สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 1

โครงการวิจัย

ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่สิ่งแวดล้อมทะเลของไทย

(Surface chloride content and chloride penetration of reinforced concrete structures in marine environment of Thailand)

โดย

ผศ.ดร. ทวีชัย สำราญวานิช
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

TK01165047
-7 ก.ค. 2558
354960

มีนาคม 2556

เรียนปริการ
-8 ต.ค. 2558

สนับสนุนโดยทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

คำนำ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ เป็นรายงานวิจัยของโครงการวิจัยเรื่อง "ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่สิ่งแวดล้อมทะเลของไทย" โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ซึ่งรายงานนี้เป็นรายงานผลวิจัยปีที่ 1 ของโครงการวิจัยเท่านั้น โดยตลอดโครงการวิจัยมีระยะเวลาทั้งสิ้นสองปี ดังนั้น ส่วนที่นำเสนอในรายงานนี้เป็นเพียงรายงานความก้าวหน้าของผลการดำเนินการวิจัยในปีที่หนึ่งเท่านั้น ยังไม่สิ้นสุดโครงการวิจัย

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์	4
2.2 ปริมาณคลอไรด์ตามที่มาตรฐานกำหนด	4
2.3 ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมล้อมทะเล	5
2.4 กลไกการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	7
2.5 ความเสี่ยงของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเหล็ก	10
2.6 ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต	11
2.7 การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต	12
2.8 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล	14
2.9 ปัญหาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล	15
2.10 สาเหตุของความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	15
2.11 หลักการเลือกคอนกรีตที่อาจมีปัญหาเนื่องจากการกัดกร่อนคลอไรด์	19
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 การทดลอง	22
3.1 รายละเอียดของสถานที่เก็บตัวอย่างคอนกรีต	22
3.2 รายละเอียดการทดลอง	28
3.3 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	30
3.4 วิธีการทดลอง	36

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย 40

4.1 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก 40

4.2 การกระจายตัวการแทรกซึมเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต 45

4.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย 63

บทที่ 5 สรุปผล 65

5.1 สรุปผล 65

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องมาจากการทำลายของคลอไรด์อิออนเป็นปัญหาที่พบมากสำหรับโครงสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณสิ่งแวดล้อมทะเล เช่น สะพาน ท่าเทียบเรือ กำแพงกันคลื่น เป็นต้น ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพและมีอายุการใช้งานที่สั้นลงกว่าที่คาดการณ์ไว้ ทำให้ต้องสูญเสียงบประมาณในการซ่อมแซมโครงสร้างให้มีสภาพพร้อมใช้งานเป็นจำนวนมาก และในบางกรณีก็ต้องสร้างโครงสร้างขึ้นมาใหม่ทดแทน ปัญหาเหล่านี้วิศวกรโยธาและผู้เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลก็ทราบและพยายามคิดหาวิธีในการป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาการเสื่อมสภาพขึ้น แต่ปัจจุบัน ประเทศไทยยังไม่มีวิธีการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลให้มีความคงทนในเชิงปริมาณ (Qualitative durability design) สำหรับใช้ออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลให้มีอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาตามที่วิศวกรผู้ออกแบบหรือเจ้าของโครงการต้องการ จึงเป็นปัญหาอย่างมากต่อการทำงานของวิศวกรและผู้เกี่ยวข้อง ดังนั้นถ้าหากมีมาตรฐานหรือวิธีสำหรับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลแล้ว ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการก่อสร้างในประเทศไทยอย่างมาก การที่จะพัฒนามาตรฐานสำหรับการออกแบบนี้จำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลที่มีอยู่ในประเทศไทยเพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการสร้างมาตรฐาน ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นในการหาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย เพื่อวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่เกลือคลอไรด์ของคอนกรีต ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีอายุการใช้งานยาวนานตามวัตถุประสงค์ ทั้งยังเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในอนาคตได้อย่างเหมาะสมอีกด้วย

โดยงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s) โดยคำนึงถึงปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น อายุของโครงสร้าง ระยะจากชายฝั่ง กำลังของคอนกรีต เป็นต้น เพื่อนำมาสนับสนุนการวิเคราะห์หาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s) ให้ได้ผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด และศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration profile) เพื่อที่จะได้ทราบถึงปริมาณคลอไรด์ที่ระยะต่างๆจากผิวหน้าของคอนกรีต โดยผลของการศึกษาสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม (C_d) ส่งผลให้ทราบถึงปริมาณเกลือคลอไรด์ที่จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม เพื่อใช้ในการออกแบบคอนกรีตที่มีความคงทนต่อเกลือคลอไรด์ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล อีกทั้งยังสามารถทำนายอายุของโครงสร้างที่ปลอดการซ่อมบำรุงได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวของโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย
2. เพื่อศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย
3. เพื่อวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต
4. เพื่อนำข้อมูลจากการวิจัยที่ได้ไปปรับปรุงส่วนผสมของคอนกรีตและออกแบบโครงสร้างคอนกรีต ให้มีความสามารถในการต้านทานคลอไรด์มากยิ่งขึ้น

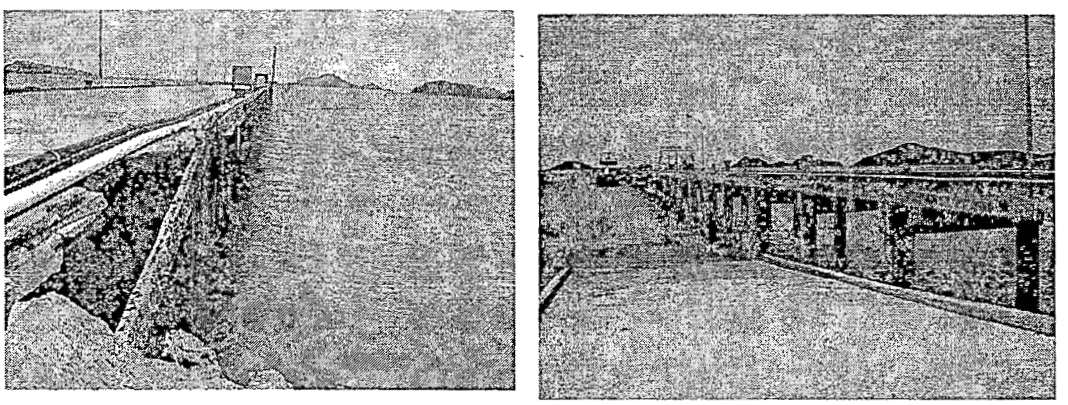
1.3 ขอบเขตการศึกษา

ทำการศึกษาค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวและการแทรกซึมคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทยบริเวณภาคตะวันออก ได้แก่ จังหวัดชลบุรี โดยเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างสะพาน ท่าเทียบเรือ และกำแพงกันคลื่น ที่มีอายุการใช้งานแตกต่างกัน และมีการใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่แตกต่างกัน แล้วนำมาวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บริเวณชายฝั่งทะเล หรือห่างจากทะเลไม่มากนัก มักพบปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเร็วกว่าที่ควรเป็น อันมาก ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งาน (Service life) ที่สั้น ทั้งนี้โดยมากเกิดเนื่องจากเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมแล้วดันให้เนื้อ ของคอนกรีตที่หุ้มอยู่เกิดการแตกร้าวหลุดร่อนเสียหาย ทำให้ต้องสูญเสียงบประมาณในการซ่อมแซมบำรุงรักษาจำนวนมาก ทั้งๆ ที่โครงสร้างดังกล่าวก็ใช้ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟตในการก่อสร้าง สาเหตุที่ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่สั้นส่วนหนึ่งเป็นเพราะว่าผู้ที่ เกี่ยวข้องในงานก่อสร้างยังขาดความรู้ความเข้าใจในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาพการทำลายที่รุนแรงของน้ำทะเล ทั้งนี้ในน้ำทะเลมีเกลือหลักๆ อยู่สองชนิดคือ เกลือคลอไรด์ (Cl^-) และเกลือซัลเฟต (SO_4^-) ซึ่งแต่เดิมวิศวกรมีความเข้าใจว่าคอนกรีตสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสิ่งแวด ล้อมทะเลต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า (Sulfate resisting Portland cement) ซึ่งต้านทานซัลเฟตเท่านั้นเป็นส่วนผสมจึงจะป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้าง คอนกรีตได้ แต่ความจริงแล้วปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้าเหมาะกับการใช้ในงาน คอนกรีตที่ต้องเผชิญเกลือซัลเฟตเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จะเห็นได้จากในปูนจะมีปริมาณสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อลดการเกิดสาร Ettringite ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวของคอนกรีต และลดการสูญเสียความสามารถยึดประสานของคอนกรีตเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนสาร C-S-H ให้เป็นสาร M-S-H ที่ไม่มีความสามารถยึดประสาน แต่เราสามารถใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้าในโครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็กที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียในชุมชน หรือในโครงสร้างบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงานซึ่งมีเกลือซัลเฟต แต่ไม่มีเกลือคลอไรด์ละลายอยู่ หรืออาจใช้งานคอนกรีตล้วนที่ต้องเผชิญทั้งเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ก็ได้ แต่ไม่มีเหล็กเสริมอยู่ภายในคอนกรีต เช่น พื้นคอนกรีตล้วนที่ไม่มีเหล็กเสริมแต่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย

2.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) คลอไรด์ในเนื้อของคอนกรีตนั้นอาจมีอยู่ในคอยกรีตเอง หรือมาจากภายนอกโครงสร้างคอนกรีตในช่วงเวลาที่ใช้งาน โดยคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเองนั้นอาจมาจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หิน ทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หิน ทราย จากแหล่งที่อยู่ใกล้ทะเล หรือในน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ซึ่งจะมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนมากจะมาจากคลอไรด์ภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาพแวดล้อมทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing salt)

โดยทั่วไปแหล่งที่มาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมาจากน้ำทะเล แต่ในโครงสร้างที่แช่ในน้ำทะเลตลอดเวลานั้น แม้คลอไรด์จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้มาก แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน หรือมีออกซิเจนในปริมาณที่ไม่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้นผลกระทบของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงมีไม่มากนัก

2.2 ปริมาณของคลอไรด์ตามที่มาตรฐานกำหนด

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ(2540) ระบุปริมาณการปนเปื้อนของคลอไรด์ในน้ำที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีต ควรมีปริมาณไม่เกินค่าต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารที่ยอมให้ในน้ำสำหรับผสมคอนกรีต

ชื่อสาร	ปริมาณที่ยอมให้(ppm.)
คลอไรด์	
-สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงหรืองาน	500
สะพาน	1,000
-สำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วๆไป	

(ที่มา: มาตรฐาน ว.ส.ท. 1014-40, 2540)

แต่ทั้งนี้ปริมาณรวมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต ในขณะที่ผสมคอนกรีต (ไม่รวมรวมถึงคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจากภายนอก ในภาวะการใช้งานของโครงสร้าง) ต้องมีไม่มากเกินกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดดังต่อไปนี้

- สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา หรือคอนกรีตอัดแรงแบบอัดแรงทีหลัง (Post-tension) ปริมาณคลอไรด์รวมในคอนกรีตต้องไม่เกิน 0.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

- สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการความทนทานสูง หรือคอนกรีตอัดแรงแบบอัดแรงก่อน (Pre-tension) หรือคอนกรีตอัดแรงแบบอัดแรงทีหลัง (Post-tension) ที่ต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์รวมในคอนกรีตต้องไม่เกิน 0.30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

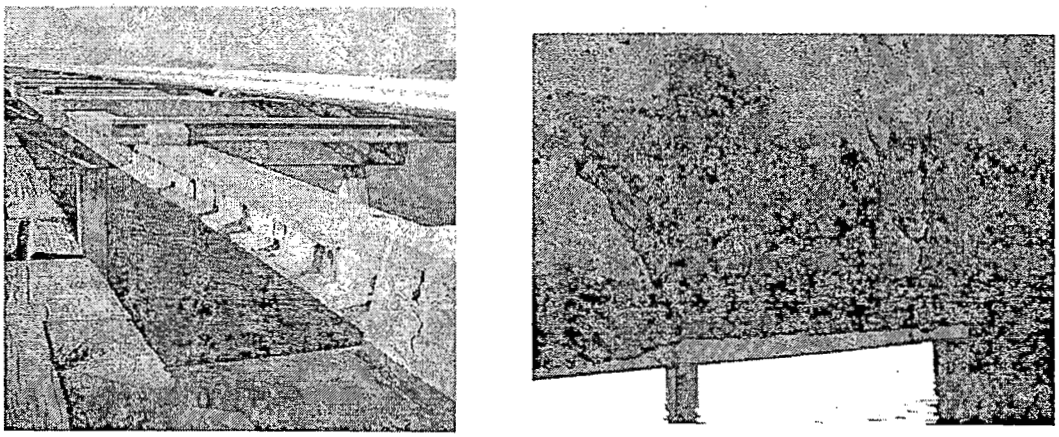
อนึ่งในกรณีของคอนกรีตผสมเสร็จ มาตรฐานดังกล่าวแนะนำว่าควรควบคุมปริมาณคลอไรด์ไว้ไม่ให้มากกว่า 0.30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ยกเว้นได้รับอนุมัติจากผู้ใช้จึงอาจควบคุมไว้ไม่ให้เกิน 0.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึงอย่างไรก็แล้วแต่ได้มีการศึกษาวิจัย และพบว่าถึงแม้คอนกรีตจะมีค่าความเป็นด่างสูง (ph = 13.20) ก็สามารถที่จะเกิดการสึกกร่อนของเหล็กเสริมได้ ถ้าหากมีปริมาณของคลอไรด์สูงอยู่ที่ประมาณ 8,000 ppm. และในขณะเดียวกันหากคอนกรีตมีความเป็นด่างลดลงเพียงเล็กน้อย (ph=11.60) การสึกกร่อนของเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณของคลอไรด์เพียง 71 ppm. เท่า

2.3 ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมล้อมทะเล

ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นปัญหาที่สำคัญ โครงสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลนั้นมักจะเกิดกรเสื่อมสภาพชำรุจ เสียหาย ซึ่งปัจจัยที่ทำโครงสร้างเหล่านั้นเสื่อมสภาพอาจเกิดได้จากหลากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น การกัดเซาะ การะล้าง การตกผลึกของเกลือ การทำลายโดยซัลเฟต แต่ปัจจัยที่สำคัญคือ ปัญหาที่เกิดจากการทำลายโดยเกลือคลอไรด์ โดยเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลนั้นจะมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างซึ่งจะทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพลง

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุดมักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำรองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเลจะมีความเสียงต่อการกร่อนของเหล็กเสริมน้อยมากในกรณีของสภาพที่เปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็ระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือเมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวสูงขึ้น ดังนั้นอิออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณที่ใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะ

เข้าไปสู่บริเวณคอนกรีตและบริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียกได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถ ทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของอิออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต ที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งอิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) จะมีปัญหาการกร่อนของเหล็กเสริม มากกว่าคอนกรีตที่ประสบภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณอิออน ของคลอไรด์ มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต



รูปที่2.2 ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย

2.4 กลไกลการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.4.1 กลไกลการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

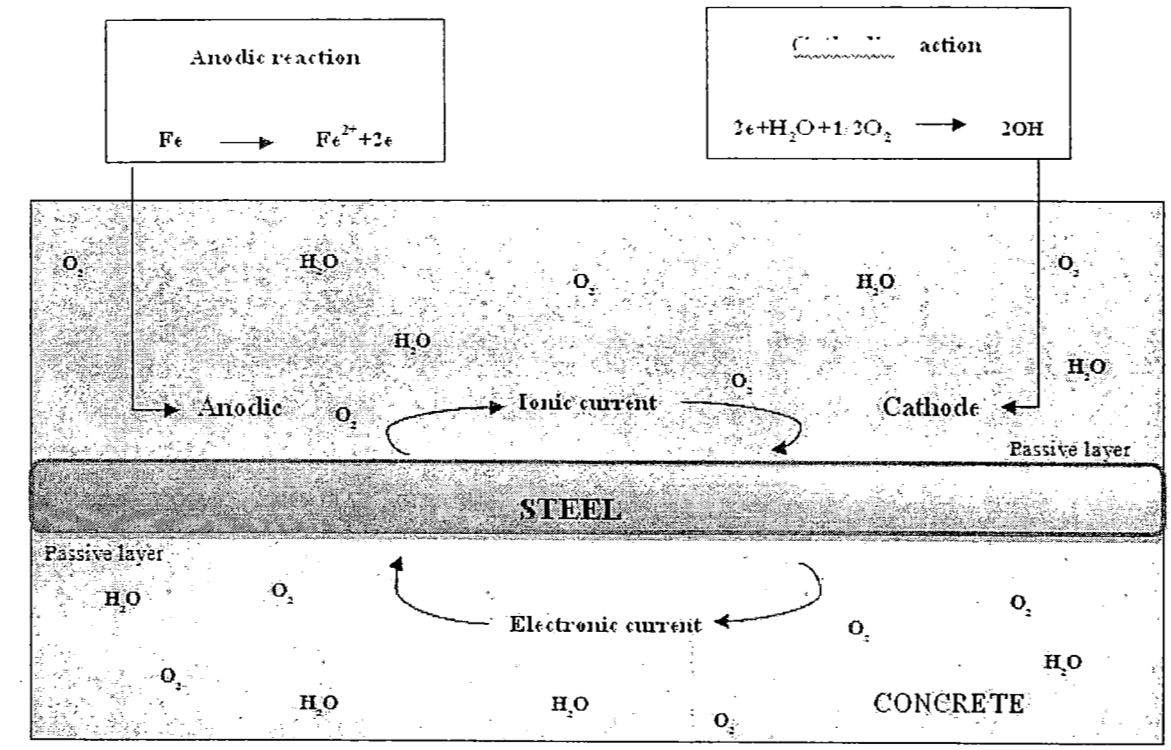
การทำลายโดยน้ำทะเลจะเกิดขึ้นได้ ทั้งจากเกลือซัลเฟต และเกลือคลอไรด์ แต่ต้นเหตุการเกิดสนิมเหล็ก จะมาจากเกลือคลอไรด์เป็นหลัก เนื่องจากน้ำทะเลมีสารละลายคลอไรด์อยู่เป็นส่วนใหญ่ (สูงกว่า 90 %) เมื่อเทียบกับซัลเฟต เมื่อคลอไรด์อิออนอิสระแทรกซึมลึกเข้าไปในเนื้อคอนกรีตถึงระดับใด จะทำให้ความเป็นด่าง(หรือค่า pH) ของคอนกรีต ในส่วนนั้น ลดลงเรื่อยๆจากระดับปกติ คือ ค่า pH เท่ากับ 12.5-13.5 ลงไปสู่ระดับค่า pH เท่ากับ 11 10 และ 9 สารละลายที่มีความเป็นด่างนี้ จะเป็นฟิล์มบางๆ ที่ช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริม ถูกทำลายด้วยปฏิกิริยา Electrolysis ซึ่งจะทำให้เนื้อเหล็กถูกกัดกร่อนอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อความเป็นด่างลดลงถึงระดับวิกฤต(มีค่า pH ต่ำกว่า 9.0) แต่การทำลายเนื้อเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน molar ratio ระหว่างคลอไรด์อิออน ต่อไฮดรอกซิลอิออน (Cl^-/OH^-) เป็นสำคัญ ดังนั้น ถึงแม้ค่า pH ในคอนกรีตจะสูงกว่า 11.5 เหล็กเสริมก็ยังมีโอกาส เกิดเป็นสนิมได้ ถ้าค่าอัตราส่วน molar ratio นี้สูงกว่า 0.6

2.4.2 กลไกลการเกิดการทำลายโดยปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

ณัฐมนต์ และ จุลเศรษฐ์ (2545) ปริมาณของคลอไรด์เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการผุกร่อนเป็นสนิมของเหล็กเสริม และถ้าหากว่ามีปริมาณคลอไรด์ในปริมาณที่มากพอในระหว่างการผสมคอนกรีต อาจมีผลทำให้ Passivity Film ไม่เกิดขึ้นได้

ภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งที่ได้คือ $Ca(OH)_2$ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่างทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง คือมีค่า pH ประมาณ 12.5 – 13.5 ความเป็นด่างของคอนกรีตจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมภายใน โดยจะเกิดชั้นฟิลม์บางๆ ของ γ -Fe_2O_3 เคลือบผิวเหล็กไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็ก จึงไม่เกิดสนิมขึ้น สภาพเช่นนี้เรียกว่า Passivity อย่างไรก็ตามคลอไรด์จากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตจนถึงชั้นของเหล็กเสริมและทำลายชั้นฟิล์มดังกล่าว ประกอบกับมีน้ำหรือความชื้นและก๊าซออกซิเจนภายในคอนกรีต ทำให้กระบวนการเกิดสนิมจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นในลักษณะของเซลกัลวานิค (Galvanic cell) เนื่องจากเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวของเหล็กเสริม ซึ่งมีสาเหตุจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมคอนกรีต ความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นสารละลายเกลือภายในช่องว่างคอนกรีต ฯลฯ ทำให้เกิดสภาพขั้วบวกและขั้วลบ (Cathode and anode) เกิดการไหลของ

