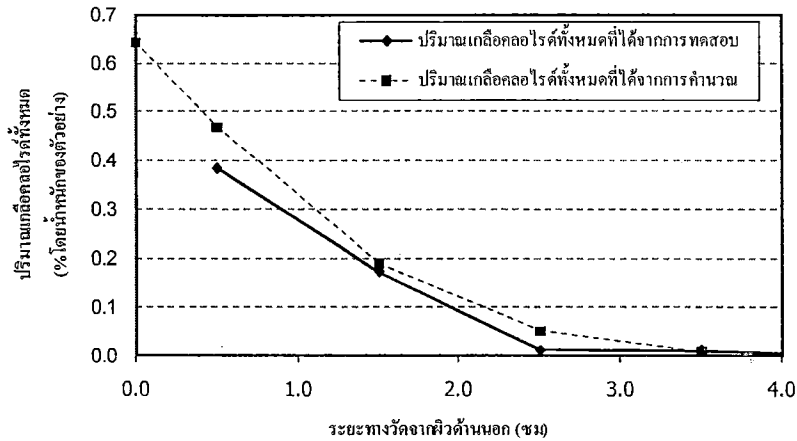
ภาพที่ 6-49 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 2 ปี
 $W/B = 0.66$ $f/b = 0$ ปริมาณวัสดุประสาน 288 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง



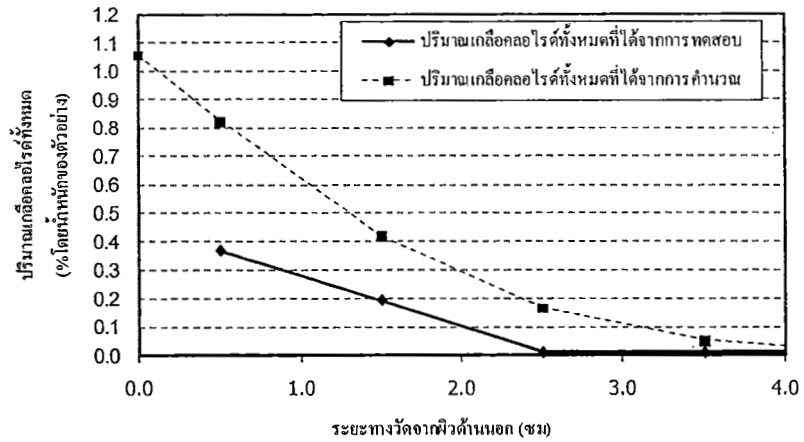
ภาพที่ 6-50 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 3 ปี
 $W/B = 0.66$ $f/b = 0$ ปริมาณวัสดุประสาน 288 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง



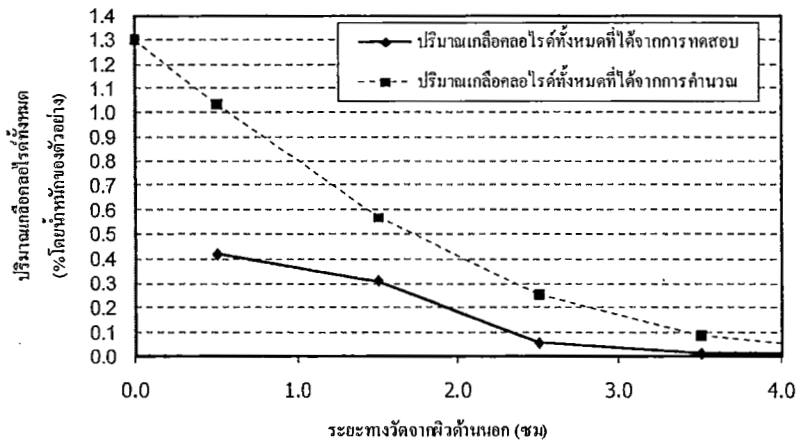
ภาพที่ 6-51 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 2 ปี
 $W/B = 0.54$ $f/b = 0.30$ ปริมาณวัสดุประสาน 325 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง



ภาพที่ 6-52 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 3 ปี
 $W/B = 0.54$ $f/b = 0.30$ ปริมาณวัสดุประสาน 325 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง

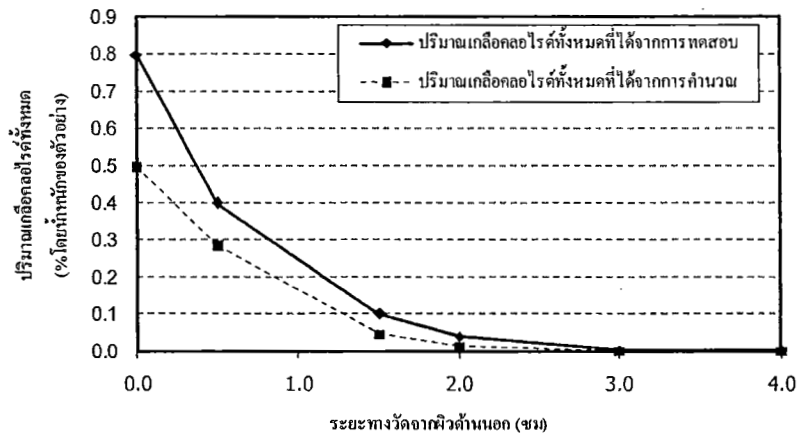


ภาพที่ 6-53 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 6 ปี
 $W/B = 0.54$ $f/b = 0.30$ ปริมาณวัสดุประสาน 325 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง

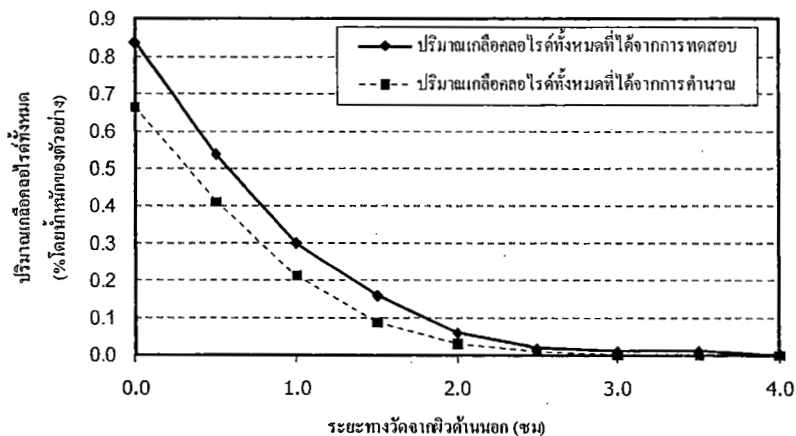


ภาพที่ 6-54 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 8 ปี
 $W/B = 0.54$ $f/b = 0.30$ ปริมาณวัสดุประสาน 325 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง

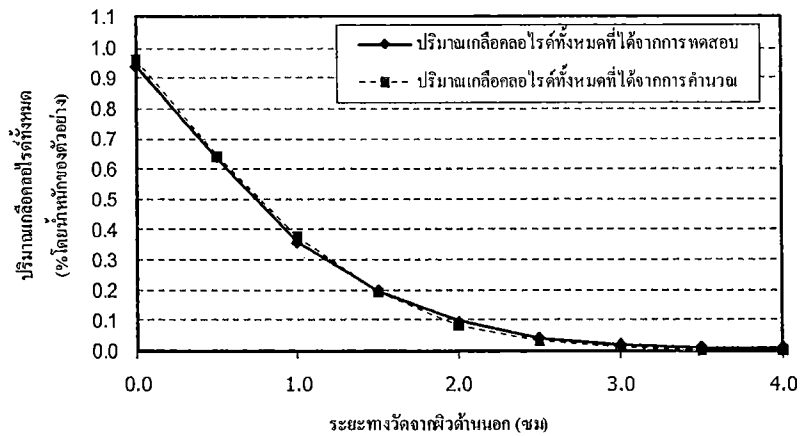
จากการศึกษาของ Chalee et al. (2007) นำการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดตามระดับความลึกจากผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบในอัตราส่วนผสมของคอนกรีตและสภาพแวดล้อมต่างๆ มาเปรียบเทียบกับ การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดตามระดับความลึกที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 6-55 และ 6-57