กระแสไฟฟ้าโดยมีสารละลายของเกลือคลอไรด์ในช่องว่างคอนกรีตเป็นสื่ออิเลคโตรไลต์ให้อิเลคตรอนวิ่งผ่านปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของกระบวนการเกิดสนิมจะเริ่มจากที่ขั้ว Anode เหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสอิออน (Fe_2^+) เข้าสู่สภาพสารละลาย ส่วนอิเลคตรอน (e^-) จะวิ่งผ่านไปตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้ว Cathode ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาอะโนดิค (Anodic reaction) จากนั้น e^- จากปฏิกิริยาอะโนดิคจะไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นไฮดรอกซิลอิออน (OH^-) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาคะโธดิค (Cathodic reaction) และเมื่อ Fe_2^+ รวมตัวกับ $(OH)^-$ จะเกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) ซึ่งจะออกซิไดซ์ต่อไปเป็นไฮเดรตเฟอร์ริกออกไซด์ ($Fe_2O_3.H_2O$) หรือสนิมเหล็กในที่สุด สนิมที่เกิดขึ้นมีปริมาตรมากกว่าเนื้อเหล็กเดิมหลายเท่า ซึ่งอาจมากถึง 6 เท่า ส่งผลให้เกิดการขยายตัวและดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย โดยระยะทางที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีอาจยาวตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร จนถึงมากกว่า 6 เมตร ทำให้สนิมอาจเกิดต่างบริเวณกับจุดที่เกิดการกัดกร่อนของเนื้อเหล็ก และเมื่อเหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนจากสนิมมากขึ้นเรื่อยๆ คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมก็จะเกิดการแตกร้าวไปตามแนวของเหล็กเสริม(Splitting crack) จนในที่สุดก็จะหลุดล่อน (Spalling) ออกมา โดยชั้นของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอาจจะหลุดกะเทาะออกมาเป็นบริเวณกว้าง ถ้าหากเหล็กเสริมเกิดสนิมอย่างรุนแรง นอกจากนี้ในสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงอย่างเช่นในน้ำทะเล เหล็กเสริมอาจจะถูกกัดกร่อนเป็นรอยลึกขนาดใหญ่ที่เรียกว่า Pitting Corrosion ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงอย่างมากและอาจเป็นอันตรายต่อการรับกำลังของโครงสร้างคลอไรด์จากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้หลายวิธี เช่น การดูดซึมเนื่องจากแรง Capillary Suction การแพร่ของคลอไรด์อิออนจากภายนอกที่มีความเข้มข้นสูงกว่าภายใน และการซึมผ่านเนื่องจากแรงดันของน้ำ โดยความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการซึมผ่านของคอนกรีตเป็นสำคัญ คลอไรด์เมื่อซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตจะถูกจับยึดไว้โดยทางเคมีและทางกายภาพ (Chemical and physical binding) และบางส่วนที่ไม่ถูกจับยึดจะเป็นคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม



$Fe^{2+} + 2OH \longrightarrow Fe(OH)_2$ ---------- Ferrous hydroxide

$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3$ ---------- Ferric hydroxide

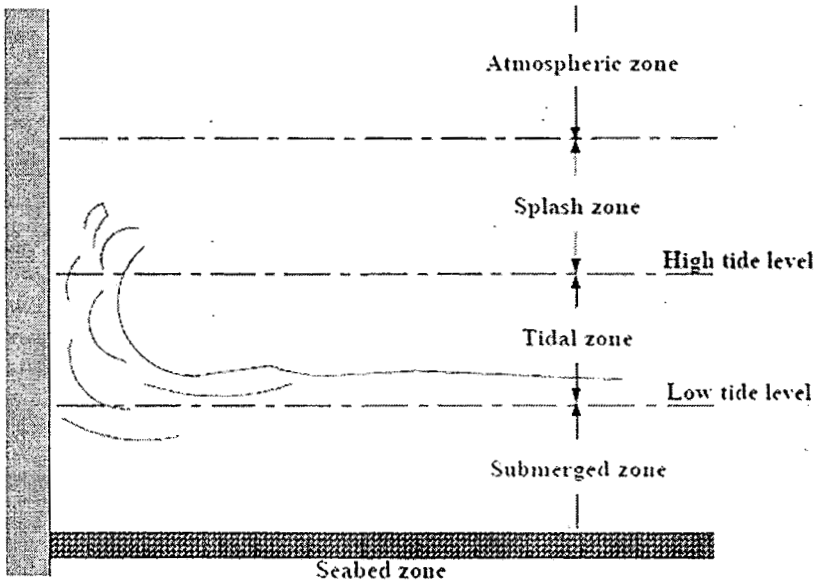
$2Fe(OH)_3 \longrightarrow Fe_2O_3 \cdot H_2O - 2H_2O$ ---------- Hydrated ferric oxide (rust)

$\frac{Vol_{Fe_2O_3 \cdot H_2O}}{Vol_{Steel}} = 2 \longrightarrow 10$ ---------- คอนกรีตแตกร้าวและหลุดร่อน

รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์
(ที่มา : http://www.bucc4.buu.ac.th~twc,2547)

2.5 ความเสี่ยงของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเหล็ก

ความเสี่ยงที่เกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีมากที่สุดในบริเวณโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณคลื่นละอองน้ำ รองลงมาเป็นบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงซึ่งแสดงดังภาพ



รูปที่2.4 ลักษณะของโครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเล

บริเวณบรรยากาศทะเล (Marine atmospheric zone) คอนกรีตบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ถูกลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่ง ทิศทางและความแรงของกระแสลมที่จะพัดละอองน้ำหรือไอเกลือไปถึง ซึ่งแม้แต่โครงสร้างที่อยู่บนฝั่งห่างจากชายทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับเกลือคลอไรด์และซัลเฟตจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่จะเกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมการผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือการแข็งตัวและละลายของน้ำโดยอาจเริ่มจากมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ง่ายขึ้น

บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) คือบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล และอยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลง ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกและแห้งสลับกันคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ประกอบกับมีความชื้นและก๊าซออกซิเจนสูงในช่องว่างของคอนกรีตทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว ส่วนการกัดกร่อนโดยซัลเฟ

ตจะไม่รุนแรงเท่าบริเวณ Tidal Zone หรือ Submerged Zone นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความเสียหายได้จากการผุกร่อนเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น การแข็งตัวและละลายของน้ำ คอนกรีตในบริเวณนี้มักพบว่าเกิดความเสียหายรุนแรงกว่าส่วนอื่นๆ

บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) คือบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด (HighTide and Low Tide) คอนกรีตบริเวณนี้จะอยู่จมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนอยู่ในสภาพแห้งคล้ายกับบริเวณ Splash Zoneความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเกิดสนิมในเหล็กเสริม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การขัดสีจากทรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในกระแสน้ำ การแข็งตัวและละลายของน้ำ การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด

บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) คือบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำลงต่ำสุด คอนกรีตในส่วนนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้เกิดจากการกัดกร่อนโดยซัลเฟตการเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะพบได้น้อยเนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอ การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ

ตามที่ได้กล่าวมาสภาวะเปียกสลับแห้งมีอิทธิพลโดยตรงต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ รวมไปถึงการได้รับผลกระทบเนื่องจากทิศทางการพัดพาของน้ำทะเล กระแสลม อุณหภูมิ ความชื้น แสงอาทิตย์ และลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง ซึ่งแต่ละส่วนของโครงสร้างก็ย่อมมีโอกาสสัมผัสกับสภาวะเปียกสลับแห้งที่แตกต่างกัน การที่คอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียก เป็นการเร่งให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ด้วยเหตุนี้คอนกรีตบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง(Tidal zone) จึงเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์น้อยกว่าบริเวณคลื่นและละอองของน้ำทะเล (Splash zone)

2.6 ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต

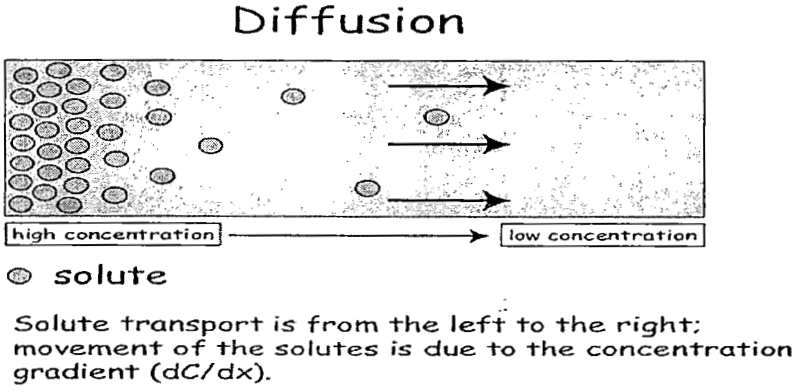
2.6.1 คลอไรด์ที่ถูกจับยึด (Fixed chloride) คือคลอไรด์ที่ถูกจับยึดให้อยู่ในผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่น เช่น ผลผลิตของC_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Friedal's salt) หรือ $3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Calcium chloroferrite) และเกิดปฏิกิริยาโดยเปลี่ยนไปในรูปของ Calcium chloro-aluminate hydrate ที่เรียกว่า Friedal's salt หรือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับไว้ที่ผิวของ gel pores และบางส่วนอาจถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยซึ่งคลอไรด์ประเภทนี้ไม่มีผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตคลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชั่นเช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยาเช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย

2.6.2 คลอไรด์อิสระ(Free chloride) คือ คลอไรด์ที่มีสภาพเป็นสารละลาย ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต โดยคลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ซึ่งถ้ามีคลอไรด์ประเภทนี้ในปริมาณที่มากพอก็จะสามารถทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมเปียกสลับแห้งเช่น บริเวณคลื่นละอองน้ำ (Splash zone) หรือ บริเวณ น้ำขึ้น น้ำลง (Tidal zone) จะได้รับผลกระทบจากการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนที่ค่อนข้างรุนแรงกว่าโครงสร้างที่อยู่ในสภาพเปียกตลอดเวลา เช่น บริเวณใต้ทะเล (Submerged zone)

2.7 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

เนื่องจากคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำทะเล จึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่างๆของคอนกรีตได้ซึ่งมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมซึ่งจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสื่อมสภาพลงโดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่านดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งเป็น 4 กลไก ดังนี้

2.7.1 การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่นี้จะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อิ่มตัว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์อิออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของอิออนโดยคลอไรด์อิออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนสูง ไปยัง บริเวณที่มีที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนต่ำ



รูปที่ 2.5 ลักษณะการแพร่

$$\frac{\partial C_t(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial^2 x} \qquad (2.1)$$

โดยที่ $C_t(x,t)$ 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)

$$C_d = \frac{(C_s - C_0)\left[1 - erf\left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t}}\right)\right] + C_0}{B} \times 100 \qquad (2.2)$$

โดยที่ C_d คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม (%โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (กก./ม^3)

C_0 คือ ปริมาณคลอไรด์ในปฏิภาคส่วนผสม

c คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม.)

D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.^{2}/ปี)

t คือ อายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปี)

B คือ น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กก./ม.^{3})

2.7.2 การดึงดูดแบบคาพิวลารี (Capillary suction) โดยการดึงดูดแบบคาพิวลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆ ที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบคาพิวลารีซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น

2.7.3 การดึงดูดอิออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลาพว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นสูงกว่า ปรากฏการณ์นี้ไม่สมารถอธิบายโดยกลการแพร่ได้ เพราะการแพร่จะยุติลงเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดอิออนจะสูงขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีต จะดึงดูดคลอไรด์อิออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น

2.7.4 แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำเช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์อิออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำและเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสถาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยที่ในคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตนั้นสัมผัสอยู่จะแพร่จากคนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูงไปสู่คอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำกว่า และเมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ในเนื้อของคอนกรีตแล้วคลอไรด์ก็จะแพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า จึงทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

2.8 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล

ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride condensation ซึ่งเกิดได้ในสองลักษณะดังนี้

1. ในกรณีของสภาวะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิวของคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวของคอนกรีตทิ้งคราบเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้งแต่พอ

คอกรีตเข้าสู่สภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆรอบก็ทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

2. ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือในน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้าเนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชั่น เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ดีในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลาถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากก็มักไม่เป็นอนตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิมยกเว้นแต่ว่าในบริเวณที่ติดกับคอนกรีตจะมีส่วนที่สภาวะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดินซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจแพร่เข้าไปสู้บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวดินมีมากขึ้น และในบริเวณผิวดินที่มีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจทำให้โครงสร้างบริเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้

2.9 ปัญหาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อย หรือบริเวณชายฝั่ง รวมทั้งโครงสร้างใต้ดินบริเวณนั้น จะประสบปัญหาความเสียหายอย่างมากจากสภาพแวดล้อม ดังนั้นการออกแบบให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานตามที่ต้องการ จะต้องคำนึงถึงการต้านทานความเสียหายที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งคอนกรีตเป็นส่วนสำคัญเนื่องจากเป็นด่านแรกของโครงสร้างที่จะต้านทานความเสียหาย

แต่เดิมมีความเข้าใจกันว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ซึ่งมี C_3A ต่ำ จะเหมาะกับโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำทะเลแต่เมื่อพิจารณาองประกอบของน้ำทะเลแล้วเพราะ ในน้ำทะเลมีส้วนประกอบของซัลเฟตอยู่เพียงแค่ 10% ส่วนคลอไรด์นั้นมีถึง 90 %

นอกจากโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำทะเลแล้วโครงสร้างที่สัมผัสกับทะเลที่อาจอยู่ห่างจากชายฝั่งหลายกิโลเมตร ก็ยังจัดว่าเป็นโครงสร้างที่ต้องคำนึงถึงความต้านทานของน้ำทะเลเช่นกัน เนื่องจากเกลือในอากาศ สามารถแพร่ไปถึงโครงสร้างที่ห่างจากทะเลได้ถึง 3 กิโลเมตร

2.10 สาเหตุของความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

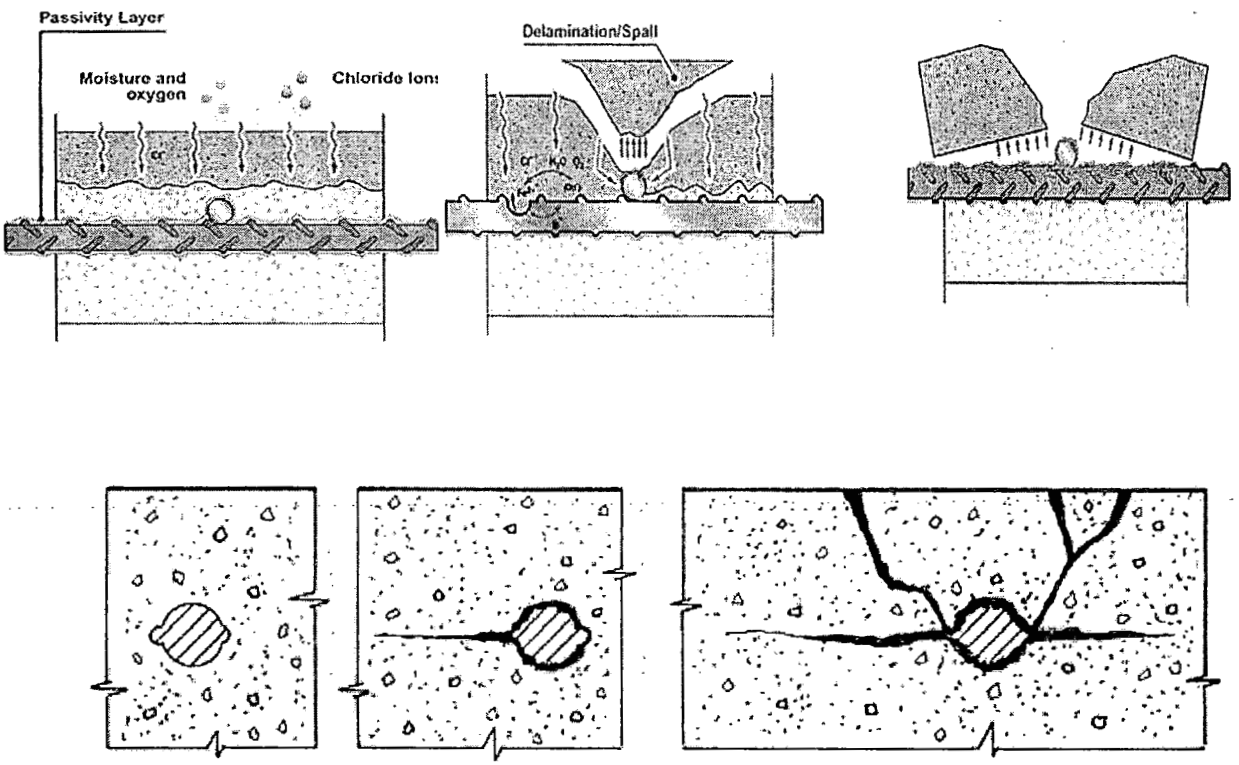
ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลของประเทศไทยเกิดจากหลายสาเหตุพร้อมๆกัน

1. สาเหตุทางเคมี ได้แก่ การกัดกร่อนของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ และความเสียหายของเนื้อคอนกรีตจากซัลเฟต โดยเฉพาะแมกนีเซียมซัลเฟต

2. สาเหตุทางกายภาพ แบ่งออกเป็นความเสียหายทางตรงและทางอ้อม สาเหตุทางตรงได้แก่ การกัดกร่อนจากคลื่น กรวด และทราย สาเหตุทางอ้อม ได้แก่ แรงตึงผิวตามสภาพเปียก และแห้งแรงดันน้ำ รอยแตกร้าว และรอยต่อที่มีปัญหาซึ่งทำให้ความเสียหายทางเคมีเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น

2.10.1 คลอไรด์ สาเหตุสำคัญของการกัดกร่อนโดยเหล็กเสริม

คลอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเลจะซึมเข้าเนื้อคอนกรีต โดยคลอไรด์อิสระจะเป็นส่วนสำคัญทำให้เหล็กเสริมภายในเกิดสนิม สนิมเหล็กจะทำให้คอนกรีตเสียการยึดเกาะกับเหล็กเสริม และจะขยายตัวทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเกิดการหลุดร่อน นอกจากนั้น พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมจะลดลงทำให้โครงสร้างพังทลายได้



เริ่มแรก เมื่อมี O_2 และ H_2O เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมและคอนกรีตเกิดการหลุดร่อน

รูปที่2.6 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเลหรือน้ำ

(ที่มา : http://www.cpac.co.th/frame_tec.html)

2.10.2 ซัลเฟต ต้นเหตุของความเสียหายในเนื้อคอนกรีต

เกลือซัลเฟตที่อยู่ในรูปของแข็งจะไม่ทำอันตรายต่อคอนกรีต แต่ถ้าอยู่ในสภาพสารละลายสามารถทำอันตรายต่อคอนกรีตได้มาก เนื่องจากสารละลายซัลเฟตจะค่อยๆ ซึมผ่านเข้าไปภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยาเคมีกับซีเมนต์เพสต์ เกลือซัลเฟตที่พบในน้ำทะเลจะเป็นพวกแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$), โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4), โปแตสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) และแคลเซียมซัลเฟต($CaSO_4$) แต่แมกนีเซียมซัลเฟตมีความเข้มข้นสูงกว่า และมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดีกว่าเกลือซัลเฟตอื่นๆ จึงสามารถทำอันตรายต่อคอนกรีตได้มากกว่าในน้ำทะเลยังมีแมกนีเซียมซัลเฟต ที่มีอันตรายอย่างมากต่อคอนกรีต โดยซัลเฟตอิออน จาก แมกนีเซียมซัลเฟตนอกจากทำปฏิกิริยากับ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะกลายเป็นยิปซัมและก่อให้เกิดการขยายตัวของเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตแตกร้าวปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S), ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)และ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) จะทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.Al_2O_3.6H_2O$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ตามสมการที่ 2.3, 2.4 และ2.5

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2.3)$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2.4)$$

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \quad (2.5)$$

เมื่อแมกนีเซียมซัลเฟตจากน้ำทะเลแพร่กระจายเข้ามาในโพรงหรือช่องว่างคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งจะเป็นดังนี้

1. แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ได้สารประกอบคือแคลเซียมซัล-โฟอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$) หรือ Ettringite แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) และน้ำ (H_2O) ตามสมการที่ 2.6

$$2(3CaO.Al_2O_3.12H_2O) + 3(MgSO_4.7H_2O) \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O + 2Al(OH)_3 + 3Mg(OH)_2 + 8H_2O \quad (2.6)$$

2. แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากคอนกรีต เกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟต($CaSO_4.2H_2O$) หรือยิปซัม (Gypsum) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ตามสมการที่ 2.7

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4.7H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + Mg(OH)_2 + 5H_2O \quad (2.7)$$

แคลเซียมซัลเฟตที่ได้จากสมการ 2.7 เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องโดยทำปฏิกิริยาแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต เกิดเป็นแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต (Ettringite) ตามสมการที่ 2.8

$$3CaO.Al_2O_3.12H_2O + 3(CaSO_4.2H_2O) + 13H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O \quad (2.8)$$

3. แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.nH_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟต เกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ($SiO_2.nH_2O$) ตามสมการที่ 2.9

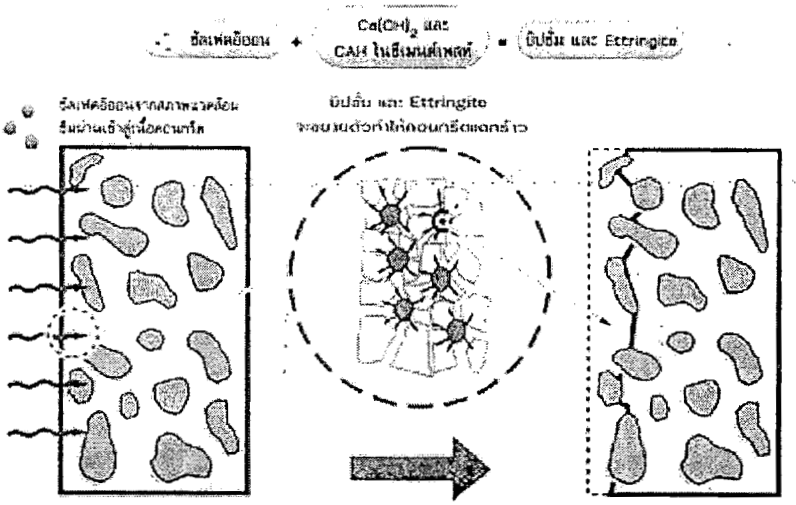
$$3CaO.2SiO_2.nH_2O + MgSO_4.7H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + Mg(OH)_2 + SiO_2.nH_2O \quad (2.9)$$

แคลเซียมซัลเฟตที่ได้จากสมการ 2.9 อาจทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตเกิดเป็น Ettringite ตามสมการ 2.8 ได้อีก

แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเกิดตามสมการที่ 2.6 , 2.7 หรือ 2.9 จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจลเกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (4MgO.SiO2.8.5H2O) ตามสมการที่ 2.10

$$4Mg(OH)_2 + SiO_2.nH2O \longrightarrow 4MgO.SiO2.8.5H2O + (n\text{-}4.5)H_2O \quad (2.10)$$

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นข้างต้น แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต เป็นสารที่มีการขยายตัวมาก โดยมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้นจากสารเดิมประมาณ 2 เท่า ทำให้เกิดแรงดันภายในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหาย อกจากนี้การสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นสารประกอบที่เป็นตัวยึดประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต แต่ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานแทน ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวและ ณ สมบัติในการรับกำลังของคอนกรีตก็จะลดลง



รูปที่ 2.7 กระบวนการกัดกร่อนของเกลือซัลเฟต

(ที่มา : http://www.cpac.co.th/frame_tec.html)

2.11 หลักการเลือกคอนกรีตที่อาจมีปัญหาเนื่องจากการกัดกร่อนคลอไรด์

การเลือกคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ มีเพื่อไม่ให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปทำลายจนถึงชั้นของเหล็กเสริมได้ แนวทางการเลือกคอนกรีตในทางปฏิบัติมีดังนี้

1. การใช้วัสดุปอซโซลาน

การใช้เถ้าถ่านหินตะกรันเตาถลุงและซิลิกาฟูม สามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปคอนกรีตได้ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานจะทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การแทรกซึมของสารเคมีเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้ยากขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้สนกำลังของคอนกรีตควบคู่กันไปด้วย

2. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะมีความทึบน้ำและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี มาตรฐาน ACI 201.2 R ได้กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟตและคลอไรด์สูง มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไม่เกิน 0.40 ถึง 0.45 และนอกจากนั้นยังพบว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงในคอนกรีตธรรมดาจะสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินถึงแม้จะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงก็มีความทึบน้ำอยู่แล้ว ส่วนการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงก็จะทำให้อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงไม่มากนัก ส่วนคอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงจะมีความพรุนมาก อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าสูง แต่พอปรับใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำลง จึงส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงค่อนข้างชัดเจน

3. ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

ถ้าเพิ่มระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กให้มากขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มระยะทางการเดินทางในการแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปถึงเหล็กเสริม มาตรฐาน ACI 201.2R ได้กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่ซัลเฟตและคลอไรด์สูง มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 5 ถึง 6 เซนติเมตร เพื่อลดการการเสี่ยงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

Soroka (1993) การซึมผ่านของคลอไรด์อิออนจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ มีน้ำอยู่ในระบบโพรงที่อยู่นิ่ง ในคอนกรีตที่ค่อนข้างแห้งน้ำจะเป็นตัวพาคลอไรด์อิอนเข้าไปในคอนกรีต และเมื่อคอนกรีตอิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำจะเป็นตัวกลางให้คลอไรด์อิอนผ่านเข้าไปในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้งจะเกิดกลไกทั้งสองกรณี ซึ่งอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

กมล (2545) คลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเล (และในน้ำกร่อย) ซึ่งมีความสามารถที่จะแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้ ถ้าหากว่าอยู่ในสภาพหรือมีปัจจัยที่เหมาะสม โดยคลอไรด์ที่มีบทบาทที่สำคัญในการทำลายจะเป็นในส่วนของคลอไรด์อิสระ(Free chloride) ซึ่งการทำลายดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543), ทวีชัย สำราญวานิช (2547) โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของการแทรกซึมของคลอไรด์อิออนนั้นสามารถแบ่งออกได้ใน 4 ลักษณะดังนี้

1. โดยการแพร่กระจาย (Diffusion) : เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของความเข้มข้นของคลอโรด์ในคอนกรีต

2. โดยการเคลื่อนย้าย (Migration) : เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า(หรือปริมาณของอิออน) ในคอนกรีต

3. โดยการพา (Convection) : เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งในคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่กระบวนการเกิด Capillary suction นั่นเอง

4. โดยการซึมผ่าน (Permrability) : เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างทางด้าน hydraulic pressure ในคอนกรีต

2.12.2 การวัดระยะคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีต

ชัยชาญ (2546) โดยคอนกรีตที่คลอไรด์ซึมผ่านถึงเมื่อทำปฏิกิริยากับสารดังกล่าวจึงจะมีสี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วน้ำยาซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate) ที่ใช้จะมีความเข้มข้น 0.1N และระยะที่สารละลายดังกล่าวเปลี่ยนเป็นสีเทา คือระยะที่คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีต

ณัฐมนต์ และจุลเศรษฐ์ (2545) การตรวจสอบปริมาณ Chloride สามารถกระทำได้ง่าย ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Chloride analyser หรืออาจใช้กระบวนการทางเคมีในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 114 ก็ได้ โดยนำคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ มาทดสอบหาปริมาณ Chloride และหากเราทำการพล็อตกราฟเทียบกับระยะความลึก ก็จะได้แนวโน้มของการซึมผ่านของ Chloride ซึ่งจะทำให้เราสามารถประเมินระยะเวลาที่เหลืออยู่ ก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมได้โดยประมาณ ซึ่งเกณฑ์ในการพิจารณาปริมาณ Chloride ions สูงสุดที่ยอมรับได้คือไม่เกิน 0.4% ต่อน้ำหนักของซีเมนต์

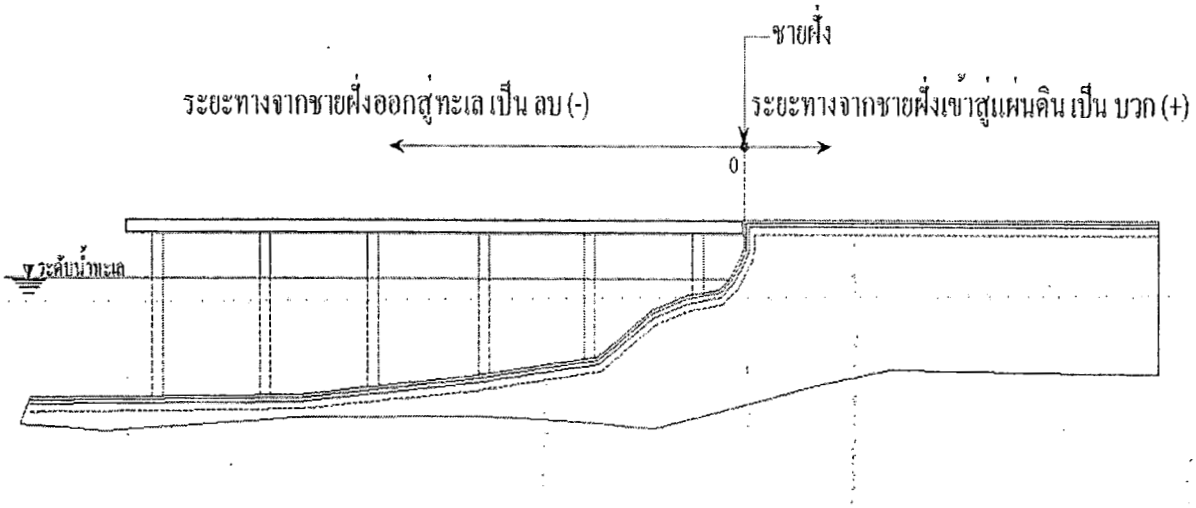
บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 รายละเอียดของสถานที่เก็บตัวอย่างคอนกรีต

3.1.1 สถานที่ตั้งและตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างคอนกรีต

สถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ทำการศึกษานี้อยู่ในพื้นที่อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ดังตารางที่ 3.1 โดยทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากโครงสร้างสะพานท่าเทียบเรือ ส่วนตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างนั้นอาจจะเป็นชิ้นส่วนคาน หรือเสาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น โดยเลือกเก็บตัวอย่างเฉพาะบริเวณที่รับลมทะเล (ทิศตะวันตกเฉียงใต้) ทำการบันทึกข้อมูลทั่วไปของโครงสร้างไปพร้อมกัน อาทิเช่น อายุโครงสร้าง ระดับความสูงของตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างกับระดับน้ำทะเลต่ำสุด และระยะทางจากชายฝั่ง เป็นต้น ทั้งนี้กำหนดให้ระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดินเป็นบวก และระยะทางจากชายฝั่งออกสู่สู่ทะเลเป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะการวัดระยะทางจากชายฝั่ง

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

ตารางที่ 3.1 ประเภทและสถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและระยะทางจากชายฝั่งในการเก็บตัวอย่าง

ประเภทของโครงสร้าง	สถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุ (ปี)	ระยะทางจากชายฝั่ง(เมตร)	ความสูง (เมตร)	สภาวะของโครงสร้างส่วนที่เก็บตัวอย่าง
สะพาน	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	40	0	0	สภาวะละอองคลื่น (Splash zone)
		40	-340	1.5	
		40	-480	1.5	
	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	10	-10	0.5	
		10	-10	0.8	
		10	-10	0.5	
	ถนนหาดนางรำ กองทัพเรือ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	42	0	3	สภาวะบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone)
		42	-150	3	
		42	-300	3	
	ถนนบ้านแสมสาร อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	30	0	0.5	สภาวะละอองคลื่น (Splash zone)
		30	-100	1.5	
		30	-200	1.5	
กำแพงกันคลื่น	ถนนท่าเทียบเรือจักรกรีนฤเบศร์ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	42	-10	0.5	สภาวะบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone)
		42	0	1.5	
เสาไฟฟ้า	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	20	50	2.5	สภาวะบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone)
		20	[illegible]	3	

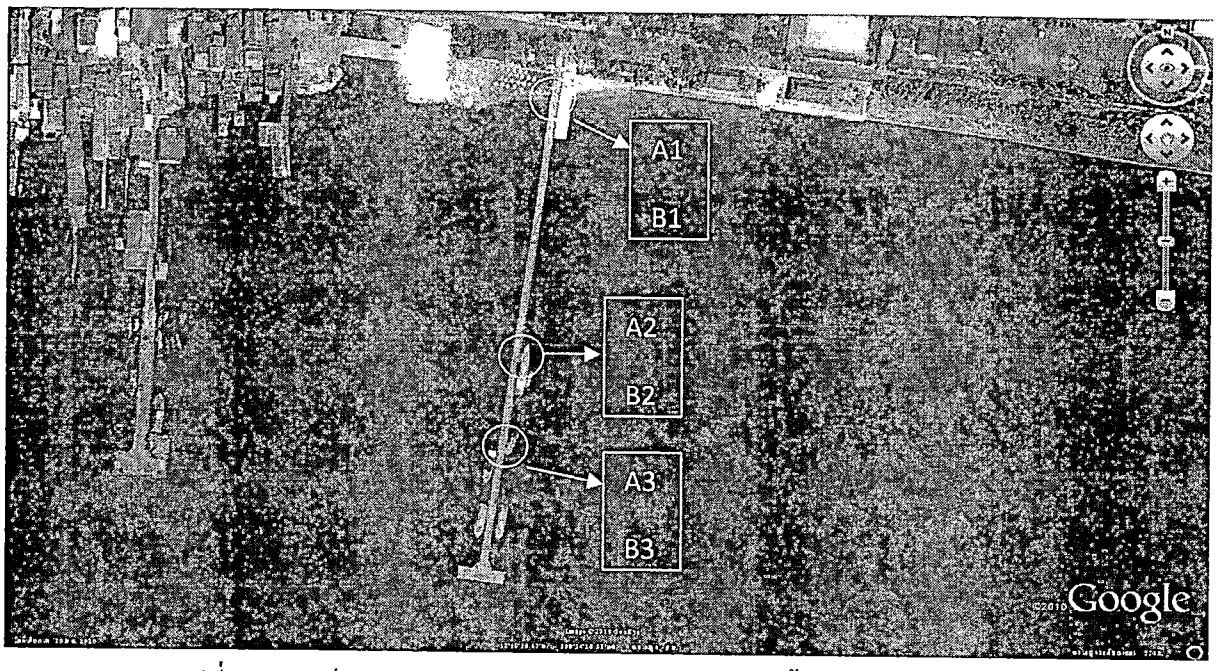
624.18347
ท193ป
ฉ.4
354960

ภาพถ่ายทางอากาศแสดงสถานที่และระบุชนิดของโครงสร้างและตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่าง

กำหนดให้ : A = ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างผิวหน้าของคอนกรีต

B = ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะความลึกต่างๆ

1. สะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



รูปที่ 3.1 การเก็บตัวอย่าง ณ สะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำ อ.สัตหีบ จ. ชลบุรี

ชนิดของโครงสร้าง : สะพาน

ตำแหน่ง : บริเวณขอบสะพาน

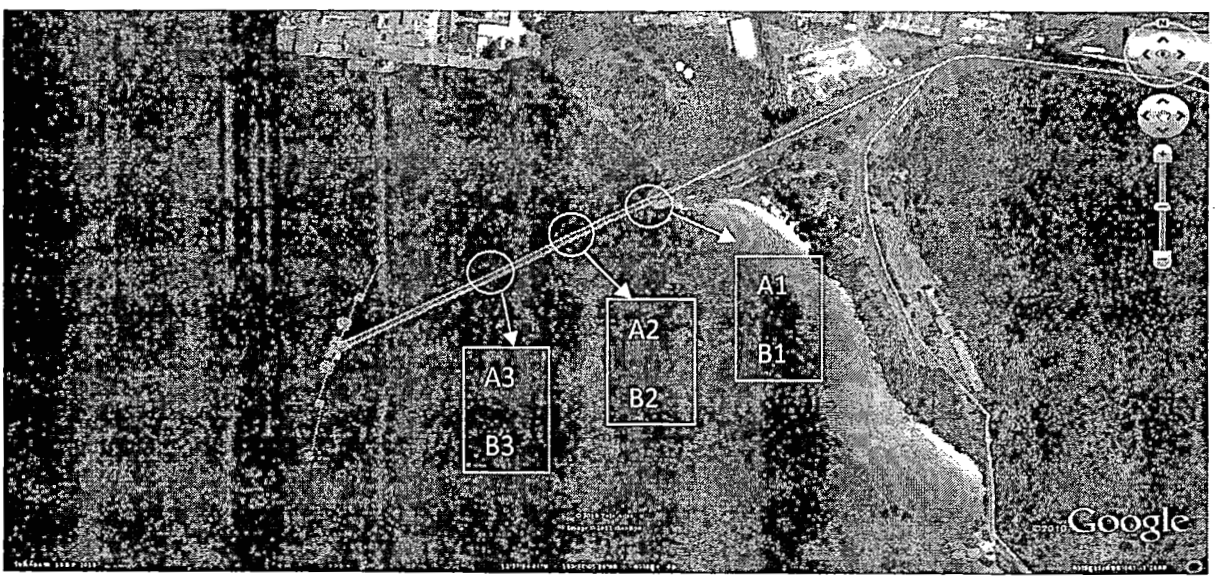
2. สะพานเทศบาล1 อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

รูปที่ 3.2 การเก็บตัวอย่าง ณ สะพานเทศบาล1 อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

ชนิดของโครงสร้าง : สะพาน

ตำแหน่ง : บริเวณเสาของสะพาน

3. สะพานท่อส่งน้ำมัน อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

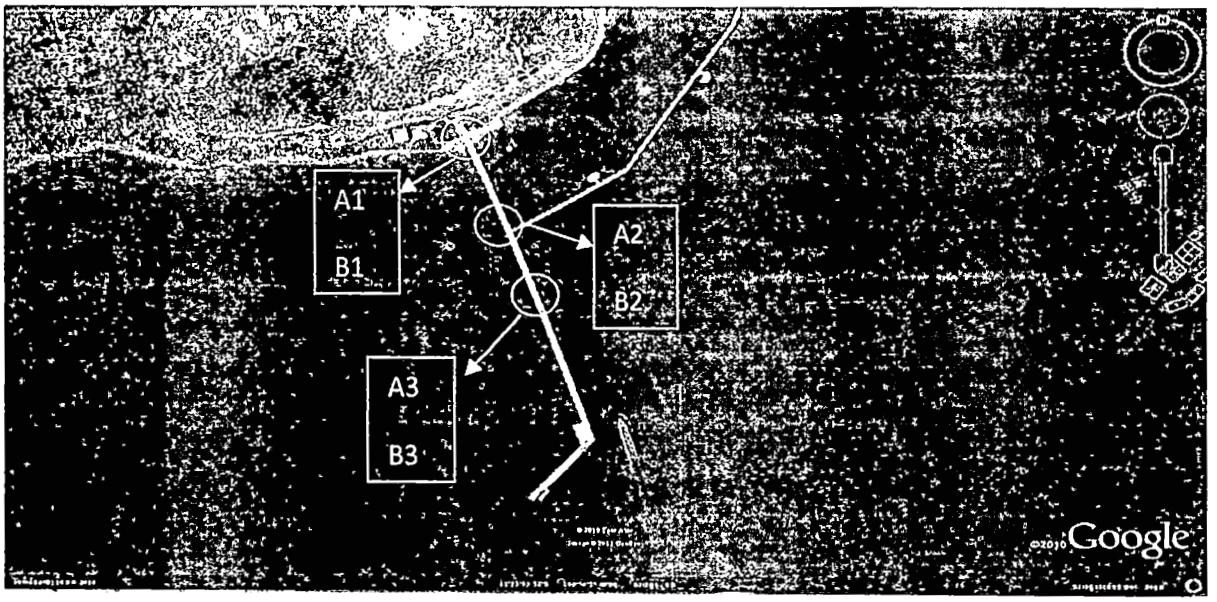


รูปที่ 3.3 การเก็บตัวอย่าง ณ สะพานท่อส่งน้ำมัน อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

ชนิดของโครงสร้าง : สะพาน

ตำแหน่ง : บริเวณขอบสะพาน

4.สะพานแสมสาร อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



รูปที่ 3.4 การเก็บตัวอย่าง ณ สะพานแสมสาร อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

ชนิดของโครงสร้าง : สะพาน

ตำแหน่ง : บริเวณขอบสะพาน

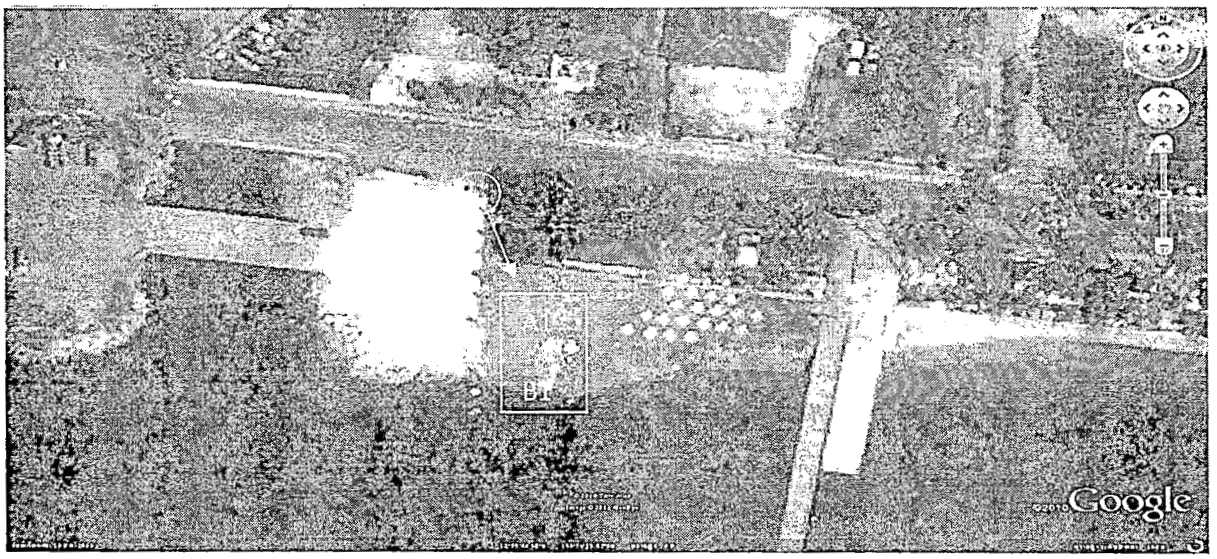
5.กำแพงกั้นคลื่น อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

รูปที่ 3.5 การเก็บตัวอย่าง ณ ตำแหน่งกำแพงกั้นคลื่น อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

ชนิดของโครงสร้าง : กำแพงกั้นคลื่น

ตำแหน่ง : บริเวณขอบกำแพงกั้นคลื่น

6. เสาไฟฟ้า อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



รูปที่ 3.6 การเก็บตัวอย่าง ณ ตำแหน่งเสาไฟฟ้า อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

ชนิดของโครงสร้าง : เสาไฟฟ้า

ตำแหน่ง : บริเวณเสาไฟฟ้า

3.1.2 การทดลองหาปริมาณความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต

ทำการทดลองหาปริมาณความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต แล้วนำผลมาวิเคราะห์ร่วมกับปัจจัยต่างๆ เพื่อหาสมการการคำนวณหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (C_s) และสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเกลือคลอไรด์ (D_a) ทั้งนี้วิธีการทดลองหาปริมาณความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ประกอบไปด้วย

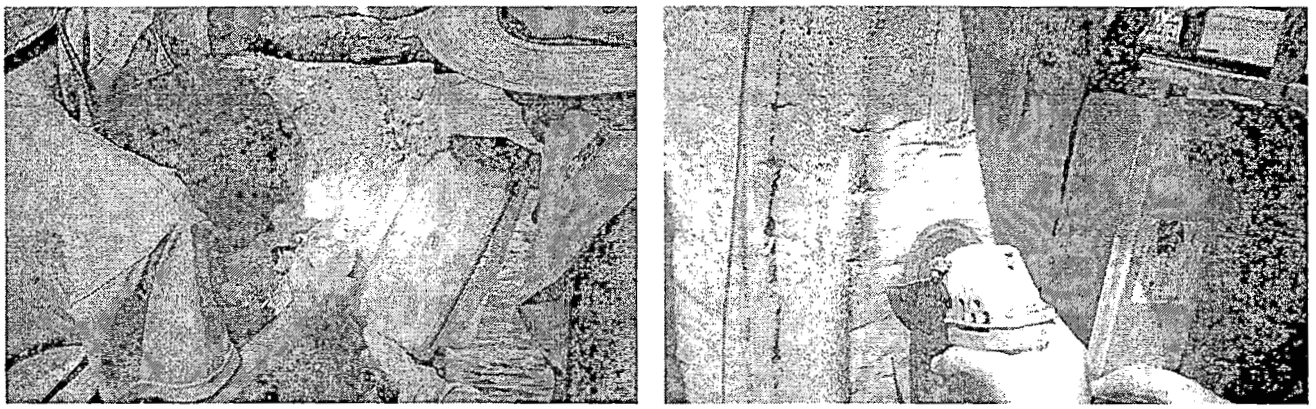
1.การทดสอบโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid soluble) ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ที่สะสมอยู่ในตัวอย่าง

2. การทดสอบโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water soluble) ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ที่สะสมอยู่ในตัวอย่าง

3.2 รายละเอียดการทดลอง

3.2.1 การหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีต

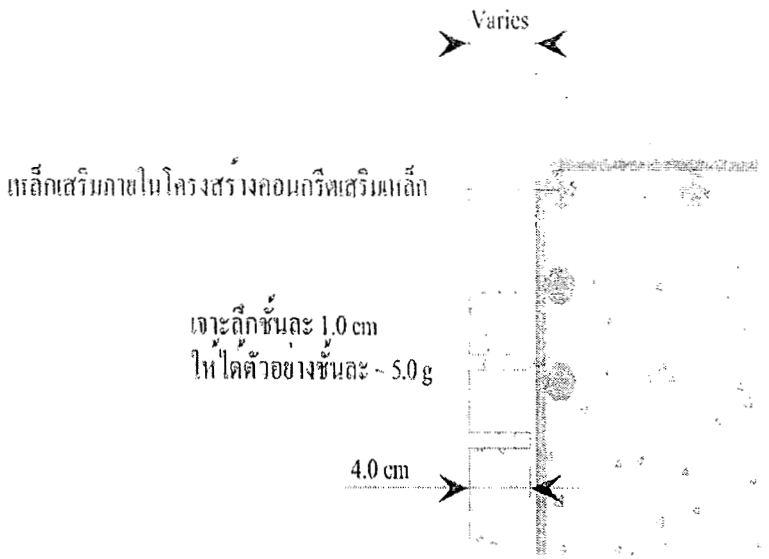
การหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีต ทำได้โดยการขัดผิวหน้าของโครงสร้างบริเวณตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างด้วยเครื่องขัดผิวคอนกรีตเพื่อเก็บผงฝุ่นคอนกรีตจากผิวหน้า โดยจำกัดความลึกไว้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร และใช้ภาชนะพลาสติกเพื่อรองรับผงฝุ่นคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากนั้นนำผงฝุ่นคอนกรีตที่ได้มาทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ในคอนกรีต ซึ่งค่าที่ได้คือปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 3.7 การขัดผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต

3.2.2 การหาการกระจายตัวของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต

การหาการกระจายตัวของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต ทำโดยการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยสว่านเจาะคอนกรีต ที่ใช้ดอกสว่านเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร โดยเจาะทีละชั้น ลึกชั้นละ 1 เซนติเมตร ซึ่งต้องเจาะ 9 รู จึงจะได้ตัวอย่างคอนกรีตหนักอย่างน้อย 5 กรัม ทำการแยกเก็บตัวอย่างแต่ละชั้นลงถุงพลาสติก จากนั้นเพิ่มความลึกของการเจาะอีกชั้นละ 1 เซนติเมตร แล้วเก็บตัวอย่างแบบเดียวกันนี้จนกระทั่งถึงระดับความลึก 4 เซนติเมตรจากผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 3.8 จากนั้นนำตัวอย่างผงฝุ่นคอนกรีตที่ได้ในแต่ละชั้นไปทดสอบหาการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตนั้น โดยในการเก็บข้อมูลในครั้งนี้จะไม่พิจารณาถึงสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริม



รูปที่ 3.8 รายละเอียดการเจาะเก็บตัวอย่างในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.2.3 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต ทำโดยนำตัวอย่างผงฝุ่นคอนกรีตที่ได้จากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมาทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ในคอนกรีตตามวิธี ASTM C1152 (American society for testing and materials, 2000) ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid soluble chloride) โดยการไตรเตรท (Titration) ซึ่งใช้สารละลายกรดไนตริกเป็นตัวทำละลายคลอไรด์อิออนทั้งหมดในคอนกรีตออกมา แล้วใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวทำปฏิกิริยาโดยพิจารณาจุดยุติของปฏิกิริยาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกวิธีการหาปริมาณคลอไรด์นี้ว่า Potentionmetric titration

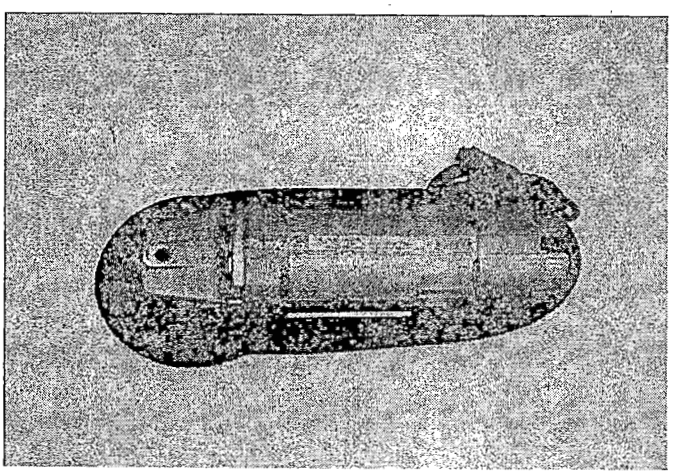
3.2.4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีแบบไม่ทำลาย

การทดสอบกำลังอัดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่ทำลาย ทำได้โดยการวัดค่า Rebound number ด้วยเครื่อง Schmidt hammer ที่ผิวหน้าตัวอย่างคอนกรีต เพื่อประเมินค่ากำลังอัดของโครงสร้างคอนกรีตต่อไป

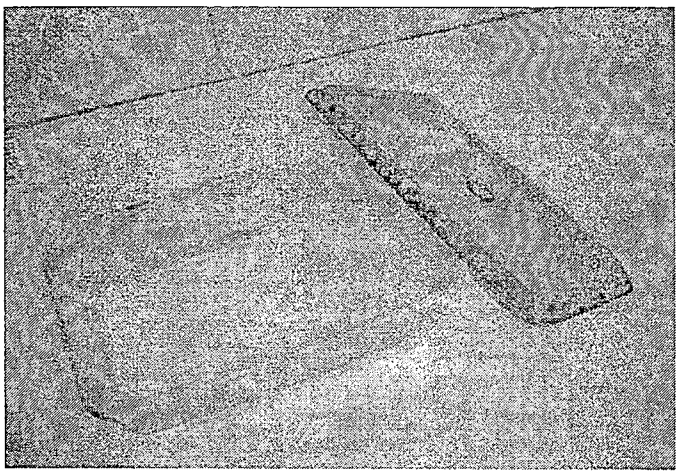
3.3 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

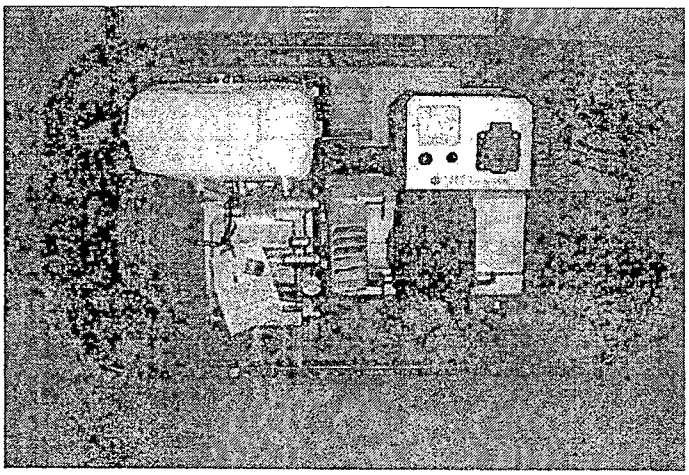
1. เครื่องเก็บตัวอย่างผิวหน้าคอนกรีต ดังภาพที่ 3.9
2. ภาชนะดัก (เก็บ) ผงฝุ่น ดังภาพที่ 3.10
3. เครื่องปั่นไฟ ดังภาพที่ 3.11
4. ถุงเก็บตัวอย่างผงฝุ่น ดังภาพที่ 3.12
5. เทปวัดระยะ ดังภาพที่ 3.13
6. ตลับเมตร ดังภาพที่ 3.14
7. Schmidth hammer ดังภาพที่ 3.15
8. สว่าน ดังภาพที่ 3.16
9. ฝาครอบ ดังภาพที่ 3.17
10. เครื่องดูดฝุ่น ดังภาพที่ 3.18
11. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้ว ดังภาพที่ 3.19
12. เครื่อง Auto titration ดังภาพที่ 3.20



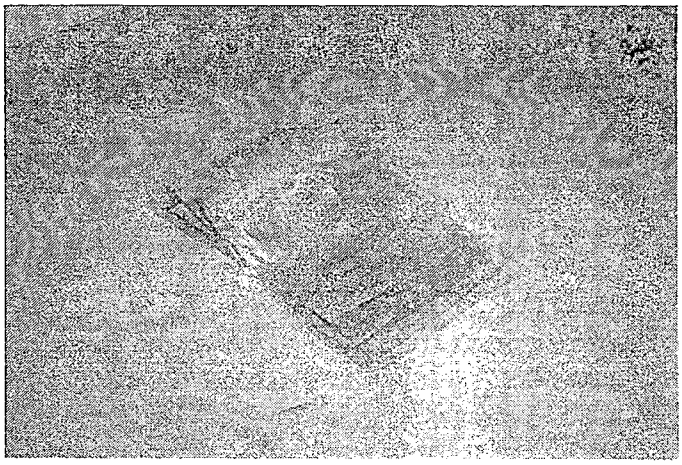
รูปที่ 3.9 เครื่องเก็บตัวอย่างผิวหน้าคอนกรีต



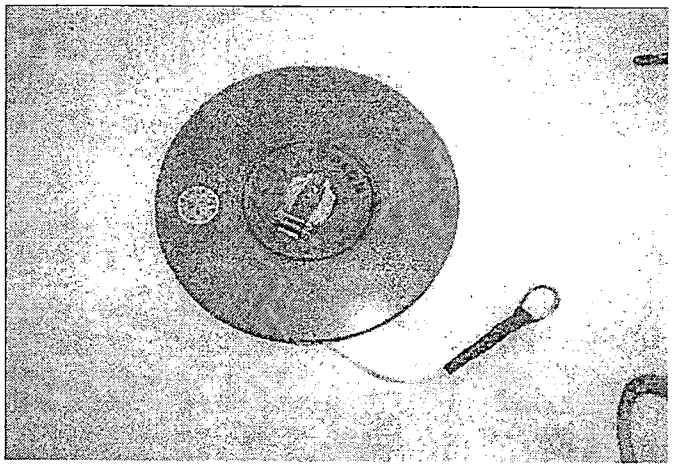
รูปที่ 3.10 ภาชนะดัก (เก็บ) ผงฝุ่น



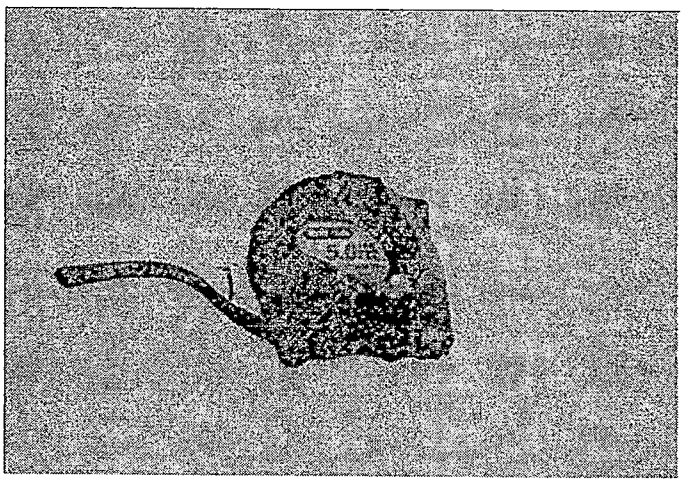
รูปที่ 3.11 เครื่องปั่นไฟ



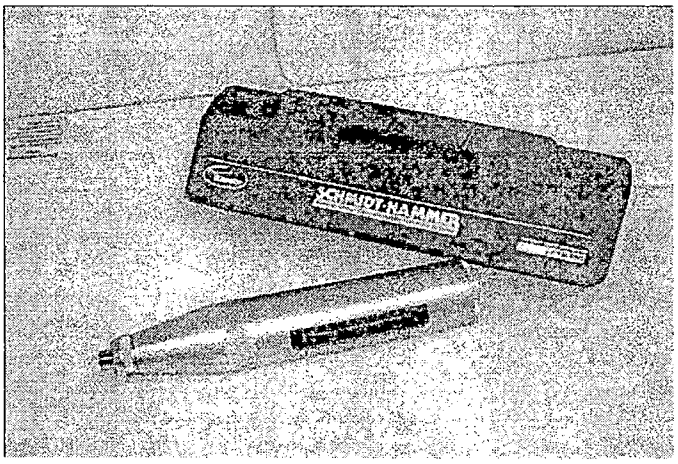
รูปที่ 3.12 ถุงเก็บตัวอย่างผงฝุ่น



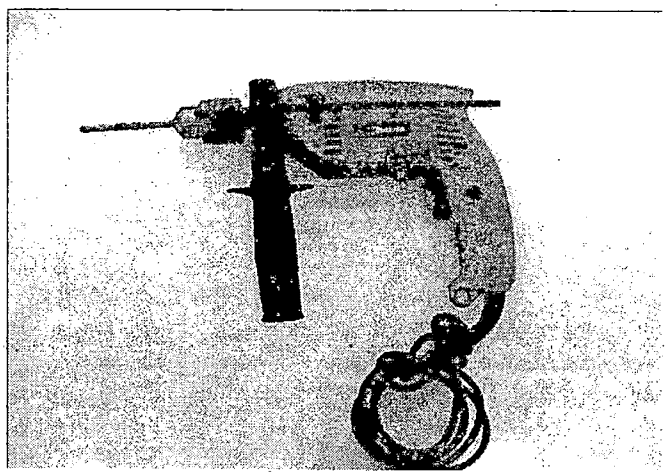
รูปที่ 3.13 เทปวัดระยะ



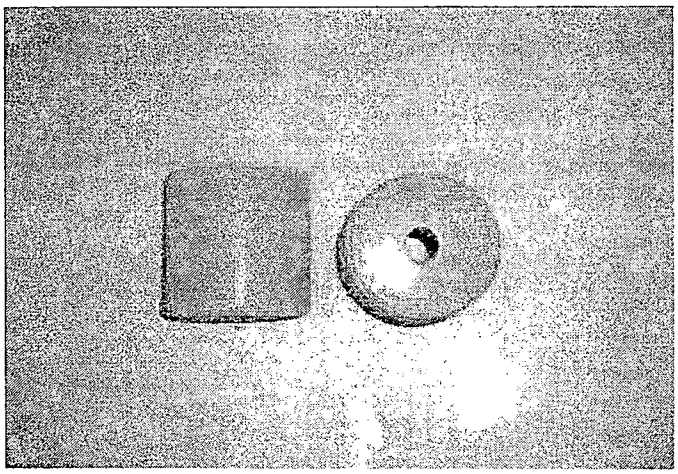
รูปที่ 3.14 ตลับเมตร



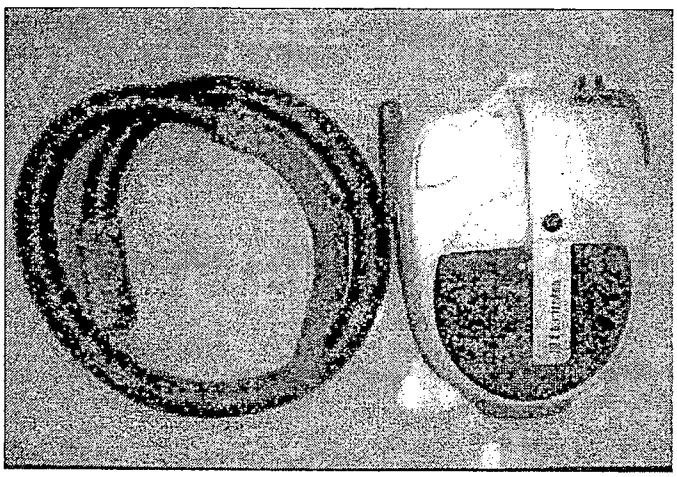
รูปที่ 3.15 Schmidth hammer



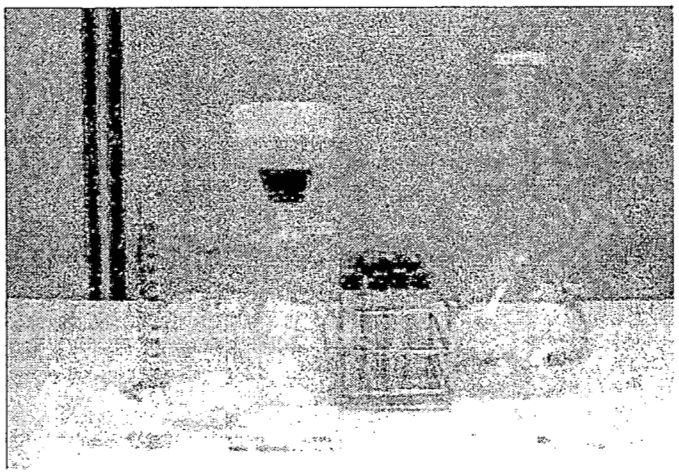
รูปที่ 3.16 สว่าน



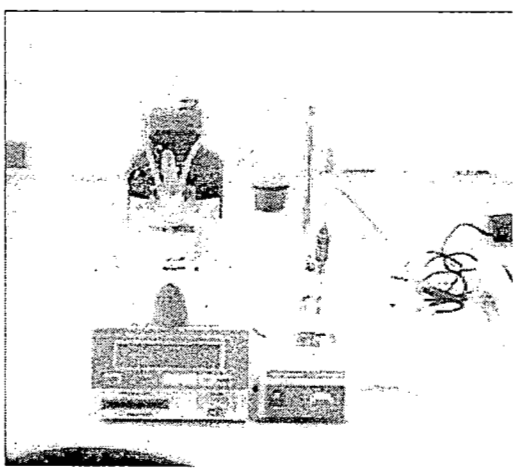
รูปที่ 3.17 ฝาครอบ



รูปที่ 3.18 เครื่องดูดฝุ่น



รูปที่ 3.19 ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้ว



รูปที่ 3.20 เครื่อง Auto titration

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

1. กรดไนตริก (Nitric acid)
2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
3. Methyl orange indicator
4. สารละลายมาตรฐาน 0.05 N NaCl
5. สารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate)
6. น้ำกลั่น

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (C_s)

1. ทำการสำรวจพื้นที่และเลือกตำแหน่งเป้าหมายของโครงสร้างที่ต้องการเก็บตัวอย่างโดยเลือกด้านของโครงสร้างที่รับลมทะเลทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ เนื่องจากลมมรสุมที่พัดมายังอ่าวไทยคือลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และตะวันออกเฉียงเหนือ แต่เพื่อทำให้การทกลองเป็นไปอย่างแบบเดียวกันทั้งหมดจึงเลือกทางด้านที่รับลมตะวันตกเฉียงใต้ใน

2. วัดระยะทางจากชายฝั่งถึงบริเวณตำแหน่งที่จะทำการเก็บตัวอย่างแล้วบันทึกค่า โดยในการบันทึกจะนับระยะทางเป็นบวกเมื่อเป็นระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน และจะบันทึกค่าเป็นลบเมื่อเป็นระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่ทะเล

3. วัดระยะความสูงจากตำแหน่งที่น้ำขึ้นสูงสุดไปยังตำแหน่งที่ต้องการเก็บตัวอย่างแล้วบันทึกค่า

4. ใช้เครื่องเก็บตัวอย่างผิวหน้าคอนกรีต โดยทำการปาดบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ณ บริเวณที่ต้องการเก็บตัวอย่าง (โดยในการปาดผิวคอนกรีตจะต้องไม่ให้ลึกเกิน 1 มิลลิเมตร) และใช้ภาชนะดักเก็บผงฝุ่นที่ได้จากการปาดที่ผิวหน้าของคอนกรีตประมาณ 10 กรัม (ในการเก็บผงฝุ่นต้องเก็บไว้ในที่ปลอดความชื้น)

5. ใช้ Schmidth hammer กดลงบนผิวหน้าของคอนกรีตที่ได้ทำการปาดผิวแล้ว จากนั้นทำการบันทึกค่า Rebound number เพื่อใช้ในการคำนวณหากำลังอัดของคอนกรีตต่อไป

6. ทำความสะอาดเครื่องเก็บตัวอย่าง และภาชนะดักเก็บผงฝุ่นทุกครั้งเมื่อเก็บตัวอย่างเสร็จเพื่อลดการปนเปื้อนในการเก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งถัดไป

7. เมื่อทำการเก็บตัวอย่างเสร็จแล้ว ให้นำซีเมนต์เพสฉาบตกแต่งบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตในบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่าง

3.4.2 การหาการกระจายตัวของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต (D_a)

1. ทำการสำรวจพื้นที่และเลือกตำแหน่งเป้าหมายของโครงสร้างที่ต้องการเก็บตัวอย่างโดยเลือกด้านของโครงสร้างที่รับลมทะเลทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ เนื่องจากลมมรสุมที่พัดมายังอ่าวไทยคือลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และตะวันออกเฉียงเหนือ แต่เพื่อทำให้การทกลองเป็นไปอย่างแบบเดียวกันทั้งหมดจึงเลือกทางด้านที่รับลมตะวันตกเฉียงใต้ใน

2. ทำสัญลักษณ์ลงบนตำแหน่งที่ต้องการเจาะ โดยการใช้สว่านกดเบาๆ ประมาณ 12 รู

3. ใช้สว่านเจาะลงไปในเนื้อคอนกรีตบนตำแหน่งที่ได้ทำสัญลักษณ์ไว้ในข้อ 2 โดยในการเจาะต้องผ่านที่ครอบกันฝุ่นปลิวให้ได้ความลึก 1 เซนติเมตร แล้วใช้ไม้เขี่ยเพื่อเก็บผงคอนกรีตที่ตกค้างอยู่ในรูใส่ลงในถุงเก็บตัวอย่าง (ในการเก็บผงฝุ่นต้องเก็บไว้ในที่ปลอดความชื้น) ต้องทำความสะอาดรูที่เจาะทุก

ครั้งโดยใช้เครื่องดูดฝุ่น หากตัวอย่างที่เก็บได้นั้นมีปริมาณไม่ถึง 10 กรัม ให้เพิ่มจำนวนรูจนกว่าจะได้ตัวอย่างประมาณ 10 กรัม

4. ทำซ้ำตามข้อ 3 แต่เพิ่มความลึกทีละ 1 เซนติเมตร ในรูเจาะเดิม ไปจนถึง 4 เซนติเมตร

5. ทำความสะอาดอุปกรณ์ทุกครั้งเมื่อเก็บตัวอย่างเสร็จ เพื่อลดการปนเปื้อนในการเก็บตัวอย่าง ณ ตำแหน่งถัดไป

6. เมื่อทำการเจาะรูเสร็จแล้ว ให้ใช้อีพ็อกซีฉีดเข้าไปในรูที่ได้ทำการเจาะ จากนั้นใช้ซีเมนต์เพสฉาบตกแต่งผิวหน้าของคอนกรีตในบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่าง

3.4.3 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีต

ในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตจะแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน คือ 1. การทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดในระบบ (Total chloride) และ 2. การทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในระบบ (Free chloride)

3.4.3.1 การทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดในระบบ (Total chloride) มีวิธีการทดสอบดังนี้ (ตามมาตรฐาน ASTM C1152 และมาตรฐาน C114)

1. นำคอนกรีตจากตัวอย่างที่เก็บมาจำนวนประมาณ 5 กรัม (โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม) นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เติมน้ำลงไป 75 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกที่ Dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 มิลลิลิตรตามลงไปทันทีโดยค่อยๆเติมลงไป คนก้อนซีเมต์ที่จับตัวกันเป็นก้อน (Lumps) ให้แยกออกจากกัน ถ้ามีกลิ่นของก๊าซไข่เน่า (Hydrogen peroxide) ในระหว่างนี้ให้เติมให้เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 มิลลิลิตร และหยด Mythyl orange indicator จำนวน 3 หยอด ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระจกแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ถ้ามีสีเหลืองถึงสีเหลืองส้มปรากฏบนด้านบนของของแข็งที่ตกตะกอนอยู่ แสดงว่าสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดไม่พอ ให้หยดสารละลายกรดไนตริกที่ Dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไปแล้วคนไปพร้อมๆกันจนกระทั่งปรากฏเป็นสีชมพูหรือสีแดงเลือนๆ จากนั้นหยดสารละลายไนตริกเกินต่อไปอีก 10 หยด

3. ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาด้วยแผ่นกระจกด้วยการต้มให้เดือด อย่าให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม Hot plate)

4. ล้างแผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 เซนติเมตร ด้วยน้ำเพิ่มขึ้นครั้งละ 25 มิลลิลิตร จำนวน 4 ครั้ง โดยใช้การกรองดูด (Suction filtering) ด้วยกรวย (Buchner funnel) ขนาด 250 หรือ 500 มิลลิลิตร และขวดกรองแก้วก้นโป่ง (Filtration flask) เลิกการล้างแล้วทำการล้างขวดแก้วก้นโป่งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์และแผ่นกระดาษกรอง 2 ครั้ง ด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้นโป่งไปยัง

บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำ บีกเกอร์อันแรกที่ใช้อาจนำมาใช้ทิ้งสารละลายที่ผ่านกรองไว้ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 มิลลิลิตร

5. สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ว เติมสารละลายมาตรฐาน 0.05 N NaCl จำนวน 2 มิลลิลิตร ด้วย Pipet วางบีกเกอร์ไว้บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไปแช่ Electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน Electrode เริ่มการกวนช้าๆ วางปลายส่งของ 10 ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงในหรืออยู่เหนือสารละลาย

6. เครื่อง Potentiometric titration จำทำการไตรเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Potentiometric titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้และประจุ

7. จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration

3.4.3.2 การทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในระบบ (Free chloride) มีวิธีการทดสอบดังนี้ (ตามมาตรฐาน ASTM C1218 และมาตรฐาน C144)

1. นำผงตัวอย่างคอนกรีตที่เก็บมาจำนวน 5 กรัม (โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม) นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เติมน้ำ (Reagent water meeting specification D 1193) ลงไป 50 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระจกนำไปต้มให้เดือด 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง กรองด้วยแรงโน้มถ่วงหรือการดูดผ่านกระดาษเนื้อละเอียด (A fine-texture, Type II, Class G filter paper of specification E832) ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรอง (Filtrate) ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

3. เติมสารละลายไนตริกที่ Dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 มิลลิเมตรและสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 มิลลิลิตร ลงในสารละลายที่ผ่านการกรองปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระจกและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือดอย่าให้เดือนเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (Hot plate)

(ทำการทดลองเหมือนวิธีการหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด ตั้งแต่ข้อ 4 เป็นต้นไป)

4. ล้างแผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 เซนติเมตร ด้วยน้ำเพิ่มขึ้นครั้งละ 25 มิลลิลิตร จำนวน 4 ครั้ง โดยใช้การกรองดูด (Suction filtering) ด้วยกรวย (Buchner funnel) ขนาด 250 หรือ 500 มิลลิลิตร และขวดกรองแก้วก้นโป่ง (Filtration flask) เลิกการล้างแล้วทำการล้างขวดแก้วก้นโป่งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์และแผ่นกระดาษกรอง 2 ครั้ง ด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้นโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำ บีกเกอร์อันแรกที่ใช้อาจนำมาใช้ทิ้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 มิลลิลิตร

5. สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ว เติมสารละลายมาตรฐาน 0.05 N NaCl จำนวน 2 มิลลิลิตร ด้วย Pipet วางบีกเกอร์ไว้บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไปแช่ Electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน Electrode เริ่มการกวนช้าๆ วางปลายส่งของ 10 ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงในหรืออยู่เหนือสารละลาย

6. เครื่อง Potentiometric titration จำทำการไตรเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Potentiometric titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้และประจุ

7. จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

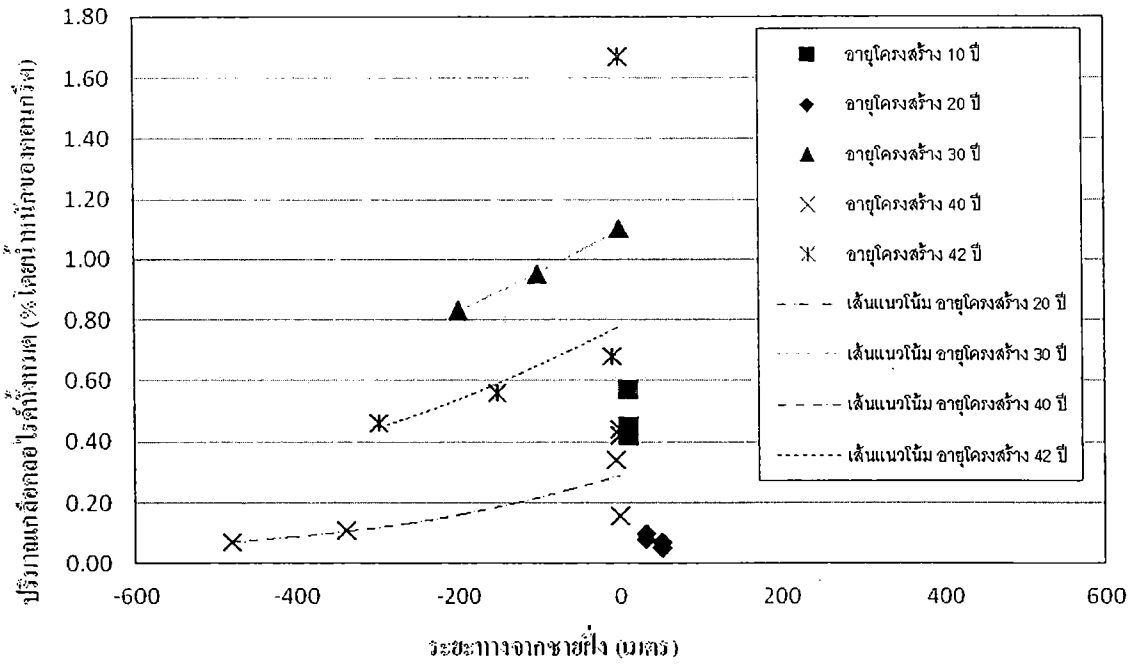
ผลการวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากคอนกรีตที่ได้มาจากโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล ส่วนที่ 2 คือ การกระจายตัวการแทรกซึมเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตตามระดับความลึกจากผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล และส่วนที่ 3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย

4.1 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

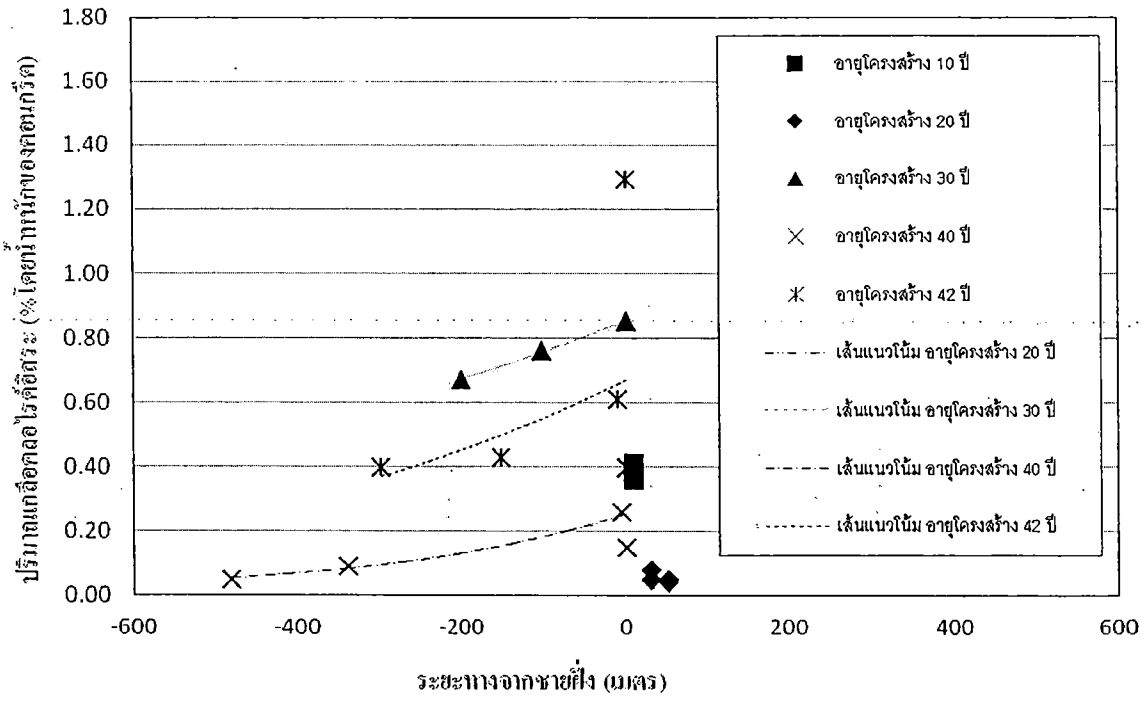
จากการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลตามสถานที่ต่างๆ แล้วนำตัวอย่างมาทำการทดสอบเพื่อหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดในตัวอย่างของคอนกรีต (Total chloride) และปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในตัวอย่างของคอนกรีต (Free chloride) ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล

ประเภทของโครงสร้างคอนกรีต	สถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุ (ปี)	ระยะทางจากชายฝั่ง (เมตร)	ความสูง (เมตร)	ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของคอนกรีต)	ปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของคอนกรีต)
สะพาน	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	40	0	0	0.44	0.40
		40	0	0.5	0.44	0.40
		40	0	1.5	0.05	0.04
		1	-5	1.25	0.44	0.40
		40	-340	2	0.11	0.04
		40	-480	2	0.05	0.04
	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	40	-10	0.5	0.11	0.40
		10	-10	0.5	0.11	0.04
		10	-10	0.5	0.11	0.38
	ถนนหาดนางรำกองทัพเรือ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	42	0	2	0.11	0.38
		42	-150	3	0.56	0.43
		42	-300	3	0.44	0.40
	ถนนบ้านแสมสาร อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	10	0	0.5	1.10	0.85
		30	-100	1.5	0.44	0.85
		30	-200	1.5	0.85	0.04
กำแพงกั้นคลื่น	ถนนท่าเทียบเรือจักรกรีนฤเบศร์ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	42	-10	1.5	0.65	0.85
		42	0	0.5	1.67	1.29
เสาไฟฟ้า	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	30	50	2.5	0.07	0.04
		20	50	3	0.07	0.04
		20	50	2.5	0.10	0.85
		20	30	3	0.08	0.85



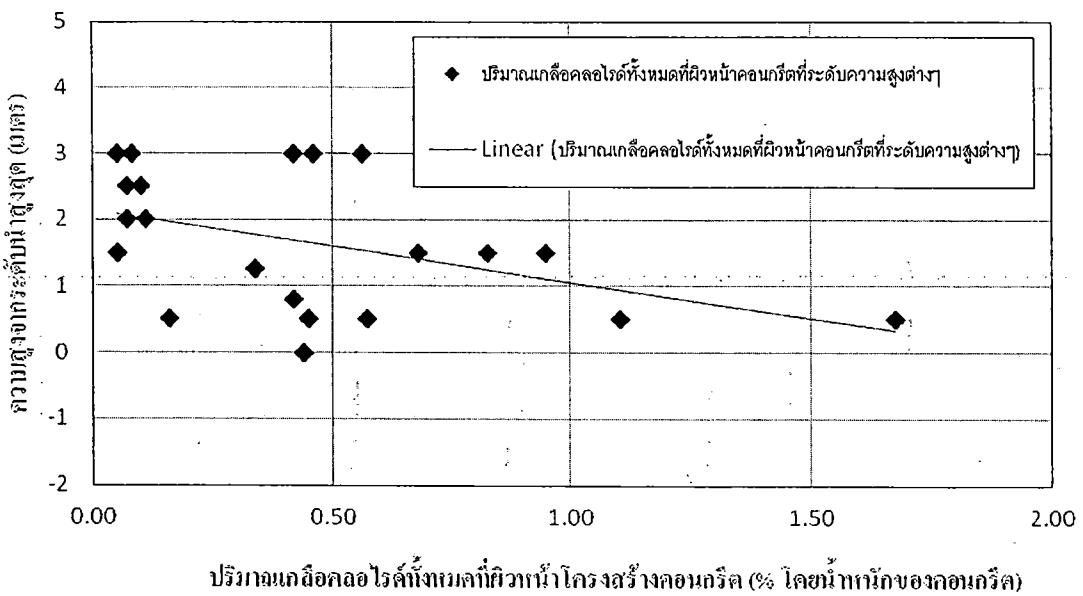
รูปที่ 4.1 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากชายฝั่ง ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล ที่อายุโครงสร้างต่างๆ



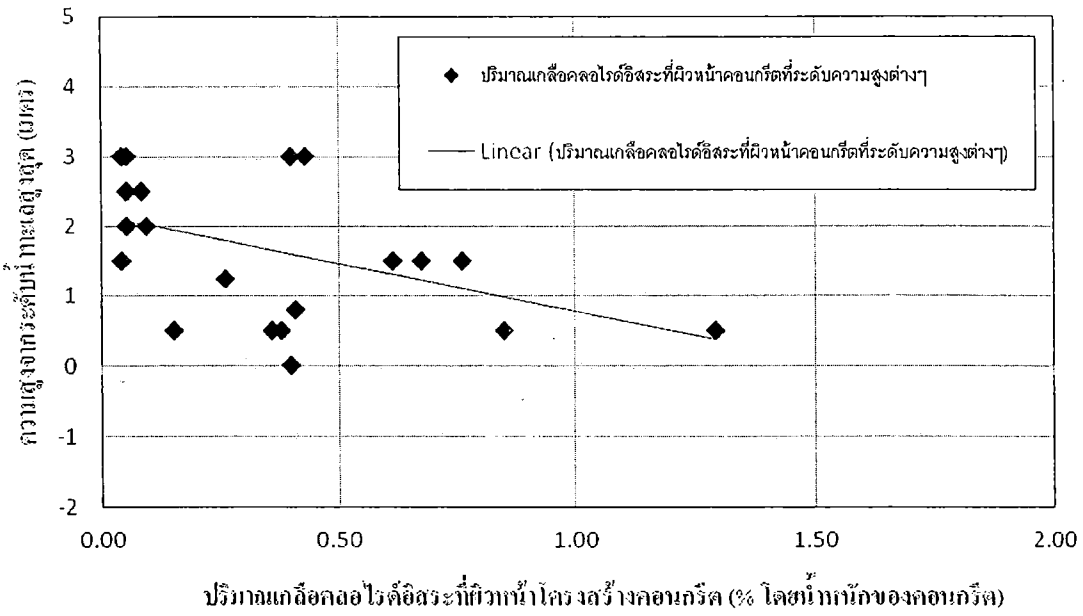
รูปที่ 4.2 ปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากชายฝั่ง ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล ที่อายุโครงสร้างต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ตามระยะทางจากชายฝั่งและอายุโครงสร้างพบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่ทะเล และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าเมื่อระยะทางจากชายฝั่งเท่ากันแล้วตามเส้นแนวโน้มพบว่า ที่อายุโครงสร้าง 30 ปี มีปริมาณเกลือคลอไรด์มากกว่าที่อายุโครงสร้าง 40 ปี และ 42 ปี ทั้งนี้เนื่องมาจากตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างที่อายุโครงสร้าง 30 ปี อยู่ในตำแหน่งสภาวะละอองคลื่น (Splash zone) จึงส่งผลให้มีปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างมากกว่าที่อายุโครงสร้าง 40 ปี และ 42 ปี ซึ่งทั้ง 2 โครงสร้างดังกล่าวนี้ บริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างจะอยู่ในตำแหน่งสภาวะบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) เมื่อพิจารณาดูถึงอายุของโครงสร้างพบว่า ที่ระยะทางจากชายฝั่งเท่ากัน และตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างอยู่ในสภาวะเดียวกัน ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างจะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออายุของโครงสร้างมากขึ้น

และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ในตำแหน่งที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลแตกต่างกัน พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลมีค่าที่แตกต่างกันตามระดับความสูงที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ตำแหน่งความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดต่างๆ



รูปที่ 4.4 ปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ตำแหน่งความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดต่างๆ

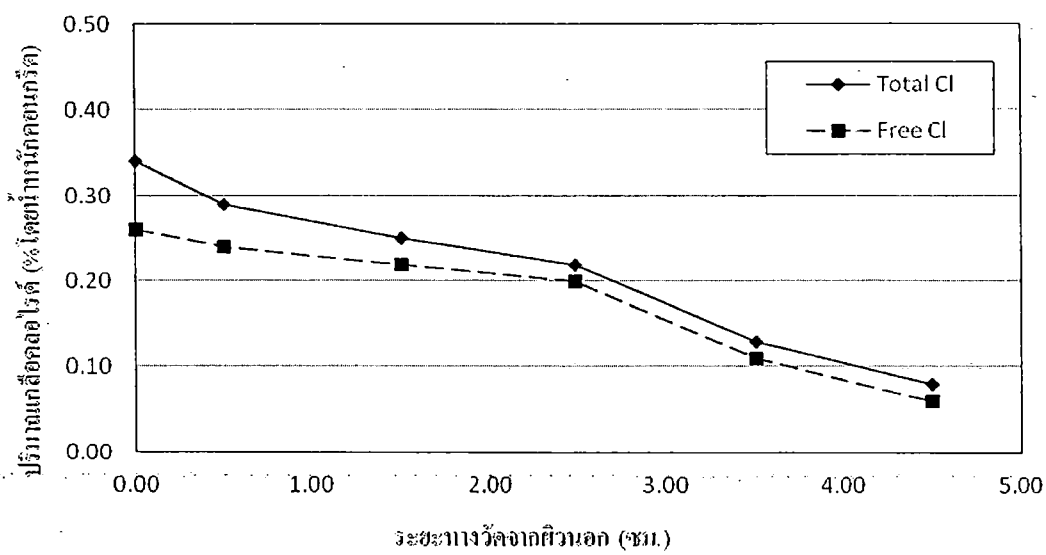
ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตที่แนะนำโดย Japan Society of Civil Engineer, JSCE (2005) ซึ่งกำหนดไว้ว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในบริเวณคลื่นกระแทก (Splash zone) มีค่าเท่ากับ 13.0 กก./ม^3 (หรือประมาณ 0.54 % โดยน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต) และปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตมีค่าลดลงตามระยะทางจากชายฝั่งทะเลเข้าสู่แผ่นดิน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดินปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลที่ขัดแย้งกับ JSCE ที่ได้ให้เหตุผลไว้ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดมีผลต่อปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีต โดยดูได้จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าเมื่อความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดมีค่าลดลง จะส่งผลให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างคอนกรีตมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสลมอีกด้วย

โดยในการศึกษานี้มิได้มุ่งหาค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่บริเวณผิวเหล็กเสริมโดยตรง แต่ศึกษาการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย ซึ่งจากข้อมูลที่ได้มาสามารถวิเคราะห์หาค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่บริเวณเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ด้วยกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ทั้งนี้ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤติ (Chloride threshold) เป็นค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่น้อยที่สุดของคอนกรีตตรงบริเวณผิวของเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดเป็นสนิม โดยที่ค่าเกลือคลอไรด์วิกฤตตามมาตรฐาน Japan Society of Civil