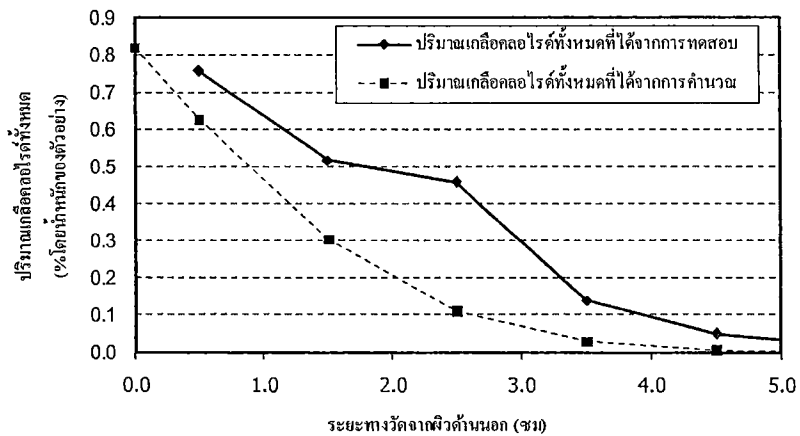
ภาพที่ 6-55 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 2 ปี
 $W/B = 0.45$ $f/b = 0.50$ ปริมาณวัสดุประสาน 478 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง



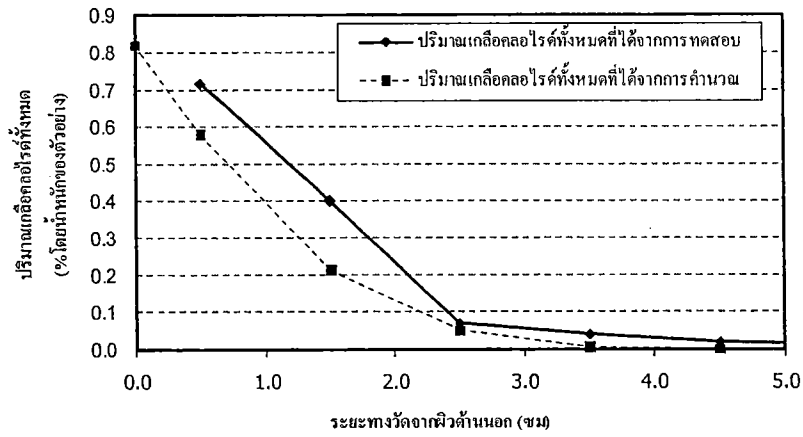
ภาพที่ 6-56 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 3 ปี
 $W/B = 0.45$ $f/b = 0.50$ ปริมาณวัสดุประสาน 478 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง



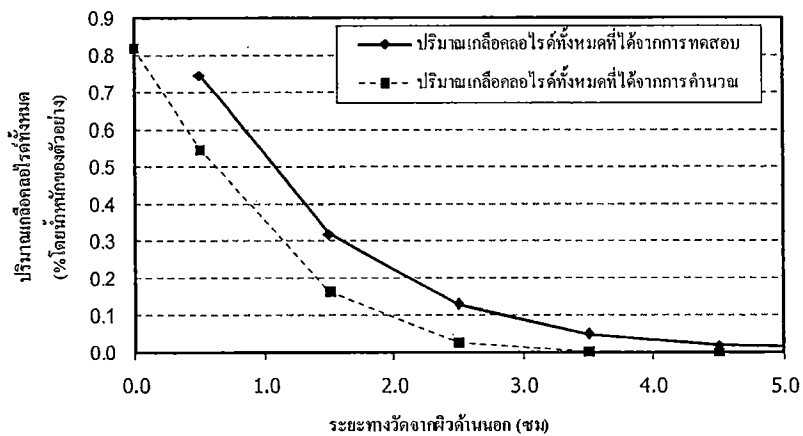
ภาพที่ 6-57 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 5 ปี
 $W/B = 0.45$ $f/b = 0.50$ ปริมาณวัสดุประสาน 478 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง



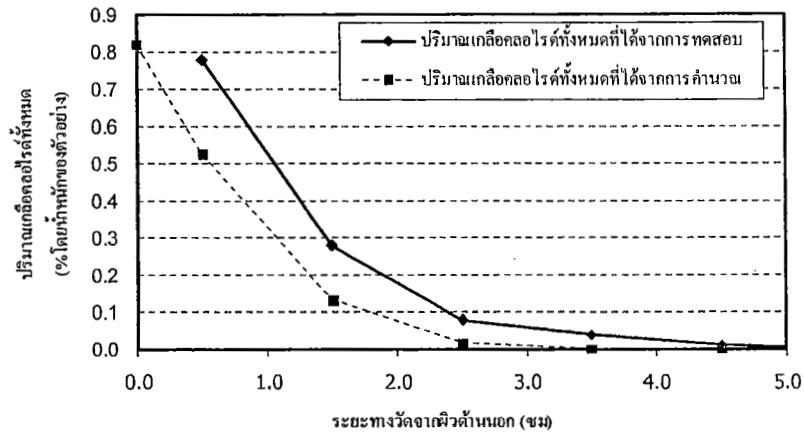
ภาพที่ 6-58 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 4 ปี
 $W/B = 0.45$ $f/b = 0$ ปริมาณวัสดุประสาน 478 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง



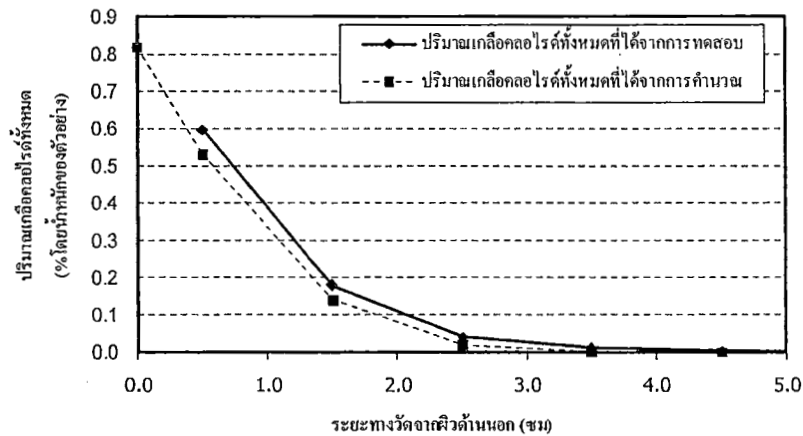
ภาพที่ 6-59 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 4 ปี
 $W/B = 0.45$ $f/b = 0.15$ ปริมาณวัสดุประสาน 478 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง



ภาพที่ 6-60 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 4 ปี
 $W/B = 0.45$ $f/b = 0.25$ ปริมาณวัสดุประสาน 478 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง



ภาพที่ 6-61 ปริมาณเหล็กคอลลีไรต์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 4 ปี
 $W/B = 0.45$ $f/b = 0.35$ ปริมาณวัสดุประสาน 478 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง



ภาพที่ 6-62 ปริมาณเหล็กคอลลีไรต์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก อายุ 4 ปี
 $W/B = 0.45$ $f/b = 0.50$ ปริมาณวัสดุประสาน 478 kg/m^3
 ระยะห่างจากชายฝั่ง 0 เมตร สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง

จากการเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดตามระดับความลึกจากผิวหน้าจากการทดสอบของนักวิจัยอื่น และการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 6-1 ถึง 6-45 พบว่า มีค่าแตกต่างกันที่บริเวณใกล้ผิวหน้าคอนกรีต แต่มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อลึกเข้าไปในคอนกรีต ดังนั้นจึงสามารถนำสมการที่ใช้ในการหาค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ไปใช้ทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้

และจากภาพที่ 6-1 ถึง 6-62 จะเห็นว่า สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถหาการกระจายตัวของปริมาณคลอไรด์ที่ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีตมากกว่า 2.0 เซนติเมตร ได้เป็นอย่างดี แต่ที่ระยะทางน้อยกว่า 2.0 เซนติเมตร ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่คำนวณอาจได้มีค่าแตกต่างจากค่าที่ทดสอบได้ค่อนข้างมาก ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จึงไม่เหมาะสมในการใช้หาการกระจายตัวของปริมาณเกลือคลอไรด์ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยกว่า 2.0 เซนติเมตร แต่โดยปกติในทางปฏิบัติ นั้นจะใช้ระยะหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลมากกว่า 2.0 เซนติเมตร ดังนั้นจึงสามารถนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ได้ต่อไป

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาและการพัฒนาแบบจำลองเพื่อหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต และสัมประสิทธิ์การแพร่เกลือคลอไรด์ภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายในคอนกรีตของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่ามากขึ้นเมื่อ โครงสร้างนั้นเผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลนานขึ้น และเมื่อ ระยะทางจากชายฝั่งออกสู่ทะเลมากขึ้น และมีค่าแตกต่างกันไปตามประเภทของ โครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็กด้วย
2. ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายในคอนกรีตของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่บนพื้นดินจะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ โครงสร้างที่มีการสัมผัสกับ น้ำทะเลโดยตรง
3. ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายในคอนกรีตของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงสูง เช่น หอหล่อเย็น และ คลองระบายน้ำที่มี แผ่นพื้นปิด มีค่ามากกว่า โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมทะเลตาม ธรรมชาติ
4. เมื่อ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์เป็นระยะเวลานานขึ้นพบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ใน คอนกรีตมีค่าลดลง
5. ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆหลายปัจจัย เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ระยะห่างจากชายฝั่ง ทะเล และความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เสนอสมการเบื้องต้นสำหรับการใช้ในการคำนวณ เพื่อหาค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่างๆ
6. สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ใน โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์มี ค่าขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนเนื้อต่อ วัสดุประสาน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เสนอสมการเบื้องต้นสำหรับการใช้ในการคำนวณเพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของ เกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่างๆ
7. แบบจำลองปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์สามารถใช้ทำนายการกระจาย

ตัวของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตได้ และสามารถใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี

บรรณานุกรม

- คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. (2543). *ความคงทนของคอนกรีต*. กรุงเทพฯ:
บริษัท จุดทอง จำกัด
- ชุมพล จันทรสม. (2540). การเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต. *วิศวกรรมสาร*
มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 25(2), 139-154.
- ปรัชญา จูเหล็ก ทวีชัย สำราญวานิช เฉลิมชัย วัฒนล้ำเลิศ และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล (2551).
ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของโครงสร้าง
คอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลของประเทศไทย. *การประชุมเสนอผลงานวิจัย ระดับ
บัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9*, มหาวิทยาลัยบูรพา, 14-15 มีนาคม 2551
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). *ความคงทนของคอนกรีต*.
พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท จุดทอง จำกัด.
- วิเชียร ชาลี. (2550). สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ใน
สภาวะแวดล้อมทะเล. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3
24-26 ตุลาคม 2550 (หน้า MAT 103-109).
- 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.
- ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual
Book of ASTM Standards 2000 Volume 04.02*, 627-629
- Bakker RFM. (1988). *Corrosion of steel in concrete*. New York : Chapman and Hall.
- Chalee W., Teekavanit M., Kiattikomol K., Siripanichgorn A., Jaturapitakkul C. (2007). Effect of
W/C ratio on cover depth of fly ash concrete in marine environment, *Construction and
Building Materials*, 21, 965-971.
- Dhir R.K., Jones M.R. (1999). Development of chloride-resisting concrete using fly ash. *Fuel*, 78,
137-142.
- Dhir R.K., Jones M.R., Ng S.L.D. (1998). Prediction of total chloride content profile and
concentration/time-dependent diffusion coefficients for concrete. *Magazine of
Concrete Research*, 50, 37-48.
- Funahashi M. (1990). Predicting corrosion free service life of a concrete structure in chloride
environment. *ACI Materials Journal*, 87(6), 584-587.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Gjørv O.E., Vennesland . (1979). Diffusion of chloride ions from seawater into concrete. *Cement and Concrete Research*, 9, 229-238.
- Japan Society of Civil Engineers. (2005). Standard specifications for concrete structure-2001. Japan ; Yotsuya 1-chome.
- Jooss M., Reinhardt H.W. (2002). Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature. *Cement and Concrete Research*, 32, 1497-1504.
- Kayyali O.A., Haque M.N. (1988). Effect of carbonation on the chloride concentration in pore solution of mortars with and without flyash. *Cement and Concrete Research*, 18, 636-648.
- Khatib J.M., Mangat P.S. (2002). Influence of high-temperature and low-humidity curing on chloride penetration in blended cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 32, 1743-1753.
- Luping T., Gulikers J. (2007). On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, 589-595.
- Mangat P.S., Molloy B.T. (1994). Prediction of long term chloride concentration in concrete. *Materials and Structures*, 27, 338-346.
- Midess S., Young J.F. (1981). *Concrete*. New Jersey: Prentice-Hall
- Oh B.H. and Jung S.Y. (2007). Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 37, 47-53.
- Shamsad A. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structure its monitoring and service life prediction. *Cement & concrete composites*, 25, 459-471
- Song H.W., Lee C., Ann K.Y. (2008). Factor influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. *Cement & Concrete Composites*, 30, 113-121.
- Soroka. (1993). *Concrete in hot environments*. Great Britain: Alden Press.
- Thomas M.D.A., Bamforth P.B. (1999). Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 29, 487-495.
- Tumidajski P.J., Chan GW. (1996). Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity. *Cement and Concrete Research*, 26, 551-556.

บรรณานุกรม (ต่อ)

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.