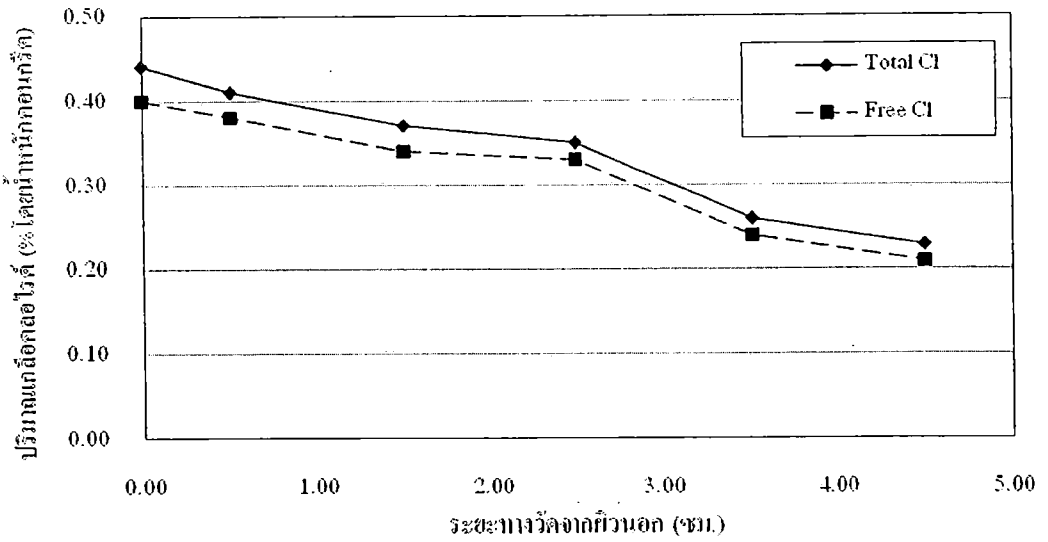
Engineer, JSCE (2005) กำหนดไว้เท่ากับ 1.20 กก./ม^3 ซึ่งหากใช้ปริมาณวัสดุประสาน 300 กก. ต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. แล้วค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤติเท่ากับ 0.40% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และหากคอนกรีต 1 ลบ.ม. มีน้ำหนัก 2,400 กก. แล้วค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤติเท่ากับ 0.05 %โดยน้ำหนักของคอนกรีต

4.2 การกระจายตัวการแทรกซึมเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

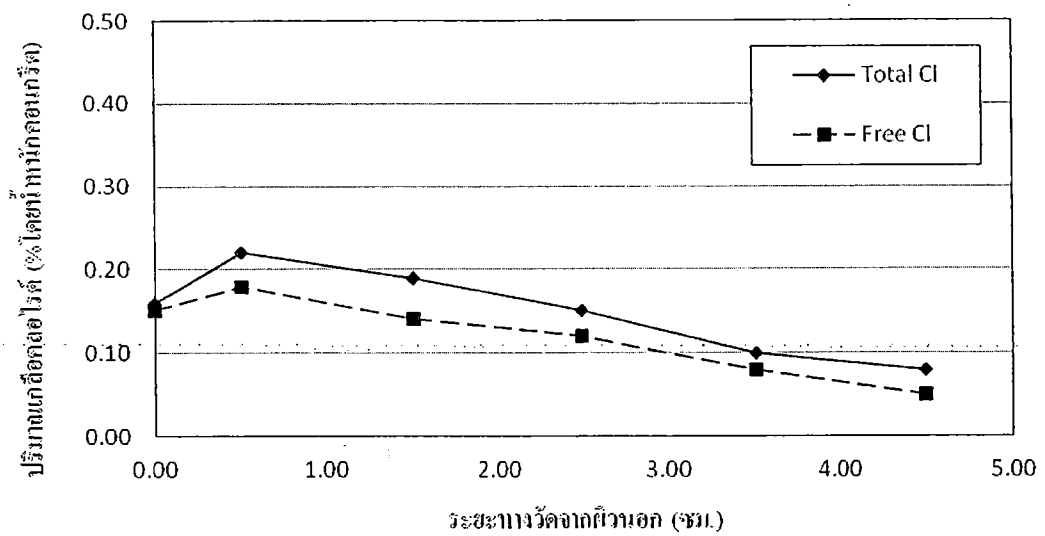
จากการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลตามในสถานที่ต่างๆ แล้วนำตัวอย่างในแต่ละระดับความลึกจากผิวหน้าของคอนกรีตมาทดสอบเพื่อหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดในตัวอย่างของคอนกรีต (Total chloride) และ ปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในตัวอย่างของคอนกรีต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



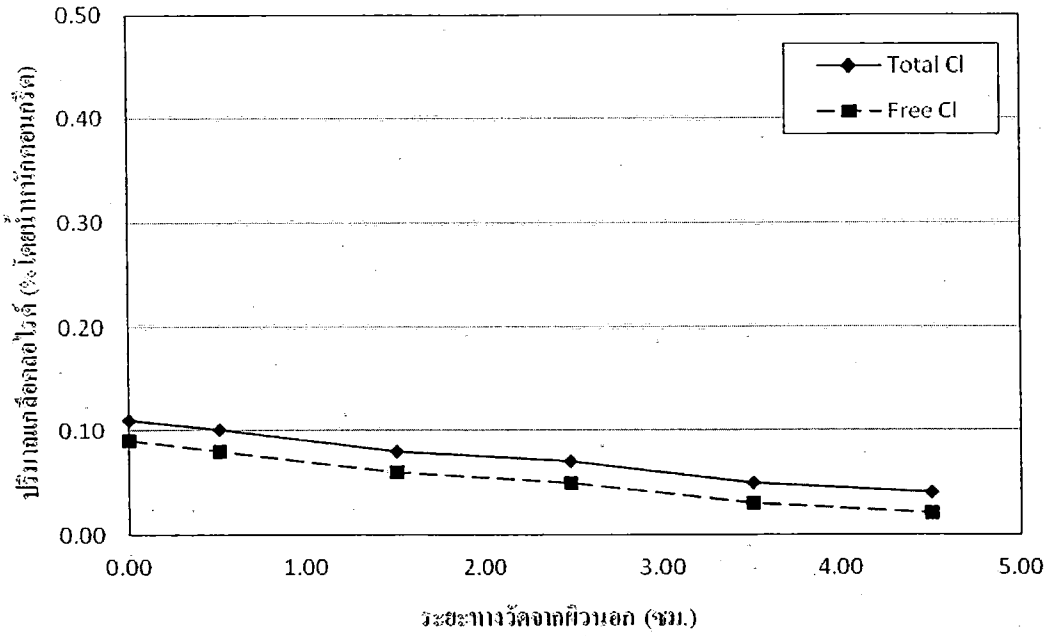
รูปที่ 4.5 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำ ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง -5 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.25 เมตร อายุ 40 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



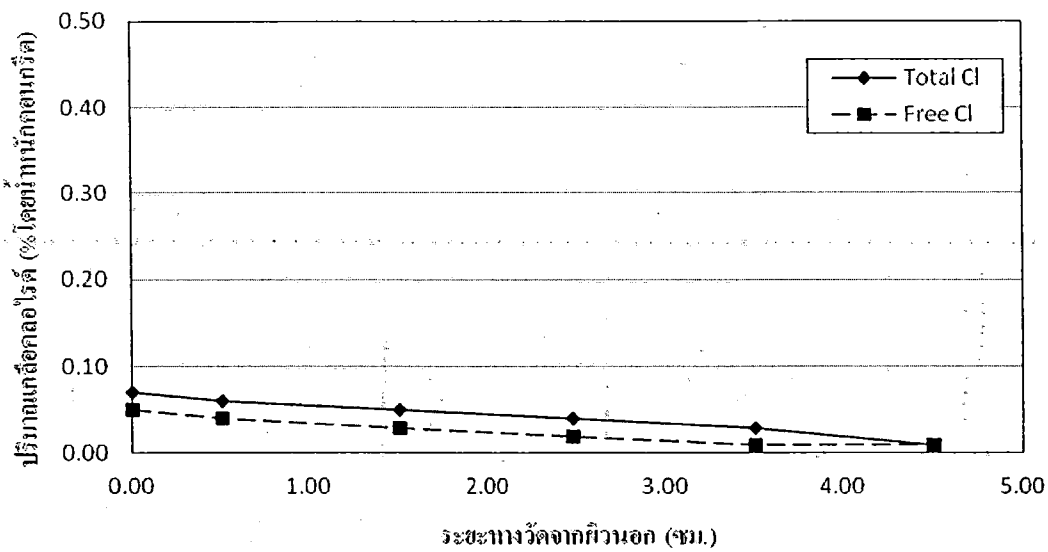
รูปที่ 4.6 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำ ที่ตำแหน่งเสา ระยะทางจากชายฝั่ง 0 เมตรความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0 เมตร อายุ 40 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



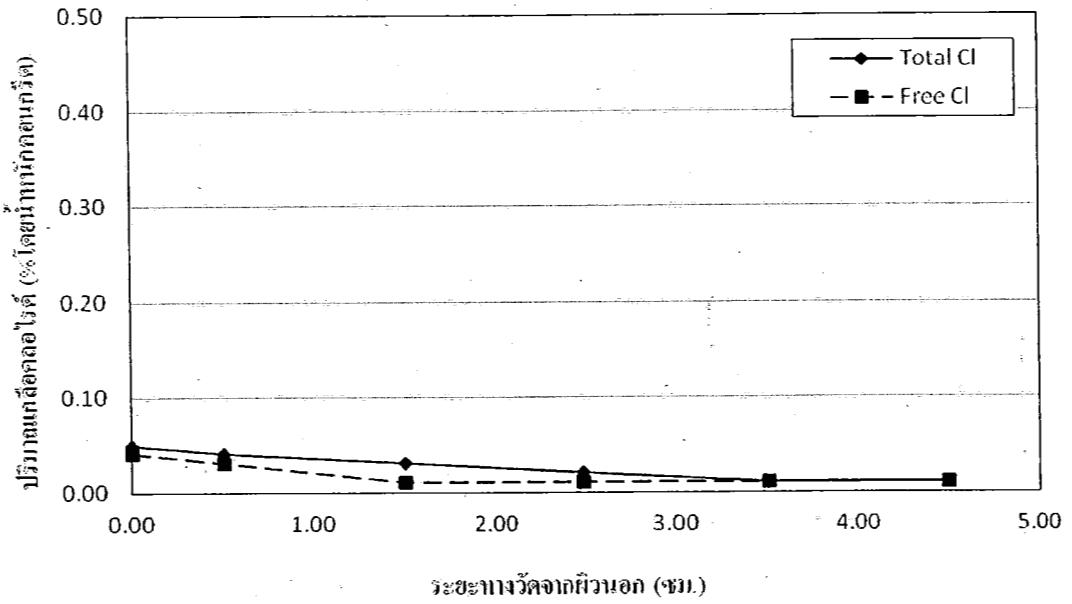
รูปที่ 4.7 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำ ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง 0 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.5 เมตร อายุ 40 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



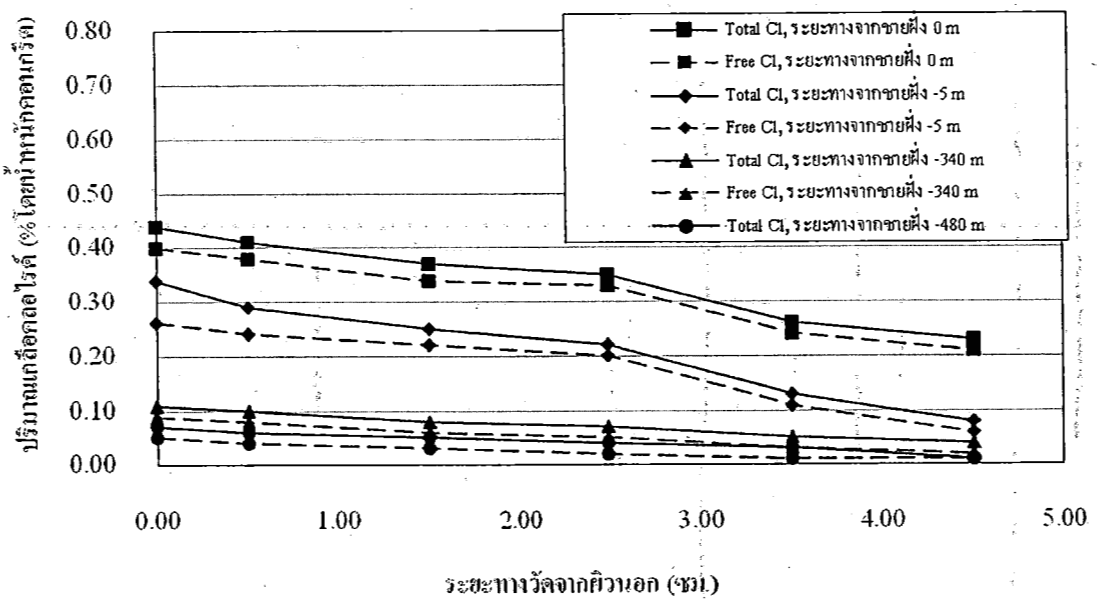
รูปที่ 4.8 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำ ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง -340 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 2 เมตร อายุ 40 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



รูปที่ 4.9 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำ ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง -480 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 2 เมตร อายุ 40 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



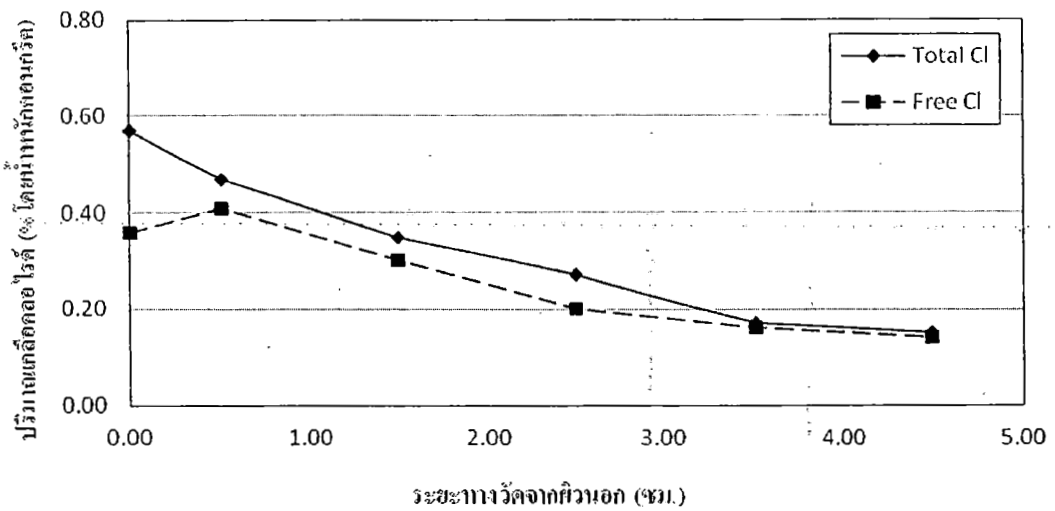
รูปที่ 4.10 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำ ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง 0 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.5 เมตร อายุ 1 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



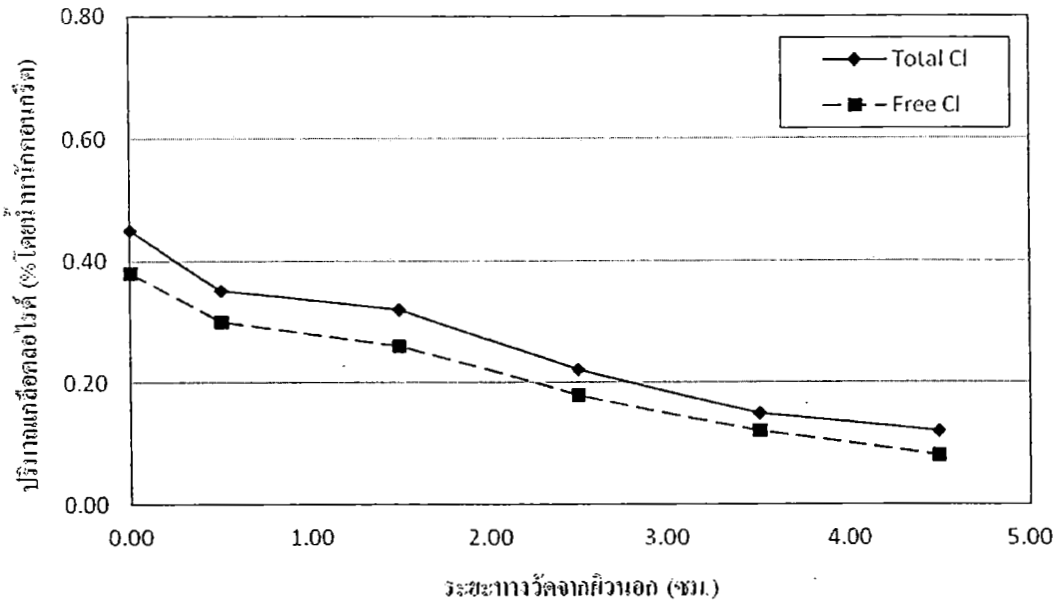
รูปที่ 4.11 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำ ที่ตำแหน่งคาน อายุ 40 ปี บริเวณถนนหน้า อำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

จากรูปที่ 4.5 , 4.6 , 4.7 , 4.8 , 4.9 , 4.10 และ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระในโครงสร้างคอนกรีตของสะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี ที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยมีอายุโครงสร้าง 40 ปี และ 1 ปี พบว่าการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อโครงสร้างคอนกรีตมีระยะทางเข้าสู่ชายฝั่งเป็น 0 เมตร ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในบริเวณที่ใกล้กับชายฝั่งในตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างอยู่ในชั้นบรรยากาศแบบน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) จึงทำให้มีปริมาณการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มาก และจะสังเกตได้ว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของโครงสร้างด้านนอกจะมีค่ามากที่สุดและจะลดลงโดยลำดับ ส่วนปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระนั้นจะมีค่าน้อยกว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและจะมีค่าลดลงตามระยะทางจากผิวนอกที่มากขึ้น แต่จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตที่ผิวด้านนอกจะมีค่าน้อย ที่เป็นเช่นนั้นอาจจะเกิดจากการชะล้างของน้ำฝนจึงทำให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ในบริเวณดังกล่าวนี้มีค่าน้อยกว่าผิวด้านใน

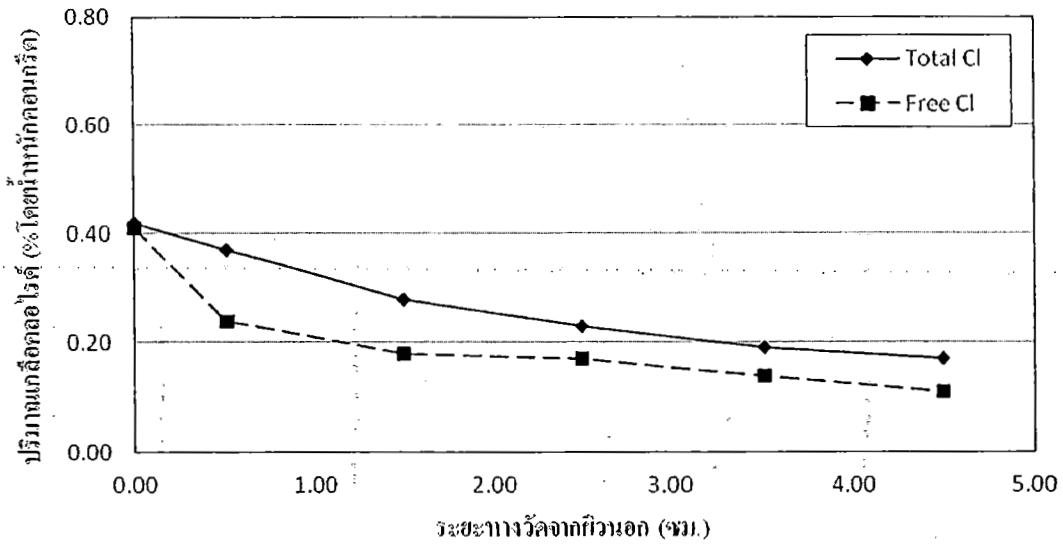
และเมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของโครงสร้างสะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำที่มีอายุการใช้งาน 1 ปี ระยะทางจากชายฝั่ง 0 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.5 เมตร พบว่ามีการแทรกซึมเกลือคลอไรด์ภายในโครงสร้างคอนกรีตที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจนกันกับโครงสร้างสะพานท่าเทียบเรือตำรวจน้ำที่มีอายุการใช้งาน 40 ปี โดยโครงสร้างที่มีอายุการใช้งานที่น้อยกว่าจะมีการแทรกซึมเกลือคลอไรด์เข้าไปในเนื้อของคอนกรีตน้อยกว่า โดยที่ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างมีความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน และระยะทางจากชายฝั่งใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.12 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานเทศบาล 1 ที่ตำแหน่งกำแพง ระยะทางจากชายฝั่ง -10 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.5 เมตร อายุ 10 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

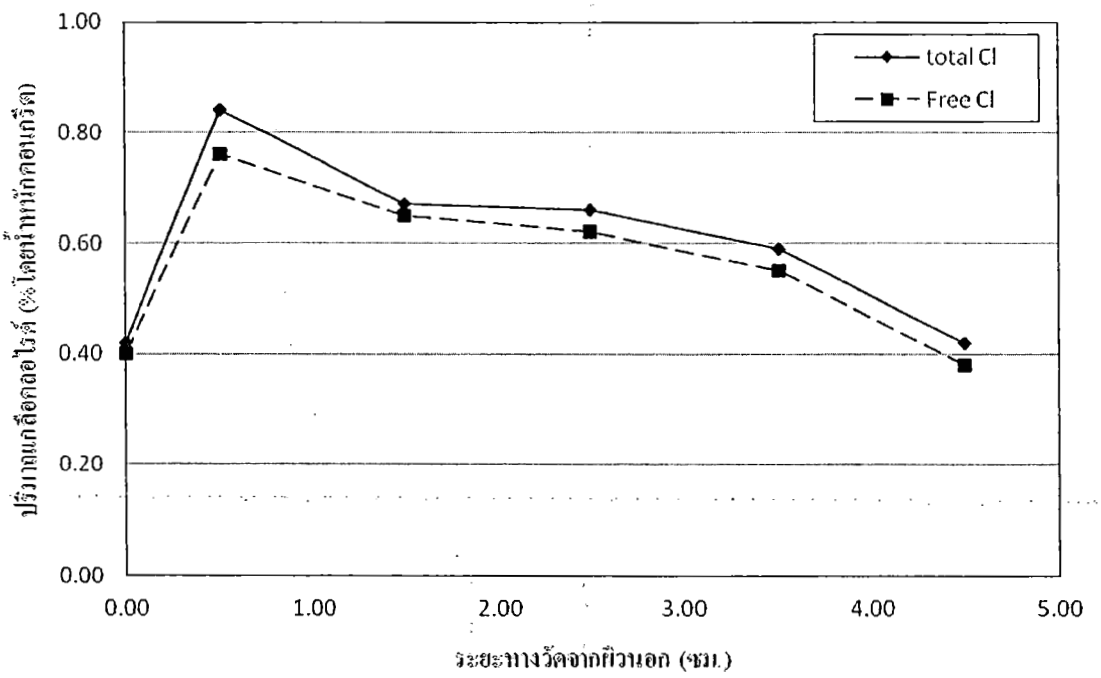


รูปที่ 4.13 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานเทศบาล 1 ที่ตำแหน่งเสา ระยะทางจากชายฝั่ง -10 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.5 เมตร อายุ 10 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

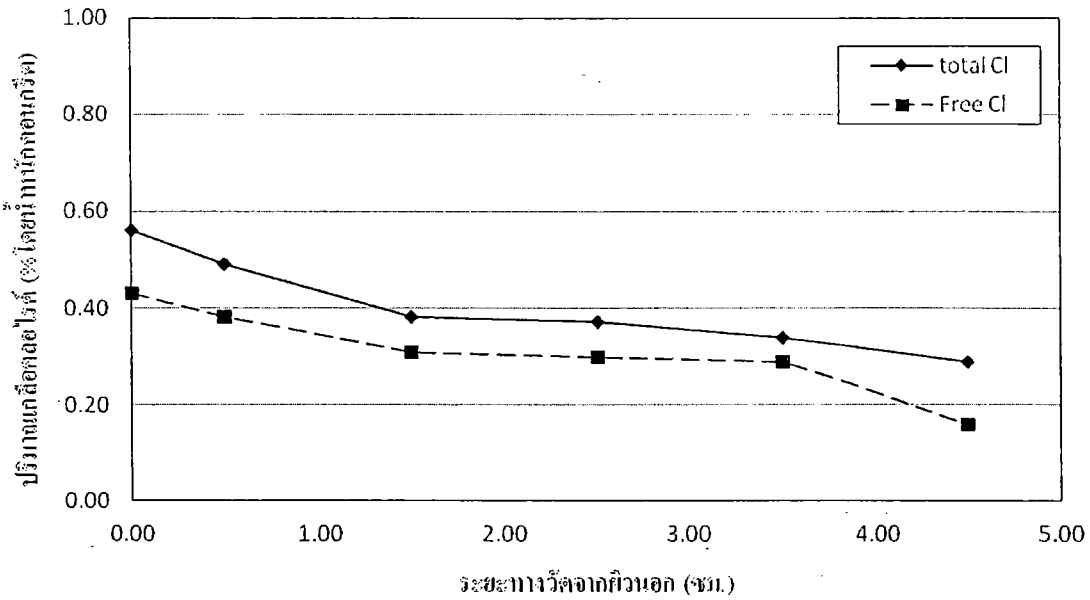


รูปที่ 4.14 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานเทศบาล 1 ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง -10 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.8 เมตร อายุ 10 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

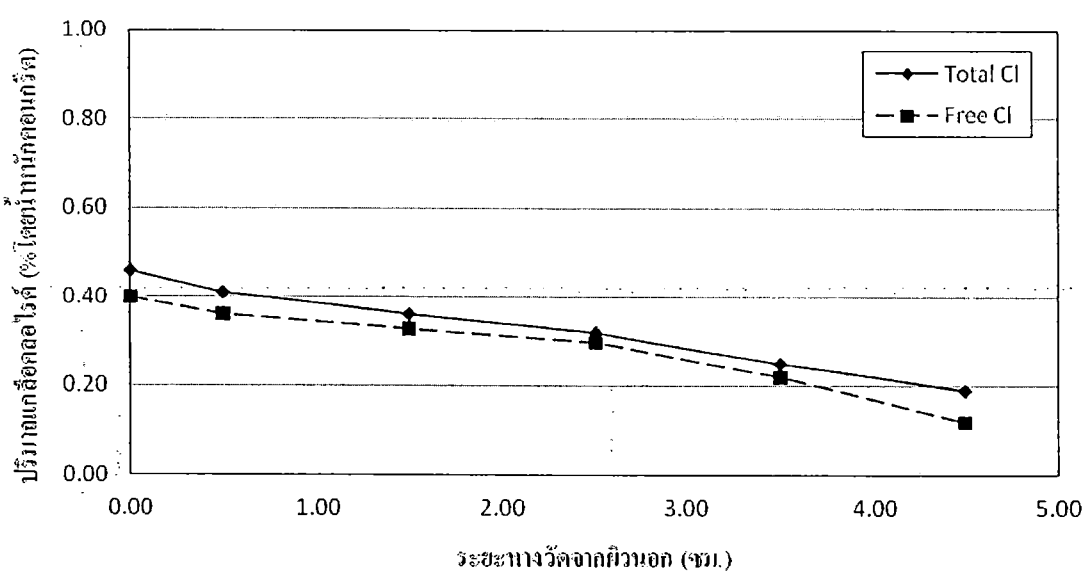
จากรูปที่ 4.12 , 4.13 และ 4.14 เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระในโครงสร้างคอนกรีตของสะพานเทศบาล 1 อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี ที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยมีอายุโครงสร้าง 10 ปี พบว่ามีปริมาณการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างมีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันอยู่พอสมควร ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างประเภทกำแพง เสา หรือคาน ทั้งนี้อันเนื่องมาจากบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างมีระยะทางจากชายฝั่งเท่ากัน และความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุดใกล้เคียงกันอยู่พอสมควร แต่จะเห็นได้ว่าที่ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.5 เมตร ประเภทของโครงสร้างเป็นกำแพงมีการแทรกซึมเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตมากกว่าบริเวณอื่นเนื่องมาจากในบริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้กับระดับน้ำทะเลสูงสุด จึงทำให้มีการแทรกซึมเกลือคลอไรด์เข้าไปในเนื้อของคอนกรีตมากกว่าบริเวณอื่น และจะสังเกตได้ว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางจากผิวด้านนอกมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระจะมีค่าที่น้อยกว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระจะมีค่าลดลงตามระยะทางจากผิวด้านนอกมีค่าเพิ่มขึ้น



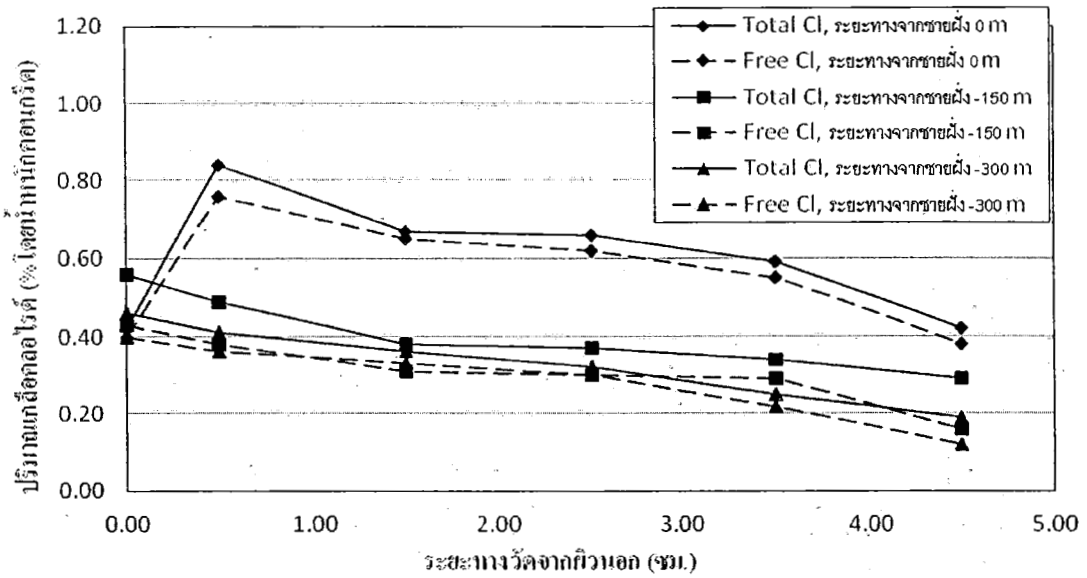
รูปที่ 4.15 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานท่อส่งน้ำมัน ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง 0 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 3 เมตร อายุ 42 ปี บริเวณถนนหาดนางรำ กองทัพเรือ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



รูปที่ 4.16 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานท่อส่งน้ำมัน ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง -150 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 3 เมตร อายุ 42 ปี บริเวณถนนหาดนางรำ กองทัพเรือ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

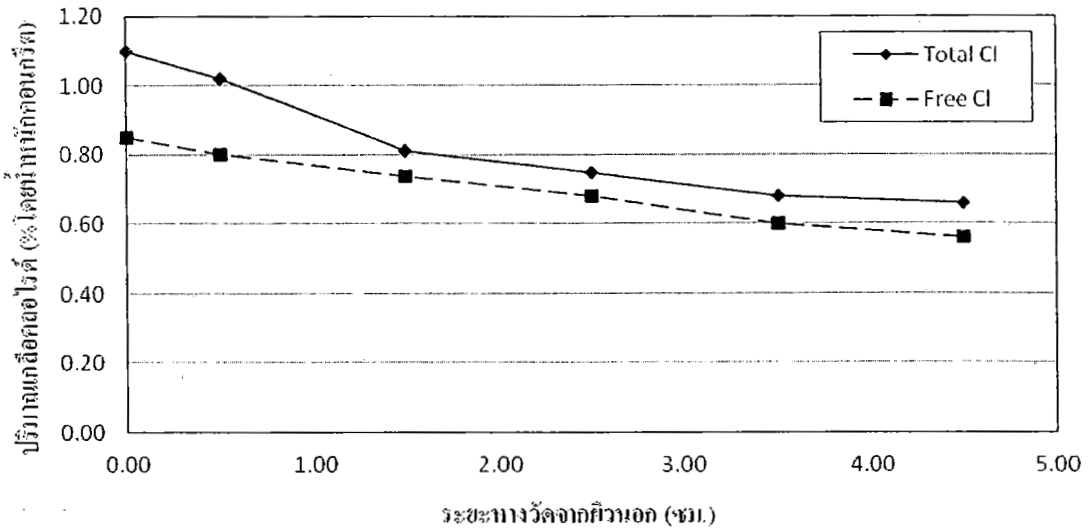


รูปที่ 4.17 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานท่อส่งน้ำมัน ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง -300 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 3 เมตร อายุ 42 ปี บริเวณถนนหาดนางรำ กองทัพเรือ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

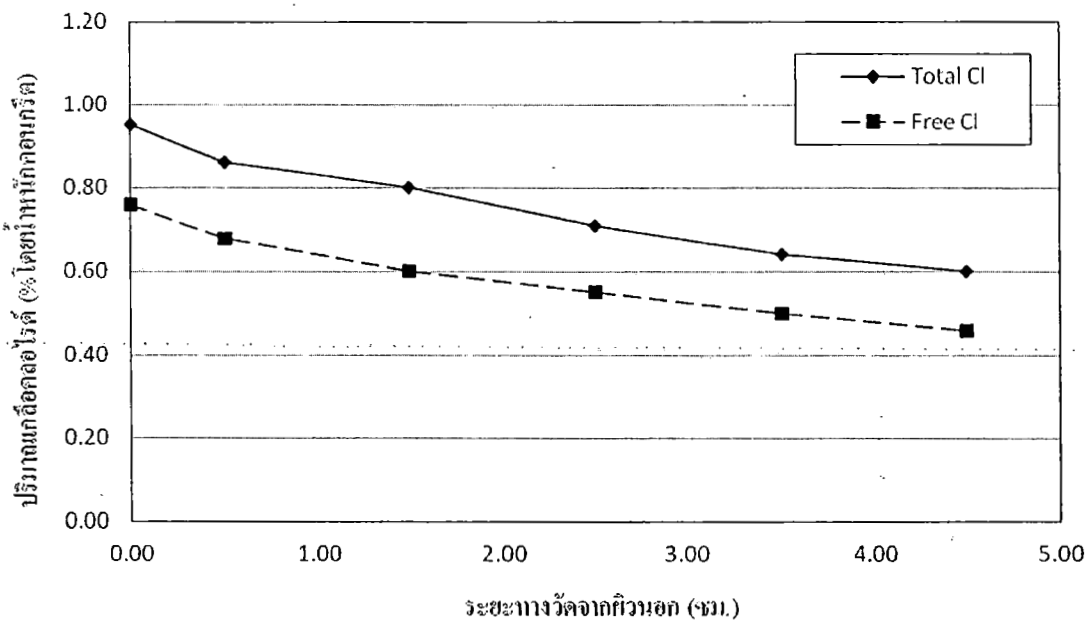


รูปที่ 4.18 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานท่อส่งน้ำมัน ที่ตำแหน่งคาน อายุ 42 ปี บริเวณถนนหาดนางรำกองทัพเรือ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

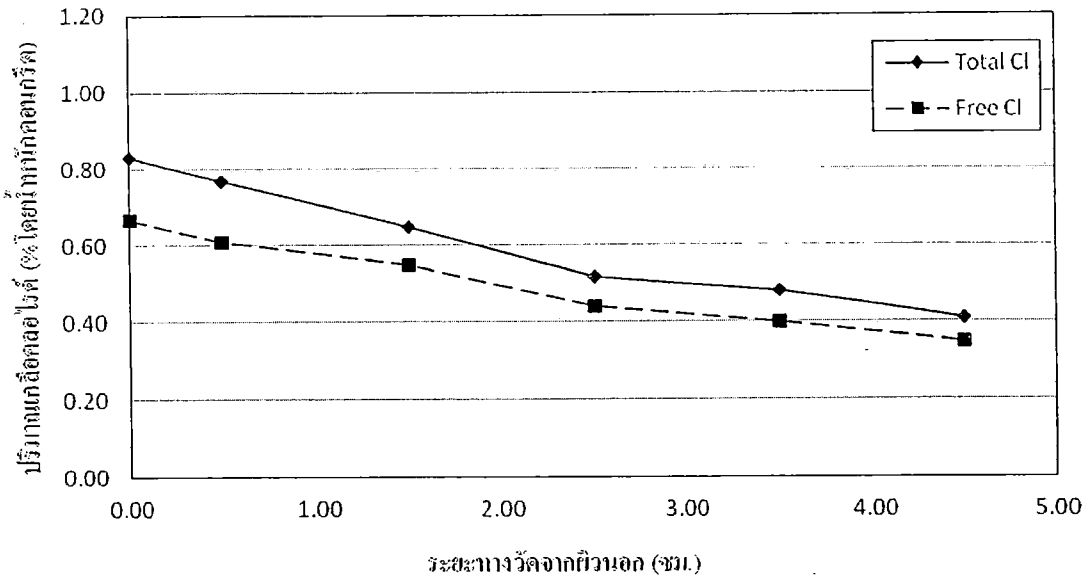
จากรูปที่ 4.15 , 4.16 , 4.17 และ 4.18 เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของโครงสร้างสะพานท่อส่งน้ำมัน อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี ที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยมีอายุโครงสร้าง 42 ปี พบว่าการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางจากทะเลเข้าสู่ชายฝั่ง ที่เป็นเช่นนี้เพราะในบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างอยู่ในชั้นบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตจะไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ถูกพัดมา โดยที่จะสังเกตได้ว่าในบริเวณชายฝั่งจะมีละอองน้ำทะเลพัดมามากกว่าในบริเวณที่อยู่ในทะเล โดยละอองน้ำทะเลนี้จะมาจากการแตกตัวของคลื่น จึงทำให้บริเวณโครงสร้างที่อยู่ใกล้กับชายฝั่งทะเลมีการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มาก และจะสังเกตได้ว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของโครงสร้างด้านนอกจะมีค่ามากที่สุดและจะลดลงโดยลำดับ ส่วนปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระนั้นจะมีค่าน้อยกว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและจะมีค่าลดลงตามระยะทางจากผิวนอกที่มากขึ้น แต่จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ของโครงสร้างคอนกรีตที่ผิวด้านนอกจะมีค่าน้อย ที่เป็นเช่นนั้นอาจจะเกิดจากการชะล้างของน้ำฝนจึงทำให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ในบริเวณดังกล่าวนี้มีค่าน้อยกว่าด้านในของโครงสร้างคอนกรีต



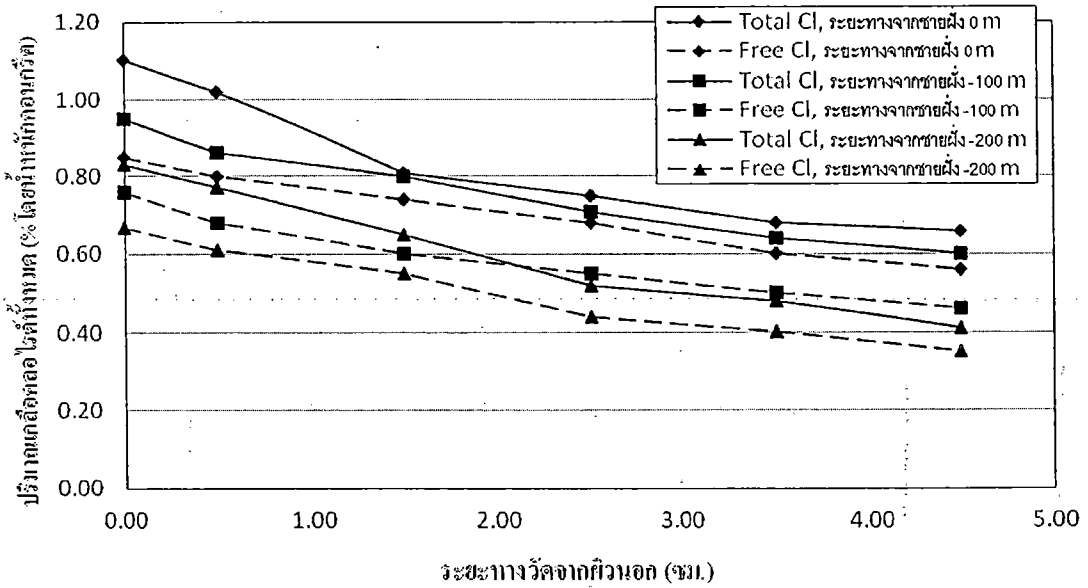
รูปที่ 4.19 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานแสมสาร ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง 0 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.5 เมตร อายุ 30 ปี บริเวณถนนบ้านแสมสาร อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



รูปที่ 4.20 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานแสมสาร ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง -100 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.5 เมตร อายุ 30 ปี บริเวณถนนบ้านแสมสาร อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

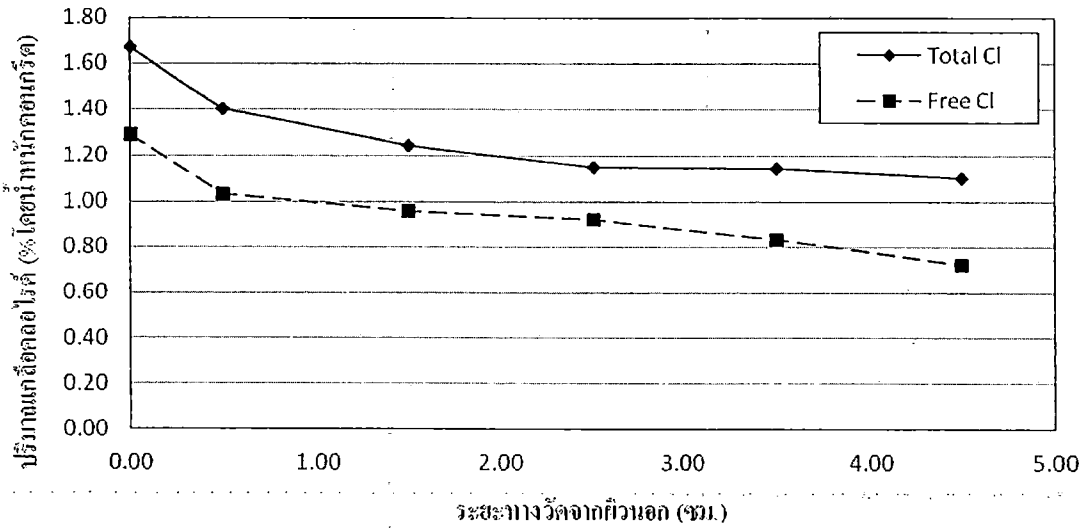


รูปที่ 4.21 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานแสมสาร ที่ตำแหน่งคาน ระยะทางจากชายฝั่ง -200 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.5 เมตร อายุ 30 ปี บริเวณถนนบ้านแสมสาร อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

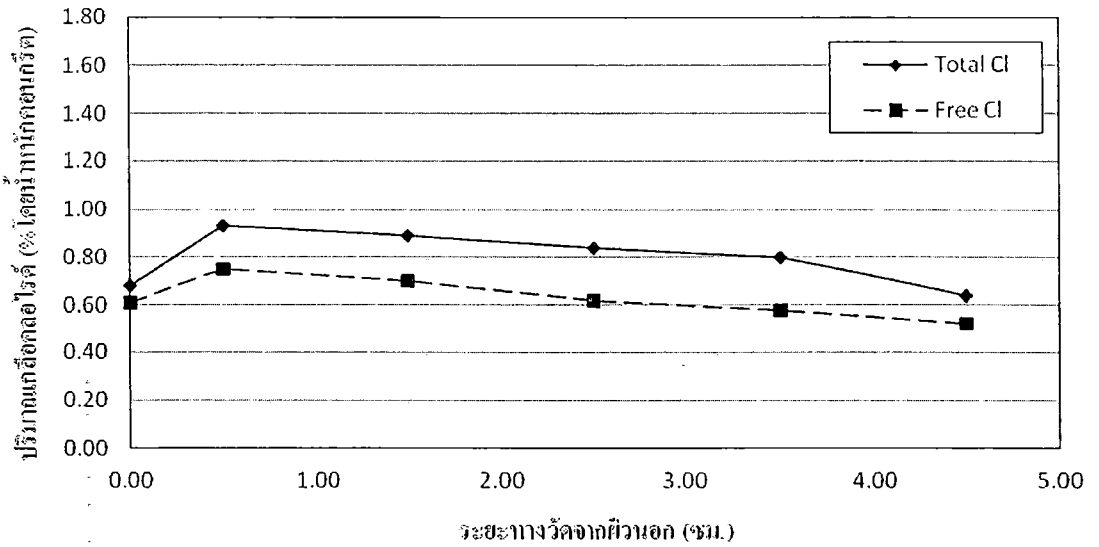


รูปที่ 4.22 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของสะพานแสมสาร ที่ตำแหน่งคาน อายุ 30 ปี บริเวณถนนบ้านแสมสาร อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

จากรูปที่ 4.19 , 4.20 , 4.21 และ 4.22 เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของโครงสร้างสะพานแสมสาร อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี ที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยมีอายุโครงสร้าง 30 ปี พบว่าการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางจากทะเลเข้าสู่ชายฝั่ง คือที่ระยะทางจากชายฝั่งเท่ากับ 0 เมตร จะมีปริมาณการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตมากที่สุด ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างอยู่ในชั้นบรรยากาศสภาวะละอองคลื่น (Splash zone) จึงทำให้มีปริมาณการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มากกว่าโครงสร้างที่มีระยะทางจากชายฝั่ง -100 เมตร และ -200 เมตร ซึ่งทั้ง 2 โครงสร้างนี้ในบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างอยู่ในชั้นบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) จึงทำให้มีค่าการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างน้อยกว่า และจะสังเกตได้ว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดจะมีค่าลดลงโดยลำดับเมื่อระยะทางจากผิวด้านนอกของโครงสร้างคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างเดียวกันจะมีค่าน้อยกว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด และจะมีค่าลดลงโดยลำดับเมื่อระยะทางจากผิวด้านนอกมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

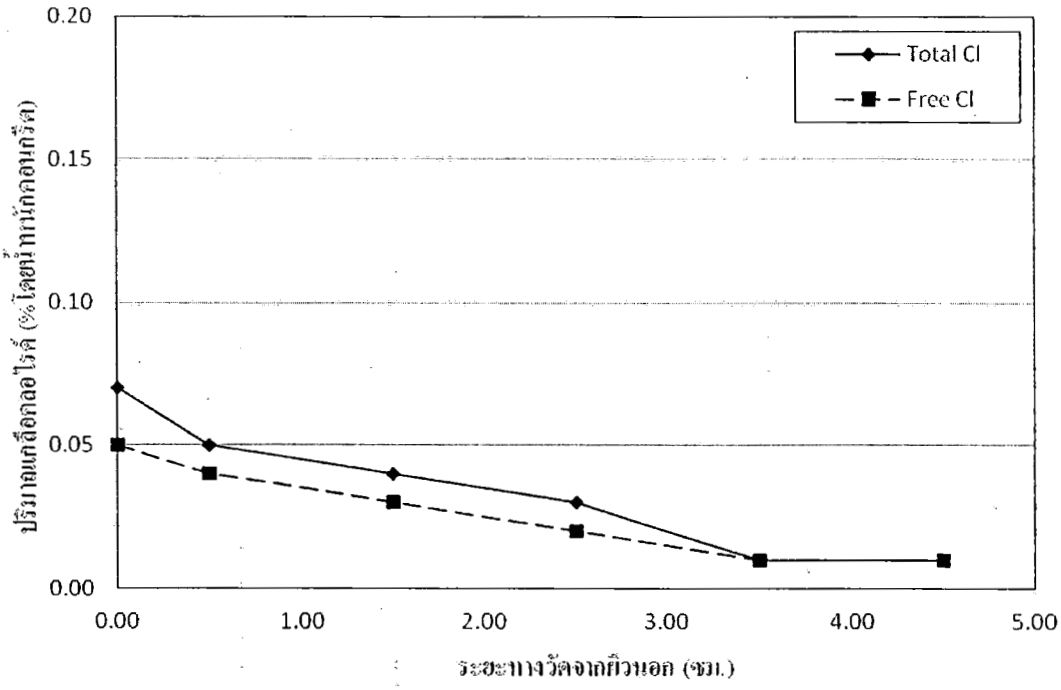


รูปที่ 4.23 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของกำแพงกั้นคลื่น ที่ตำแหน่งกำแพง ระยะทางจากชายฝั่ง 0 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.5 เมตร อายุ 42 ปี บริเวณถนนท่าเทียบเรือจักรกรีนฤเบศร์ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

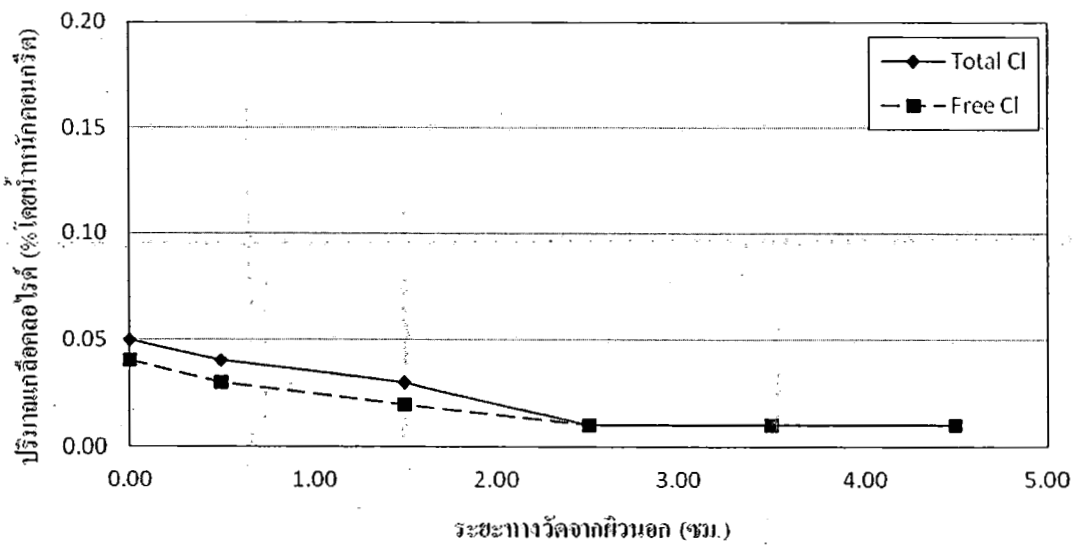


รูปที่ 4.24 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของกำแพงกั้นคลื่น ที่ตำแหน่งกำแพง ระยะทางจากชายฝั่ง -10 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.5 เมตร อายุ 42 ปี บริเวณถนนท่าเทียบเรือจักรกรีนฤเบศร์ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

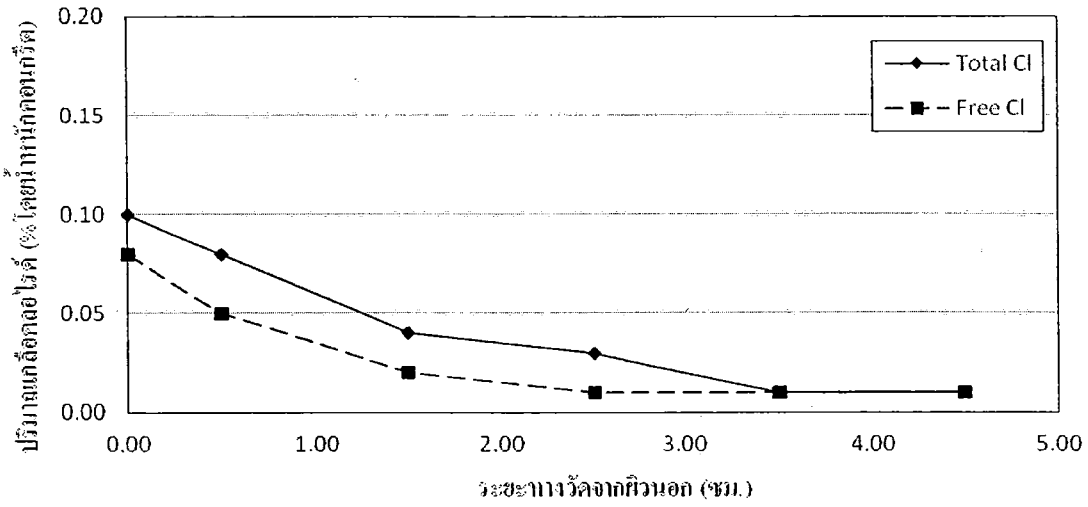
จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของโครงสร้างกำแพงกั้นคลื่น อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี ที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยมีอายุโครงสร้าง 42 ปี พบว่าปริมาณการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อความสูงจากระดับน้ำทะเลมีค่าลดลง โดยจากรูปที่ 4.23 ในบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างมีความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 0.5 เมตร อยู่ในชั้นบรรยากาศแบบสภาวะละอองคลื่น (Splash zone) จึงทำให้มีปริมาณการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มากกว่าในบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 1.5 เมตร ซึ่งอยู่ในชั้นบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) และจะสังเกตุได้ว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดจะมีค่าลดลงโดยลำดับเมื่อระยะทางจากผิวนอกของโครงสร้างคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระจะมีค่าน้อยกว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระจะมีค่าลดลงโดยลำดับเมื่อระยะทางจากผิวนอกของโครงสร้างคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จากรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวนอกสุดของโครงสร้างคอนกรีตจะมีค่าน้อยกว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ด้านในของโครงสร้างคอนกรีต ที่เป็นเช่นนี้อาจจะมาจากการชะล้างของน้ำฝนจึงส่งผลให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวด้านนอกสุดของโครงสร้างคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าด้านในของโครงสร้างคอนกรีตในตำแหน่งเดียวกัน



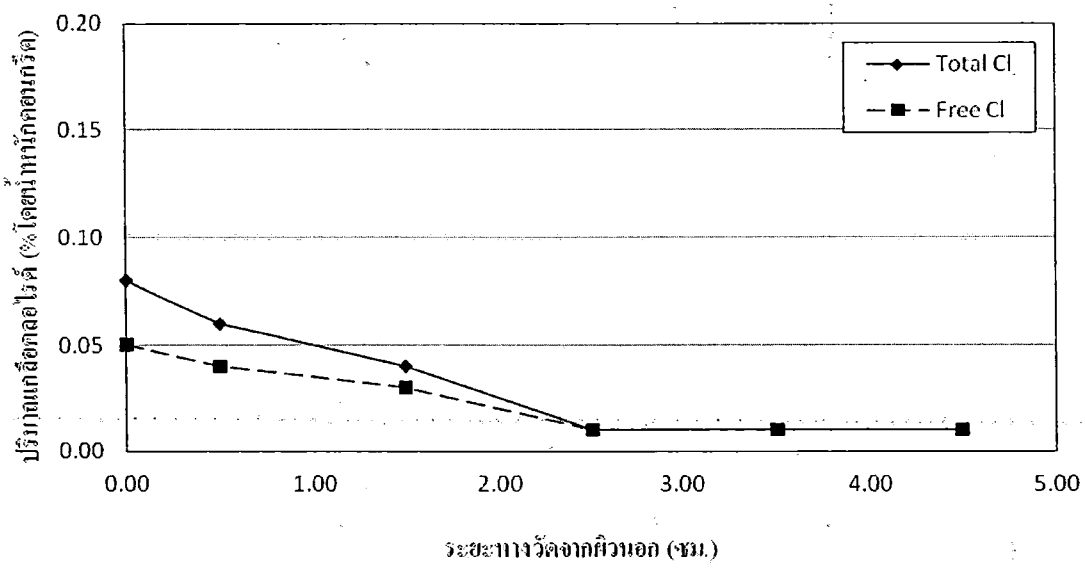
รูปที่ 4.25 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของเสาไฟฟ้าหน้าตำรวจน้ำ ที่ตำแหน่งเสา ระยะทางจากชายฝั่ง 50 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 2.5 เมตร อายุ 20 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



รูปที่ 4.26 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของเสาไฟฟ้าหน้าตำรวจน้ำ ที่ตำแหน่งเสา ระยะทางจากชายฝั่ง 50 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 3 เมตร อายุ 20 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



รูปที่ 4.27 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของเสาไฟฟ้า ที่ตำแหน่งเสา ระยะทางจากชายฝั่ง 30 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 2.5 เมตร อายุ 20 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี



รูปที่ 4.28 ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกของเสาไฟฟ้า ที่ตำแหน่งเสา ระยะทางจากชายฝั่ง 30 เมตร ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 3 เมตร อายุ 20 ปี บริเวณถนนหน้าอำเภอสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี

จากรูปที่ 4.25 , 4.26 , 4.27 และ 4.28 เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและเกลือคลอไรด์อิสระของเสาไฟฟ้าที่ตั้งอยู่ในสภาวะบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี พบว่าเมื่อระยะทางจากชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดินมีผลกระทบต่อปริมาณการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อันเนื่องมาจากโครงสร้างเสาไฟฟ้าตั้งอยู่บนแผ่นดินซึ่งไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่โครงสร้างเสาไฟฟ้าได้รับเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลโดยมากับละอองน้ำทะเลในอากาศที่พัดเข้าหาแผ่นดิน และจากรูปที่ 4.25 ถึง 4.28 จะเห็นได้ว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางจากผิวนอกของโครงสร้างคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าในบางจุดปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระมีค่าเท่ากัน ซึ่งเป็นผลมาจากความละเอียดของเครื่อง Potensiometric titration ที่มีความละเอียดในระดับ 0.01 จึงทำให้ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระมีค่าเท่ากัน

4.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย

จากการวัดค่า Rebound number ด้วยเครื่อง Schmidt hammer ที่ผิวหน้าคอนกรีตของตัวอย่างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และคำนวณหากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ละตำแหน่ง ซึ่งได้ผลของการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในแต่ละโครงสร้าง แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ

ประเภทของโครงสร้างคอนกรีต	สถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุ (ปี)	ระยะทางจากชายฝั่ง (เมตร)	ความสูง (เมตร)	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (กก./ซม^2)
สะพาน	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	40	0	0	460
		40	0	0.5	348
		40	0	0.5	348
		1	-5	1.25	348
		40	-340	2	421
		40	-480	2	421
	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	40	-10	0.5	421
		10	-10	0.5	460
		10	-10	0.5	421
	ถนนหาดนางรำกองทัพเรือ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	42	0	2	348
		42	-150	2	380
		42	-480	3	389
	ถนนบ้านแสมสาร อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	10	0	0.5	389
		10	-100	1.5	389
		40	-100	1.5	377
กำแพงกั้นคลื่น	ถนนท่าเทียบเรือจักรกรีนฤเบศร์ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	42	-10	1.5	407
		42	0	0.5	411
เสาไฟฟ้า	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	20	50	2.5	494
		10	50	3	411
		20	50	2.5	485
		20	50	3	485

จากข้อมูลที่แสดงให้เห็นในตารางที่ 4.2 เมื่อทราบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในแต่ละแห่ง จะทำการวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้ในการผสมคอนกรีต โดย

สมมุติ คอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างทุกสถานที่ใช้ ซีเมนต์ล้วน เป็นวัสดุประสาน

ใช้ ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 350 กก/ม^3

หิน เท่ากับ 1,100 กก/ม^3

ทราย เท่ากับ 800 กก/ม^3

และ คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด มากกว่า 300 กก/ม^2 ที่อายุ 28 วัน ให้ใช้สารลดปริมาณน้ำในอัตราส่วนผสมของคอนกรีต และ คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด น้อยกว่า 300 กก/ม^2 ที่อายุ 28 วัน จะไม่ใช้สารลดปริมาณน้ำในอัตราส่วนผสมของคอนกรีต

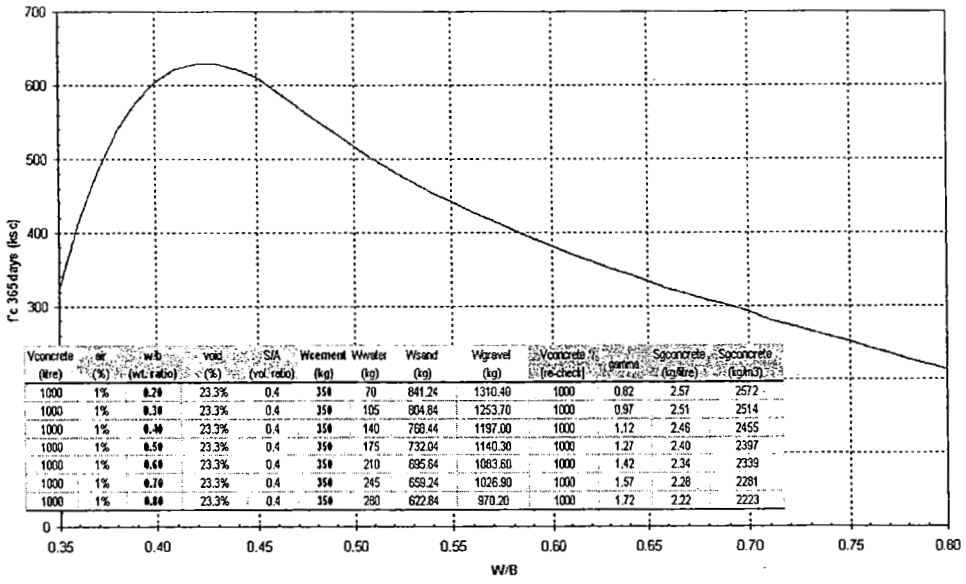
ทำการวิเคราะห์ย้อนกลับโดยใช้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ " FACOMP T2.0" โดยจะพิจารณาถึงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 ปี ทำโดยการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆกัน ซึ่งจะได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีอายุ 1 ปี ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.29 และจากผลการสำรวจอายุการใช้งานของโครงสร้างแต่ละแห่งนั้นมีอายุของโครงสร้างมากกว่า 1 ปี แต่ในการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อายุมากๆนั่น ให้ใช้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 ปีในการวิเคราะห์ เนื่องจากการพัฒนากำลังของคอนกรีตมีค่าที่น้อยมากเมื่ออายุของคอนกรีตมากๆ และยังมีผลกระทบจากการทำลายคอนกรีตจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ ซึ่งอาจทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้ เมื่ออายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะสมมุติให้การสูญเสียกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่อโครงสร้างนั้นๆได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม

โดย กำหนดให้ ช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

3-5 ปี มีการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ประมาณ 5 %

6-10 ปี มีการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ประมาณ 10 %

11 ปีขึ้นไปมีการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ประมาณ 15 %



Vconcrete (litre)	air (%)	w/b (wt. ratio)	void (%)	S/A (vol. ratio)	Wcement (kg)	Wwater (kg)	Wsand (kg)	Wgravel (kg)	Vconcrete [re-check]	gamma	Sgconcrete (kg/litre)	Sgconcrete (kg/m3)
1000	1%	0.20	23.3%	0.4	350	70	841.24	1310.40	1000	0.82	2.57	2572
1000	1%	0.30	23.3%	0.4	350	105	804.84	1253.70	1000	0.97	2.51	2514
1000	1%	0.40	23.3%	0.4	350	140	768.44	1197.00	1000	1.12	2.46	2455
1000	1%	0.50	23.3%	0.4	350	175	732.04	1140.30	1000	1.27	2.40	2397
1000	1%	0.60	23.3%	0.4	350	210	695.64	1083.60	1000	1.42	2.34	2339
1000	1%	0.70	23.3%	0.4	350	245	659.24	1026.90	1000	1.57	2.28	2281
1000	1%	0.80	23.3%	0.4	350	280	622.84	970.20	1000	1.72	2.22	2223

รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 ปี และ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ได้จากการคำนวณโดย "FACOMP T2.0"

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

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลต่างๆ ในการเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ

ประเภทของโครงสร้างคอนกรีต	สถานที่ตั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	อายุ (ปี)	ระยะทางจากชายฝั่ง (เมตร)	ความสูง (เมตร)	f_c'	$f_{c\ Adjust}'$	W/B
สะพาน	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	40	0	0	460	529.0	0.492
		40	0	0.5	348	434.7	0.555
		40	0	1.5	365	365.0	0.610
		1	-5	1.25	367	422.1	0.558
		40	-340	2	421	484.2	0.519
		40	-480	2	413	475.0	0.519
	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	10	-10	0.5	435	478.5	0.550
		10	-10	0.8	446	490.6	0.519
		10	-10	0.8	435	478.5	0.530
	ถนนหาดนางรำกองทัพเรือ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	42	0	2	381	438.2	0.558
		42	-150	3	380	437.0	0.558
		42	-300	2	389	447.4	0.558
	ถนนบ้านแสมสาร อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	10	0	0.5	355	408.3	0.572
		10	-300	1.5	380	414.0	0.563
		40	-200	1.5	377	433.6	0.555
กำแพงกั้นคลื่น	ถนนท่าเทียบเรือจักรกรีนฤเบศร์ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	42	-10	1.5	407	468.1	0.531
		42	0	0.5	411	472.7	0.528
เสาไฟฟ้า	ถนนหน้าอำเภอ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	20	50	2.5	494	568.1	0.572
		20	50	3	477	548.6	0.482
		10	50	2.5	485	557.8	0.470
		20	50	3	486	558.9	0.470

บทที่ 5
สรุปผล

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่สิ่งแวดล้อมทะเลของไทย ในปีที่ 1 ของโครงการวิจัย สามารถสรุปผลการวิจัยเบื้องต้นได้ดังนี้

1. ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายในคอนกรีตของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่ามากขึ้นเมื่อโครงสร้างนั้นเผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเลนานขึ้น อีกทั้งปริมาณเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางวัดจากผิวด้านนอกของโครงสร้างมากขึ้น

2. ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ภายในคอนกรีตของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่บนพื้นดินจะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่มีการสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง

3. เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์เป็นระยะเวลานานขึ้น พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตมีแนวโน้ม

4. ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆหลายปัจจัย เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล และความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด