



การแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่  
ในสภาพแวดล้อมทะเล กรณีศึกษา : อำเภอหัวหิน  
และอำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์



โดย  
ผศ.ดร.ชูศักดิ์ ศีรีรัตน์  
ศุภชัย ไทยพุ่ม

สนับสนุนงบประมาณโดย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
ประจำปีงบประมาณ 2558

CHLORIDE PENETRATION OF REINFORCED CONCRETE  
STRUCTURE IN MARINE ENVIRONMENT.  
CASE STUDY : HUAHIN AND PRANBURI IN  
PRACHUAP KHIRI KHAN PROVINCE.



By

CHUSAK KERERAT  
SUPACHAI THAIPUM

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2015

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงบรรลุผลตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยดีนั้นผู้จัดทำขอขอบหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งหลาย ได้แก่ แขนงการทางประจวบคีรีขันธ์ เทศบาลเมืองหัวหิน องค์การบริหารส่วนจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ แขนงการทางประจวบคีรีขันธ์ เทศบาลปราณบุรี และแขนงการทางประจวบคีรีขันธ์ (หัวหิน) ที่ให้ความช่วยเหลือผู้จัดทำ ให้คำปรึกษาแนะนำ ให้ข้อคิดเห็น ช่วยแก้ปัญหาต่างๆ คู่มือการดำเนินการจัดทำ ของงานวิจัยฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่อำนวยความสะดวกในด้านสถานที่และอุปกรณ์ในการจัดทำวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณผู้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาลัยเป็นงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2558

ชูศักดิ์ ศิริรัตน์  
กรกฎาคม 2559



### บทคัดย่อ

รหัสโครงการ :A20 / 2558  
 ชื่อโครงการ :ปริมาณคลอไรต์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล  
 กรณีศึกษา : อำเภอหัวหิน และอำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
 ชื่อนักวิจัย :ผศ.ดร.ชูศักดิ์ ศีรีรัตน์ และ ศุภชัย ไทยพุ่ม

โครงการนี้มุ่งเน้นศึกษาการแทรกซึมของคลอไรต์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก บริเวณพื้นที่ใกล้ชายฝั่งทะเล ระยะทางไม่เกิน 10 กิโลเมตร ในอำเภอหัวหินและอำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยเก็บผงคอนกรีตตัวอย่างมาวิเคราะห์กับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต เพื่อหาปริมาณคลอไรต์ทั้งหมดในคอนกรีตโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย ตามมาตรฐาน ASTM C1152 ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ปริมาณคลอไรต์จะมีค่าสูงสุดที่บริเวณผิวหน้าและลดลงเมื่อระดับความลึกผิวหน้าเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีรอยร้าวเกิดขึ้น จะทำให้คลอไรด์บริเวณนั้นมีค่าสูง ซึ่งทำให้ไม่สามารถคำนวณได้ด้วยกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตสูงชันและอายุโครงสร้างที่มาก ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรต์ในโครงสร้างลดลง เมื่อพิจารณาพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากคลอไรต์ในอำเภอหัวหิน อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 กิโลเมตร และอำเภอปราณบุรี อยู่ในช่วง 0 ถึง 6 กิโลเมตร ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีปริมาณคลอไรต์ในโครงสร้างเท่ากับ 1 ถึง 25 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จึงควรมีการพิจารณาความเสียหายเนื่องจากคลอไรต์ในขั้นตอนการออกแบบ แต่ถ้าหากมีระยะทางมากกว่าที่กล่าวมา ไม่จำเป็นต้องพิจารณาอิทธิพลของคลอไรด์

คำสำคัญ : คลอไรต์ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก บริเวณชายฝั่งทะเล

E-mail Address :chusak@rmutr.ac.th  
 ระยะเวลาโครงการ :ตุลาคม 2557 – กรกฎาคม 2559



## Abstract

**Code of project :** A20 / 2015

**Project name:**Chloride Content of Reinforced Concrete in Marine Environment.

Case Study :HuaHin and PranBuri, PrachuapKhiri Khan Province.

**Researcher :** Asst.Prof.Dr.Chusak Kererat and Supachai Thaipum

This study is to study a chloride in filtration into reinforced concrete structure in marine environment. The structure of case study located in AmphoeHuaHin and Amphoe Pranburi, and distance of this structure is not exceeding 10 km from a sea. The powder of concrete is obtained from the structure as the representation. They were taken to titrate by mixing with silver nitrate solution and using acid a solvent follow by ASTM C1152 for determining total chloride content. According to the result, a maximum chloride is at a surface at structure and it will decrease along to the increasing depth. In case of concrete cracking, chloride will more increase that it cannot calculate by using the second Fick's law. Moreover, the results showed that more strength and more age of concrete, coefficient of diffusion will be decrease. The structure in marine environment which located not exceed 1 km and 6 km far from sea in Amphoe HunHin and Amphoe Pranburi, respectively, found the chloride content of 1-25 kg/m<sup>3</sup>. Therefore, the structural design process should be considered damage due to chloride. However, the structure located more than 6 km far from sea, the structural design process is not necessary to consider the influence of chloride

**Keywords:**Chloride, Reinforced concrete structure, Coastal areas

**E-mail Address** : chusak@rmutr.ac.th

**Period of project** : October 2014 – July 2016

## สารบัญ

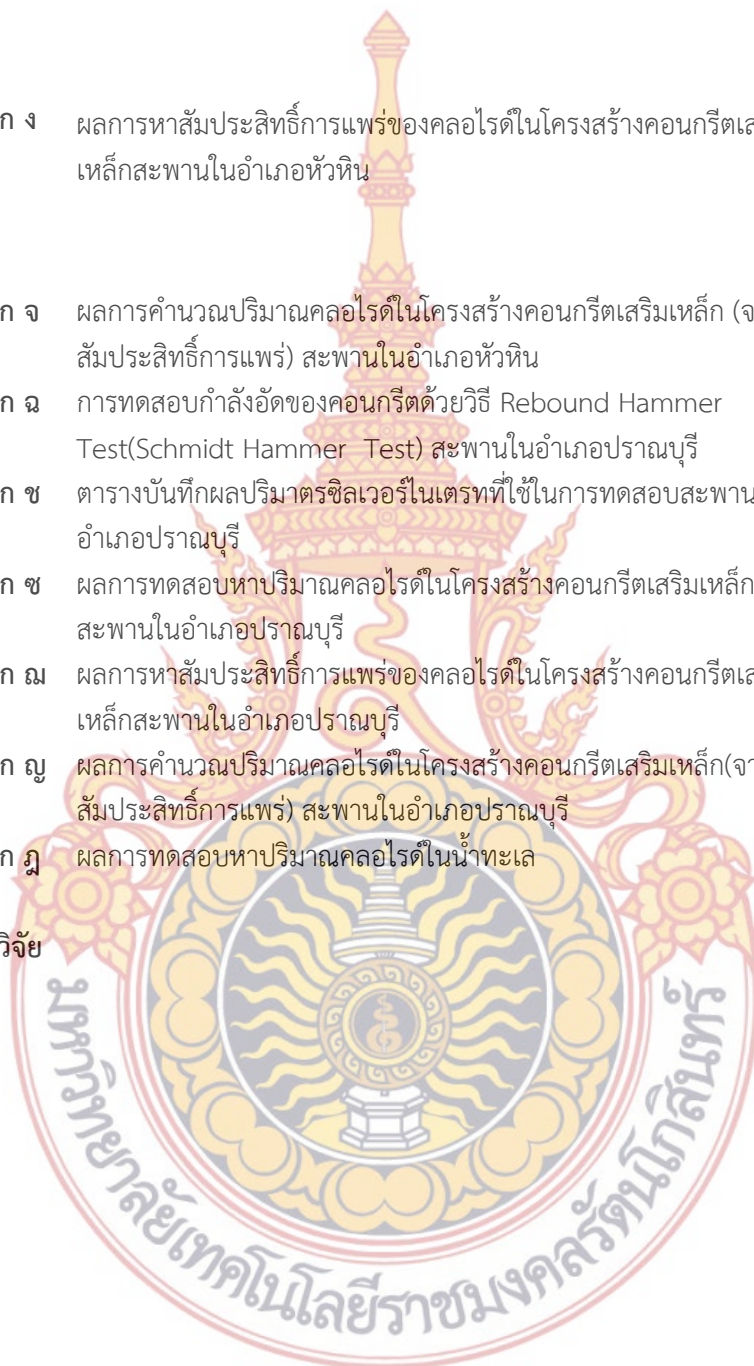
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
สัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
<b>บทที่ 1    บทนำ</b>	<b>1</b>
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
2. วัตถุประสงค์การวิจัย	2
3. คำถามการวิจัย / สมมติฐานการวิจัย	2
4. ขอบเขตการวิจัย	2
5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2    ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
1. คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล	4
2. กลไกการทำลายของสภาวะแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก	5
3. การแทรกซึมของคลอไรด์	7
4. แหล่งที่มาของคลอไรด์	8
5. ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต	9
6. กลไกการเกิดสนิมในเหล็กเสริม	11
7. การประเมินความเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	13
8. อิทธิพลที่มีผลต่อการกัดกร่อน	14
9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
<b>บทที่ 3    ระเบียบวิธีการวิจัย</b>	<b>21</b>
1. สถานที่ตั้งและตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2. เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ	22
3. ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างคอนกรีต	26
4. วิธีการเตรียมสารเคมีที่ใช้สำหรับการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์	28
5. วิธีการทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride)	28
6. การเก็บรวบรวมข้อมูล	32
7. การวิเคราะห์ข้อมูล	32
8. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์	33
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	<b>34</b>
1. ข้อมูลเบื้องต้นของโครงสร้างสะพานในปัจจุบัน	34
2. การกระจายของปริมาณคลอไรด์ที่ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล	43
3. การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ ในโครงสร้างสะพาน	47
4. สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างสะพาน	54
5. การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างสะพานกับอายุของโครงสร้างและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต	69
6. ระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง	72
7. แนวทางการป้องกันและการแก้ไขปัญหาคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็ก	73
<b>บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>74</b>
1. สรุปผลการวิจัย	74
2. อภิปรายผล	75
3. ข้อเสนอแนะ	75
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>76</b>
<b>ภาคผนวก ก</b> การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยวิธี Rebound Test(Schmidt Hammer Test) สะพานในอำเภอหัวหิน	79
<b>ภาคผนวก ข</b> ตารางบันทึกผลปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบสะพานในอำเภอหัวหิน	81
<b>ภาคผนวก ค</b> ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานในอำเภอหัวหิน	87

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง	93
ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสะพานในอำเภอหัวหิน	
ภาคผนวก จ	99
ผลการคำนวณปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (จากสัมประสิทธิ์การแพร่) สะพานในอำเภอหัวหิน	
ภาคผนวก ฉ	105
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยวิธี Rebound Hammer Test(Schmidt Hammer Test) สะพานในอำเภอปราณบุรี	
ภาคผนวก ช	107
ตารางบันทึกผลปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบสะพานในอำเภอปราณบุรี	
ภาคผนวก ซ	113
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานในอำเภอปราณบุรี	
ภาคผนวก ฌ	119
ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสะพานในอำเภอปราณบุรี	
ภาคผนวก ฎ	125
ผลการคำนวณปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก(จากสัมประสิทธิ์การแพร่) สะพานในอำเภอปราณบุรี	
ภาคผนวก ฏ	131
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำทะเล	
ประวัติผู้วิจัย	133





## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุดในคอนกรีตมาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ	10
2	ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุดในคอนกรีตจากข้อกำหนดต่างๆ	10
3	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน	80
4	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน	80
5	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน	80
6	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน	80
7	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน	80
8	ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน	82
9	ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน	83
10	ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน	84
11	ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน	85
12	ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน	86
13	ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน	88
14	ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน	89
15	ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน	90
16	ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน	91
17	ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน	92
18	ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน	94
19	ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน	95
20	ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน	96
21	ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน	97

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
22	ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน	98
23	ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน	100
24	ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน	101
25	ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน	102
26	ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน	103
27	ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน	104
28	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี	106
29	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี	106
30	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี	106
31	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี	106
32	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี	106
33	ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี	108
34	ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี	109
35	ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี	110
36	ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี	111
37	ผลปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี	112
38	ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี	114
39	ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี	115
40	ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี	116
41	ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี	117

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
42	ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพาน ที่ 5 อำเภอปราณบุรี	118
43	ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็ก สะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี	120
44	ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็ก สะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี	121
45	ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็ก สะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี	122
46	ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็ก สะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี	123
47	ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็ก สะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี	124
48	ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพาน ที่ 1 อำเภอปราณบุรี	126
49	ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพาน ที่ 2 อำเภอปราณบุรี	127
50	ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพาน ที่ 3 อำเภอปราณบุรี	128
51	ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพาน ที่ 4 อำเภอปราณบุรี	129
52	ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพาน ที่ 5 อำเภอปราณบุรี	130
53	ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำทะเล	132



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต	2
2	ลักษณะโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล	6
3	บริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีต	7
4	กระบวนการไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต	11
5	การประเมินระดับความเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	14
6	ตำแหน่งที่ตั้งสะพานในเขตอำเภอหัวหิน	21
7	ตำแหน่งที่ตั้งสะพานในเขตอำเภอบางสะพาน	22
8	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	23
9	ส่วานไฟฟ้า	23
10	ภาชนะรองรับผงคอนกรีตที่ระดับความลึกแต่ละชั้น	23
11	ถุงเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต	24
12	เครื่องตัม	24
13	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล	24
14	กระดาษกรองเนื้อหยาบ	25
15	บีกเกอร์ ขนาดต่างๆ	25
16	บริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากโครงสร้างสะพาน	26
17	การเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต	27
18	ซองเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต	27
19	การซ่อมแซมบริเวณที่เก็บตัวอย่างคอนกรีต	27
20	การชั่งผงคอนกรีต	29
21	การเติมน้ำกลั่นลงในผงคอนกรีตตัวอย่าง	29
22	การเติมกรดไนตริกลงในผงคอนกรีตตัวอย่าง	29
23	(ก) นำสารละลายตัวอย่างไปต้มจนเดือด (ข) พักสารละลายตัวอย่างไว้จนอุณหภูมิลดลง	30
24	นำสารละลายตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรอง	30
25	การปิเปตสารละลายตัวอย่าง	30
26	การเติมสารละลายโซเดียมโบรไมด์ลงในสารละลายตัวอย่าง	31
27	การเติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมตลงในสารละลายตัวอย่างแล้ว	31



สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	(ก) การนำสารละลายตัวอย่างแล้วไปไตเตรท (ข) การเกิดตะกอนสีแดงอิฐในสารละลายตัวอย่าง	32
29	ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน	34
30	สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน	34
31	ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน	35
32	สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน	35
33	ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน	35
34	สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน	36
35	ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน	36
36	สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน	37
37	ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน	38
38	สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน	38
39	ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี	39
40	สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี	39
41	ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี	40
42	สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี	40
43	ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี	41
44	สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี	41
45	ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี	42
46	สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี	42
47	ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี	43
48	สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี	43
49	ปริมาณคลอไรต์ในแหล่งน้ำบริเวณโครงสร้างสะพานในเขตอำเภอหัวหิน	44
50	ปริมาณคลอไรต์ในแหล่งน้ำบริเวณโครงสร้างสะพานในเขตอำเภอปราณบุรี	44
51	ปริมาณคลอไรต์ในระดับ 0 ถึง 2 เซนติเมตร ของโครงสร้างสะพานในเขตอำเภอหัวหิน	45
52	ปริมาณคลอไรต์ในระดับ 0 ถึง 2 เซนติเมตร ของโครงสร้างสะพานในเขตอำเภอปราณบุรี	45

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
53	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างสะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน	47
54	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน	48
55	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน	48
56	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน	49
57	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน	49
58	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างสะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี	50
59	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างสะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี	50
60	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างสะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี	51
61	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างสะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี	51
62	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างสะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี	52
63	การกระจายตัวของคลอไรด์ไอออนที่มาจากการปนเปื้อน	53
64	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราว สะพานสะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน	54
65	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคาน สะพานสะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน	55
66	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อ สะพาน สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน	55
67	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราว สะพานสะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน	56
68	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคาน สะพานสะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน	56





## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
85	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพานสะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี	65
86	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคานสะพานสะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี	65
87	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อสะพานสะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี	66
88	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพานสะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี	66
89	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคานสะพานสะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี	67
90	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อสะพานสะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี	67
91	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพานสะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี	68
92	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคานสะพานสะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี	68
93	ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อสะพานสะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี	69
94	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เปรียบเทียบกับอายุของโครงสร้างและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต อำเภอหัวหิน	70
95	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เปรียบเทียบกับอายุของโครงสร้างและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต อำเภอปราณบุรี	70
96	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์กับเวลา	71
97	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตกับกำลังอัดของคอนกรีต	72



### สัญลักษณ์และคำย่อ

pH	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
AgNO <sub>3</sub>	สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต
CaCl <sub>2</sub>	แคลเซียมคลอไรด์
Fe(OH) <sub>2</sub>	เฟอร์โรไฮดรอกไซด์
Fe(OH) <sub>3</sub>	เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์
FeCl <sub>2</sub>	ไอร์ออนคลอไรด์
HCl	กรดไฮโดรคลอริก
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	เกลือซัลเฟต
Cl <sup>-</sup>	เกลือคลอไรด์
Fe <sup>2+</sup>	ประจุเหล็ก
OH <sup>-</sup>	ประจุไฮดรอกซิล
C <sub>o</sub>	คลอไรด์บนผิวหน้าคอนกรีต
D <sub>ap</sub>	สัมประสิทธิ์การแพร่
c	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม
C <sub>3</sub> A	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
C <sub>4</sub> AF	เตตระแคลเซียมอลูมิเนียมเฟอร์ไรต์
C-S-H	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
M-S-H	แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต
C-A-H	แคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaCl <sub>2</sub> ·10H <sub>2</sub> O	Friedel's salt
3CaO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaCl <sub>2</sub> ·10H <sub>2</sub> O	Calcium Chloroferrite
ASTM C1152	American Society for Testing and Materials Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete
ACI 201	American Concrete Institute for guide for durable concrete
ACI 222	American Concrete Institute for corrosion of metals concrete
ACI 318	American Concrete Institute for building code requirements for structural concrete and commentary
ACI 357	American Concrete Institute for guide for design and construction of fixed concrete offshore structures

### สัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

BS 8110

British Standard for the design and construction of reinforced and prestressed concrete structures



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป คู่กับการเสริมเหล็กไว้ภายใน ซึ่งจะทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น สามารถรับทั้งแรงอัดและแรงดึงได้ดี ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปนั้น มักจะถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 50 ปี หรือมากกว่า แต่ในสภาพความเป็นจริงแล้วอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก กลับลดลงเร็วกว่าความเป็นจริง โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเลและพื้นที่ใกล้เคียง มักจะพบปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเป็นจำนวนมาก อันเนื่องมาจากปัจจัยทางด้านกายภาพ อย่างเช่น อุณหภูมิและความชื้น เป็นต้น พร้อมกับปัจจัยทางด้านเคมี ซึ่งเกิดจากสารประกอบที่ปะปนอยู่ในน้ำทะเลแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างเช่น ซัลเฟต และคลอไรด์ เป็นต้น

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในบริเวณชายฝั่งทะเลและพื้นที่ใกล้เคียงนั้น มักมีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีปริมาณของไตรแคลเซียมซิลิเกต ต่ำ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมซิลิเกตกับซัลเฟตที่ปะปนในน้ำทะเล ซึ่งทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสียหายน้อยลง แต่ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในบริเวณชายฝั่งและพื้นที่ใกล้เคียงไม่ได้เกิดขึ้นจากสารประกอบซัลเฟตเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างนั้น สามารถทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหายขึ้นได้ อันเนื่องมาจากการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำทะเลประมาณร้อยละ 1.8 โดยน้ำหนักของน้ำทะเล [1] แทรกซึมเข้าสู่เนื้อของคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 1-1 ซึ่งเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลในพื้นที่อำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ที่เกิดความเสียหายจากการที่คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตซึ่งจะไม่ทำลายเนื้อคอนกรีตของโครงสร้างโดยตรง แต่จะแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมภายในจนเกิดสนิมขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวกับเหล็กเสริม นอกจากนั้นแล้วจะทำให้เหล็กขยายตัวจนดันเนื้อคอนกรีตให้แตกแล้วหลุดออกทำให้ความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและอายุการใช้งานลดลง

ดังนั้นแล้วจึงสมควรที่จะศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณชายฝั่งทะเลและพื้นที่ใกล้เคียงที่จะส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้แก้ไข ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลและพื้นที่ใกล้เคียงที่เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วให้มีอายุการใช้งานยาวนานและมีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น





ภาพที่ 1 ผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต (สะพานปลา อำเภอบรามบุรี)

## 2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะห่างจากชายฝั่งทะเลต่อปริมาณคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 2 เพื่อศึกษาความเร็วการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 3 เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบโครงสร้างใกล้ชายฝั่งทะเล
- 4 เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปเผยแพร่ถ่ายทอดเทคโนโลยีแก่วิศวกรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ตีพิมพ์เผยแพร่ หรือ/และนำเสนอระดับชาติ

## 3. คำถามการวิจัย / สมมติฐานการวิจัย (ถ้ามี)

ระยะทางจากชายฝั่งทะเลไกลขึ้นเท่าไร โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กไม่ต้องพิจารณาอิทธิพลของคลอไรด์จากทะเล

## 4. ขอบเขตการวิจัย

- 1 สะพานที่ศึกษาเป็นสะพานที่อยู่ใกล้กับบริเวณชายฝั่งทะเลในพื้นที่อำเภอดำเนินสะดวกและปราสาทบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
- 2 การหาปริมาณคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต ใช้วิธีการทดสอบโดยการไทเทรต (Titrate) ในห้องปฏิบัติการ ตามวิธี ASTM C1152



## 5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1 สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยจากคลอไรด์ ในบริเวณอำเภอหัวหิน และอำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

2 สามารถนำค่าคลอไรด์ที่ทดสอบไปพัฒนาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก บริเวณชายฝั่งทะเลและพื้นที่ใกล้เคียงให้มีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานที่ดีขึ้น



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 1. คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine concrete) [2]

สิ่งก่อสร้างประเภทโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในทะเลหรือในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล อย่างบริเวณชายฝั่งทะเลหรือห่างจากทะเลไม่มากนัก มักพบปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเร็วกว่าที่ควรเป็นจำนวนมาก ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งาน (Service life) ที่ลดลง ซึ่งโดยมากมักเกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิม แล้วดันให้เนื้อของคอนกรีตที่หุ้มอยู่นั้นเกิดการแตกร้าวหลุดร่อนเสียหาย ทำให้ต้องสูญเสียงบประมาณในการซ่อมแซมบำรุงรักษาเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ที่โครงสร้างดังกล่าวก็ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (Sulfate resisting Portland cement) ซึ่งมีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ในการก่อสร้าง สาเหตุที่ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่ลดลง ส่วนหนึ่งเป็นเพราะว่าผู้ที่เกี่ยวข้องในงานก่อสร้างยังขาดความรู้ความเข้าใจในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาพการทำลายที่รุนแรงของน้ำทะเล ทั้งนี้ในน้ำทะเลจะมีเกลือหลักๆ อยู่สองชนิดคือ เกลือคลอไรด์ ( ) และเกลือซัลเฟต ซึ่งแต่เดิมวิศวกรมีความเข้าใจว่าคอนกรีตสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งต้านทานซัลเฟตเท่านั้นเป็นส่วนผสมจึงจะป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างคอนกรีตได้ แต่ความจริงแล้วปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จะเหมาะสมกับการใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องเผชิญเกลือซัลเฟตเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จะเห็นได้จากในปูนซีเมนต์จะมีปริมาณสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C3A) ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อลดการเกิดสารแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต หรือเอทริงไจต์ (Ettringite) ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวของคอนกรีต และลดการสูญเสียความสามารถยึดประสานของคอนกรีตเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนจากสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate : C-S-H) ให้เป็นสารแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Magnesium Silicate Hydrate : M-S-H) ที่ไม่มีความสามารถยึดประสาน แต่เรายังสามารถใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียในชุมชนหรือในโครงสร้างบำบัดน้ำเสียของโรงงานซึ่งมีเกลือซัลเฟต แต่ไม่มีเกลือคลอไรด์ละลายอยู่หรืออาจใช้ในงานคอนกรีตล้นที่ต้องเผชิญทั้งเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ก็ได้ แต่ไม่มีเหล็กเสริมอยู่ในคอนกรีต เช่น พื้นคอนกรีตล้นที่ไม่มีเหล็กเสริมแต่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นต้น

การที่จะใช้คอนกรีตให้เหมาะสมกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่มีทั้งเกลือคลอไรด์และเกลือซัลเฟตนั้น มีได้หลายแนวทางด้วยกัน ทั้งการปรับปรุงที่รายละเอียดของแบบก่อสร้าง หรือปรับปรุงที่คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้งานได้ หรืออาจใช้หลายๆ แนวทางประกอบกันเพื่อทำให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่มีอายุการใช้งานยาวนานตามที่ต้องการ ซึ่งแนวทางเหล่านี้ ได้แก่ การเพิ่มระยะหุ้มเหล็กเสริม (Covering depth) ของคอนกรีตในแบบก่อสร้างให้มากขึ้น เพื่อให้ระยะทางที่เกลือคลอไรด์จะแทรกซึมเข้าไปถึงผิวเหล็กมีค่ามากขึ้น เป็นการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างให้

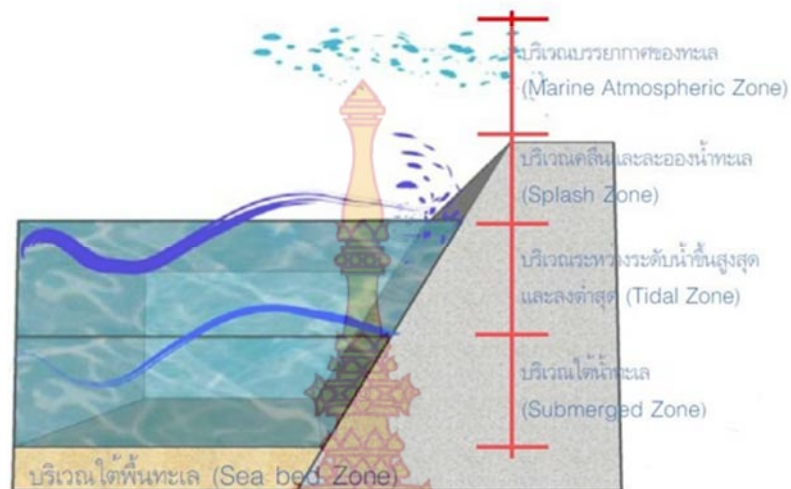
เพิ่มขึ้น หรือการลดอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณวัสดุประสาน (Water to binder ratio) ในคอนกรีตให้ต่ำลงมากๆ เพื่อให้เนื้อคอนกรีตมีความพรุนน้อยลง ซึ่งจะช่วยให้ทั้งเกลือซัลเฟตและเกลือ

คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปได้ยากขึ้น หรือจะใช้การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยการเลือกใช้วัสดุประสานที่ต้านทานทั้งการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากเกลือซัลเฟตและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์ร่วมกัน ซึ่งวัสดุประสานดังกล่าวคงไม่ใช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จะต้านทานเฉพาะเกลือซัลเฟตเพียงเท่านั้น แต่เราอาจใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement) ผสมกับเถ้าลอย (Fly ash) โดยใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะทำให้ได้คอนกรีตมีความพรุนต่ำเนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยไปเติมเต็ม ช่องว่างในคอนกรีต และเพิ่มความสามารถยึดจับเกลือคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้ามาในคอนกรีตไม่ให้เคลื่อนที่สูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เถ้าลอยในประเทศไทยนั้นก็มีหลายชั้นคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก 2135-2545.) ซึ่งวิศวกรจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานด้วย สรุปได้ว่าการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับสิ่งแวดลอมทะเลจะต้องพิจารณาป้องกันทั้งปัญหาการทำลายคอนกรีตโดยเกลือซัลเฟตและปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยเกลือคลอไรด์ควบคู่ไปพร้อมกัน

## 2. กลไกการทำลายของสภาวะแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก [4]

ลักษณะความเสียหายที่อาจเกิดกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล มาจากสาเหตุทางกายภาพโดยได้รับแรงกระทำจากคลื่น ทราบ กรวด ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต รวมไปถึงความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ส่วนสาเหตุจากกระบวนการทางเคมีจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบเคมีต่างๆที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งจะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามประเภทของสารเคมีนั้น โดยความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตในแต่ละบริเวณอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งจะมีความเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการขั้วของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากแรงกระทำของคลื่น ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง การไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งมีการสะสมสารเคมีทั้งซัลเฟตคลอไรด์ และเกลือต่างๆในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าปกติจึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ในกรณีที่มีรอยแตกร้าวเล็กๆซึ่งเกิดจากการหดตัวเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันจะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความเสียหายรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 บริเวณ แสดงดังภาพที่ 2

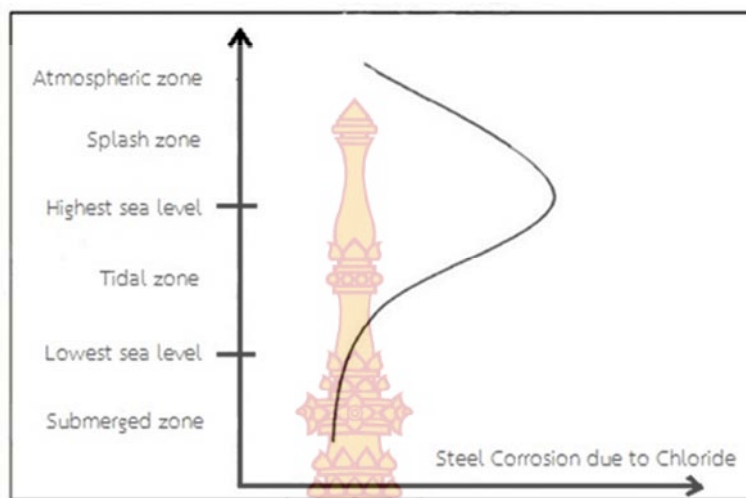




ภาพที่ 2 ลักษณะโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล  
ที่มา: (ศูนย์วิชาการคอนกรีตซีแพค, 2545)

2.1 บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) คอนกรีตบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่พัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทางและความแรงของกระแสลมที่พัดพาละอองไอเกลือ แม้โครงสร้างจะอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับเกลือจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ โดยอาจเริ่มจากรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้ง่ายขึ้น

2.2 บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล เมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ประกอบกับความชื้นและก๊าซออกซิเจนในช่องว่างที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้เหล็กเสริมภายในของคอนกรีตเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความเสียหายได้จากการผุกร่อนเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น ซึ่งจะทำให้คอนกรีตในบริเวณนี้เกิดความเสียหายรุนแรงกว่าบริเวณอื่นๆ แสดงดังในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 บริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีต  
ที่มา: (นันทรัตน์ โยคะวัฒน์ และอภิเดช รัตนดิลก ณ ภูเก็ต, 2556)

2.3 บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนจะแห้งคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม การฟุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การขีดสีจากทรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิต

2.4 บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลต่ำสุด คอนกรีตในบริเวณนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้เกิดจากการกัดกร่อนของซัลเฟต การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะพบได้น้อยมาก เนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอที่ทำให้เกิดสนิม

2.5 บริเวณใต้พื้นทะเล (Seabed zone) เป็นบริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด

### 3. การแทรกซึมของคลอไรด์

การเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตนั้น ถือว่าเป็นสาเหตุที่สำคัญทำโครงสร้างเสื่อมสภาพ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับคอนกรีตได้ ซึ่งจะมีผลต่อความคงทนของคอนกรีตทั้งทางตรงและทางอ้อม และนำไปสู่การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เรียกว่า การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ (Chloride penetration) ซึ่งเกิดขึ้นจากกลไกต่างๆเช่น ความแตกต่างของความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ ประจุไฟฟ้า และแรงดันน้ำ เป็นต้น นอกจากนั้นยังอาจเกิดขึ้นจากแรงขับเคลื่อนของกลไกธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่านด้วย ดังนั้น

กลไกสำคัญของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไกหลักๆ ดังนี้ [1]

3.1 การแพร่ (Diffusion) กลไกนี้มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์เข้าไปยังโพรงคอนกรีตที่อิ่มตัว แรงขับเคลื่อนของเกลือคลอไรด์ในกลไกนี้เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ กล่าวคือ เกลือคลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อสองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตเทียบกับระยะทางและเวลา

3.2 การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเล ตลอดเวลาพบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารถละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนจะเกิดขึ้นเนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีตจะดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุลบจากสิ่งแวดล้อมและสะสมอยู่ในบริเวณนั้นสูงขึ้นได้

3.3 การดึงดูดคาพิลลารี (Capillary suction) สามารถดึงน้ำเกลือคลอไรด์ผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆ บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตได้ โดยทั่วไปโครงสร้างส่วนมากจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงดูดเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆ ด้วยกลไกการดึงดูดคาพิลลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและใช้เวลาสั้น

3.4 แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) สำหรับโครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน เขื่อน อุโมงค์ เป็นต้น ความแตกต่างของความดันน้ำ (Hydraulic head) สามารถทำให้น้ำเกลือซึ่งมีเกลือคลอไรด์เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยังคอนกรีตจากบริเวณที่มีความดันน้ำสูงไปยังบริเวณที่มีความดันน้ำต่ำกว่าได้

#### 4. แหล่งที่มาของคลอไรด์ [1]

เกลือคลอไรด์ (Chloride) อาจมีอยู่ในเนื้อคอนกรีตตั้งแต่แรกเริ่ม โดยมีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตในหินและทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายที่มาจากในแหล่งใกล้ทะเล หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น สารเร่งการก่อตัวจำพวกแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) เป็นต้น แต่ปัญหาของเกลือคลอไรด์ที่ส่งผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้าง ส่วนมากจะเข้ามาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งานโครงสร้างไปแล้วด้วยวิธีเช่น การซึมผ่านคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ การแพร่ของไอออนคลอไรด์ จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต และการซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันน้ำ เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมาจากน้ำทะเล หรือมาจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็ง (De-icing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ซึ่งในน้ำทะเลนั้นจะมีเกลือคลอไรด์ถือเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเล โดยทั่วไปมีประมาณร้อยละ 1.8 โดยน้ำหนักของน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้ว่าคลอไรด์จะซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนที่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้



จึงไม่เป็นปัญหาต่อโครงสร้างมากนัก ส่วนบริเวณที่มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ ร่องลงจะเป็นบริเวณบรรยากาศทะเลและบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง

โดยสภาวะเปียกสลับแห่งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งได้โดยการดึงดูดออสหรือการดึงดูดคาพิวลารี จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตจะระเหยออกไป เหลือไว้แต่แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีกครั้งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนคลอไรด์จึงมีความเข้มข้นสูงบริเวณผิวคอนกรีต และจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้เคียงผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นและจะเข้าสู่คอนกรีตมากขึ้นเรื่อยๆซึ่งภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้น การแพร่ของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตแบบที่สภาวะเปียกสลับแห่งจะใช้เวลาเร็วกว่าคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลตลอดเวลา

การเคลื่อนตัวของไอออนคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาวะเปียกสลับแห่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และการใช้งานของโครงสร้างเป็นต้น โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งไอออนของคลอไรด์ให้เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกละลายน้ำทะเลเป็นบางครั้งที่เวลาช่วงแห้งนานๆ จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้มากกว่าคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งแต่เวลาช่วงแห้งสั้นๆ การกัดกร่อนของคลอไรด์จะเกิดขึ้นต่อเมื่อปริมาณไอออนของคลอไรด์มีมากเพียงพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตบริเวณผิวเหล็กเสริมลดต่ำลงจนถึงระดับวิกฤต(ค่า pH ของเนื้อคอนกรีตจะต้องลดลงต่ำกว่า 9)

## 5. ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต [7]

การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้นั้น จะต้องขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการปมคอนกรีต อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ ชนิดของแคทไอออน (Cation) และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้นๆเผชิญ เป็นต้นโดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีต (Total chloride) นั้น เป็นผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท ได้แก่

5.1 คลอไรด์ที่ถูกจับยึด (Fixed chloride) คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะถูกจับยึดโดยกลไกดังต่อไปนี้ คือ

5.1.1 การยึดจับทางเคมี (Chemical binding) คลอไรด์บางส่วนถูกจับยึดโดยผลผลิตที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำ (Hydration product) เช่นผลผลิตของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ในรูปของ  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Friedel's salt) หรืออาจจะอยู่ในรูปของ  $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Calcium Chloroferrite) หรือแม้แต่อยู่ในโครงสร้างของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

5.1.2 การยึดจับทางกายภาพ (Physical binding) คลอไรด์บางส่วนจะสามารถถูกยึดจับด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) อยู่บนผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดจับอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยาอย่างทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

5.2 คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์นี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าสามารถยึดจับคลอไรด์อิสระนี้ไว้ได้ก็จะสามารถยืดระยะเวลาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตออกไปได้

อย่างไรก็ตาม มีการกำหนดปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ยอมรับในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุดในคอนกรีตมาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ [1]

ประเภทของโครงสร้าง	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุด (ร้อยละ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)			
	BS 8110	ACI 201	ACI 357	ACI 222
คอนกรีตอัดแรง	0.10	-	0.06	0.08
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะเผชิญกับเกลือคลอไรด์	0.20	0.10	0.10	0.20
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือไม่มีความชื้น	0.40	-	-	-
คอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	-	0.15	-	-

หมายเหตุ BS 8110 : British Standard for the design and construction of reinforced and prestressed concrete structures

ACI 201 : American Concrete Institute for guide for durable concrete

ACI 357 : American Concrete Institute for guide for design and construction of fixed concrete offshore structures

ACI 222 : American Concrete Institute for corrosion of metals concrete

ตารางที่ 2 ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุดในคอนกรีตจากข้อกำหนดต่างๆ [1]

ประเภทของโครงสร้าง	ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุด (ร้อยละ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)	
	ACI 318	ACI 222
คอนกรีตอัดแรง	0.06	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะเผชิญกับเกลือคลอไรด์	0.15	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือไม่มีความชื้น	1.00	-
คอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.30	-

หมายเหตุ ACI 318: American Concrete Institute for building code requirements for structural concrete and commentary

ACI 222: American Concrete Institute for corrosion of metals concrete

## 6. กลไกการเกิดสนิมในเหล็กเสริม (Corrosion in Rebar)[8]

### 6.1 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process)

โดยทั่วไปการเกิดสนิมในเหล็กเสริมถือเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) ที่ประกอบไปด้วยขั้วสองขั้ว 1) ขั้วให้ประจุ (Anode) และ 2) ขั้วรับประจุ (Cathode) ซึ่งเป็นส่วนของน้ำและออกซิเจน โดยที่เนื้อเหล็กที่อยู่ในสภาพของขั้วให้ประจุ (Anode) จะปล่อยประจุลบหรืออิเล็กตรอน (Electron) ออกมา หลังจากการปล่อยอิเล็กตรอน อนุภาคเหล็กก็จะเปลี่ยนเป็นประจุเหล็ก (Ferrous ion,  $Fe^{2+}$ ) มารอไว้ก่อน ส่วนประจุอิเล็กตรอนเมื่อไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนจะปล่อยประจุไฮดรอกซิล (OH) ออกมาในขั้นสุดท้าย ประจุไฮดรอกซิลจะไปรวมตัวกับประจุเหล็กเกิดเป็นสนิม ( $Fe(OH)_2$ )

สนิมเหล็ก ( $Fe(OH)_2$ ) จัดเป็นสารประกอบที่มีปริมาณมาก (High volume) ซึ่งปริมาตรของสนิมที่มากกว่าปริมาณเนื้อเหล็กที่สูญเสียไปนั้น ทำให้เกิดแรงดันภายในเนื้อคอนกรีตและเกิดการแตกร้าวอันเนื่องมาจากการดันออกของเนื้อสนิม ถ้ามีเนื้อสนิมมีปริมาณมาก การแตกร้าวหรือการกะเทาะออกของเนื้อคอนกรีตก็จะกินวงกว้าง ทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการรับแรงได้ดังแสดงในภาพที่ 4

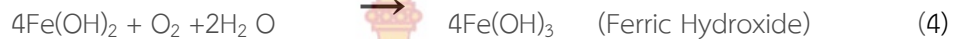
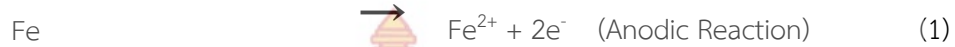


ภาพที่ 4 กระบวนการไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต  
ที่มา: (ศูนย์วิชาการคอนกรีตซีแพค, 2545)

อย่างไรก็ตาม การที่จะเกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่นำไปสู่การเกิดสนิมในเหล็กนั้นได้ เหล็กเสริมจะต้องอยู่ในสภาวะของขั้วให้ประจุและการที่จะเปลี่ยนสภาพเนื้อเหล็กบริเวณใดบริเวณหนึ่งให้มีสภาพไปเป็นขั้วให้ประจุนั้น ฟิล์มป้องกัน (Passive Film) ที่อยู่บนผิวของเหล็กบริเวณนั้นจะต้องถูกทำลายลง เหล็กเสริมที่ฝังตัวอยู่ในคอนกรีตที่มีค่า pH ประมาณ 12.5 นั้นจะมีฟิล์มป้องกันเกิดขึ้นที่ผิวเหล็ก โดยตราบไคที่ฟิล์มนี้ยังคงอยู่ที่ผิวเหล็ก เหล็กเสริมจะไม่เปลี่ยนสภาพไปเป็นขั้วให้



ประจุ (Anode) การที่ฟิล์มนี้จะถูกทำลายลงได้ ค่า pH ของเนื้อคอนกรีตจะต้องลดลงต่ำกว่า 11 ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้เมื่อมีการทรุดหรือสารที่สภาวะเป็นกรดแทรกซึมเข้ามาในเนื้อคอนกรีต



## 6.2 การเกิดสนิมในสภาพแวดล้อมคลอไรด์สูง

สารคลอไรด์ (Chloride) พบมากบริเวณที่อยู่ใกล้น้ำเค็มหรือน้ำทะเล กระบวนการเกิดสนิมโดยมีคลอไรด์เข้าไปเกี่ยวข้องสามารถแบ่งได้ 2 ช่วงดังนี้

ช่วงที่ 1 การแตกร้าวเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างประจุคลอไรด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์

โดยในช่วงนี้เนื้อคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลครั้งแรก ประจุคลอไรด์ (Chloride Ion) จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮดรอกไซด์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{C}_3\text{A}$ ) เกิดเป็น  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ซึ่งเป็นสารประกอบเกลือที่มีปริมาตรสูง ทำให้เกิดแรงดันภายในและนำไปสู่การปริร้าวที่ผิว การปริร้าวที่เนื้อผิวนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้ประจุคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ลึกยิ่งขึ้น

ช่วงที่ 2 ช่วงการเกิดสนิม

หลังจากที่เกิดการแตกร้าวเล็กๆที่ผิวแล้ว ประจุคลอไรด์จะแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต ทำให้เนื้อคอนกรีตมีสภาวะเป็นกรด (มีค่า pH ลดต่ำลง) ซึ่งผลกระทบโดยตรงคือทำให้ฟิล์มป้องกันถูกทำลายลงและพื้นที่ของเหล็กในบริเวณนั้นกลายเป็นขั้วให้ประจุ (Anode) นอกจากนี้รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเปิดโอกาสให้ออกซิเจนและน้ำเข้ามา ทำให้กระบวนการเกิดสนิมโดยไฟฟ้าเคมีสมบูรณ์

นอกจากนี้ตัวประจุคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้ามายังอาจทำให้เกิดสนิมได้โดยตรงด้วยการทำปฏิกิริยากับประจุเหล็กเกิดเป็น  $\text{FeCl}_2$  แล้วไปทำปฏิกิริยากับประจุไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นสนิมพรุน (Porous Rust,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) และให้ประจุคลอไรด์ออกมาใหม่อีกครั้งโดยกระบวนการนี้ก็จะวนรอบเป็นวัฏจักรเพราะผลผลิตที่ได้จะประกอบไปด้วยประจุคลอไรด์ในทุกครั้งไปดังแสดงในสมการที่ 2-5 และ 2-6



## 6.3 การเกิดสนิมในบริเวณที่มีความชื้นสูง

ชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำตลอดเวลา มีโอกาสเป็นสนิมได้สูงเช่นกัน โดยเฉพาะเมื่อ

- 1) คอนกรีตในบริเวณนั้นมีลักษณะที่พรุนสูง เกิดจากการใช้คอนกรีตคุณภาพไม่ดี หรือใช้คอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง หรือการเทคอนกรีตไม่ได้รับการอัดแน่นที่ดี ทำให้เกิดรูพรุนมาก เป็นต้น
- 2) ความชื้นที่มาสัมผัสมีลักษณะเป็นกรดสูง เช่น ฝนกรดหรือน้ำเสียจากการเกษตรและอุตสาหกรรม เป็นต้น
- 3) โครงสร้างตั้งอยู่ในพื้นที่ที่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศและมีความชื้นสูง

## 2.7 การประเมินความเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [27]

### 7.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

พารามิเตอร์พื้นฐานจะมีอยู่ 3 ประเภทด้วยกัน ที่ใช้สำหรับการประเมินการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ คลอไรด์บนผิวหน้าคอนกรีต ( $C_0$ ) สัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D_{ap}$ ) และระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ( $c$ ) ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 3 นี้ จะสามารถนำไปใช้คำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งและเวลาใดๆได้

$C_0$  เป็นพารามิเตอร์แสดงสภาวะแวดล้อมรอบๆโครงสร้าง โดยระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมโดยรอบ ดังนั้นการประเมินสภาพแวดล้อมที่ตั้งของโครงสร้างให้เหมาะสมร่วมด้วยนั้นเป็นสิ่งสำคัญมาก ค่า  $C_0$  จะสามารถแพร่กระจายได้มากเท่าไรนั้น จะขึ้นอยู่กับสภาพของโครงสร้าง วัสดุที่ใช้ และสภาพแวดล้อมโดยรอบ สำหรับโครงสร้างในบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเลค่า  $C_0$  ที่ใช้ประเมินการเสื่อมสภาพของโครงสร้างในขั้นตอนการออกแบบจะใช้ 13 กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร และ สำหรับตามแนวชายฝั่ง 9 กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร

$D_{ap}$  แทนการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ซึ่งมีผลต่อความทนทานของโครงสร้าง สามารถคำนวณค่าของ  $D_{ap}$  คลอไรด์ในคอนกรีต โดยการใช้กฎการแพร่ของข้อที่สองของฟิคส์ดังแสดงในสมการที่ 2-7

$$C_{cl}(t,x) = C_0 \exp\left(-\frac{x^2}{4D_{ap}t}\right) \quad (7)$$

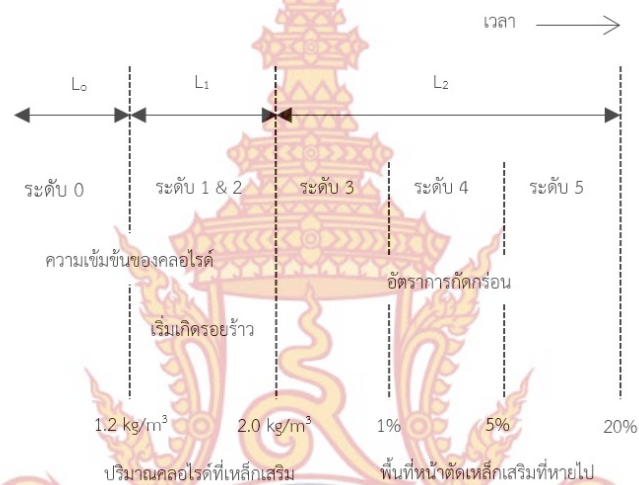
เมื่อ  $C_{cl}(t,x)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่เวลาและตำแหน่งใดๆในคอนกรีต  
 $t$  คือ ระยะเวลา  
 $x$  คือ ความลึกจากผิวหน้าของคอนกรีต  
 $\exp$  คือ ฟังก์ชันข้อผิดพลาด

ค่าที่วัดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตนั้นจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประเภทของปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในคอนกรีต ส่วนระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

(c) นั้นจะไม่แพร่หลายนักเมื่อเทียบกับอีกพารามิเตอร์อีก 2 ประเภท ที่กล่าวมาข้างต้น แต่ก็สามารถนำมาใช้เป็นค่าในการออกแบบโครงสร้าง เพื่อประเมินความเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้

### 7.2 ระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง

พารามิเตอร์ทั้ง 3 ประเภท ที่กล่าวถึงในข้อ 7.1 นั้น สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณเหล็กเสริม โดยใช้สมการและนำปริมาณคลอไรด์ที่ได้นั้น มาประเมินระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง ในภาพที่ 5 ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของการประเมินระดับการเสื่อมสภาพที่เชื่อมโยงกับผลการตรวจสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต



ภาพที่ 5 การประเมินระดับความเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ที่มา: (Asian Concrete Model Code Level 3 Maintenance, 2004)

เมื่อบริเวณของเหล็กเสริมมีปริมาณคลอไรด์ถึงค่าที่กำหนดไว้ จะทำให้เหล็กเสริมภายในเกิดสนิมขึ้นและเป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เหล็กเสริมภายในเกิดสนิมโดยทั่วไปกำหนดไว้ที่ 1.2 กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร หลังจากเหล็กเสริมเริ่มมีการกัดกร่อน และพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมจะลดลง จนเมื่อถึงขีดจำกัดสูงสุดแล้ว จะทำให้ความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างสูญเสียไปในที่สุด

## 8. อิทธิพลที่มีผลต่อการกัดกร่อน

### 8.1 ความเป็นกรด-ด่าง[10]

น้ำทะเลปกติมีค่า pH ประมาณ 7.8 ถึง 8.1 แต่ถ้าในอ่าวหรือท่าเทียบเรือ น้ำทะเลจะมีค่า pH เหลือประมาณ 7 เนื่องจากบริเวณนี้มักมีสิ่งมีชีวิตที่สามารถสร้างอาหารไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนสูง

สารละลายคลอไรด์ที่มี pH <4 หรือมีความเป็นกรดมากขึ้น หรือ pH ยิ่งต่ำ อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



ที่  $\text{pH} > 4$  ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้น คือ Reduction of Oxygen ความเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเร็วของการแพร่ของออกซิเจน ซึ่งเป็นไปอย่างช้าๆ

ที่  $\text{pH} < 4$  ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้น คือ Reduction of Hydrogen Ion ผลของปฏิกิริยา คือก๊าซไฮโดรเจน ไฮโดรเจนอออนมีอยู่มาก เนื่องจากเป็นกรด ดังนั้นปฏิกิริยาการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

ที่  $\text{pH} > 9$  ปฏิกิริยาการกัดกร่อนจะช้าลงมาก เนื่องจากมีฟิล์มไฮดรอกไซด์ที่ผิวเหล็ก

8.2 ปริมาณออกซิเจน การกัดกร่อนบริเวณที่ทะเลราบเรียบ จะกัดกร่อนเสียหายน้อยกว่าบริเวณทะเลที่มีคลื่น เนื่องจากทะเลที่มีคลื่นเป็นการเติมออกซิเจนตลอดเวลา ทำให้ในน้ำมีออกซิเจนมาก อัตราการกัดกร่อนจึงสูง [9]

### 8.3 อุณหภูมิ [10]

น้ำที่มีปริมาณคลอไรด์ต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ออกซิเจนละลายในน้ำน้อยลง ทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง

น้ำที่มีปริมาณคลอไรด์สูง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการกัดกร่อนไม่ลดลง แม้ออกซิเจนในน้ำจะลดลงก็ตาม

8.4 ปริมาณเกลือที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล น้ำในทะเลที่มีเกลือละลายอยู่อย่างอิมิตัวจะกัดกร่อนน้อย เนื่องจากออกซิเจนอิสระจะละลายในน้ำนั้นได้น้อยลง [10]

### 8.5 ระยะหุ้มเหล็ก

คอนกรีตที่ดีต้องมีความทึบแน่นและมีระยะหุ้มเหล็กเสริมที่เหมาะสม จึงสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้[9]

### 8.6 ความทึบน้ำ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ และใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุผสมเพิ่มจะช่วยให้ช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน (Interconnected void) ลดลง คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น การซึมผ่านของคลอไรด์ซัลเฟต ความชื้นและออกซิเจนลดน้อยลง[9]

## 9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทวีชัย สำราญวานิช (2547) ได้ทำการศึกษาปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของการเกิดสนิมในคอนกรีตเหล็กเสริมที่ผสมเถ้าลอยและหาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ดี โดยได้ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตและมีเหล็กเสริมแทรกอยู่ตรงกลาง โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50, 0.55 และ 0.60 และมีสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 0.20, 0.40 และ 0.60 ของปูนซีเมนต์ และมีการใช้ปูนซีเมนต์จำนวน 2 ประเภท คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ทำการบ่มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาแช่น้ำเกลือคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ของเกลือคลอไรด์ เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เปลี่ยนแปลงมาก ทำการเก็บก้อนตัวอย่างมาผ่าและนำคอนกรีตบริเวณที่ผิวของเหล็กเสริมมาบดเป็นผงเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเกลือคลอไรด์ จากการทดลองและวิเคราะห์พบว่า ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.10 ถึง 0.25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่ใช้ในส่วนผสม โดยเมื่อสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ต่ำค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของ

เหล็กเสริมจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) ร้อยละ 20 และ 40 ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมจะมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อแทนที่ปริมาณเถ้าลอยถึงร้อยละ 60 จะพบว่าค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมจะมีค่าต่ำลง ซึ่งลักษณะเช่นนี้ พบว่า มีแนวโน้มเดียวกันทั้งกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50, 0.55 และ 0.60 และพบว่าที่สัดส่วนผสมคอนกรีตเดียวกัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [11]

ทวีชัย สํารานวนิช (2552) ได้ทำการพัฒนาคอนกรีตที่ทนทานต่อการทำลายของน้ำทะเล โดยได้ศึกษาการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50, 0.55 และ 0.60 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลานที่ 0.20, 0.40 และ 0.60 สารปอซโซลานที่ใช้ ได้แก่ เถ้าลอย เถ้าแกลบและตะกรันเตาถลุงเหล็ก และได้ศึกษาการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต นอกจากนี้ได้ศึกษาความต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ด้วย จากผลการทดลองความคงทนของการทำลายของซัลเฟตพบว่า มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ถึง 0.55 และอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.20 ถึง 0.40 มีการขยายตัวน้อยที่สุด มอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีการสูญเสียกำลังรับแรงอัดมาก ส่วนมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กไม่มีการสูญเสียกำลังอัด และจากผลการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและอัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.40 จะมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปน้อยที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าส่วนผสมคอนกรีตที่ทนทานต่อการทำลายทั้งซัลเฟตและคลอไรด์ควรใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ และใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในอัตรา 0.40 [12]

ทวีชัย สํารานวนิช (2552) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเพื่อการทำนายปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ โดยแบบจำลองพัฒนาจากคำตอบของกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ ซึ่งมีค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตเป็นตัวแปรหลัก จากผลการศึกษาทดลองพบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด และประเภทสภาพแวดล้อมทะเลซึ่งแบ่งได้เป็นบนฝั่งและในทะเล ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อ วัสดุประสานของคอนกรีต และจากแบบจำลองที่พัฒนานี้สามารถทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ได้ [13]

พิพัฒน์ ซอลีฮี และคณะ (2552) ได้ทำการศึกษาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลของไทย ในเขตพื้นที่จังหวัดระยองและจังหวัดจันทบุรีโดยได้ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ผิวหน้าและภายในเนื้อคอนกรีตของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างโครงสร้างสะพานกำแพงกันคลื่น ทำเทียบเรือเป็นต้น มาทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดด้วยวิธีการไตเตรทที่หาจุดยุติด้วยการเปลี่ยนแปลงของ



ศักย์ไฟฟ้า ซึ่งพบว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับประเภทของโครงสร้างของคอนกรีตเสริมเหล็กระยะเวลาที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทางทะเลและ ระยะห่างจากฝั่งทะเลซึ่งผลการทดสอบที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายอายุ การใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลได้[14]

วิเชียร ชาลี และกฤษศ ประสพชัยชนะ (2553) ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานและปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะ แวดล้อมน้ำทะเล 7 ปี โดยการหล่อตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า แม่เหมาแทนที่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่1 ในอัตราร้อยละ 15,25,35 และ50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45,0.55และ0.65 แล้วฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร มีระยะหุ้มเหล็ก 10,20,50 และ75มิลลิเมตร นำมาบ่มเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล ที่สภาวะเปียกสลับแห้ง ครบ 2,3,4,5 และ7ปี และได้ทำการวัด พื้นที่ของการเกิดสนิมเหล็กและทดสอบการหาคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ในคอนกรีต และ จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งเสริมเหล็ก สามารถวิเคราะห์หา ปริมาณคลอไรด์วิกฤตได้ ซึ่งพบว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีตจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการ แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้น และจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง [15]

นำพล บุตรเชื้อไทย และคณะ (2554) ได้ทำการศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ ทำจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล โดยทำการหล่อ ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าถ่านหินจาก โรงไฟฟ้าแม่เหมาในอัตราส่วน 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 หลังจากนั้นนำไปบ่มเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำไปแช่น้ำ ทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 365 วัน เพื่อนำมาทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้กรด เป็นตัวทำละลาย ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าถ่านหินนั้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานก็สามารถลดการแทรกซึม ของคลอไรด์ได้ดี โดยเห็นชัดในคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่าน หิน ซึ่งคอนกรีต ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 ถึง 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานจะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.40 สามารถใช้เป็นคอนกรีตโครงสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง เนื่องจากให้ผลกำลังอัดและ การต้านทานของคลอไรด์ไปในทิศทางที่ดี [16]

วิเชียรชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554)ได้ทำการศึกษาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้คอนกรีตควบคุมทำจากซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 และใช้เถ้าถ่านหิน เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 หล่อเป็นตัวอย่างคอนกรีตแล้ว นำไปบ่มเป็นเวลา 28 วัน ก่อนที่จะนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระซึ่งพบว่าร้อยละ ของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการ แทนที่ด้วยเปลือกไม้ในคอนกรีตแต่ในการแทนที่เถ้าถ่านหินเปลือกละเอียดปริมาณสูงในคอนกรีต (ร้อยละ 50) กลับส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าลดลงนอกจากนั้นพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ



ประสานที่ลดลงส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 จะมีความเหมาะสมของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลเนื่องจากให้กำลังอัดสูงและความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์สูงด้วย [17]

ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ และวิเชียร ชาลี (2555) ได้ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและฟลูเวอร์โรซ์ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลโดยทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าถ่านหินจากการเผาฟลูอิดไดซ์เบดและเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูเวอร์โรซ์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักวัสดุประสานคงที่ 0.65 และฝังเหล็กกลมขนาดเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ให้มีระยะหุ้มคอนกรีต 10, 20, 50 และ 75 มิลลิเมตรนอกจากนั้นได้หล่อตัวอย่างทรงกระบอกสำหรับการทดสอบอายุที่ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเล หลังจากนั้นนำคอนกรีตไปบ่มจนครบ 28 วัน ก่อนที่จะนำไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี เพื่อนำมาทดสอบกำลังอัด ปริมาณคลอไรด์และการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูเวอร์โรซ์ให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และยังมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินบดละเอียดจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดซึ่งคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน [18]

พัฒนพงษ์ วงษ์เสียงดัง และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กและเหล็กเคลือบผิวด้วยสังกะสีในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดสนิมของเหล็กและเหล็กเคลือบผิวด้วยสังกะสี โดยวิธีจุ่มร้อนและทดสอบสังกะสีเหลวในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีในการทดสอบโดยการเตรียมคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอกเสริมเหล็กข้ออ้อย SD40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร 3 แบบคือ 1) เหล็กข้ออ้อยธรรมดา 2) เหล็กข้ออ้อยที่ชุบด้วยสังกะสี และ 3) เหล็กข้ออ้อยเคลือบผิวด้วยสังกะสีทิ้งไว้ให้แห้งแล้วนำไปบ่มด้วยกระสอบเปียก เมื่อครบกำหนด นำก้อนตัวอย่างไปเร่งอัตราการเกิดสนิมโดยขังไว้ในสารละลายคลอไรด์ และทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และค่าความหนาแน่นกระแส เพื่อหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่เวลาต่างๆ เมื่อเกิดสนิมจะนำผงคอนกรีตมาทำการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ผิวเหล็ก ด้วยวิธีบอกจุดยุติทางศักย์ไฟฟ้า (Potentionmetric Titration) ซึ่งพบว่าเหล็กเสริมที่ผ่านการเคลือบผิวมานั้น จะมีค่าคลอไรด์วิกฤตที่ลดลงและอัตราการเกิดสนิมช้ากว่าเมื่อเทียบกับเหล็กเสริมที่ไม่เคลือบผิว ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้นี้ไปเป็นแนวทางในการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างเสริมเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวสังกะสีต่อไปได้ [19]

กิริติกร เจริญพร้อม และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล โดยได้ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มิลลิเมตร โดยแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วน 15, 25, 35 และ 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 และนำตัวอย่างที่ได้ไปบ่มเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลชายฝั่งซึ่งอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 30 เดือน เมื่อครบกำหนดแล้ว ทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำมาหาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวหน้าของคอนกรีต

หลังจากนั้นได้นำข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ โดยใช้กฎการแพร่ของฟิคส์ (Fick's second law) ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันในอัตราส่วน 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ (0.40) จะสามารถลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ได้ อันเนื่องมาจากคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นนั่นเอง [20]

ทริชัย สารภูวนิช (2556) ได้ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีวัสดุซ่อมแซม โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักในคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 และ 0.50 บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน และทำการเคลือบผิวหน้าตัวอย่างคอนกรีตด้วย Crystal seal และ Xypex concentrate ยกเว้นที่ผสมด้วย Xypex admix C-1000NF จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 91 วัน 182 วัน และ 365 วัน เมื่อครบระยะเวลาการแช่จึงทำการทดสอบเพื่อหาค่าการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต จากการทดสอบพบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราการผสมเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาการบ่ม และชนิดของวัสดุซ่อมแซมที่นำมาใช้ โดยเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นจาก 0.50 เป็น 0.60 ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าลดลง และเมื่ออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้นจาก 0.30 เป็น 0.50 ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อใช้ระยะเวลาบ่มคอนกรีตนานขึ้นจาก 7 วันเป็น 28 วัน ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตที่เคลือบด้วย Crystal seal และ Xypex concentrate และที่ผสมด้วย Xypex admix C-100NF มีค่าสูงกว่าของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ใช้วัสดุซ่อมแซม คอนกรีตที่ผสมวัสดุซ่อมแซม Xypex admix C-100NF มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากที่สุด [21]

นันทรัตน์ โยคะวัฒน์ และอภิเดช รัตนติลภณ ภูเก็ต (2556) ได้ทำการศึกษาการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 15 ปี โดนใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานไฟฟ้าแม่เหาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 55 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 หล่อเป็นทรงลูกบาศก์จากนั้นนำไปบ่มเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ที่บริเวณชายหาด จังหวัดชลบุรีให้อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี เมื่อครบกำหนดจึงนำมาทดสอบหาการแทรกซึมของคลอไรด์จากวิธีไตเตรทด้วยสารซิลเวอร์ไนเตรท ซึ่งพบว่าการใช้ถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตด้วยปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์สูงขึ้น นอกจากนี้การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงจะทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงชัดเจนในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน [4]

นุชจิรา ทำมาตา และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี โดยทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50 และ 0.60 แล้วนำไปบ่ม 28 วัน ก่อนที่จะนำไปทดสอบการ

แทรกซึมของคลอไรด์ด้วยวิธีการไตเตรทแบบจุดยุติทางศักย์ไฟฟ้า พร้อมหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ ซึ่งพบว่าการแทรกซึมของคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นและระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลมากขึ้น การใช้แก้วลอยผสมในคอนกรีตนั้นช่วยลดสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ แต่เมื่อใช้ผงหินปูนร่วมกับแก้วลอยเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ยังแปรผกผันกับกำลังอัดของคอนกรีตอีกด้วย [22]

ประกิจ สร้อยระย้าแก้ว (2556) ได้ศึกษาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดสมุทรปราการ โดยเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ผิวหน้าและภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อทดสอบปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระ และนำข้อมูลนี้ไปปรับปรุงแบบจำลองคณิตศาสตร์ของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณปากแม่น้ำจากการศึกษาพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีตและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของโครงสร้างขึ้นกับประเภทของโครงสร้างและมีค่ามากขึ้นเมื่อเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลนานหรือตั้งอยู่ห่างจากชายฝั่งออกสู่ทะเลมากขึ้น หรืออยู่บริเวณระดับน้ำทะเลสูงสุด แต่ไม่พบความแตกต่างตามระยะทางจากปากแม่น้ำเข้ามาในแม่น้ำจนถึงระยะ 4,000 เมตร สุดท้ายได้เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณปากแม่น้ำ [23]





### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีการวิจัย

#### 1. สถานที่ตั้งและตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง

ในการศึกษาค่าปริมาณคลอไรด์ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากสะพานต่างๆบริเวณชายฝั่งทะเลและบริเวณใกล้เคียงที่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่เกิน 10 กิโลเมตร ในเขตอำเภอหัวหินและอำเภอประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ที่มีอายุตั้งแต่ 10 ปีขึ้นไป เพื่อให้เป็นไปตามกฎการแพร่ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion)

##### 1.1 สะพานในเขตพื้นที่อำเภอหัวหินมีทั้งหมด 5 สะพาน

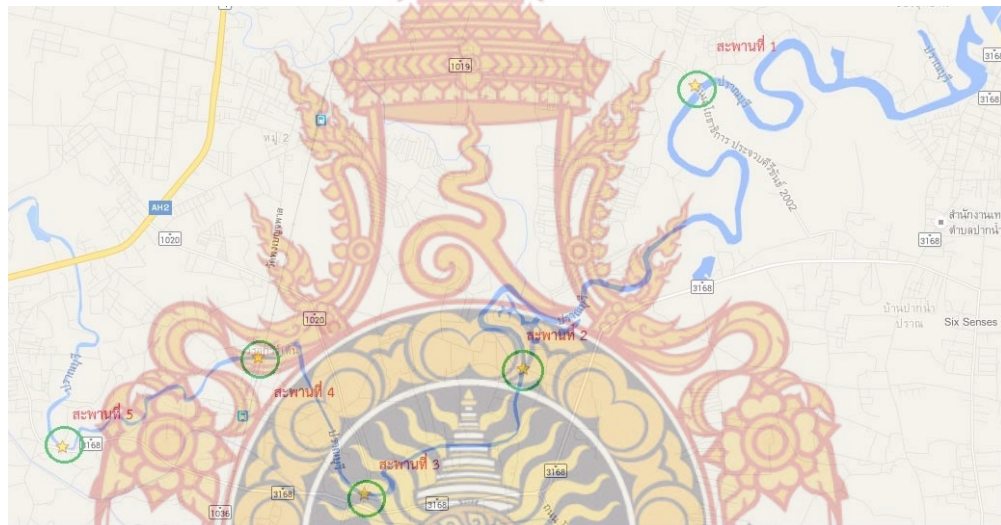
- 1) สะพานที่ 1 ในความรับผิดชอบของเทศบาลหัวหิน สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2543 ระยะห่างจากชายฝั่งประมาณ 0.884 กิโลเมตร
- 2) สะพานที่ 2 ในความรับผิดชอบของเทศบาลหัวหิน สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2539 ระยะห่างจากชายฝั่งประมาณ 0.198 กิโลเมตร
- 3) สะพานที่ 3 ในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงประจวบคีรีขันธ์ สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2548 ระยะห่างจากชายฝั่งประมาณ 7.59 กิโลเมตร
- 4) สะพานที่ 4 ในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงประจวบคีรีขันธ์ (หัวหิน) สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2546 ระยะห่างจากชายฝั่งประมาณ 8.16 กิโลเมตร
- 5) สะพานที่ 5 ในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงประจวบคีรีขันธ์ (หัวหิน) สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2537 ระยะห่างจากชายฝั่งประมาณ 10.05 กิโลเมตร



ภาพที่ 6 ตำแหน่งที่ตั้งสะพานในเขตอำเภอหัวหิน  
ที่มา: (Google map, 2016)

## 1.2 สะพานในเขตอำเภอปรางบุรีมีทั้งหมด 5 สะพาน

- 1) สะพานที่ 1 ในความรับผิดชอบของแขวงการทางประจวบคีรีขันธ์  
สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2540 ระยะห่างจากชายฝั่งประมาณ 3.09 กิโลเมตร
- 2) สะพานที่ 2 ในความรับผิดชอบของแขวงการทางประจวบคีรีขันธ์  
สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2540 ระยะห่างจากชายฝั่งประมาณ 5.36 กิโลเมตร
- 3) สะพานที่ 3 ในความรับผิดชอบขององค์การบริหารส่วนจังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2538 ระยะห่างจากชายฝั่งประมาณ 6.89 กิโลเมตร
- 4) สะพานที่ 4 ในความรับผิดชอบของแขวงการทางประจวบคีรีขันธ์  
สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2540 ระยะห่างจากชายฝั่งประมาณ 7.89 กิโลเมตร
- 5) สะพานที่ 5 ในความรับผิดชอบของเทศบาลตำบลปรางบุรีสร้างเมื่อปี พ.ศ. 2538  
ระยะห่างจากชายฝั่งประมาณ 9.83 กิโลเมตร



ภาพที่ 7 ตำแหน่งที่ตั้งสะพานในเขตอำเภอปรางบุรี  
ที่มา: (Google map, 2016)

## 2. เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

### 2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ใช้ผลิตไฟฟ้าในการเก็บตัวอย่างคอนกรีต เพราะสถานที่เก็บตัวอย่างอาจจะไม่มีไฟฟ้าใช้



ภาพที่ 8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2) ส่วนไฟฟ้า ใช้ในการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ต้องใช้ส่วนไฟฟ้าที่มีระบบเจาะ  
กระแทกและมีกำลังสูง



ภาพที่ 9 ส่วนไฟฟ้า

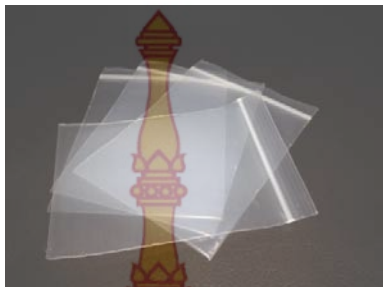
3) ภาพขณะรองรับผงคอนกรีตที่ระดับความลึกแต่ละชั้น



ภาพที่ 10 ภาพขณะรองรับผงคอนกรีตที่ระดับความลึกแต่ละชั้น



4) ซองเก็บตัวอย่าง ใช้ในการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ



ภาพที่ 11 ถุงเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต

5) เครื่องต้ม (Hot plate) ใช้ต้มสารละลายตัวอย่างก่อนนำไปหาปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต



ภาพที่ 12 เครื่องต้ม (Hot plate)

6) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance) ใช้ในการชั่งตัวอย่างผงคอนกรีต



ภาพที่ 13 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)

## 7. กระดาษกรองเนื้อหยาบ



ภาพที่ 14 กระดาษกรองเนื้อหยาบ

## 8) ปีกเกอร์ ขนาดต่างๆ



ภาพที่ 15 ปีกเกอร์ ขนาดต่างๆ

- 9) กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร
- 10) ปิเปตต์ (Pipette) ขนาด 25 มิลลิลิตร
- 11) ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 12) ขวดรูปชมพู
- 13) แท่งแก้วคนสาร
- 14) แผ่นกระดาษ
- 15) กรวยแก้ว
- 16) ขวดกรองแก้วกันโปร่ง (Filtration flask)
- 17) ซ้อนตักสาร
- 18) บิวเรตต์ (Burette)
- 19) ปูนอนซริงค์

## 2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบหาคลอไรด์

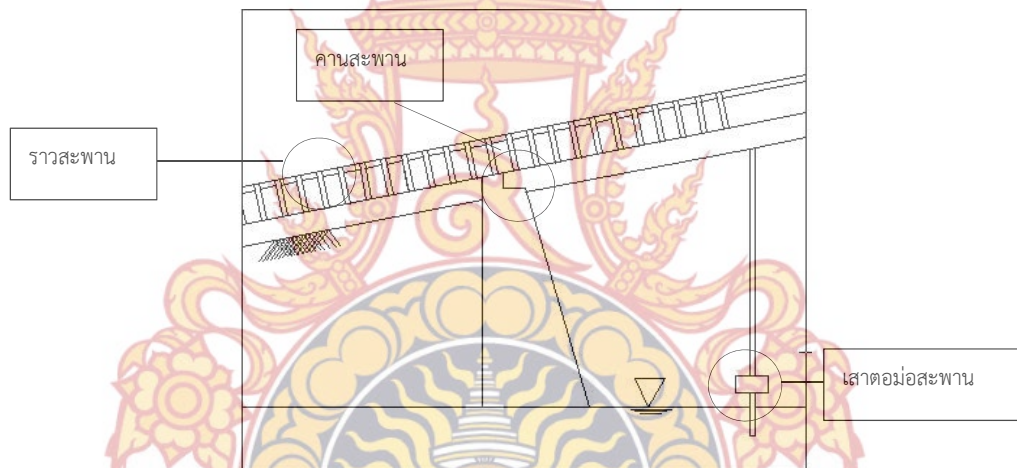
- 1) กรดไนตริก(Nitric acid)
- 2) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
- 3) สารละลายมาตรฐาน 0.05 N โซเดียมคลอไรด์(Sodium chloride)

- 4) สารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate)
- 5) น้ำกลั่น
- 6) สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต 4% w/v (Sodium bicarbonate)
- 7) สารละลายโพแทสเซียมโครเมต 5% w/v (Potassium chromate)

### 3. ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างคอนกรีต

ขั้นตอนวิธีการเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความลึกแต่ละชั้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

1) ทำการสำรวจพื้นที่และเลือกตำแหน่งเป้าหมายของโครงสร้างที่ต้องการเก็บตัวอย่าง โดยเลือกด้านของโครงสร้างที่รับลมด้านตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากลมมรสุมที่พัดมายังอ่าวไทย คือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และตะวันออกเฉียงเหนือ แต่เพื่อความเหมือนกันจึงเลือกด้านที่รับลมตะวันออกเฉียงเหนือในตำแหน่งราว คาน และเสาตอม่อของโครงสร้างสะพาน



ภาพที่ 16 บริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากโครงสร้างสะพาน

2) ทำการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทกแบบสมิทท์ (Schmidt's Hammer) ในตำแหน่งที่เลือกไว้ 9 จุด ก่อนที่จะใช้สว่านเจาะลงบนคอนกรีตที่บริเวณเดียว กับที่ทดสอบหาค่ากำลังอัด ทำการเจาะโดยผ่านที่ครอบกันผงคอนกรีตปลิวให้ได้ความลึก 2 เซนติเมตร แล้วนำผงฝุ่นที่ได้ใส่ถุงเก็บตัวอย่าง หากตัวอย่างที่เก็บได้นั้นมีปริมาณไม่ถึง 10 กรัม ให้เพิ่มจำนวนรูเจาะจนกว่าจะได้ตัวอย่างประมาณ 10 กรัม





ภาพที่ 17 การเจาะเก็บตัวอย่างผนังคอนกรีต

- 3) ทำตามข้อ 2 แต่เพิ่มความลึกที่ละ 2 เซนติเมตรในรูเจาะเดิม จนถึง 10 เซนติเมตร
- 4) เก็บตัวอย่างผนังคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ใส่ไว้ในช่องเก็บตัวอย่างที่ปลอดภัย



ภาพที่ 18 ช่องเก็บตัวอย่างผนังคอนกรีต

- 5) ทำความสะอาดเครื่องเจาะตัวอย่างคอนกรีตและภาชนะเก็บผนังตัวอย่างคอนกรีตในแต่ละชั้นเมื่อเก็บตัวอย่างเสร็จ เพื่อลดการปนเปื้อนในการเก็บตัวอย่าง ณ ตำแหน่งต่อไป
- 6) ใช้ปูนอนซึ่งคือครุและตกแต่งผิวหน้าของคอนกรีตในบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างให้อยู่ในสภาพเดิม



ภาพที่ 19 การซ่อมแซมบริเวณที่เก็บตัวอย่างคอนกรีต

- 7) ทำการเก็บน้ำจากบริเวณใต้สะพานที่ทำการเก็บตัวอย่าง เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนมาในแหล่งน้ำธรรมชาติ

#### 4 วิธีการเตรียมสารเคมีที่ใช้สำหรับการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

1) สารละลายมาตรฐาน 0.05 N โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride) 100 มิลลิลิตร [26]  
นำโซเดียมคลอไรด์ 0.2922 กรัม ละลายในน้ำกลั่นใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (จากโซเดียมคลอไรด์ 2.9222 กรัม ละลายในน้ำ 1,000 มิลลิลิตร) แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบ 100 มิลลิลิตร ก่อนจะเขย่าให้สารละลายให้ผสมกัน ตั้งขวดปรับปริมาตรเพื่อให้อุณหภูมิของสารละลายลดลงเติมน้ำกลั่นที่ละน้อยจนถึงขีดบอกปริมาตร โดยให้ส่วนโค้งต่ำสุดของสารละลายอยู่ตรงขีดบอกปริมาตรกลับขวดขึ้นลงให้สารละลายผสมกัน เก็บไว้เพื่อทำการทำมาตรฐานของสารละลาย

2) สารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) 1,000 มิลลิลิตร [26]  
นำซิลเวอร์ไนเตรท 8.4938 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบ 1,000 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายให้ผสมกัน แล้วตั้งขวดปรับปริมาตรทิ้งไว้ เพื่อให้อุณหภูมิของสารละลายลดลง เติมน้ำกลั่นที่ละน้อยจนถึงขีดบอกปริมาตร โดยให้ส่วนโค้งต่ำสุดของสารละลายอยู่ตรงขีดบอกปริมาตร กลับขวดขึ้นลงให้สารละลายผสมกัน

#### 3) การทำมาตรฐานสารละลายมาตรฐาน [26]

การทำมาตรฐานสารละลายมาตรฐาน (Standardization) เพื่อให้ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานที่ต้องการนำไปใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ไม่ทราบความเข้มข้นทำได้โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์ 0.05N ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร และโพแทสเซียมโครเมต 5% w/v ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ก่อนที่จะนำไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรท และจดบันทึกปริมาตรสารละลายมาตรฐานที่ใช้ไปเพื่อนำไปคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทจากสมการ

$$N = 0.25/V$$

(7)

N คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรท  
0.25 คือ มิลลิอิกิวาเลนต์ของสารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์  
(5.0 มิลลิลิตร × 0.05N)  
V คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรท (มิลลิลิตร)

#### 5. วิธีการทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 [26]

1) นำผงคอนกรีตตัวอย่างมาผ่านการร่อนจำนวน 10 กรัม โดยซั้งละเอียดถึง 0.01 กรัม ใส่ในปิเปกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร



ภาพที่ 20 การชั่งผงคอนกรีตตัวอย่าง

2. เติมน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์



ภาพที่ 21 การเติมน้ำกลั่นลงในผงคอนกรีตตัวอย่าง

- 3) เติมสารละลายกรดไนตริกเจือจางในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 มิลลิลิตรคนให้ผงคอนกรีตแตกออกจากกัน ในระหว่างนั้นถ้ามีกลิ่นของแก๊สไข่เน่า (ไฮโดรเจนซัลเฟต) ให้เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไป 3 มิลลิลิตร



ภาพที่ 22 การเติมกรดไนตริกลงในผงคอนกรีตตัวอย่าง

- 4) นำบีกเกอร์ที่มีสารละลายปิดด้วยแผ่นกระจกไปต้มจนเดือด ประมาณ 2 ถึง 3 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิห้อง





(ก)

(ข)

ภาพที่ 23 (ก) นำสารละลายตัวอย่างไปต้มจนเดือด

(ข) พักสารละลายตัวอย่างไว้จนอุณหภูมิลดลง

5. นำสารละลายตัวอย่างที่ได้ไปกรองผ่านกระดาษกรอง



ภาพที่ 24 นำสารละลายตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรอง

6) ใช้ปิเปตดูดสารละลายที่กรองเสร็จเรียบร้อยแล้ว 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วทำการเจือจางโดยเติมน้ำกลั่นลงไป 40 มิลลิลิตร



ภาพที่ 25 การปิเปตสารละลายตัวอย่าง

7) เติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต 4% ลงไป 10 มิลลิลิตร เพื่อเป็นการปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้เหมาะสมสำหรับการไตเตรท (ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 7 ถึง 10 )



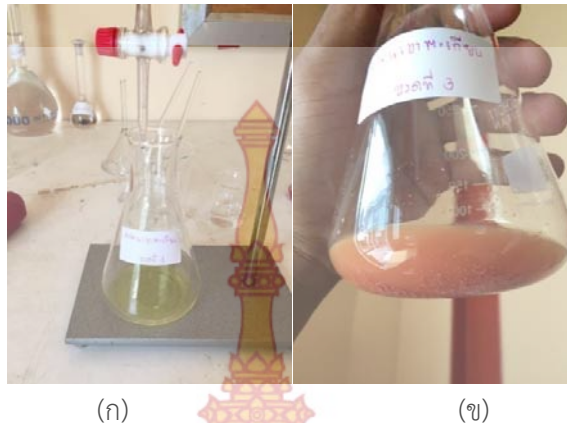
ภาพที่ 26 การเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในสารละลายตัวอย่าง

8. เติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต 5% ลงไป 1 มิลลิลิตรลงในสารละลายตัวอย่าง



ภาพที่ 27 การเติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมตลงในสารละลายตัวอย่างแล้ว

9) นำสารละลายที่ได้ไปไตเตรทด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท จนเกิดตะกอนสีแดงอิฐ แล้วบันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีตตัวอย่าง



(ก) การนำสารละลายตัวอย่างแล้วไปไตเตรท  
(ข) การเกิดตะกอนสีแดงอิฐในสารละลายตัวอย่าง

10. ทำการตรวจสอบสารละลายที่ไร้ตัวอย่าง (Blank Solution) โดยใช้ น้ำกลั่นในปริมาตรที่เท่ากับปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ทำการไตเตรทเติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต 5% ลงไป 1 มิลลิลิตรแล้วนำไปไตเตรทกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท บันทึกปริมาตรสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีตตัวอย่างโดย

$$Cl^- (\%) = \frac{3.545 (V_1 - V_2) N}{W} \quad (8)$$

เมื่อ  $V_1$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรท ( $AgNO_3$ ) ที่ใช้ในการไตเตรทสารละลายตัวอย่าง (มิลลิลิตร)  
 $V_2$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรท ( $AgNO_3$ ) ที่ใช้ในการไตเตรทแบลงค์ (มิลลิลิตร)  
 $N$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรท ( $AgNO_3$ ) (นอร์มัลลิตี)  
 $W$  คือ น้ำหนักของผงคอนกรีตตัวอย่าง (กรัม)

#### 6. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรท ( $AgNO_3$ ) จะได้นำค่ามาเฉลี่ยกัน 3 ตัวอย่างเป็น 1 ข้อมูล ทุกช่วงความลึกทุกๆ 2 เซนติเมตร ทั้งโครงสร้างราวสะพาน เสาตอม่อ และคานสะพาน ในอำเภอหัวหิน และปราณบุรี

#### 7. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์จะเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าจนถึงที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร เพื่อดูอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์กับระยะห่างจากชายฝั่งทะเลเพื่อหาระยะทางที่ไม่ถูกรบกวนโดยคลอไรด์



## 8. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ใช้สถิติประเภทสถิติอ้างอิงหรือสถิติอนุมาน (Inferential or inductive statistics) เพื่อเปรียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เคยมีนักวิจัยท่านอื่นเคยทำมาก่อน



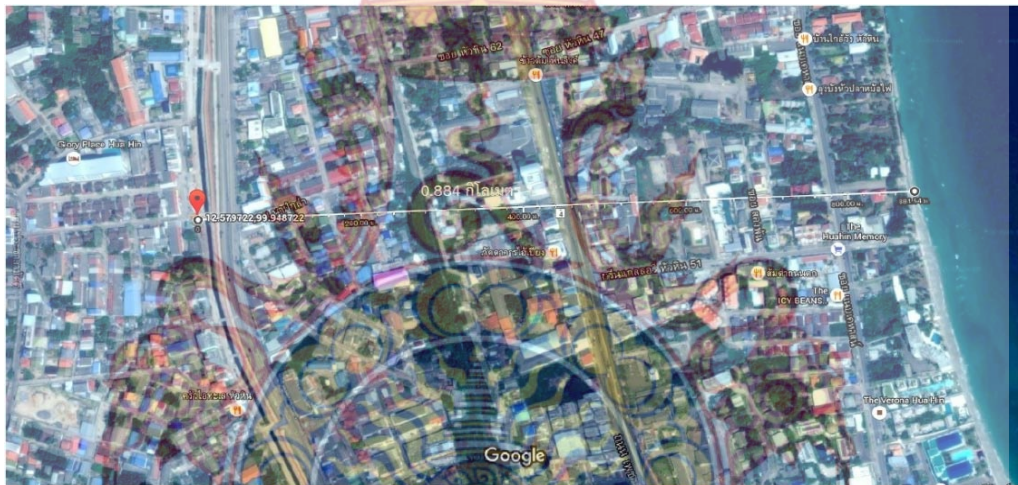
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 1. ข้อมูลเบื้องต้นของโครงสร้างสะพานในปัจจุบัน

##### 1.1 พื้นที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

สะพานที่ 1 อยู่ในความรับผิดชอบของเทศบาลเมืองหัวหิน สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2543 มีพิกัดทางภูมิศาสตร์  $12^{\circ}34'47.0''\text{N}$   $99^{\circ}56'55.4''\text{E}$  ตั้งอยู่เหนือคลองเฉลิมพระเกียรติ ซอยหมู่บ้านร่วมสุข ตำบลหัวหิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งมีระยะห่างจากชายฝั่งทะเล 0.844 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 29 และสภาพแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 29 ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน  
ที่มา: (Google map, 2016)

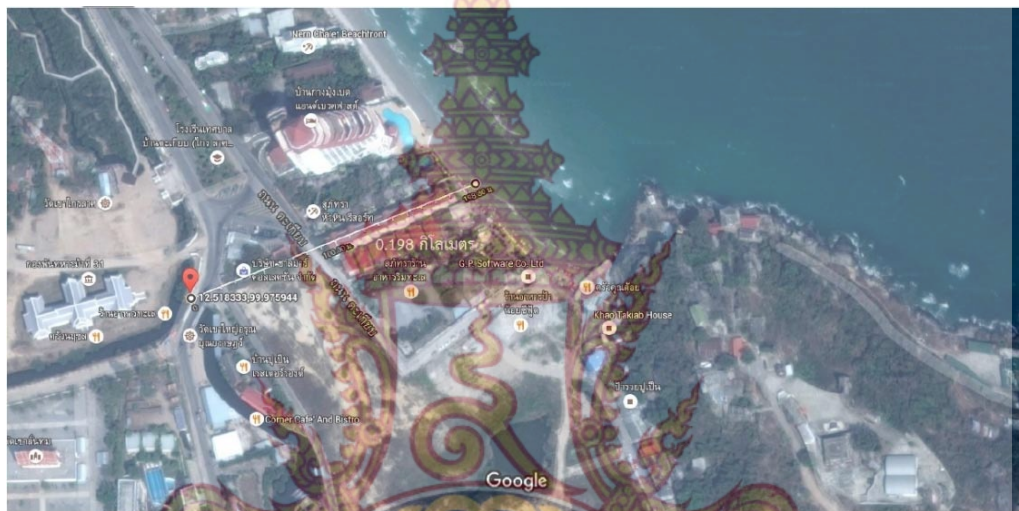


ภาพที่ 30 สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน



จากภาพที่ 30 แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆ โครงสร้างสะพาน จะเห็นได้ว่า โครงสร้างสะพานตั้งอยู่ในเขตชุมชนขนาดใหญ่ มีรถสัญจรไปมาเป็นจำนวนมาก มีต้นไม้้น้อยมาก สภาพดินจะเป็นดินแข็ง สภาพน้ำจะมีกลิ่นเหม็นเน่าเนื่องจกน้ำไม่มีการไหลเวียน

สะพานที่ 2 อยู่ในความรับผิดชอบของเทศบาลเมืองหัวหิน สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2539 ตั้งอยู่ บนคลองตะเกียบ ถนนตะเกียบ ตำบลหนองแก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พิกัดทาง ภูมิศาสตร์ 12°31'06.0"N 99°58'33.4"E ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล 0.198 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพ ที่ 31 และสภาพแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 31 ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน  
ที่มา: (Google map, 2016)



ภาพที่ 32 สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน

จากภาพที่ 30 แสดงสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆ สะพาน จะพบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่จะเป็นที่ชุมชน มีรถสัญจรไปมาพอประมาณ มีต้นไม้้น้อยมาก สภาพดินค่อนข้างที่จะอ่อน สภาพน้ำ



ค่อนข้างที่จะดีพอสมควรเนื่องจากการไหลเวียนอยู่ตลอดเวลา มีระดับน้ำประมาณ 70 ถึง 80 เซนติเมตร

สะพานที่ 3 อยู่ในความรับผิดชอบของ แขวงการทางประจวบคีรีขันธ์ สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2548 ตั้งอยู่บนห้วยสามพันนาม ปช. 2004 ตำบลทับใต้ อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พิกัดทางภูมิศาสตร์  $12^{\circ}31'36.6''\text{N}$   $99^{\circ}54'11.2''\text{E}$  ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล 7.59 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 33 และสภาพแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 34



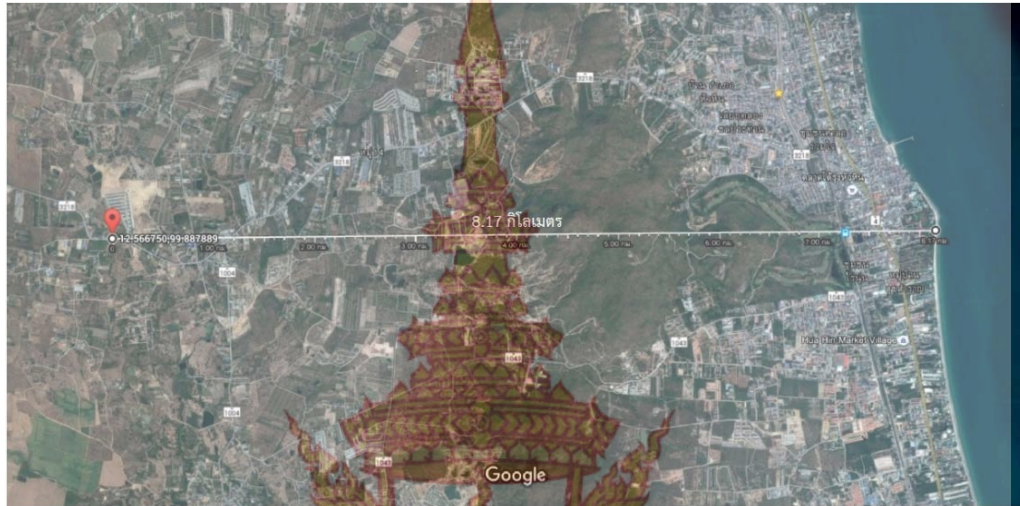
ภาพที่ 33 ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน  
ที่มา: (Google map, 2016)



ภาพที่ 34 สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน

จากภาพที่ 34 แสดงถึงสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆ โครงสร้างสะพาน จะพบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่จะปกคลุมด้วยต้นไม้ต่างๆ มีรถสัญจรไปมาปานกลาง สภาพดินส่วนใหญ่จะค่อนข้างแข็ง สภาพน้ำค่อนข้างใส

สะพานที่ 4 อยู่ในความรับผิดชอบของแขวงการทางประจวบคีรีขันธ์ (หัวหิน) สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2546 ตั้งอยู่บน ห้วยสามพันนาม ปช. 3218 ตำบลหินเหล็กไฟ อำเภอหัวหิน จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์ พิกัดทางภูมิศาสตร์  $12^{\circ}34'00.3''\text{N}$   $99^{\circ}53'16.4''\text{E}$  ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล 8.17 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 35 และสภาพแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 35 ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน  
ที่มา: (Google map, 2016)

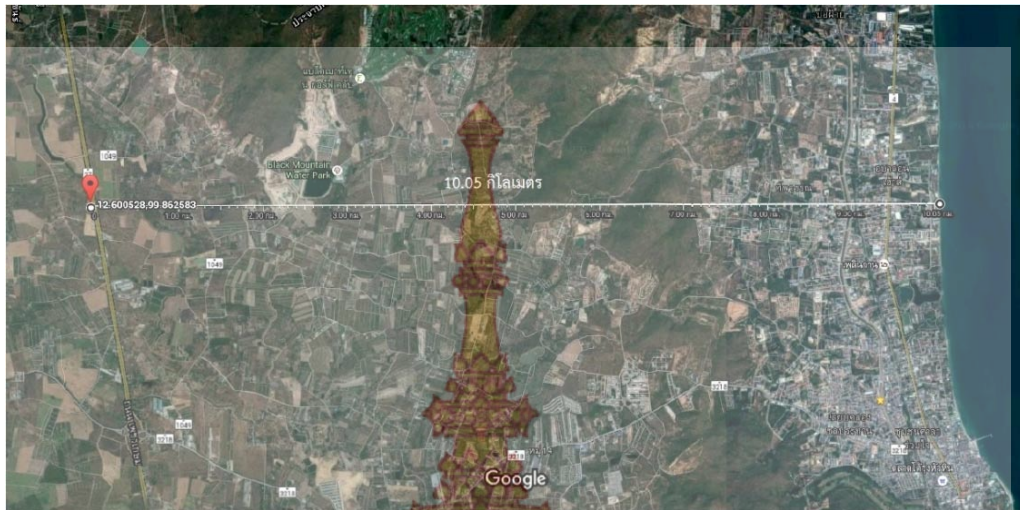


ภาพที่ 36 สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน

ภาพที่ 36 แสดงให้เห็นสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆ โครงสร้างสะพาน จะพบว่า สภาพดินจะเป็นดินแข็ง ไม่มีน้ำเนื่องจากอยู่ในฤดูแล้ง มีรถสัญจรไปมาเป็นจำนวนมาก บริเวณรอบๆ จะเป็นพื้นที่โล่ง มีต้นไม้บ้างเล็กน้อย

สะพานที่ 5 อยู่ในความรับผิดชอบของแขวงการทางประจวบคีรีขันธ์ (หัวหิน) สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2546 ตั้งอยู่บนห้วยสามพันนาม ปช. 37 ตำบลหินเหล็กไฟ อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พิกัดทางภูมิศาสตร์  $12^{\circ}36'01.9''\text{N}$   $99^{\circ}51'45.3''\text{E}$  ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล 10.05 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 37 และสภาพแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 38





ภาพที่ 37 ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน  
ที่มา: (Google map, 2016)



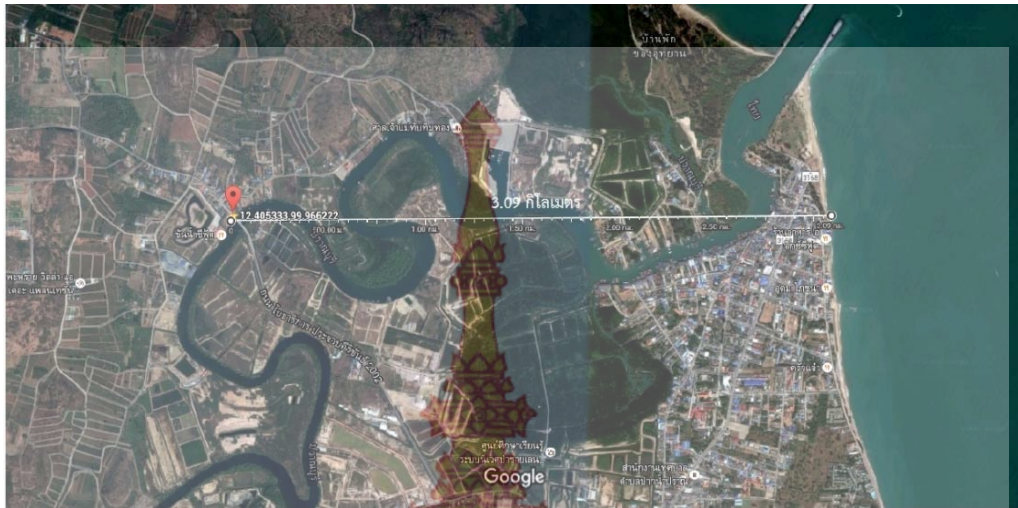
ภาพที่ 38 สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน

จากภาพที่ 38 แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมรอบๆ โครงสร้างสะพาน จะพบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นต้นไม้ มีรถสัญจรไปมาเป็นจำนวนมาก ไม่มีน้ำเนื่องจากอยู่ในฤดูแล้ง สภาพดินส่วนใหญ่จะเป็นดินแข็ง

#### 1.2 พื้นที่อำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

สะพานที่ 1 อยู่ในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงประจวบคีรีขันธ์ สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2540 ตั้งอยู่บน แม่น้ำปราณบุรี ปช.008 ตำบลปากน้ำปราณ อำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พิกัดทางภูมิศาสตร์  $12^{\circ}24'19.2''\text{N}$   $99^{\circ}57'58.4''\text{E}$  ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล 3.09 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 39 และสภาพแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 40





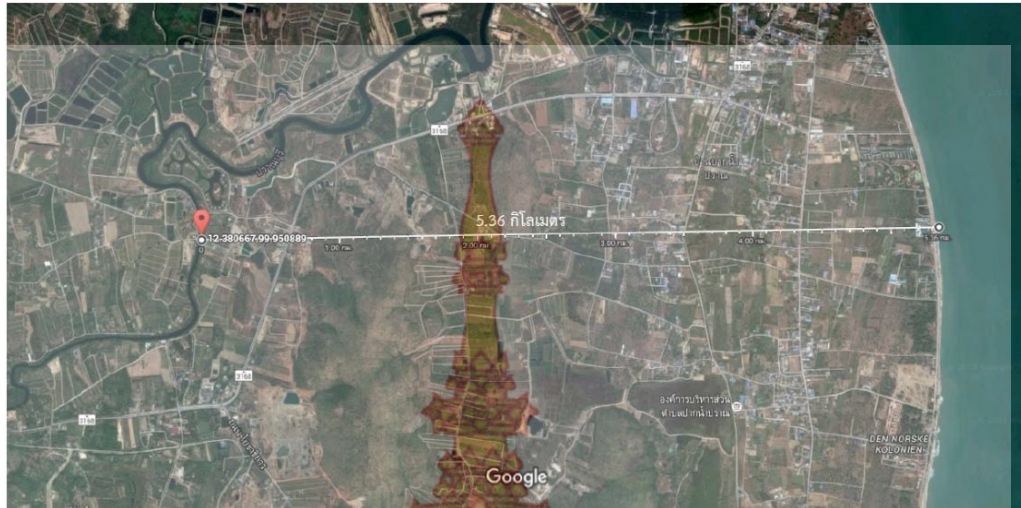
ภาพที่ 39 ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี  
ที่มา: (Google map, 2016)



ภาพที่ 40 สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี

จากภาพที่ 40 แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆ โครงสร้างสะพาน จะเห็นได้ว่าพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นต้นไม้ โดยเฉพาะโกก้าง มีบ้านเรือนหนาแน่น และเป็นเขตการประมงที่มีเรือเข้าออกเป็นจำนวนมาก สภาพดินจะเป็นดินแข็ง น้ำค่อนข้างจะใส

สะพานที่ 2 อยู่ในความรับผิดชอบของแขวงการทางประจวบคีรีขันธ์ สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2540 ตั้งอยู่บน แม่น้ำปราณบุรี บ้านฝั่งท่า ตำบลวังกัฟง อำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พิกัดทางภูมิศาสตร์  $12^{\circ}22'50.4''N$   $99^{\circ}57'03.2''E$  ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล 5.36 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 41 และสภาพแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 41 ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี  
ที่มา: (Google map, 2016)

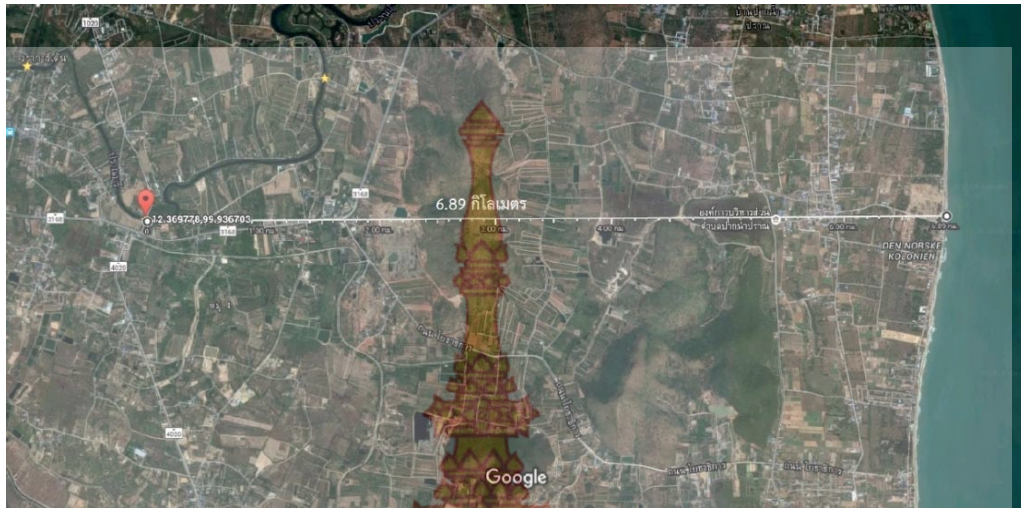


ภาพที่ 42 สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี

จากภาพที่ 42 แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆ โครงสร้างสะพาน จะเห็นได้ว่า พื้นที่ส่วนใหญ่จะเป็นต้นไม้ โดยเฉพาะโกกาทอง สภาพดินจะเป็นดินแข็งและดินเหนียวปะปนกัน มีบ้านเรือนเล็กน้อย

สะพานที่ 3 อยู่ในความรับผิดชอบของ องค์การบริหารส่วนจังหวัดประจวบคีรีขันธ์สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2538 ตั้งอยู่บน แม่น้ำปราณบุรี ปช.4020 ตำบลปราณบุรี อำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พิกัดทางภูมิศาสตร์ 12°22'11.2"N 99°56'12.1"E ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล 6.89 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 43 และสภาพแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 44





ภาพที่ 43 ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 3 อำเภอปราจีนบุรี  
ที่มา: (Google map, 2016)



ภาพที่ 44 สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 3 อำเภอปราจีนบุรี

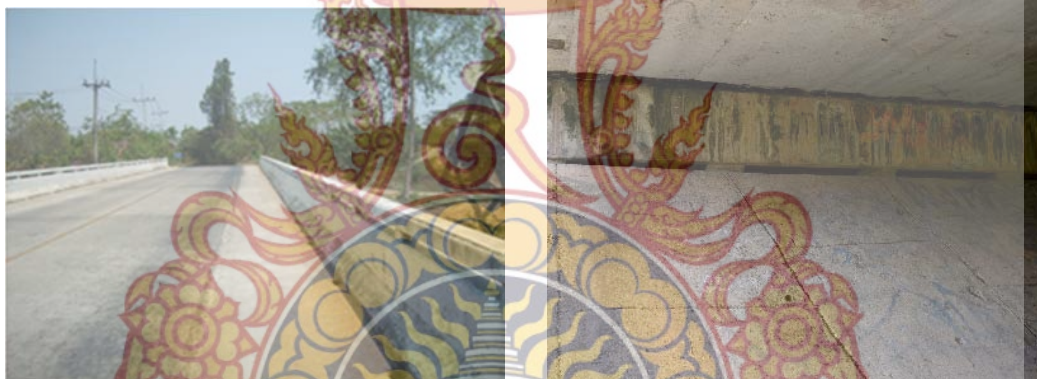
จากภาพที่ 44 แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆ โครงสร้างสะพาน จะเห็นได้ว่า พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นต้นไม้ สภาพดินจะเป็นดินแข็ง สภาพน้ำค่อนข้างใส

สะพานที่ 4 อยู่ในความรับผิดชอบของแขวงการทางประจวบคีรีขันธ์ สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2540 ตั้งอยู่บน แม่น้ำปราจีนบุรี ปช.007 ตำบลปราจีนบุรี อำเภอปราจีนบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พิกัดทางภูมิศาสตร์  $12^{\circ}22'53.9''\text{N}$   $99^{\circ}55'38.3''\text{E}$  ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล 7.89 กิโลเมตร ดังแสดงใน ภาพที่ 45 และสภาพแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 46





ภาพที่ 45 ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี  
ที่มา: (Google map, 2016)



ภาพที่ 46 สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี

จากภาพที่ 46 แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆ โครงสร้างสะพาน จะเห็นได้ว่าพื้นที่ส่วนใหญ่จะเป็นสิ่งก่อสร้าง เช่น สะพานรถไฟ โรงเรียน มีต้นไม้เล็กน้อย สภาพดินจะเป็นดินแข็ง สภาพน้ำค่อนข้างจะใส เป็นต้น

สะพานที่ 5 อยู่ในความรับผิดชอบของเทศบาลปราณบุรี สร้างเมื่อปี พ.ศ. 2538 ตั้งอยู่บนแม่น้ำปราณบุรี ตำบลเขาน้อย อำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พิกัดทางภูมิศาสตร์  $12^{\circ}22'26.1''N$   $99^{\circ}54'35.5''E$  ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล 9.83 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 47 และสภาพแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 48



ภาพที่ 47 ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างสะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี  
ที่มา: (Google map, 2016)



ภาพที่ 48 สภาพแวดล้อมบริเวณของที่ตั้งโครงสร้างสะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี

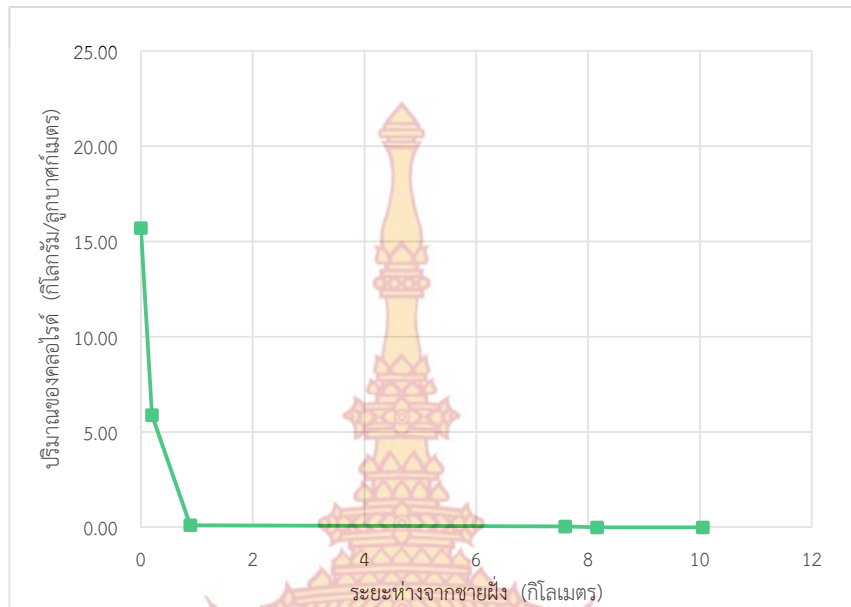
จากภาพที่ 48 แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆ โครงสร้างสะพาน จะเห็นได้ว่า พื้นที่ส่วนใหญ่จะมีต้นไม้สลัดกับบ้านเรือน สภาพดินจะเป็นดินแข็ง สภาพน้ำค่อนข้างใส ระดับน้ำประมาณ 70 ถึง 80 เซนติเมตร

## 2 การกระจายของปริมาณคลอไรด์กับระยะห่างจากชายฝั่งทะเล

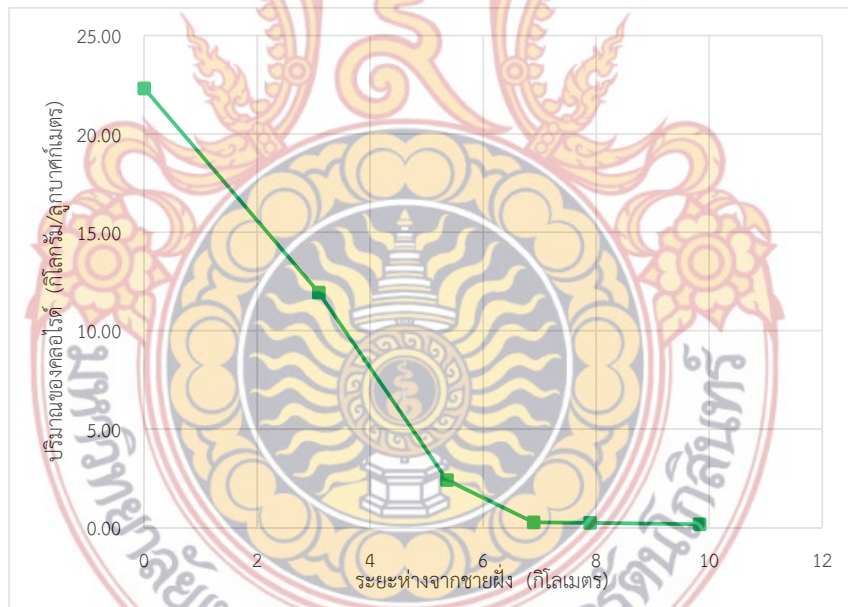
### 2.1 ปริมาณคลอไรด์ที่กระจายเข้าสู่แหล่งน้ำ

ในการวิเคราะห์คลอไรด์ในน้ำบริเวณที่ตั้งของโครงสร้างนั้น เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ในน้ำ และระยะห่างจากชายฝั่งทะเลแสดงดังภาพที่ 49 และ 50 ดังนี้





ภาพที่ 49 ปริมาณคลอไรด์ในแหล่งน้ำบริเวณโครงสร้างสะพานในเขต อำเภอหัวหิน



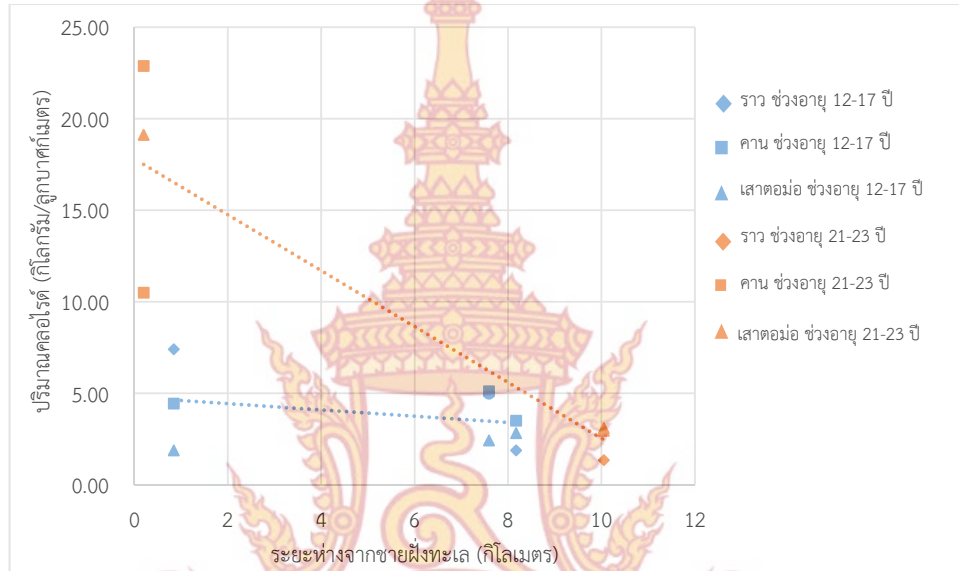
ภาพที่ 50 ปริมาณคลอไรด์ในแหล่งน้ำบริเวณโครงสร้างสะพานในเขต อำเภอปราณบุรี

จากภาพที่ 49 และ 50 จะพบว่าปริมาณคลอไรด์ในแหล่งน้ำ ทั้งในเขตอำเภอหัวหิน และอำเภอปราณบุรี มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีระยะทางที่ห่างจากชายฝั่งทะเลเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะจุดที่ 3, 4 และ 5 ในห้วยสามพันนาม ของเขตอำเภอหัวหินนั้น ที่แหล่งน้ำไม่เชื่อมต่อกับทะเลโดยตรง ทำให้



คลอไรด์จากทะเลไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณคลอไรด์ในแหล่งน้ำมากนัก ดังเช่นจุดอื่นที่มีปากแม่น้ำเชื่อมต่อกับทะเลโดยตรงอย่าง คลองตะเกียบและแม่น้ำปราณบุรี

2.2 การกระจายตัวของคลอไรด์ที่บริเวณ 0 ถึง 2 เซนติเมตร กับระยะห่างจากชายฝั่งทะเล จากข้อมูลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะห่างจากชายฝั่งทะเล จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 51 และ 52 ดังนี้



ภาพที่ 51 ปริมาณคลอไรด์ในระดับ 0 ถึง 2 เซนติเมตร ของโครงสร้างสะพานในเขตอำเภอหัวหิน



ภาพที่ 52 ปริมาณคลอไรด์ในระดับ 0 ถึง 2 เซนติเมตร ของโครงสร้างสะพานในเขตอำเภอปราณบุรี

จากภาพที่ 51 และ 52 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเกลือคลอไรด์ที่แทรกซึมในโครงสร้างสะพาน ระดับที่ความลึก 0 ถึง 2 เซนติเมตร ตามช่วงอายุต่างๆ กับระยะห่างจากชายฝั่งทะเลนั้น จะพบว่าปริมาณคลอไรด์จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะห่างจากชายฝั่งทะเลเพิ่มขึ้น ทั้งในเขตอำเภอหัวหินและปราณบุรี ซึ่งจากผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างนั้น สอดคล้องกับงานวิจัยของพิพัฒน์ และคณะ [13] ที่ทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากชายฝั่งทะเล คือเมื่อโครงสร้างนั้นอยู่ห่างจากทะเลมากขึ้นปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมอยู่ก็จะมีแนวโน้มลดลงไปด้วยและระดับความลึกจากผิวหน้าโครงสร้างมากขึ้น ปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปก็จะลดลงเช่นกัน

2.3 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ในแหล่งน้ำกับการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

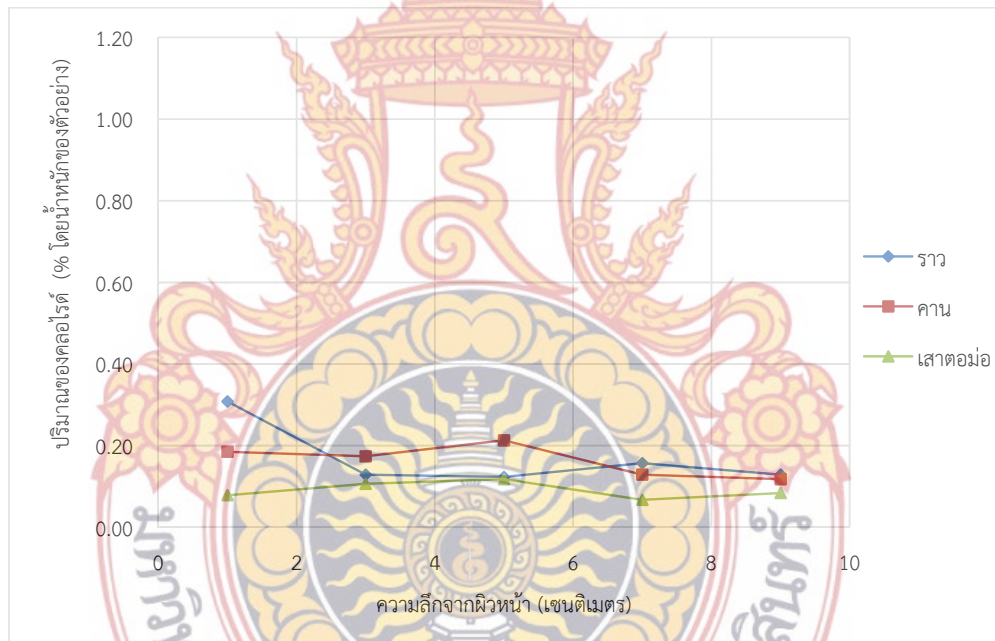
ปริมาณคลอไรด์ในแหล่งน้ำจัดทั่วไปแล้วจะอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.1 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร [25] ซึ่งจากผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในแหล่งน้ำบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่าง ในอำเภอหัวหินจะพบว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของคลอไรด์ในทะเลจะอยู่ในช่วงบริเวณสะพานที่ 1 และโดยเฉพาะสะพานที่ 2 อยู่ใกล้กับชายฝั่งทะเลมากและแม่น้ำที่เชื่อมต่อกับกับทะเลโดยตรง ทำให้มีปริมาณคลอไรด์ในแหล่งน้ำเท่ากับ 5.8896 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ส่วนปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตของ ราว คาน และเสาดอมอ่สะพานนั้น จะมีค่าอยู่ที่ 7.8080, 22.8854 และ 19.1161 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่ามีปริมาณคลอไรด์มากกว่าในแหล่งน้ำเนื่องจากการดึงดูดไอออนและการดึงดูดแบบคาพิลลารีที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งการดึงดูดทั้ง 2 แบบนี้จะทำให้เกิดการสะสมของคลอไรด์ในบริเวณผิวหน้ามากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณของโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งอย่างคานและเสาดอมอ่ ส่วนปริมาณคลอไรด์ใต้สะพานที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.0460 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นคลอไรด์ปกติที่พบในแหล่งน้ำทั่วไปและในพื้นที่สะพานที่ 4 และ 5 ที่ไม่มีน้ำอยู่เลย ทำให้ไม่สามารถสำรวจได้ และปริมาณคลอไรด์ภายในโครงสร้างค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ จึงกล่าวได้ว่าโครงสร้างบริเวณนี้ไม่ได้รับของคลอไรด์จากน้ำ แต่เป็นปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างนั่นเอง

ในส่วนของอำเภอปราณบุรีนั้น ปริมาณคลอไรด์ในแหล่งน้ำตามบริเวณที่เก็บตัวอย่างของสะพาน ที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 จะอยู่ที่ 11.9362, 2.4077, 0.2613, 0.2348 และ 0.1639 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมากกว่าปริมาณคลอไรด์ที่พบอยู่ในแหล่งน้ำทั่วไป โครงสร้างสะพานที่ 1 นั้นมีปริมาณคลอไรด์บริเวณผิวหน้าของโครงสร้างส่วน ราว คาน และเสาดอมอ่ ที่มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 3.4425, 4.1802 และ 7.8687 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งน้อยกว่าที่พบในแหล่งน้ำ แสดงถึงการแทรกซึมที่เกิดขึ้นน้อย แต่ก็มีแนวโน้มที่ปริมาณจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณคลอไรด์ในน้ำมีมากและอยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลนั่นเอง ในส่วนของสะพานอื่นๆนั้น ก็จะมีปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้ามากกว่าในแหล่งน้ำ

เนื่องจากการติดตั้งแบบอ็อนและแบบคาพิวลาไรท์จะทำให้ปริมาณคลอไรด์บนผิวหน้านั้นมีมากขึ้น ก่อนจะเริ่มการแพร่เข้าสู่โครงสร้างภายในต่อไป

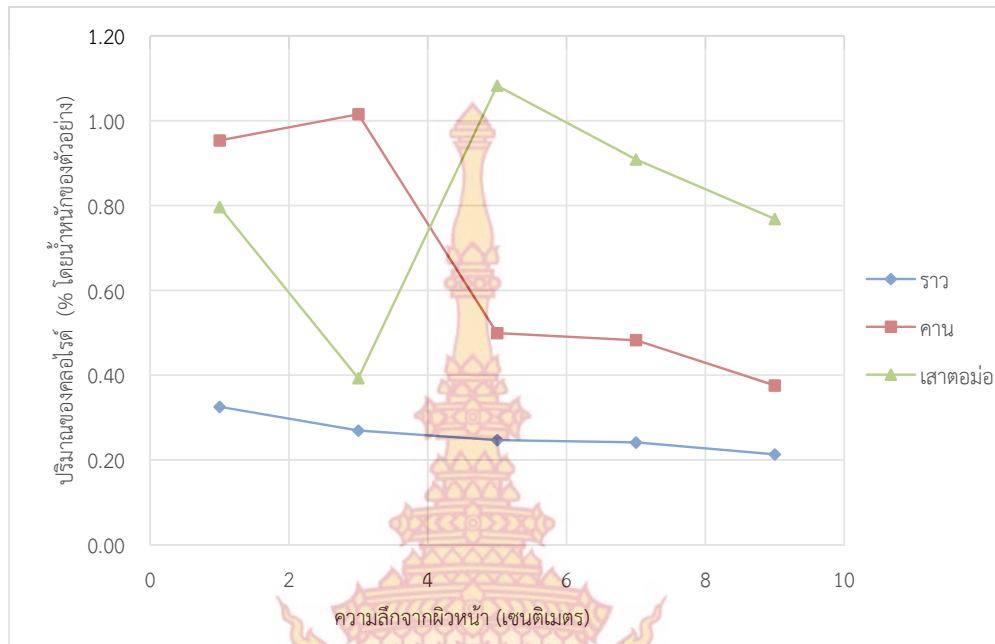
### 3 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ ในโครงสร้างสะพาน

จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลและพื้นที่ใกล้เคียง ในเขตอำเภอหัวหินและอำเภอบางสะพานบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์นั้น ทำได้โดยการเก็บตัวอย่าง ผงคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ 2 เซนติเมตร จนถึง 10 เซนติเมตร มาทำการไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมอยู่ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C1152 การหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับระดับความลึกโดยวัดจากผิวหน้าของโครงสร้างสะพานทั้งในเขตอำเภอหัวหินและอำเภอบางสะพานบุรี ดังแสดงในภาพที่ 53 ถึง 62



ภาพที่ 53 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างสะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน

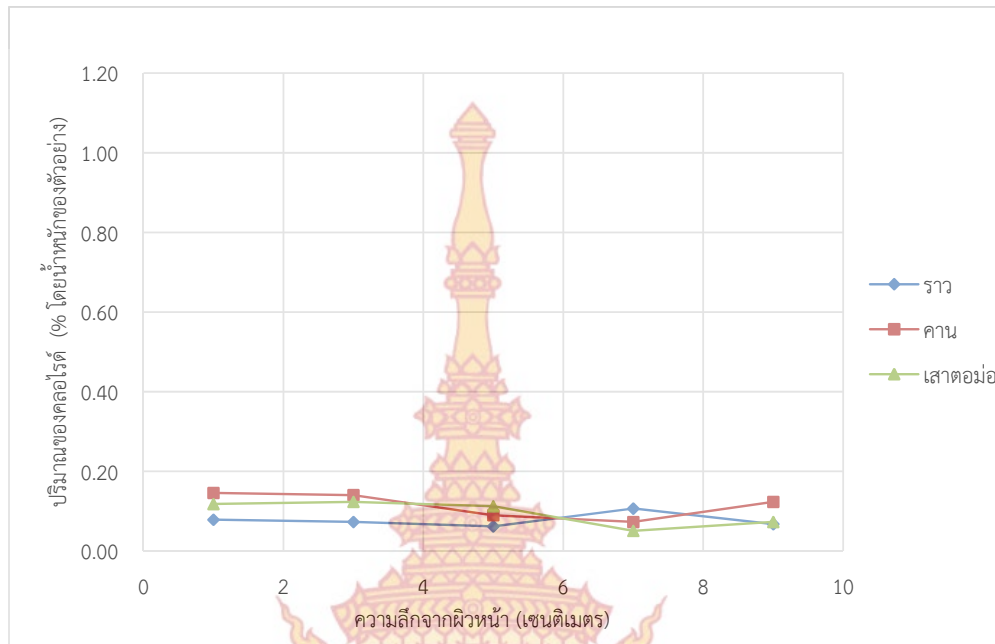




ภาพที่ 54 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 2  
อำเภอหัวหิน



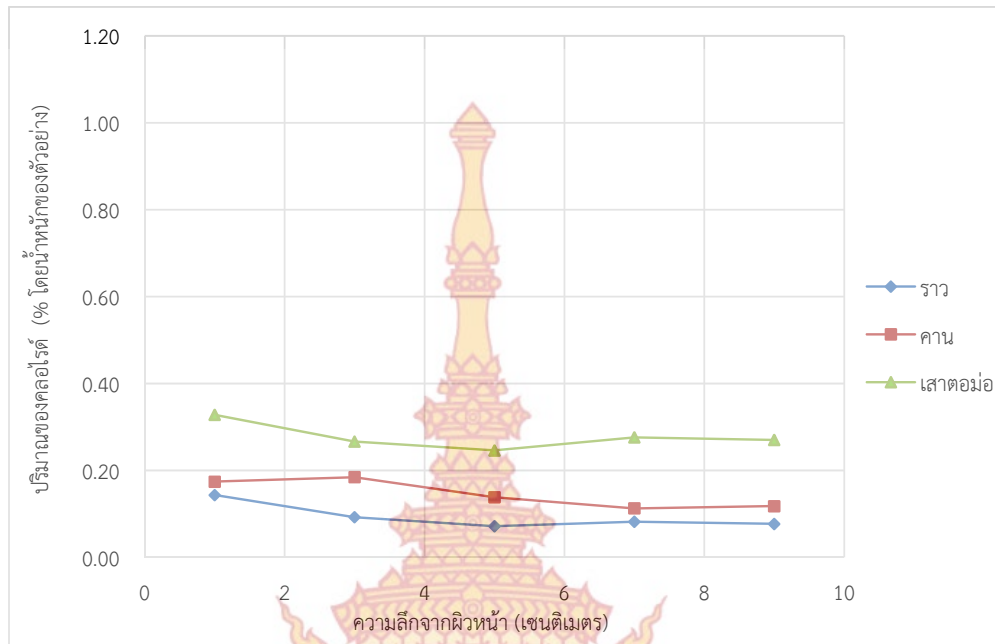
ภาพที่ 55 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 3  
อำเภอหัวหิน



ภาพที่ 56 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 4  
อำเภอหัวหิน



ภาพที่ 57 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 5  
อำเภอหัวหิน

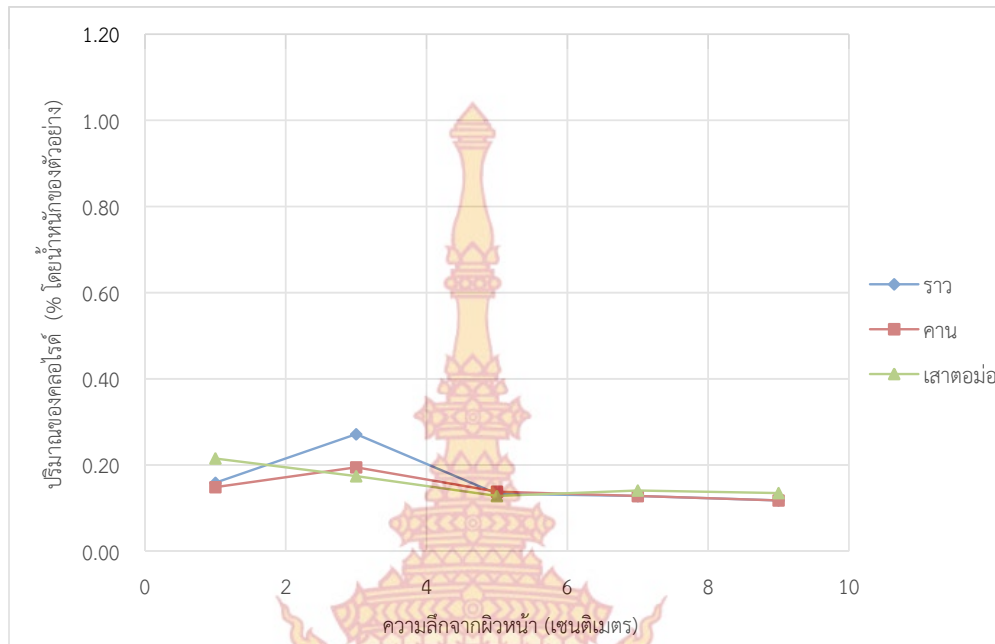


ภาพที่ 58 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างสะพานที่ 1  
อำเภอปราณบุรี



ภาพที่ 59 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 2  
อำเภอปราณบุรี

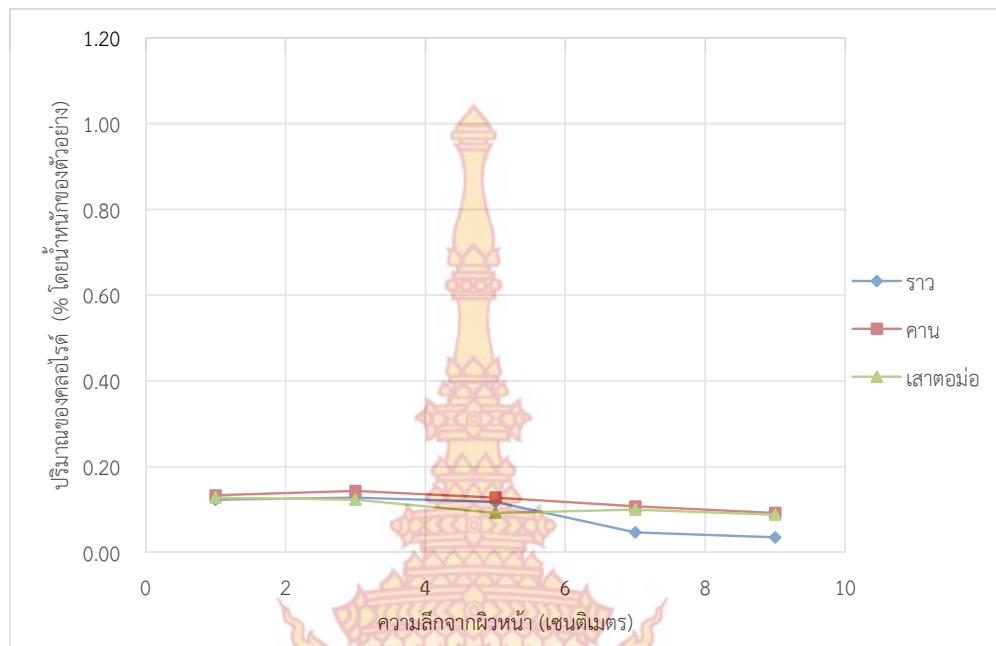




ภาพที่ 60 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี



ภาพที่ 61 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี



ภาพที่ 62 ปริมาณของคลอโรฟิล์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้าง สะพานที่ 5 อำเภอบราญบุรี

จากภาพที่ 53 ถึง 62 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอโรฟิล์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ภายในโครงสร้าง ราว, คาน และเสาตอม่อของสะพานในเขตอำเภอหัวหินและอำเภอบราญบุรี จะพบว่าปริมาณคลอโรฟิล์ที่แทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างนั้น มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความลึกเพิ่มมากขึ้น โดยที่บริเวณช่วง 0 ถึง 2 เซนติเมตร จะพบปริมาณคลอโรฟิล์ที่มากกว่าระดับความลึกอื่นๆ และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อมีระดับความลึกเพิ่ม แต่มีข้อมูลบางจุดที่ภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก กลับมีปริมาณคลอโรฟิล์ที่มากกว่าบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งจะเห็นชัดในภาพที่ 54 ซึ่งเป็นสะพานที่ 2 ของอำเภอหัวหิน ห่างจากชายฝั่งเพียง 0.199 กิโลเมตร และที่ 59 ซึ่งเป็นสะพานที่ 2 ของอำเภอบราญบุรี ที่อยู่ห่างจากชายฝั่ง 5.36 กิโลเมตร โดยอาจมีสาเหตุมาจาก

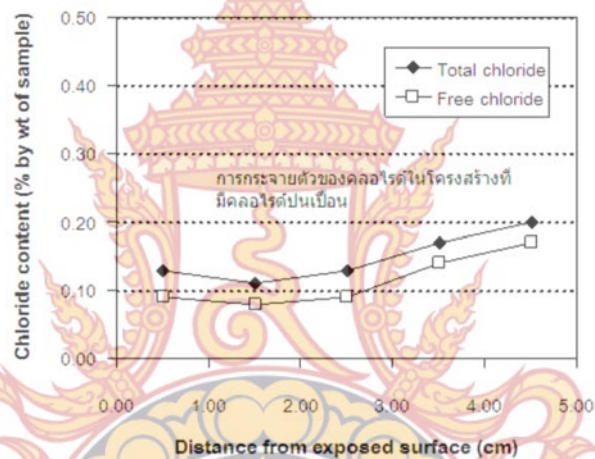
1) คลอโรฟิล์ที่แทรกซึมในโครงสร้าง โดยเฉพาะบริเวณผิวหน้านั้น อาจถูกชะล้างด้วยกระแสลมและน้ำฝนออกไป จึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีปริมาณคลอโรฟิล์ลดลงกว่าความเป็นจริงที่เคยมีอยู่

2) คลอโรฟิล์ที่แทรกซึมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น อาจถูกแทรกซึมด้วยการดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสภาวะเปียกสลับแห้ง คือ เมื่อน้ำที่มีคลอโรฟิล์ปะปนอยู่ได้แทรกซึมเข้าไปยังเนื้อคอนกรีต เมื่อน้ำที่ผิวคอนกรีตมีการระเหยออกก็จะเหลือไว้แต่ทราบเกลือ และเมื่อกลับอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้ง น้ำที่มีคลอโรฟิล์ปะปนอยู่ได้แทรกซึมเข้าไป ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของคลอโรฟิล์จะสูงขึ้น [1]

3) ภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อาจมีรอยแตกร้าวอยู่ ซึ่งบริเวณนั้นจะมีปริมาณคลอโรฟิล์สะสมมากกว่าบริเวณอื่น

4) ในการเก็บตัวอย่างคอนกรีต อาจไปโดนบริเวณเหล็กที่เป็นสนิมอยู่ปะปนมาด้วย ทำให้บริเวณความลึกนั้นมีปริมาณคลอโรฟิล์สูงกว่าปกติ

ในส่วนของภาพที่ 55 ถึง 57 ซึ่งเป็นสะพานในพื้นที่อำเภอหัวหิน อยู่ห่างจากชายฝั่ง 7.59, 8.16, 10.05 กิโลเมตร ตามลำดับ และในภาพที่ 62 ซึ่งเป็นสะพานในพื้นที่อำเภอบราญบุรี อยู่ห่างจากชายฝั่ง 9.33 กิโลเมตร จะพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมอยู่ในเนื้อคอนกรีต มีค่าที่ใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 0.00 ถึง 0.20 % ของน้ำหนักตัวอย่าง ในทุกระดับความลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าตัวสะพานดังกล่าว ในเขตทั้ง 2 อำเภอนั้น ไม่ได้มีปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปจากธรรมชาติ แต่อาจจะเป็นคลอไรด์ที่มีอยู่เดิมในโครงสร้างซึ่งปนเปื้อนคลอไรด์ จากวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตหรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับบทความเรื่อง การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากการปนเปื้อนคลอไรด์ในส่วนผสม จากวารสารคอนกรีตของ ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล และ ศ.ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล [3] ดังแสดงในภาพที่ 63



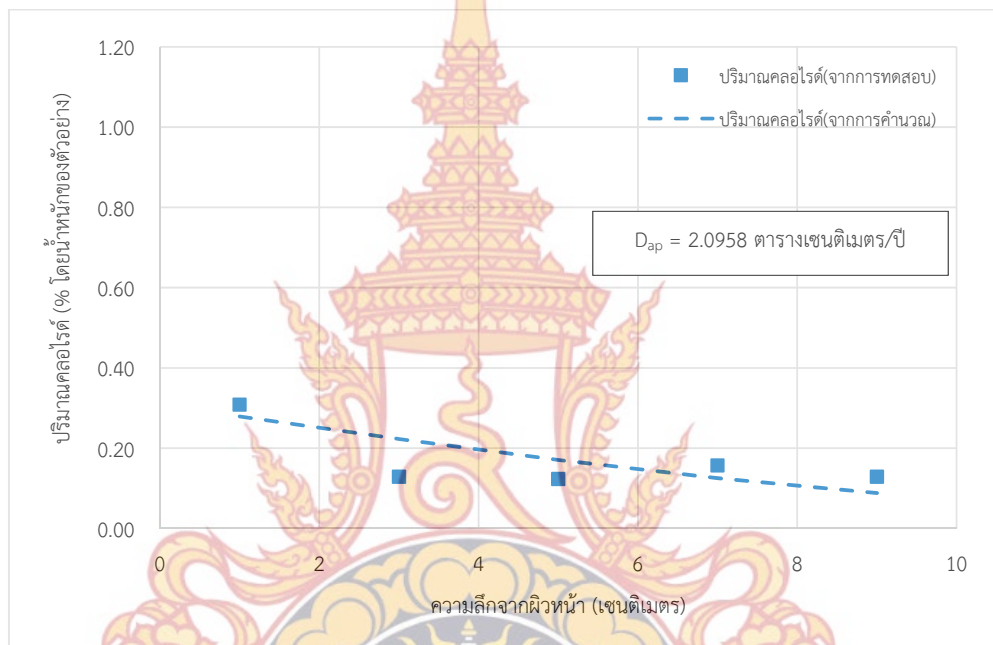
ภาพที่ 63 การกระจายตัวของคลอไรด์ที่ไอออนที่มาจาก การปนเปื้อนที่มาจาก (สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2552)

ซึ่งจากภาพจะแสดงให้เห็นการกระจายตัวของคลอไรด์นั้นมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งลึกเข้าไปในโครงสร้าง (ประมาณ 0.2 % โดยน้ำหนักของคอนกรีตที่ระยะ 50 มิลลิเมตร ) และมีค่าลดลงเมื่อใกล้ผิวมากขึ้น ลักษณะการกระจายตัวแบบนี้ แสดงให้เห็นถึงปัญหาการปนเปื้อนคลอไรด์จากวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต ส่วนที่ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ลดลงบริเวณใกล้ผิวนั้น เนื่องมาจากความเข้มข้นของคลอไรด์ในโครงสร้างมีค่ามากกว่าสิ่งแวดล้อม จึงให้เกิดการแพร่ของคลอไรด์ออกจากโครงสร้าง [25] ซึ่งในส่วนของสะพานที่กล่าวมานั้น ปริมาณคลอไรด์บริเวณผิวหน้าไม่ได้ลดลงมากนัก จึงสามารถอธิบายได้ว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในโครงสร้างสะพานนั้น มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับสิ่งแวดล้อมบริเวณรอบโครงสร้าง จึงไม่ทำให้คลอไรด์เกิดการแพร่หรืออาจเกิดการแพร่ออกบ้างแต่อาจเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยมากนั่นเอง ซึ่งหมายความว่าคลอไรด์จากสภาวะทะเล จะเริ่มไม่มีผลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในระยะประมาณ 7 กิโลเมตรเป็นต้นไป ทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อมในแต่ละพื้นที่ด้วย

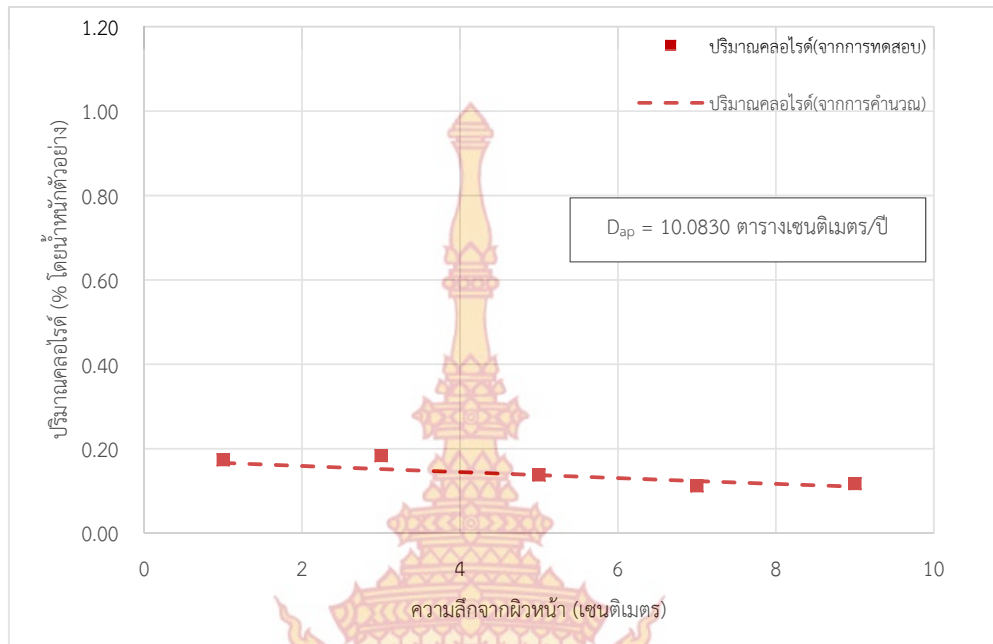


#### 4 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างสะพาน

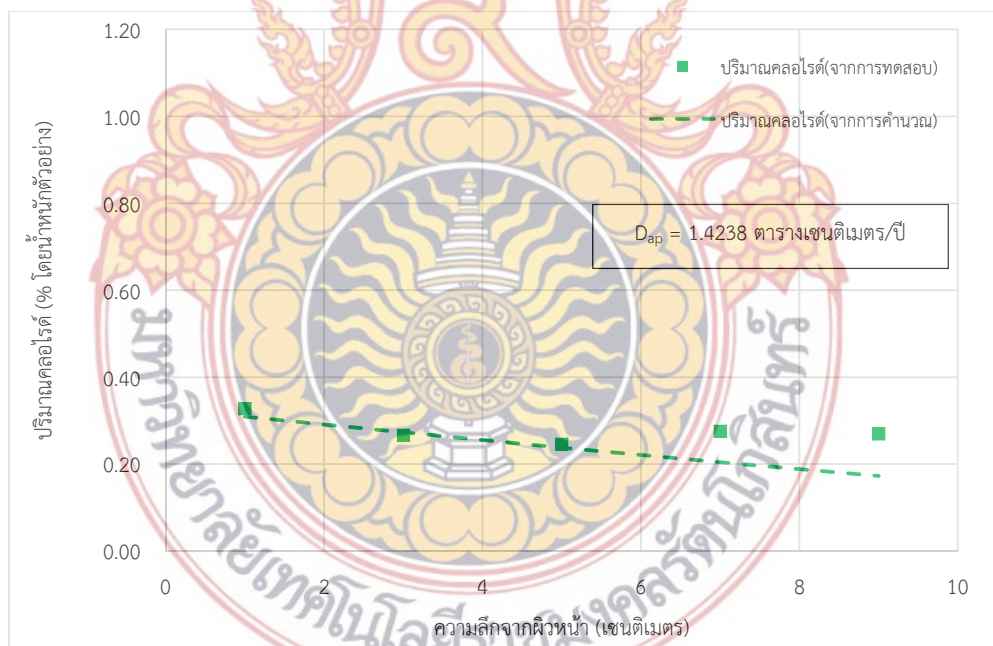
จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในความลึกที่ต่างกันนั้น สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างสะพานได้ ตามกฎข้อที่ 2 ของฟิคส์ ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่เกิดขึ้นจากสัมประสิทธิ์การแพร่นั้น และเมื่อนำค่าปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งจะได้ผลดังแสดงในภาพที่ 64 ถึง 93 ดังนี้



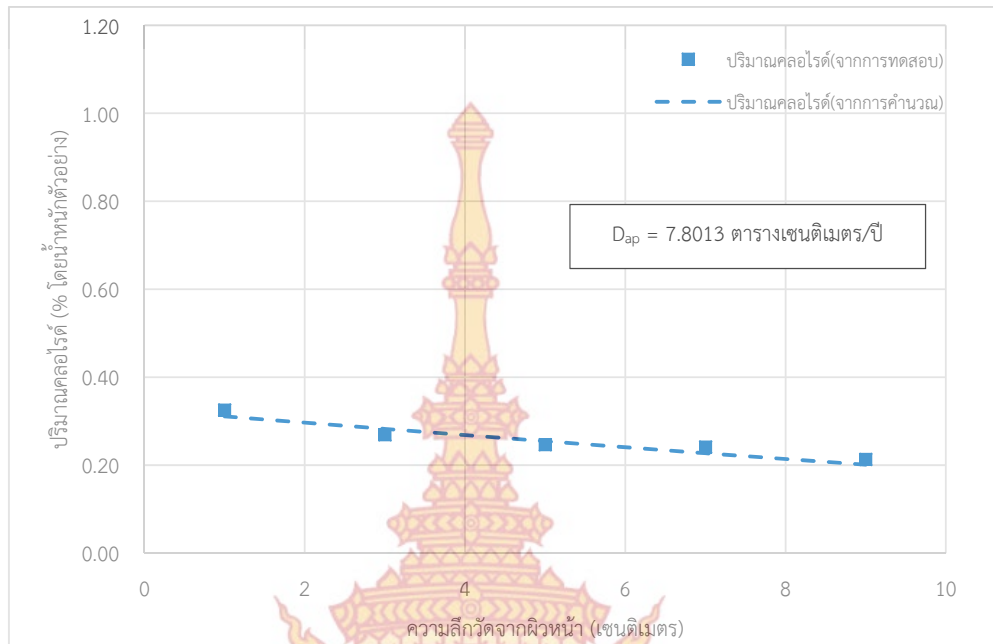
ภาพที่ 64 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพาน สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน



ภาพที่ 65 ปริมาณของคลอโรไฟต์เทียบกับระยะทางจากฝ้าหน้าของโครงสร้างคานสะพาน สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน



ภาพที่ 66 ปริมาณของคลอโรไฟต์เทียบกับระยะทางจากฝ้าหน้าของโครงสร้างเสาต่อม่อสะพาน สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน

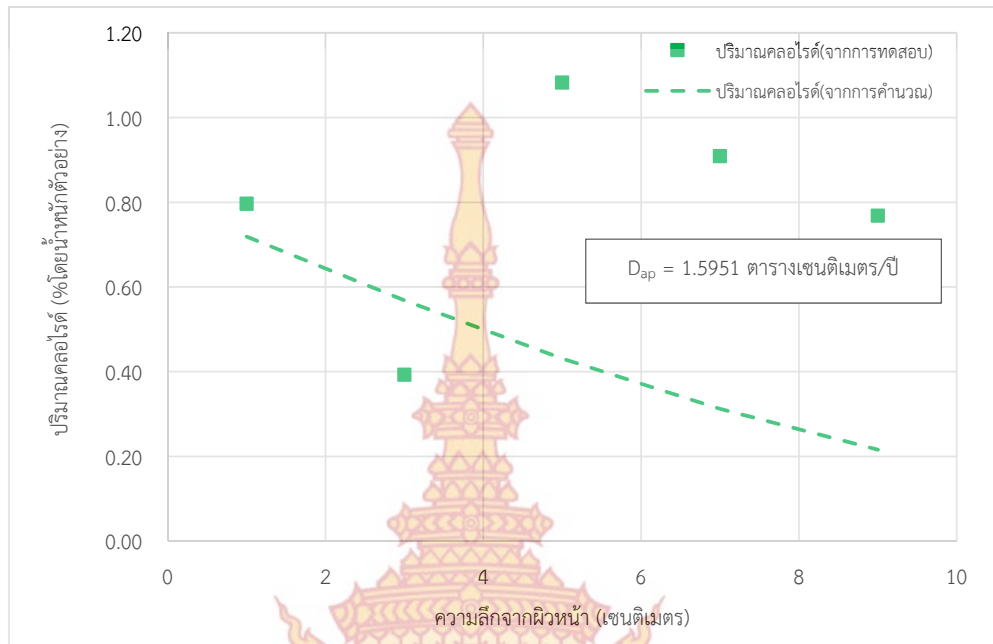


ภาพที่ 67 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพาน สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน

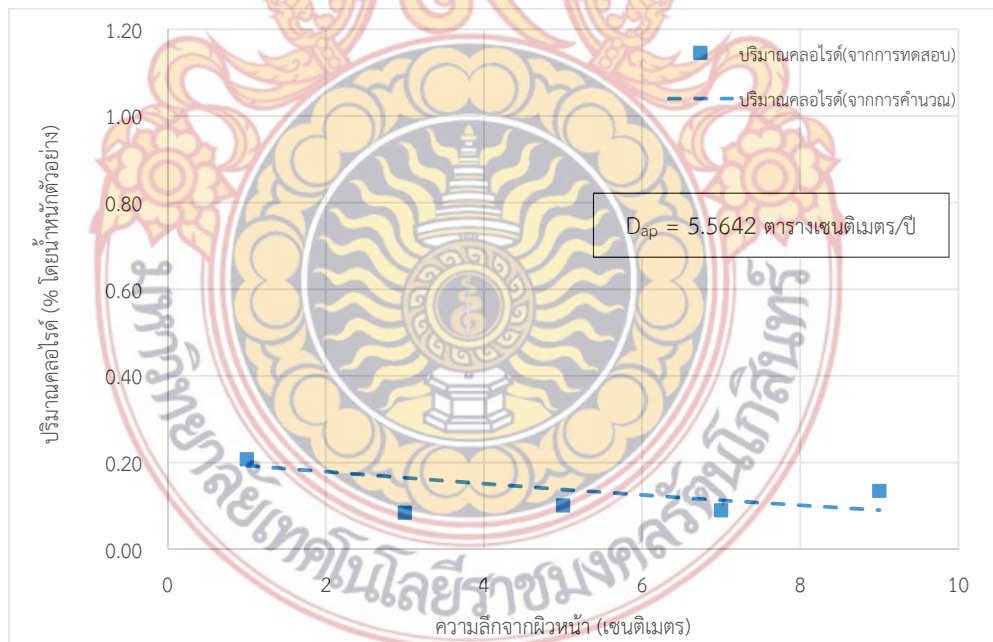


ภาพที่ 68 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคานสะพาน สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน

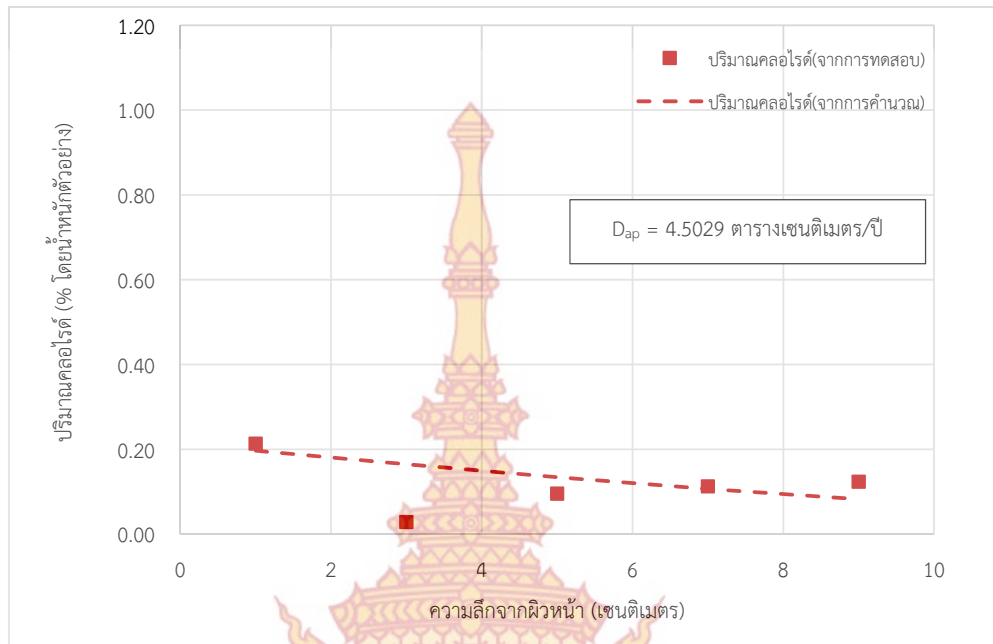




ภาพที่ 69 ปริมาณของคลอไรต์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อสะพาน สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน



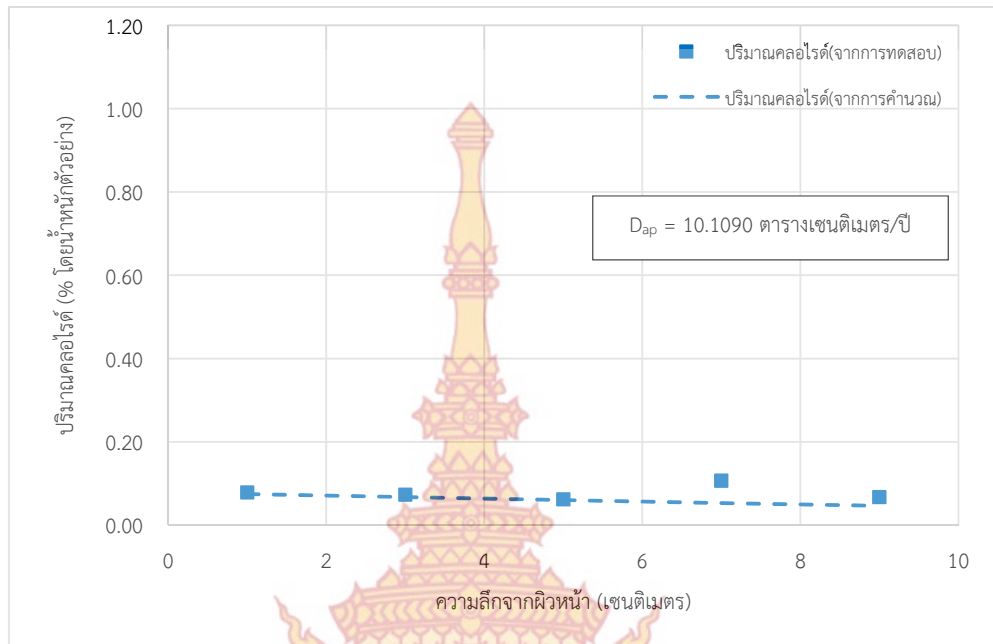
ภาพที่ 70 ปริมาณของคลอไรต์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพาน สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน



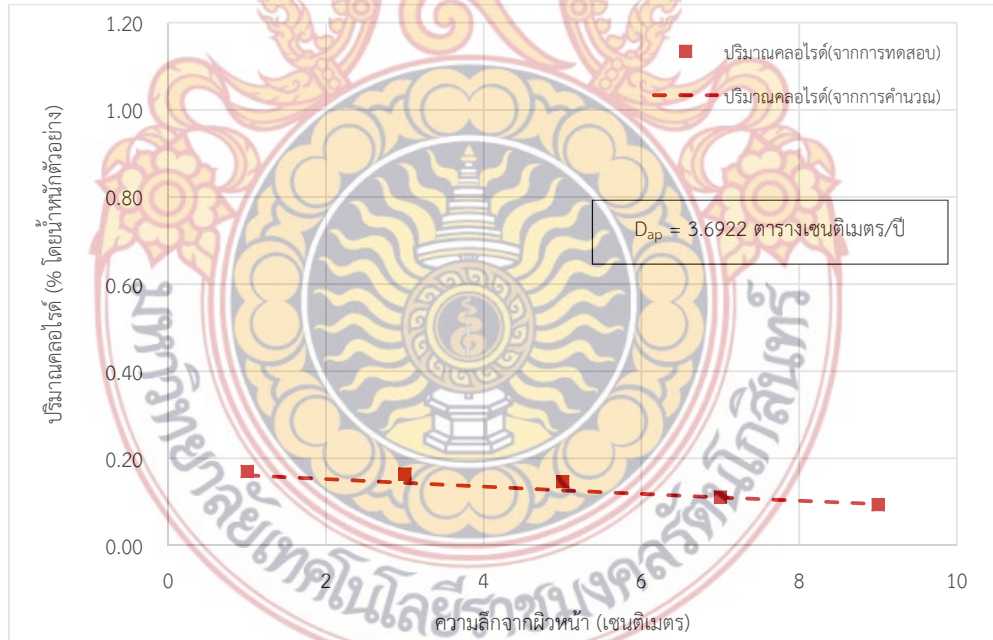
ภาพที่ 71 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคานสะพาน สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน



ภาพที่ 72 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อสะพาน สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน

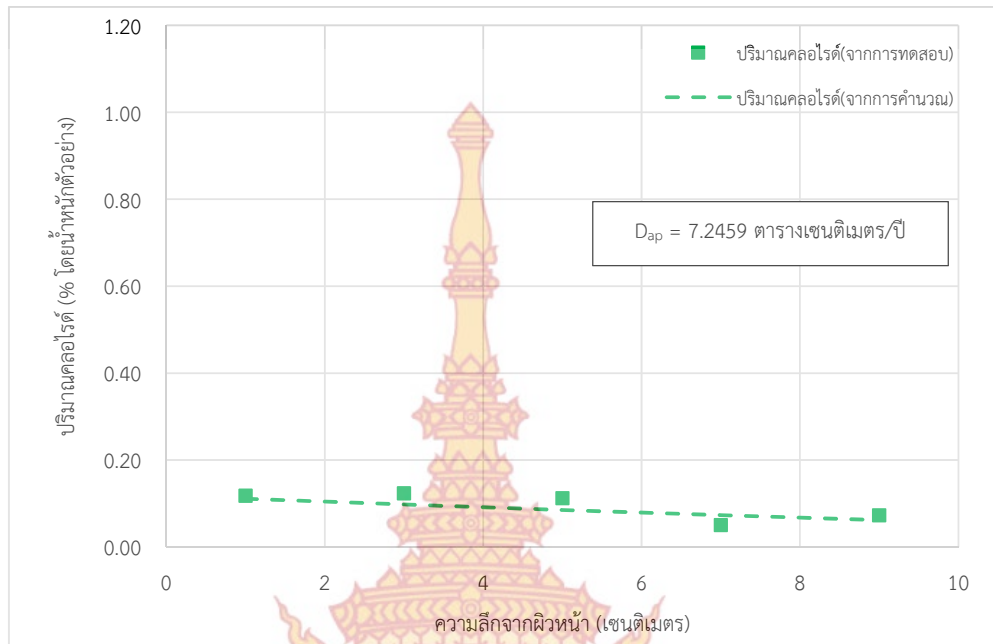


ภาพที่ 73 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพาน สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน

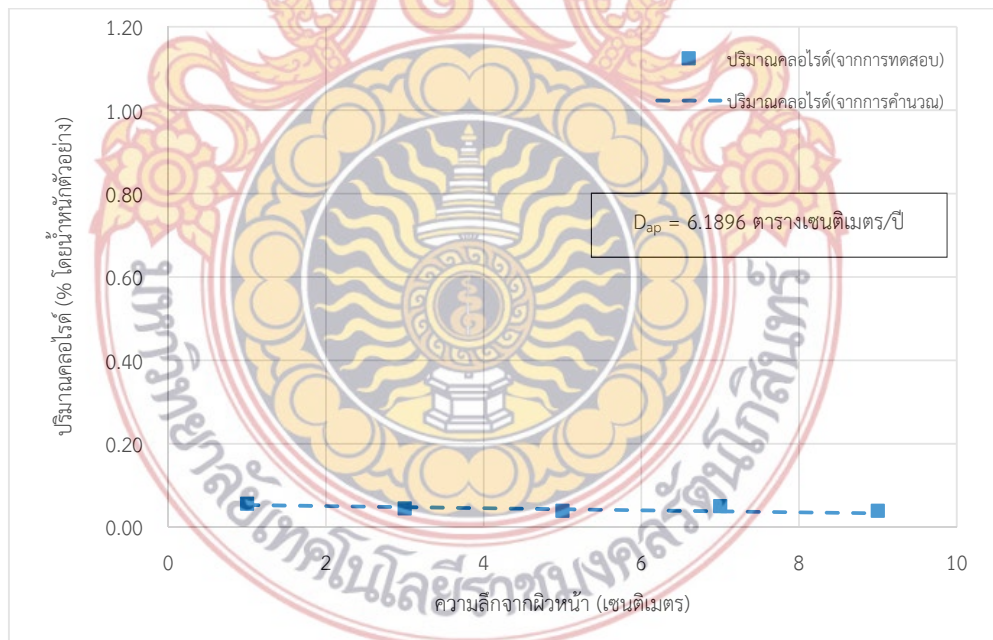


ภาพที่ 74 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคานสะพาน สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน

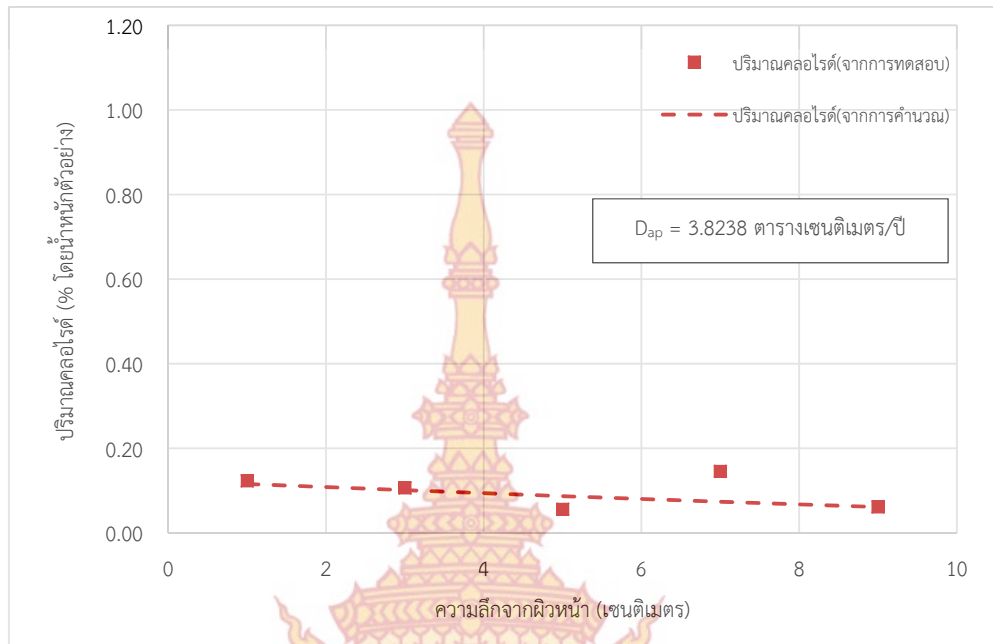




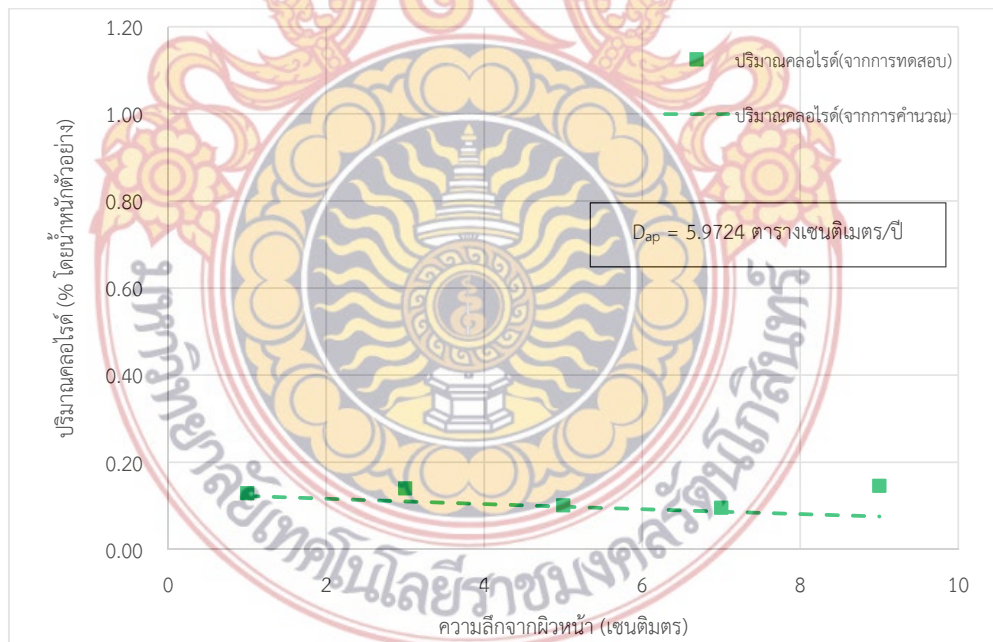
ภาพที่ 75 ปริมาณของคลอไรต์เทียบกับระยะทางจากฝ้าหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อสะพาน สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน



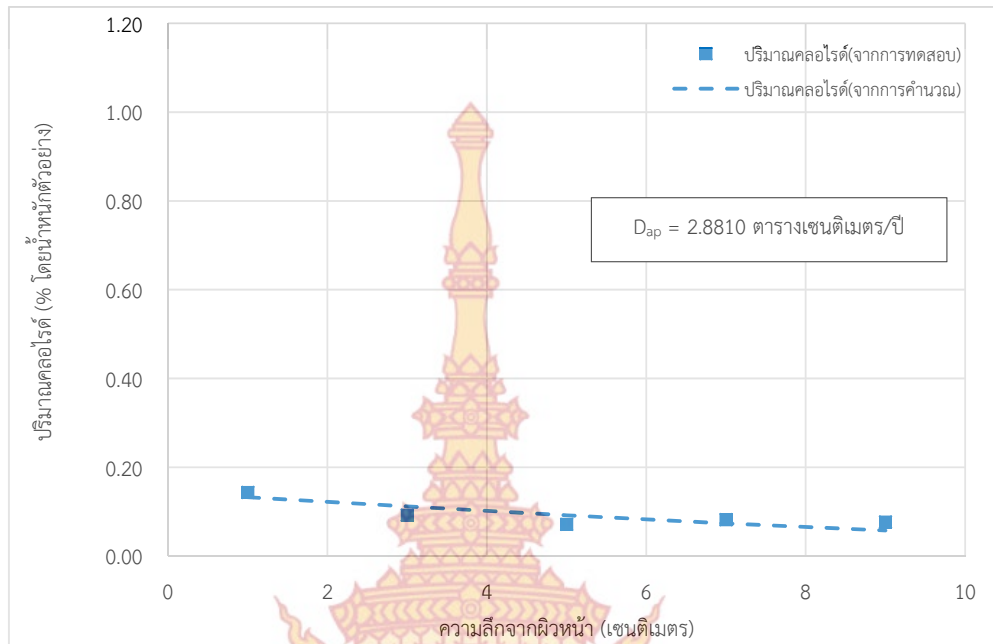
ภาพที่ 76 ปริมาณของคลอไรต์เทียบกับระยะทางจากฝ้าหน้าของโครงสร้างราวสะพาน สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน



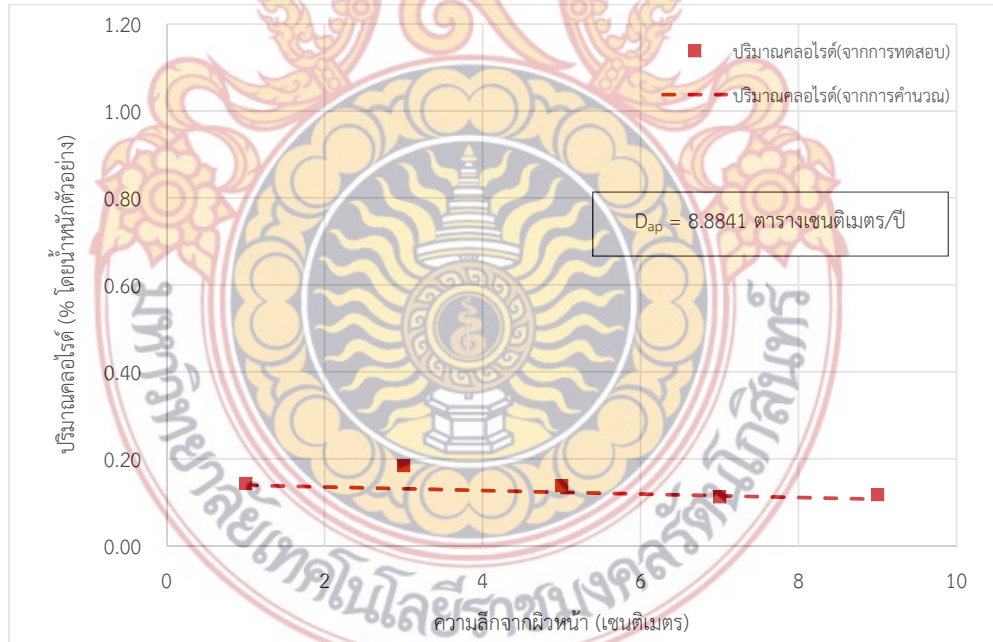
ภาพที่ 77 ปริมาณของคลอไรต์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคานสะพาน สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน



ภาพที่ 78 ปริมาณของคลอไรต์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อสะพาน สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน

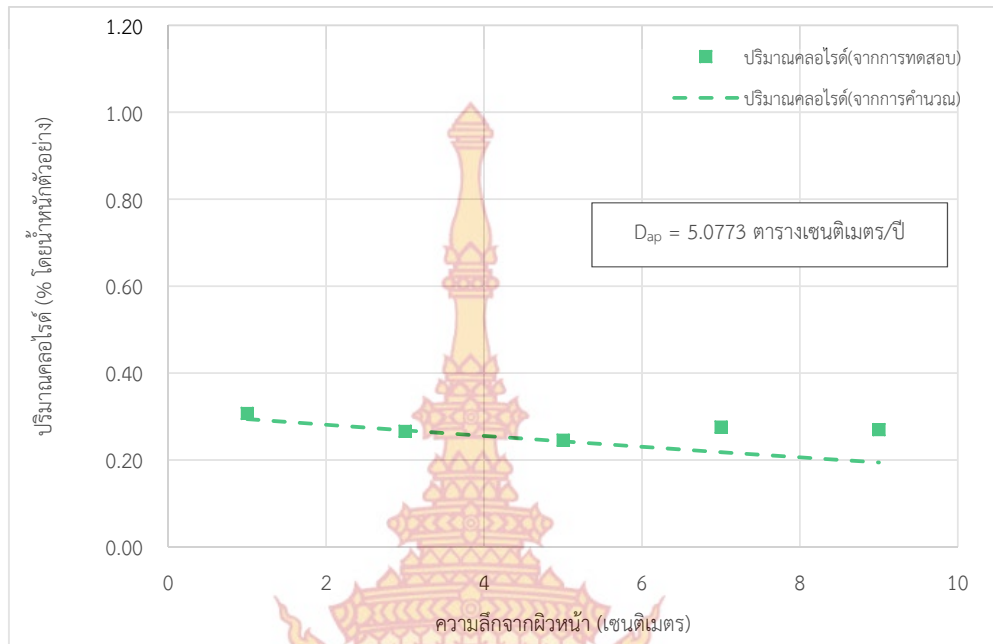


ภาพที่ 79 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพาน สะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี

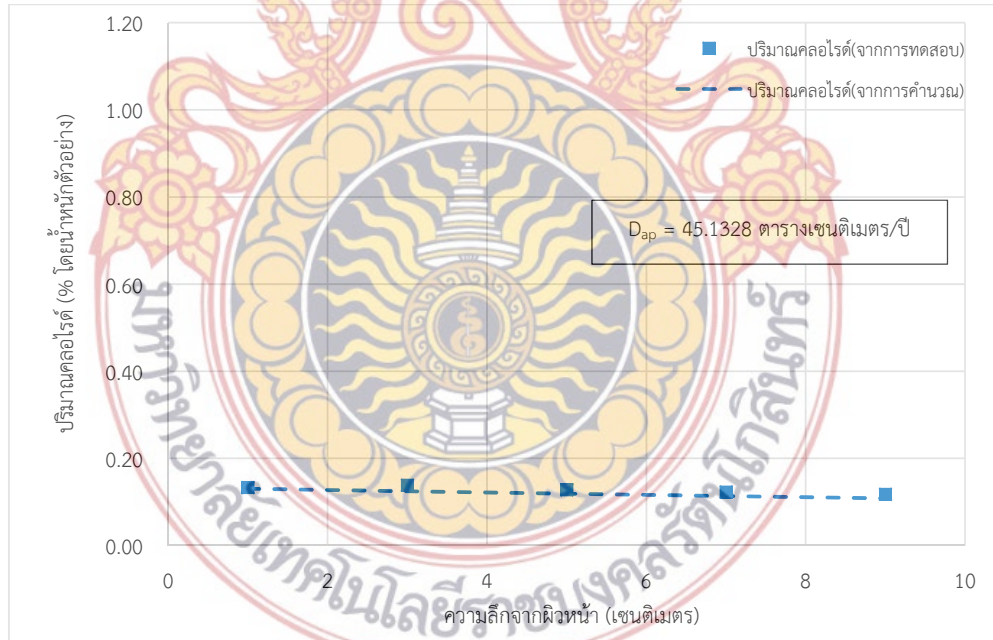


ภาพที่ 80 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคานสะพาน สะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี

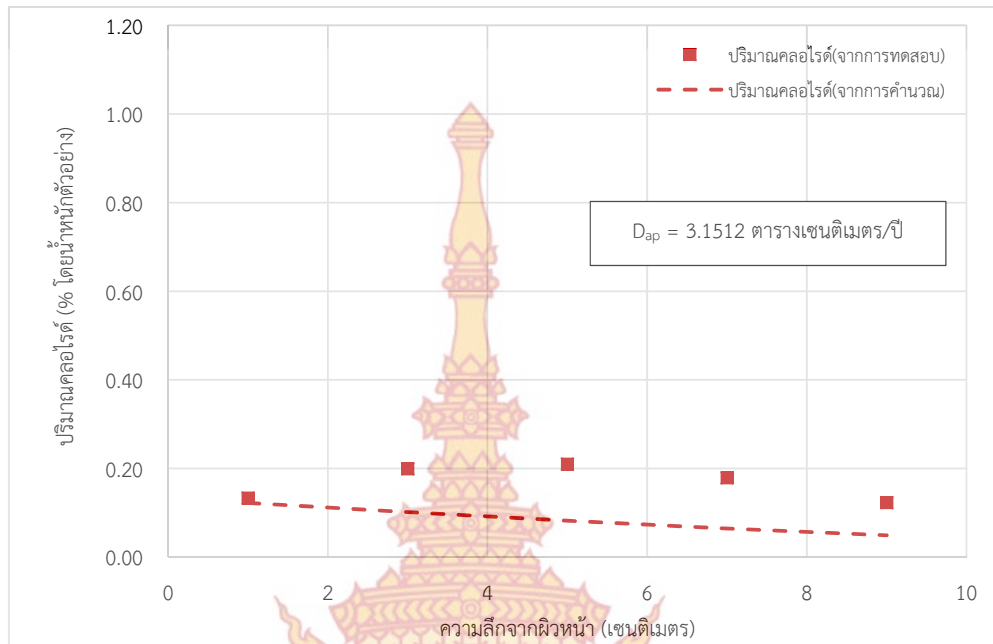




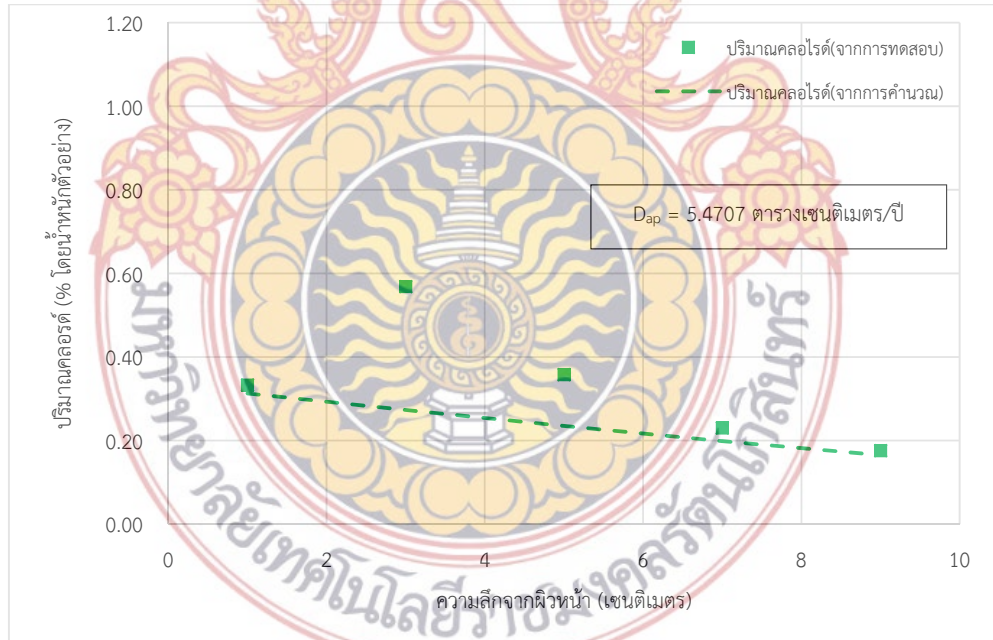
ภาพที่ 81 ปริมาณของคลอไรต์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างเสาต่อม่อสะพาน สะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี



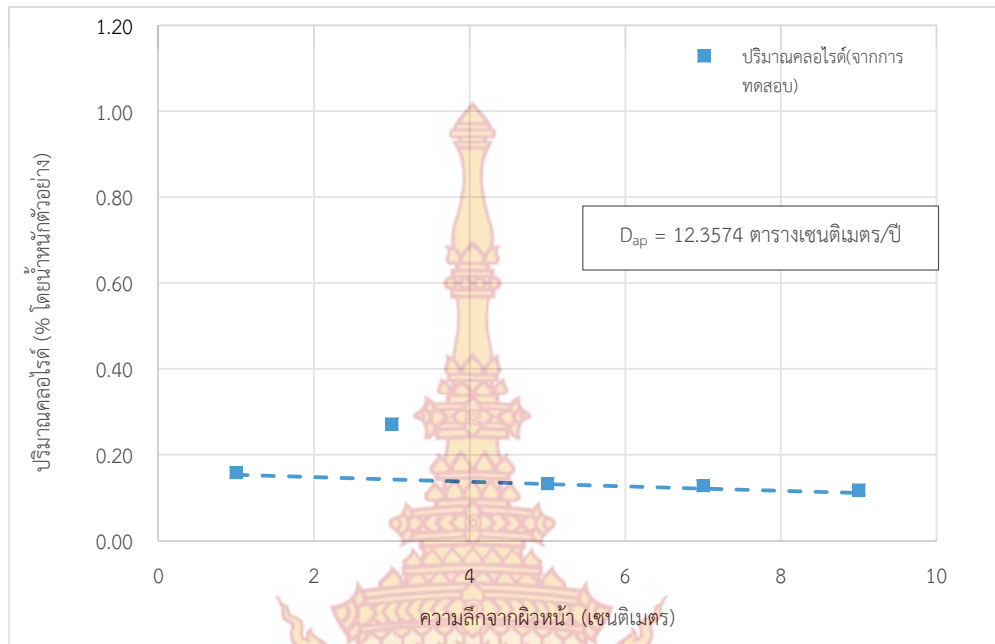
ภาพที่ 82 ปริมาณของคลอไรต์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพาน สะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี



ภาพที่ 83 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากฝ้าหน้าของโครงสร้างคานสะพาน สะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี



ภาพที่ 84 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากฝ้าหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อสะพาน สะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี

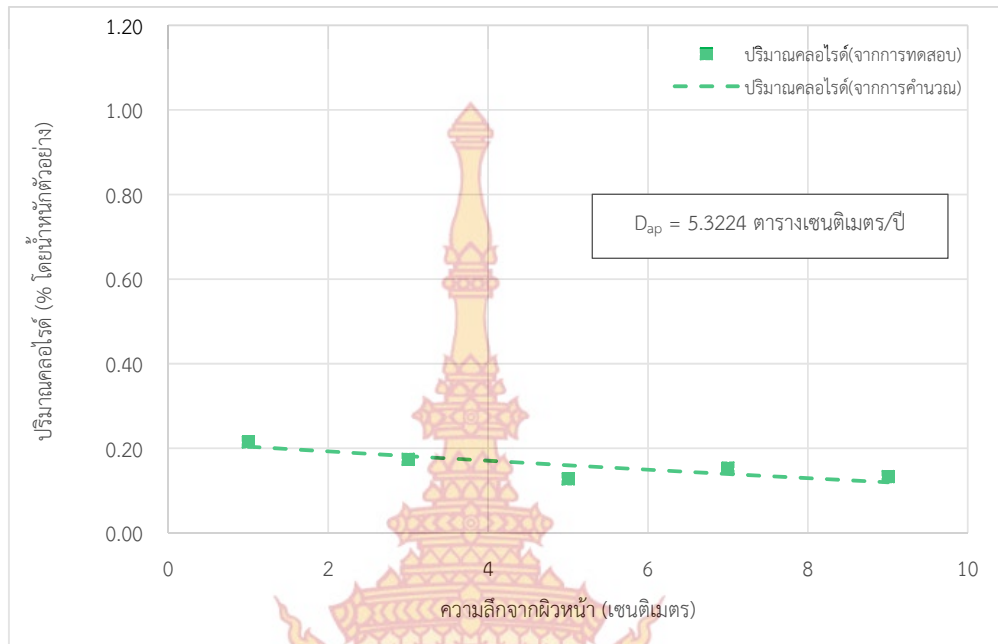


ภาพที่ 85 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพาน สะพานที่ 3 อำเภอปรางค์บุรี

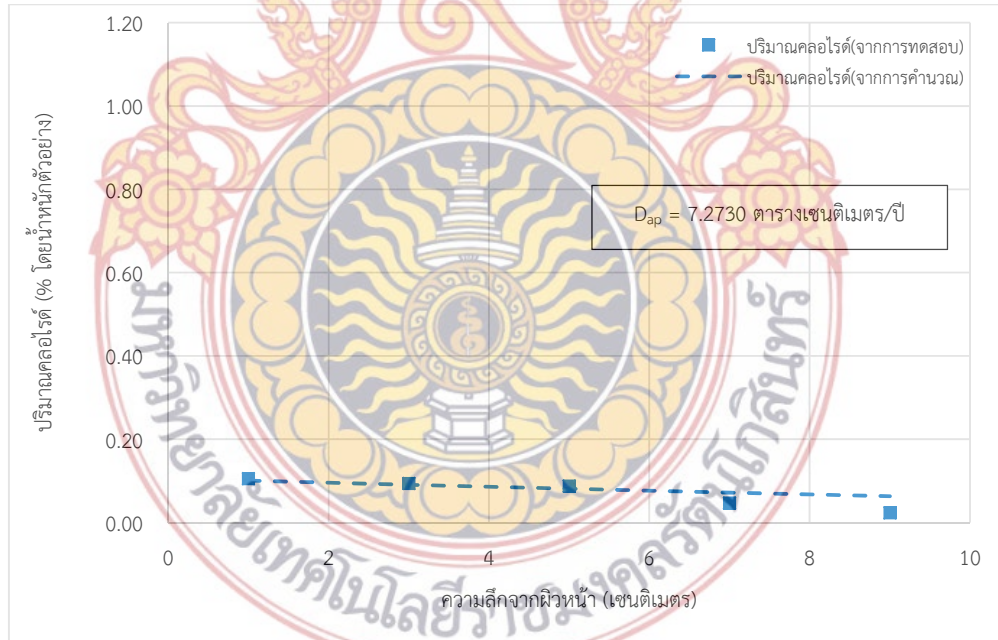


ภาพที่ 86 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคานสะพาน สะพานที่ 3 อำเภอปรางค์บุรี

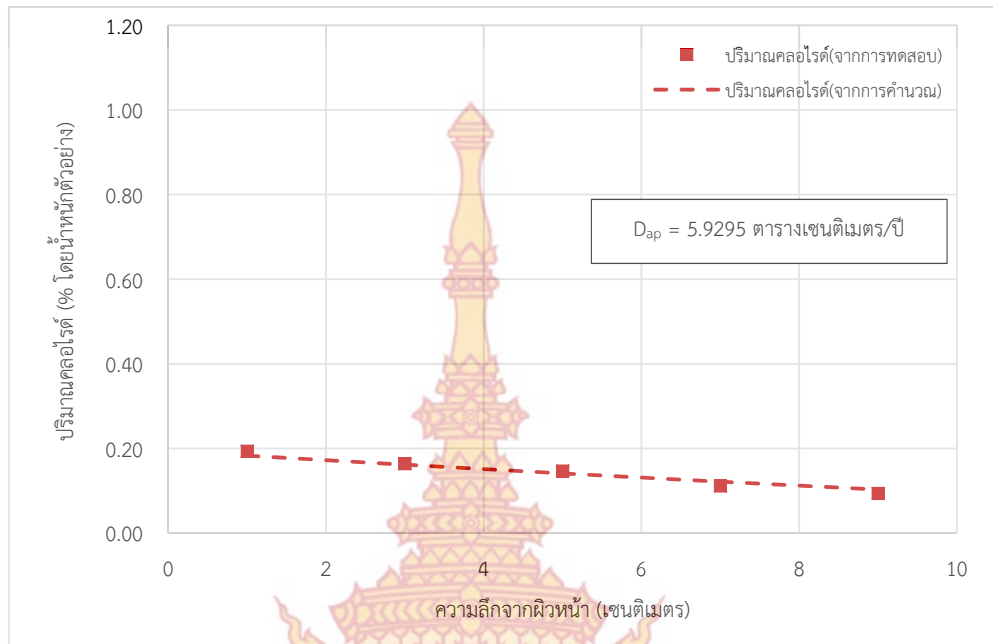




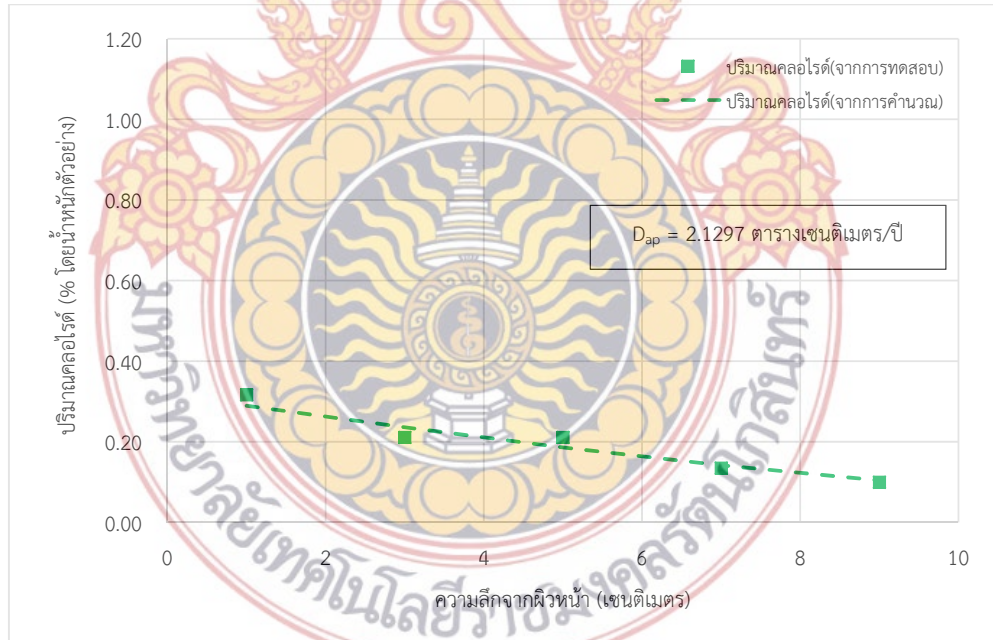
ภาพที่ 87 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อสะพาน สะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี



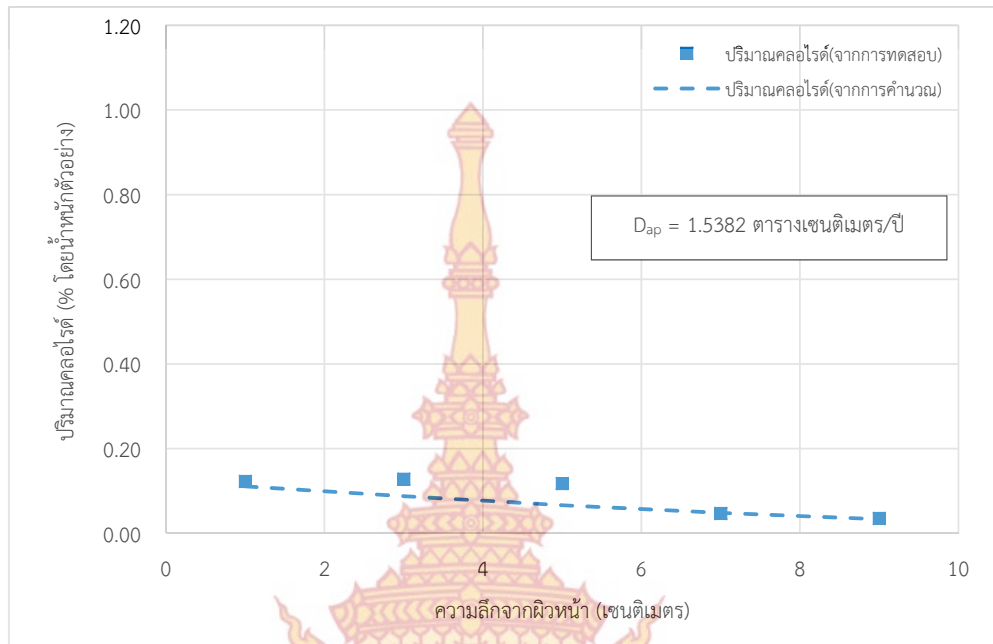
ภาพที่ 88 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพาน สะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี



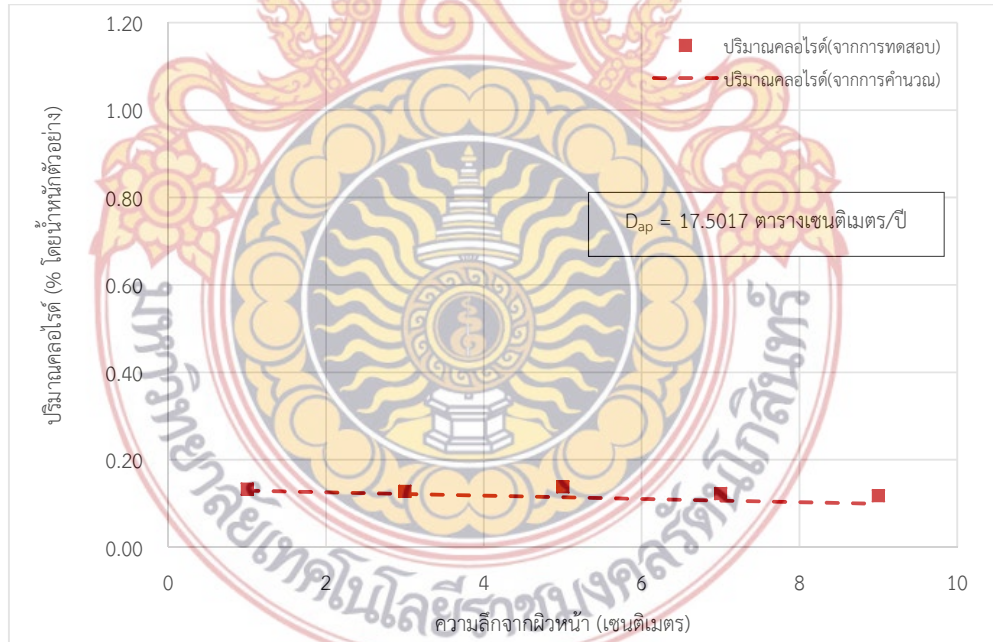
ภาพที่ 89 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคานสะพาน สะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี



ภาพที่ 90 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อสะพาน สะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี

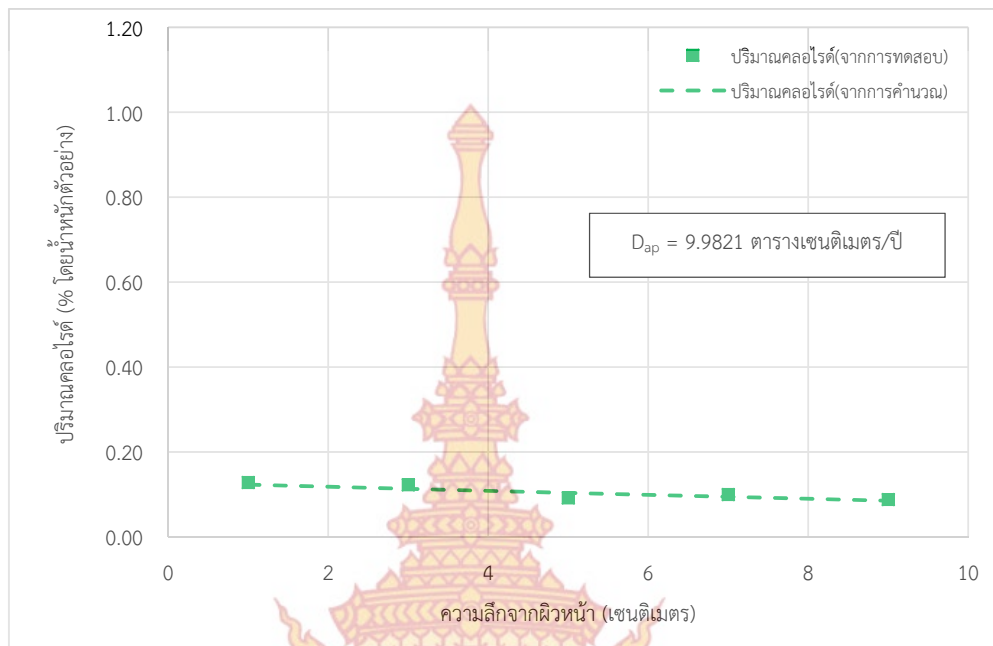


ภาพที่ 91 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างราวสะพาน สะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี



ภาพที่ 92 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างคานสะพาน สะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี



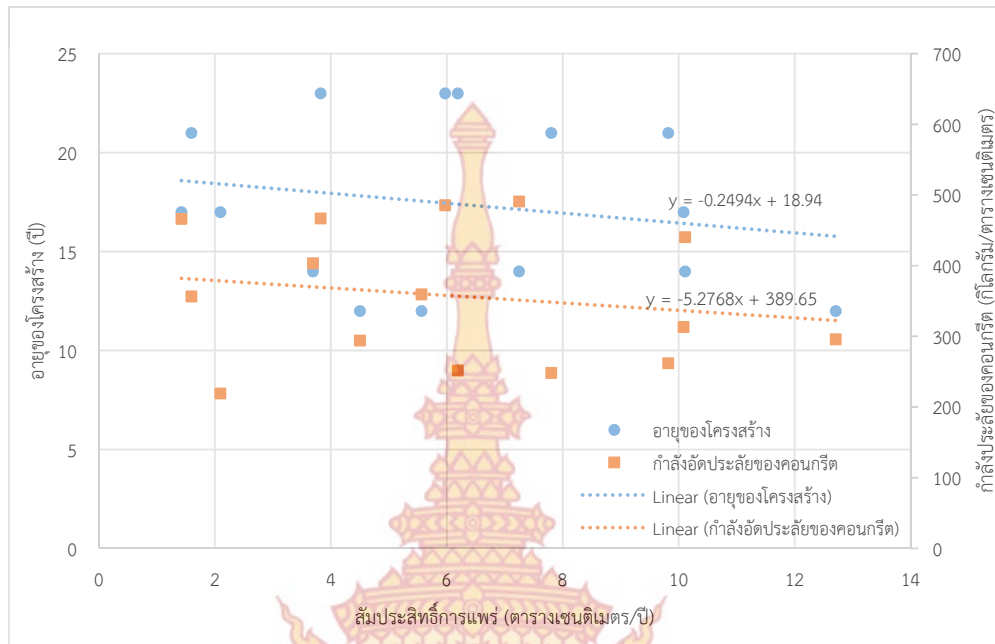


ภาพที่ 93 ปริมาณของคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อสะพาน สะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี

จากภาพที่ 64 ถึง 93 ที่ได้แสดงไว้ข้างต้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จากกฎข้อที่ 2 ของฟิคส์ เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่สมควรเกิดขึ้น จะพบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณนั้น มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณคลอไรด์ที่เกิดขึ้นจริง อาจจะมีบางจุดเท่านั้น ที่แตกต่างกันบ้างอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ภายในโครงสร้างสะพาน อย่างเช่น รอยแตกร้าวภายในคอนกรีต หรือสนิมเหล็กที่ปะปนผงคอนกรีตตัวอย่าง ซึ่งจะเห็นได้ชัดในโครงสร้างสะพานที่ 2 ของ อ.หัวหินและปราณบุรี ที่มีปัญหาโครงสร้างเสาตอม่อสะพานมีรอยแตกร้าวและเหล็กเสริมภายในเป็นสนิมค่อนข้างชัดเจน

#### 5. การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างสะพานกับอายุของโครงสร้างและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

จากข้อมูลการทดสอบที่ได้มาข้างต้นนั้น สามารถนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ ตามกฎข้อที่ 2 ของฟิคส์ กับอายุของโครงสร้างและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ซึ่งได้ผลออกมาดังในภาพที่ 94 และ 95



ภาพที่ 94 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เปรียบเทียบกับอายุของโครงสร้างและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต อำเภอกู้หวิน



ภาพที่ 95 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เปรียบเทียบกับอายุของโครงสร้างและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต อำเภอบราจบุรี

จากภาพที่ 94 และ 95 จะแสดงให้เห็นว่าอายุของโครงสร้างและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตนั้น มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างเช่นเดียวกันทั้งในอำเภอกู้หวินและบราจบุรี

ซึ่งเมื่อโครงสร้างสะพานมีอายุการใช้งานหรือกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มากขึ้น ต่างจะทำให้สัมประสิทธิ์ของการแพร่ที่ลดลง ซึ่งมีความชันอยู่ที่ลดลงของอายุโครงสร้าง ในช่วง 0.0071 ถึง 0.3219 และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตในช่วง 3.1423 ถึง 5.2768

ในการที่สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ลดลงนั้น แสดงให้เห็นว่าการแทรกของคลอไรด์เข้าสู่โครงสร้างจะมีค่าลดลงตามไปด้วย เมื่ออายุการใช้งานที่มากขึ้น เนื่องมาจากกฎการแพร่ คือการแพร่ของคลอไรด์ภายนอกที่มีความเข้มข้นมากกว่าเข้าสู่ภายในโครงสร้างที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า และจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ทั้งสองบริเวณมีความใกล้เคียงกัน ในส่วนของกำลังประลัยคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อการลดลงของสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ลดลงนั้น ก็มีผลมาจากปัจจัยต่างๆที่ช่วยให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เช่น ปริมาณของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และวัสดุผสมรวม เป็นต้น ซึ่งนอกจากจะทำให้คอนกรีตมีกำลังที่สูงขึ้นแล้ว ยังมีส่วนช่วยทำให้คอนกรีตมีความพรุนลดลงและเพิ่มความสามารถการยึดจับคลอไรด์ไว้ในผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เข้าสู่โครงสร้างนั้นลดลง

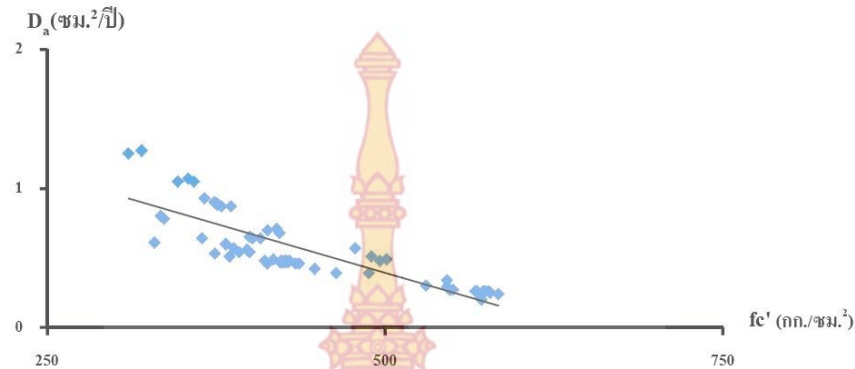
ซึ่งในการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์กับอายุของโครงสร้างสะพานและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่วิเคราะห์หานั้น จะได้ผลสอดคล้องกับรายงานการวิจัยปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดสมุทรปราการ ของประกิจ [23] ที่ได้ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์กับเวลาและกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์นั้นมีแนวโน้มลดลง เมื่อโครงสร้างมีอายุการใช้งานและกำลังอัดของคอนกรีตมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 94 และ 95



ภาพที่ 96 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์กับเวลา

ที่มา: (ประกิจ, 2556)





ภาพที่ 97 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตกับกำลังอัดของคอนกรีต  
ที่มา: (ประกิจ, 2556)

นอกจากนี้ข้อมูลทั้ง 3 ส่วนนี้ยังมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้น จะช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างให้ต่ำลง เมื่อเป็นเช่นนั้นจะทำให้ความเสียหายที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมจนเกิดสนิมเหล็กก็ต่ำลง ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างให้นานมากขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์นี้ สามารถนำกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมาใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างได้ แต่ก็ยังเป็นเรื่องยากที่จะทำนาย เนื่องจากการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่โครงสร้าง ยังมีปัจจัยอื่นๆ อย่างเช่น ส่วนผสมของคอนกรีต สภาพแวดล้อมและตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้าง เป็นต้น นั้นร่วมด้วย

## 6. ระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง

จากภาพที่ 5 ในบทที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณคลอไรด์ที่จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมจะอยู่ที่ 1.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะทำให้คอนกรีตเกิดรอยร้าวขึ้น และเมื่อปริมาณคลอไรด์มีค่ามากกว่า 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมสูญเสียไป [27] ซึ่งจากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างสะพานของอำเภอหัวหินและปราณบุรี ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ค และ ซ พบว่าปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมอยู่ในโครงสร้างบริเวณผิวหน้าของเหล็กเสริม (ที่ระดับความลึก 4 ถึง 6 เซนติเมตร) นั้น ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเมื่อประเมินระดับความเสื่อมสภาพของโครงสร้าง พบว่าโครงสร้างคอนกรีตส่วนใหญ่ทั้งในอำเภอหัวหินและปราณบุรีนั้น เหล็กเสริมภายในเกิดสนิม และเริ่มมีการสูญเสียหน้าตัดมากขึ้นเรื่อยๆ นอกจากนี้จะมีรอยร้าวเกิดขึ้น เนื่องจากการดันตัวของสนิมเหล็ก ยกเว้นในเสาตอม่อของสะพานที่ 3 ราวของสะพานที่ 4 ราวและคานของสะพานที่ 5 ในอำเภอหัวหิน และราวของสะพานที่ 1 ในอำเภอปราณบุรีเท่านั้น ที่มีปริมาณคลอไรด์มากกว่า 1.2 แต่ไม่เกิน 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างบริเวณนั้น เริ่มเกิดสนิมขึ้นที่บริเวณผิวของเหล็กเสริมและรอยร้าวในเนื้อคอนกรีต

## 7. แนวทางการป้องกันและแก้ไขปัญหาคลอไรต์ในคอนกรีตเสริมเหล็ก

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในบริเวณชายฝั่งทะเล อำเภอหัวหิน มีอัตราความเสี่ยงอยู่ในระยะห่างจากทะเล 0 ถึง 1 กิโลเมตร และอำเภอปราณบุรี มีอัตราความเสี่ยงอยู่ในระยะห่างจากทะเล 0 ถึง 6 กิโลเมตร ซึ่งสามารถป้องกันหรือชะลอความเสียหายได้มีกระบวนการป้องกันหลายวิธี ดังนี้

1. ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (Concrete Covering) ต้องมีระยะหุ้มเหล็กเสริมที่เหมาะสม และจากผลการทดสอบระยะหุ้มเหล็กที่ได้จากราฟอยู่ในช่วง 6 ถึง 8 เซนติเมตร จึงสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ [9]

2. การลดอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณวัสดุประสาน (Water to binder ratio) ในคอนกรีต เพื่อให้เนื้อคอนกรีตมีความพรุนน้อยลง ซึ่งจะทำให้ทั้งเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปได้ยากขึ้น [2]

3. การใส่วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุผสมเพิ่มในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะช่วยให้ช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน (Interconnected Void) ลดลงคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น การซึมผ่านของคลอไรด์ซัลเฟต ความชื้นและออกซิเจนน้อยลง [9]

4. การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กแบบแคโทดิก (Cathodic protection) เป็นการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อให้เหล็กมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณใกล้เคียง ซึ่งจะทำให้เหล็กไม่เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นสนิม

5. การเคลือบผิวเหล็ก เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำหรือเหล็กสัมผัสกับน้ำและอากาศโดยตรง อาจทำได้หลายวิธี เช่น การทาสี การชุบด้วยโลหะ และ ทาน้ำยากันสนิม เป็นต้น



## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

#### 1. สรุปผลการทดสอบ

ในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลและพื้นที่ใกล้เคียงเป็นจำนวน 10 สะพานแบ่งออกเป็นในเขตพื้นที่อำเภอหัวหิน จำนวน 5 สะพานและอำเภอปราณบุรี 5 สะพาน โดยการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตทุกๆ 2 เซนติเมตร จนถึงระดับความลึก 10 เซนติเมตร มาไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรท อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1152 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้มานั้น สามารถนำมาสรุปผลได้ดังนี้

1. ระยะห่างจากชายฝั่งทะเลมีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้าง เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีระยะห่างจากชายฝั่งทะเลเพิ่มมากขึ้น ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงซึ่งในพื้นที่เขตอำเภอหัวหิน จะมีพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบของคลอไรด์จากทะเลอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 กิโลเมตร ซึ่งถือว่าเป็นระยะที่สั้นกว่าเมื่อเทียบกับพื้นที่เขตอำเภอปราณบุรี ที่มีพื้นที่ได้รับผลกระทบของคลอไรด์จากทะเลในช่วง 0 ถึง 6 กิโลเมตร พื้นที่บริเวณนี้ควรพิจารณาผลกระทบจากคลอไรด์ในขั้นตอนการออกแบบด้วย เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างให้นานยิ่งขึ้น แต่ถ้าโครงสร้างอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลมากกว่าระยะที่กล่าวไว้ข้างต้นทั้งสองอำเภอนั้น ไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบของคลอไรด์ นอกจากระยะห่างจากชายฝั่งทะเลแล้ว ควรมีการพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการแพร่กระจายคลอไรด์เช่นสภาพสิ่งแวดล้อมที่ตั้งโครงสร้างสะพานลักษณะแม่น้ำเชื่อมต่อกับทะเลเป็นต้น

2. ความลึกจากผิวหน้าของโครงสร้างมีผลต่อการแทรกซึมของปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยปริมาณของคลอไรด์จะมีค่าที่ลดลงเมื่อระดับความลึกจากผิวหน้าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความเสียหายอย่างเกิดรอยร้าวขึ้น ทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ได้ไม่เป็นไปตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ อันเนื่องมาจากบริเวณรอยร้าวนี้มีการสะสมของปริมาณคลอไรด์มากกว่าบริเวณอื่น โดยข้อมูลข้างต้น ทำให้ทราบว่าในการหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กควรมีการพิจารณาความเสียหายของโครงสร้างนั้นร่วมด้วย

3. กำลังอัดประลัยของคอนกรีต และอายุของโครงสร้าง มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้าง คือ โครงสร้างที่มีกำลังอัดของคอนกรีตหรืออายุที่มากขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์นั้นลดลง และทั้ง 3 ส่วนนี้ยังมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน กล่าวคือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต เป็นปัจจัยที่ทำให้การแพร่ของคลอไรด์ลดลง ซึ่งทำให้โครงสร้างมีอายุที่นานยิ่งขึ้น

4. ปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างสะพานทั้งในอำเภอหัวหินและอำเภอปราณบุรีส่วนใหญ่แล้วมีค่าเกิน 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสามารถบ่งบอกความเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้ว่าเหล็กเสริมภายในมีสนิมเกิดขึ้นจนสูญเสียพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมไปและเกิดรอยร้าวขึ้น ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่ลดลง



5. แนวทางเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างในพื้นที่ชายฝั่งทะเลนั้น สามารถทำได้หลายวิธี คือ การเพิ่มระยะหุ้มเหล็กเสริม การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน การเพิ่มวัสดุปอซโซลาน การป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิกและการเคลือบผิวเหล็กเสริม ซึ่งวิธีเหล่านี้จะช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์และป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่นานยิ่งขึ้น

## 2. การอภิปรายผล

ผลการทดลองปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะเห็นได้ว่าอิทธิพลการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล กำลังอัดของคอนกรีต สภาพแวดล้อมข้างเคียง สภาพการแตกร้าวของคอนกรีต ตำแหน่งของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้สามารถคาดเดาปริมาณคลอไรด์ได้ยากด้วยกฎข้อที่ 2 ของฟิกส์

## 3. ข้อเสนอแนะ

1. ในการเลือกตัวอย่างของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นควรทำการสำรวจสภาพแวดล้อมบริเวณโดยรอบและความเสียหายเดิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดียิ่งขึ้น
2. การเก็บตัวอย่างควรทำการตรวจสอบแบบที่ใช้ในการก่อสร้างเพื่อหลีกเลี่ยงการเจาะเก็บตัวอย่างใกล้บริเวณเหล็กเสริม ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมอยู่ในเนื้อคอนกรีต และอาจทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเกิดความเสียหายได้
3. ในการเก็บตัวอย่างนั้น ควรทำความเข้าใจวัตถุประสงค์ที่ใช้เจาะและเก็บตัวอย่างคอนกรีตเมื่อมีการเปลี่ยนระดับความลึกทุกครั้งเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของผงคอนกรีตในแต่ละระดับชั้น
4. เก็บตัวอย่างตลอดทั้งปี เพื่อหาปริมาณคลอไรด์สูงสุดและต่ำสุดที่กระจายอยู่ปะปนอยู่ในแหล่งน้ำ

## บรรณานุกรม

1. ทวีชัย สํารานวนิช. “ความคงทนของคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังซ่อมแซมสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กและความคงทนของวัสดุซ่อมแซม.” สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2555.
2. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย . “คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดลอมทะเล.” วารสารคอนกรีต, 2551.
3. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. “การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากการปนเปื้อนคลอไรด์ในส่วนผสม.” วารสารคอนกรีต, 2552.
4. ชัย จาตุรพิทักษ์ และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. “การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม.” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2553.
5. นันทรัตน์ โยคะวัฒน์ และอภิเดช รัตนติลก ณ ภูเก็ต. “การกักเก็บคลอไรด์และการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ภายใต้สภาวะแวดล้อมทางทะเลเป็นเวลา 15 ปี.” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2556.
6. ศูนย์วิชาการคอนกรีตซีแพค (CPAC Academy). “คอนกรีตชายฝั่งทะเล” [http://cpacademy.com/download/cpac\\_academy\\_com/d-p0043.pdf](http://cpacademy.com/download/cpac_academy_com/d-p0043.pdf).
7. วิเชียร ชาลี. “การป้องกันการกัดกร่อนคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดลอมทะเลโดยใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้.” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2554.
8. ปิติ สุขนครสุขกุล. กลไกการเกิดสนิมในเหล็ก. หนังสือคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, ปทุมธานี, วรณกวี, 2556.
9. อุดม ธรรมนิยม. “การวิเคราะห์อายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตริมชายฝั่งทะเลภาคใต้ประเทศไทยที่เสื่อมสภาพด้วยคลอไรด์.” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.
10. ศิริพร ดาวพิเศษ. “คลอไรด์ตัวปัญหาของการกัดกร่อน.” วารสารวิชาการพระจอมเกล้า พระนครเหนือ, 2539, ฉบับที่ 3, หน้า 11-18.
11. ทวีชัย สํารานวนิช. “การศึกษาปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของการสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย.” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2547.
12. ทวีชัย สํารานวนิช, “การพัฒนาคอนกรีตที่ทนทานต่อการทำลายของน้ำทะเล.” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2552.
13. ทวีชัย สํารานวนิช, “การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดลอมคลอไรด์.” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2552.
14. พิพัฒน์ ซอสิทธิ์, กฤตพล สุวรรณสว่าง, ณภัฏ จูเหลือง, ทวีชัย สํารานวนิชย์ และเฉลิมชัย วานิชย์ ล้าเลิศ. “ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดลอมทะเลไทย กรณีศึกษาจังหวัดระยองและจันทบุรี.” การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 5, หน้า 285-298, 2556

15. วิเชียร ชาลี และกฤษดา ประสพชัย. “การศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในทะเล.” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, หน้า 134-141, 2556.
16. นำพล บุตรเชื้อไทย, เทียง ชีวะเกตุ และวิเชียร ชาลี. “การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมจากเศษ คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล.” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, หน้า 113-118, 2556.
17. วิเชียร ชาลีและชัย จาตุรพิทักษ์กุล. “ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล.” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ฉบับที่ 3, หน้า 245-255, 2554.
18. ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ และวิเชียร ชาลี. “การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมกับเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและฟลูเวอร์ไรซ์ ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล.” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ฉบับที่ 3 หน้า 526-538, 2555.
19. พัฒนพงษ์ วงษ์เสียงดัง, ภาควัฒน์ แสนเจริญ, วิฑิต ปานสุข และสมนึก ตั้งเต็มสิริสกุล. “การเกิดสนิมของเหล็กและเหล็กเคลือบผิวหน้าด้วยสังกะสีในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์.” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 18, หน้า 171-178, 2556
20. กীরติกร เจริญพร้อม, เทียง ชีวะเกตุและวิเชียร ชาลี. “ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสัมประสิทธิ์ การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล.” การประชุมวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 18, หน้า 234-238, 2556
21. ทวีชัย สำราญวานิช. “ความคงทนของคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังซ่อมแซมและเผชิญกับการทำลายของเกลือคลอไรด์.” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2556
22. นุชจิรา ท่ามาตา, ทวีชัย สำราญวานิชย์, สนธยา ทองอรุณศรี และสมนึก ตั้งเต็มสิริสกุล. “ผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, หน้า 21-28, 2556
23. ประกิจ สร้อยระย้าแก้ว. “ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดสมุทรปราการ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2556
24. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. “ปริมาณคลอไรด์.” <http://www.sec.psu.ac.th/home>.
25. Google map. <https://maps.google.co.th>.
26. American Society for Testing and Materials, “Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete, ASTM C1152”, Annual Book of ASTM Standard, 2003.



27. Asian Concrete Model Code Level 3 Maintenance, “Guidelines for maintenance and rehabilitation of concrete structures against chloride induced deterioration”, 2004.



ภาคผนวก ก  
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยวิธี Rebound Hammer Test  
(Schmidt Hammer Test) สะพานในอำเภอหัวหิน



ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ksc)									ค่าเฉลี่ย (ksc)
ราวสะพาน	221	191	191	236	221	221	236	236	221	219.33
คานสะพาน	332	401	349	349	252	221	252	349	316	313.44
เสาสสะพาน	493	474	493	570	437	493	474	252	512	466.44

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ksc)									ค่าเฉลี่ย (ksc)
ราวสะพาน	299	252	221	221	221	267	252	252	252	248.56
คานสะพาน	221	191	191	206	252	221	236	474	366	262.00
เสาสสะพาน	283	493	316	384	349	349	332	401	366	363.67

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ksc)									ค่าเฉลี่ย (ksc)
ราวสะพาน	283	384	316	316	384	455	332	401	366	359.67
คานสะพาน	299	283	283	236	252	349	332	316	299	294.33
เสาสสะพาน	283	299	283	267	283	299	299	267	384	296.00

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ksc)									ค่าเฉลี่ย (ksc)
ราวสะพาน	349	366	401	437	419	419	531	512	531	440.56
คานสะพาน	590	419	366	401	419	319	384	349	384	403.44
เสาสสะพาน	474	493	493	570	455	474	493	474	493	491.00

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ksc)									ค่าเฉลี่ย (ksc)
ราวสะพาน	236	221	252	283	221	236	299	267	252	251.89
คานสะพาน	332	401	474	531	512	493	512	474	474	467.00
เสาสสะพาน	531	512	401	455	474	493	474	631	401	485.78





ภาคผนวก ข  
ตารางบันทึกผลปริมาณซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ  
สะพานในอำเภอหัวหิน

ตารางที่ 8 ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ระดับความลึก (cm)	ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ (ml)			ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> เฉลี่ย (ml)
		1	2	3	
ราว	0-2	2.10	2.10	2.10	2.10
	2-4	1.10	1.00	1.00	1.03
	4-6	0.90	1.10	1.00	1.00
	6-8	1.20	1.00	1.40	1.20
	8-10	1.10	1.00	1.00	1.03
คาน	0-2	1.20	1.40	1.50	1.37
	2-4	1.40	1.50	1.00	1.30
	4-6	1.80	1.60	1.20	1.53
	6-8	1.00	1.00	1.10	1.03
	8-10	1.00	1.00	0.90	0.97
เสา	0-2	0.60	1.00	0.60	0.73
	2-4	0.90	0.80	1.00	0.90
	4-6	1.00	1.00	0.90	0.97
	6-8	0.60	0.70	0.70	0.67
	8-10	0.60	0.80	0.90	0.77
แหล่งน้ำ	-	0.70	0.60	0.70	0.67



ตารางที่ 9 ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ระดับความลึก (cm)	ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ (ml)			ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> เฉลี่ย (ml)
		1	2	3	
ราว	0-2	2.50	2.50	1.60	2.20
	2-4	2.00	1.90	1.70	1.87
	4-6	1.50	2.00	1.70	1.73
	6-8	1.80	2.20	1.10	1.70
	8-10	1.40	1.50	1.70	1.53
คาน	0-2	5.50	6.30	6.00	5.93
	2-4	6.90	6.00	6.00	6.30
	4-6	3.20	3.00	3.50	3.23
	6-8	3.50	3.20	2.70	3.13
	8-10	2.50	2.50	2.50	2.50
เสา	0-2	5.00	5.00	5.00	5.00
	2-4	2.80	2.40	2.60	2.60
	4-6	6.80	6.50	6.80	6.70
	6-8	5.50	6.00	5.50	5.67
	8-10	5.00	5.50	4.00	4.83
แหล่งน้ำ	-	4.60	4.90	4.50	4.67





ตารางที่ 10 ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	AgNO <sub>3</sub> (ml)			ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> เฉลี่ย (ml)
		1	2	3	
ราว	0-2	1.40	1.20	1.90	1.50
	2-4	0.90	0.80	0.60	0.77
	4-6	0.50	1.00	1.10	0.87
	6-8	0.80	1.00	0.60	0.80
	8-10	1.10	1.00	1.10	1.07
คาน	0-2	1.80	0.90	1.90	1.53
	2-4	0.40	0.40	0.50	0.43
	4-6	0.70	1.10	0.70	0.83
	6-8	1.00	0.80	1.00	0.93
	8-10	1.00	1.40	0.60	1.00
เสา	0-2	0.70	1.00	0.90	0.87
	2-4	0.40	0.60	0.90	0.63
	4-6	0.70	0.80	0.60	0.70
	6-8	0.70	0.70	1.00	0.80
	8-10	0.90	0.60	0.90	0.80
แหล่งน้ำ		0.20	0.40	0.22	0.27



ตารางที่ 11 ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	AgNO <sub>3</sub> (ml)			ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> เฉลี่ย (ml)
		1	2	3	
ราว	0-2	0.70	0.90	0.60	0.73
	2-4	0.60	0.90	0.60	0.70
	4-6	0.60	0.50	0.80	0.63
	6-8	1.00	0.80	0.90	0.90
	8-10	0.50	0.60	0.90	0.67
คาน	0-2	1.20	1.00	1.20	1.13
	2-4	0.80	1.50	1.00	1.10
	4-6	1.00	0.90	0.50	0.80
	6-8	1.00	0.60	0.50	0.70
	8-10	1.50	0.80	0.70	1.00
เสา	0-2	0.90	1.40	0.60	0.97
	2-4	1.00	1.00	1.00	1.00
	4-6	0.80	1.00	1.00	0.93
	6-8	0.50	0.70	0.50	0.57
	8-10	0.70	0.80	0.60	0.70
แหล่งน้ำ		-	-	-	-



ตารางที่ 12 ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	AgNO <sub>3</sub> (ml)			ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> เฉลี่ย (ml)
		1	2	3	
ราว	0-2	0.50	0.70	0.60	0.60
	2-4	0.50	0.60	0.50	0.53
	4-6	0.50	0.50	0.50	0.50
	6-8	0.60	0.50	0.60	0.57
	8-10	0.50	0.50	0.50	0.50
คาน	0-2	1.50	1.00	0.50	1.00
	2-4	0.90	0.80	1.00	0.90
	4-6	0.80	0.50	0.50	0.60
	6-8	1.20	1.00	1.20	1.13
	8-10	0.90	0.50	0.50	0.63
เสา	0-2	0.60	1.50	1.00	1.03
	2-4	1.40	0.90	1.00	1.10
	4-6	1.00	1.00	0.60	0.87
	6-8	1.00	1.00	0.50	0.83
	8-10	1.40	1.30	0.70	1.13
แหล่งน้ำ		-	-	-	-





ภาคผนวก ค  
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก  
สะพานในอำเภอหัวหิน



ตารางที่ 13 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	น้ำหนักของคอนกรีต (g)	ความเข้มข้น $\text{AgNO}_3$ (N)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้ไต-เตรทแบบลงค์ (ml)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้ไต-เตรทตัวอย่าง (ml)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้คำนวณ (ml)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (g/conc. 1 g)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (%)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (kg/conc. 1 $\text{m}^3$ )	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ ในแหล่งน้ำ (kg/ $\text{m}^3$ )	
ราว	0-2	10.00	0.0475	0.2667	2.1000	1.8333	0.0031	0.3085	7.4041	0.1122	
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	1.0333	0.7667	0.0013	0.1290	3.0963		
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	1.0000	0.7333	0.0012	0.1234		2.9616
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	1.2000	0.9333	0.0016	0.1571		3.7694
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	1.0333	0.7667	0.0013	0.1290		3.0963
คาน	0-2	10.00	0.0475	0.2667	1.3667	1.1000	0.0019	0.1851	4.4425		
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	1.3000	1.0333	0.0017	0.1739	4.1732		
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	1.5333	1.2667	0.0021	0.2131		5.1156
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	1.0333	0.7667	0.0013	0.1290		3.0963
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	0.9667	0.7000	0.0012	0.1178		2.8270
เสา	0-2	10.00	0.0475	0.2667	0.7333	0.4667	0.0008	0.0785	1.8847		
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	0.9000	0.6333	0.0011	0.1066	2.5578		
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	0.9667	0.7000	0.0012	0.1178		2.8270
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	0.6667	0.4000	0.0007	0.0673		1.6154
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	0.7667	0.5000	0.0008	0.0841		2.0193

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	น้ำหนักของคอนกรีต (g)	ความเข้มข้น AgNO <sub>3</sub> (N)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ไท-เตรทแบบลงค์ (ml)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ไท-เตรทตัวอย่าง (ml)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้คำนวณ (ml)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (g/conc. 1 g)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (%)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (kg/conc. 1 m <sup>3</sup> )	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> ในแหล่งน้ำ (kg/m <sup>3</sup> )	
ราว	0-2	10.00	0.0475	0.2667	2.2000	1.9333	0.0033	0.3253	7.8080	5.8896	
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	1.8667	1.6000	0.0027	0.2692	6.4618		
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	1.7333	1.4667	0.0025	0.2468		5.9233
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	1.7000	1.4333	0.0024	0.2412		5.7887
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	1.5333	1.2667	0.0021	0.2131		5.1156
คาน	0-2	10.00	0.0475	0.2667	5.9333	5.6667	0.0095	0.9536	22.8854		
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	6.3000	6.0333	0.0102	1.0153	24.3663		
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	3.2333	2.9667	0.0050	0.4992		11.9812
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	3.1333	2.8667	0.0048	0.4824		11.5773
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	2.5000	2.2333	0.0038	0.3758		9.0196
เสา	0-2	10.00	0.0475	0.2667	5.0000	4.7333	0.0080	0.7965	19.1161		
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	2.6000	2.3333	0.0039	0.3926	9.4234		
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	6.7000	6.4333	0.0108	1.0826		25.9817
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	5.6667	5.4000	0.0091	0.9087		21.8085
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	4.8333	4.5667	0.0077	0.7685		18.4430



ตารางที่ 15 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	น้ำหนักของคอนกรีต (g)	ความเข้มข้น AgNO <sub>3</sub> (N)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ไต-เตรทแบบลงค์ (ml)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ไต-เตรทตัวอย่าง (ml)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้คำนวณ (ml)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (g/conc. 1 g)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (%)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (kg/conc.1 m <sup>3</sup> )	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> ในแหล่งน้ำ (kg/m <sup>3</sup> )
ราว	0-2	10.00	0.0475	0.2667	1.5000	1.2333	0.0021	0.2075	4.9809	0.0460
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	0.7667	0.5000	0.0008	0.0841	2.0193	
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.8667	0.6000	0.0010	0.1010	2.4232	
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.8000	0.5333	0.0009	0.0897	2.1539	
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	1.0667	0.8000	0.0013	0.1346	3.2309	
คาน	0-2	10.00	0.0475	0.2667	1.5333	1.2667	0.0021	0.2131	5.1156	
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	0.4333	0.1667	0.0003	0.0280	0.6731	
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.8333	0.5667	0.0010	0.0954	2.2885	
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.9333	0.6667	0.0011	0.1122	2.6924	
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	1.0000	0.7333	0.0012	0.1234	2.9616	
เสา	0-2	10.00	0.0475	0.2667	0.8667	0.6000	0.0010	0.1010	2.4232	
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	0.6333	0.3667	0.0006	0.0617	1.4808	
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.7000	0.4333	0.0007	0.0729	1.7501	
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.8000	0.5333	0.0009	0.0897	2.1539	
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	0.8000	0.5333	0.0009	0.0897	2.1539	

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	น้ำหนักของคอนกรีต (g)	ความเข้มข้น $\text{AgNO}_3$ (N)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้ไต-เตรทแบลนค์ (ml)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้ไต-เตรทตัวอย่าง (ml)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้คำนวณ (ml)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (g/conc. 1 g)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (%)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (kg/conc. 1 $\text{m}^3$ )	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ ในแหล่งน้ำ (kg/ $\text{m}^3$ )
ราว	0-2	10.00	0.0475	0.2667	0.7333	0.4667	0.0008	0.0785	1.8847	
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	0.7000	0.4333	0.0007	0.0729	1.7501	
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.6333	0.3667	0.0006	0.0617	1.4808	
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.9000	0.6333	0.0011	0.1066	2.5578	
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	0.6667	0.4000	0.0007	0.0673	1.6154	
คาน	0-2	10.00	0.0475	0.2667	1.1333	0.8667	0.0015	0.1458	3.5001	-
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	1.1000	0.8333	0.0014	0.1402	3.3655	
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.8000	0.5333	0.0009	0.0897	2.1539	
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.7000	0.4333	0.0007	0.0729	1.7501	
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	1.0000	0.7333	0.0012	0.1234	2.9616	
เสา	0-2	10.00	0.0475	0.2667	0.9667	0.7000	0.0012	0.1178	2.8270	
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	1.0000	0.7333	0.0012	0.1234	2.9616	
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.9333	0.6667	0.0011	0.1122	2.6924	
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.5667	0.3000	0.0005	0.0505	1.2116	
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	0.7000	0.4333	0.0007	0.0729	1.7501	

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	น้ำหนักของคอนกรีต (g)	ความเข้มข้น $\text{AgNO}_3$ (N)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้ไต-เตรทแบบลงค์ (ml)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้ไต-เตรทตัวอย่าง (ml)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้คำนวณ (ml)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (g/conc. 1 g)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (%)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (kg/conc. 1 $\text{m}^3$ )	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ ในแหล่งน้ำ (kg/ $\text{m}^3$ )	
ราว	0-2	10.00	0.0475	0.2667	0.6000	0.3333	0.0006	0.0561	1.3462	-	
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	0.5333	0.2667	0.0004	0.0449	1.0770		
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	0.5000	0.2333	0.0004	0.0393		0.9423
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	0.5667	0.3000	0.0005	0.0505		1.2116
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	0.2667	0.5000	0.2333	0.0004	0.0393		0.9423
คาน	0-2	10.00	0.0475	0.2667	1.0000	0.7333	0.0012	0.1234	2.9616		
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	0.9000	0.6333	0.0011	0.1066	2.5578		
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.6000	0.3333	0.0006	0.0561	1.3462		
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	1.1333	0.8667	0.0015	0.1458	3.5001		
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	0.6333	0.3667	0.0006	0.0617	1.4808		
เสา	0-2	10.00	0.0475	0.2667	1.0333	0.7667	0.0013	0.1290	3.0963		
	2-4	10.00	0.0475	0.2667	1.1000	0.8333	0.0014	0.1402	3.3655		
	4-6	10.00	0.0475	0.2667	0.8667	0.6000	0.0010	0.1010	2.4232		
	6-8	10.00	0.0475	0.2667	0.8333	0.5667	0.0010	0.0954	2.2885		
	8-10	10.00	0.0475	0.2667	1.1333	0.8667	0.0015	0.1458	3.5001		



ภาคผนวก ง  
ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก  
สะพานในอำเภอหัวหิน



ตารางที่ 18 ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_{(t,x)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	t (year)	erf(z)	z	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	$D_{ap}$ (Average)
สะพานที่ 1	ราว	0-2	1	7.4041	7.4041	17	0.0000	0.0000	0.0000	2.0958
		2-4	3	3.0963	7.4041	17	0.5818	0.5724	0.4039	
		4-6	5	2.9616	7.4041	17	0.6000	0.5951	1.0381	
		6-8	7	3.7694	7.4041	17	0.4909	0.4669	3.3061	
		8-10	9	3.0963	7.4041	17	0.5818	0.5724	3.6350	
	คาน	0-2	1	4.4425	4.4425	17	0.0000	0.0000	0.0000	10.0830
		2-4	3	4.1732	4.4425	17	0.0606	0.0538	45.7996	
		4-6	5	5.1156	4.4425	17	-0.1515	-0.1351	20.1486	
		6-8	7	3.0963	4.4425	17	0.3030	0.2753	9.5057	
		8-10	9	2.8270	4.4425	17	0.3636	0.3343	10.6602	
	เสา	0-2	1	1.8847	1.8847	17	0.0000	0.0000	0.0000	1.4238
		2-4	3	2.5578	1.8847	17	-0.3571	-0.3278	1.2314	
		4-6	5	2.8270	1.8847	17	-0.5000	-0.4769	1.6163	
		6-8	7	1.6154	1.8847	17	0.1429	0.1273	44.4477	
		8-10	9	2.0193	1.8847	17	-0.0714	-0.0634	296.7072	

ตารางที่ 19 ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_{(t,x)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	t (year)	erf(z)	z	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	$D_{ap}$ (Average)
สะพานที่ 2	ราว	0-2	1	7.8080	7.8080	21	0.0000	0.0000	0.0000	7.8013
		2-4	3	6.4618	7.8080	21	0.1724	0.1540	4.5181	
		4-6	5	5.9233	7.8080	21	0.2414	0.2173	6.3025	
		6-8	7	5.7887	7.8080	21	0.2586	0.2333	10.7132	
		8-10	9	5.1156	7.8080	21	0.3448	0.3158	9.6715	
	คาน	0-2	1	22.8854	22.8854	21	0.0000	0.0000	0.0000	9.8178
		2-4	3	24.3663	22.8854	21	-0.0647	-0.0574	32.5171	
		4-6	5	11.9812	22.8854	21	0.4765	0.4511	1.4625	
		6-8	7	11.5773	22.8854	21	0.4941	0.4704	2.6363	
		8-10	9	9.0196	22.8854	21	0.6059	0.6026	2.6555	
	เสา	0-2	1	19.1161	19.1161	21	0.0000	0.0000	0.0000	1.5951
		2-4	3	9.4234	19.1161	21	0.5070	0.4848	0.4560	
		4-6	5	25.9817	19.1161	21	-0.3592	-0.3299	2.7342	
		6-8	7	21.8085	19.1161	21	-0.1408	-0.1254	37.0745	
		8-10	9	18.4430	19.1161	21	0.0352	0.0312	990.2588	



ตารางที่ 20 ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_{(t,x)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	t (year)	erf(z)	z	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	$D_{ap}$ (Average)
สะพานที่ 3	ราว	0-2	1	4.9809	4.9809	12	0.0000	0.0000	0.0000	5.5642
		2-4	3	2.0193	4.9809	12	0.5946	0.5883	0.5417	
		4-6	5	2.4232	4.9809	12	0.5135	0.4921	2.1511	
		6-8	7	2.1539	4.9809	12	0.5676	0.5551	3.3124	
		8-10	9	3.2309	4.9809	12	0.3514	0.3222	16.2518	
	คาน	0-2	1	5.1156	5.1156	12	0.0000	0.0000	0.0000	4.5029
		2-4	3	0.6731	5.1156	12	0.8684	1.0662	0.1649	
		4-6	5	2.2885	5.1156	12	0.5526	0.5372	1.8046	
		6-8	7	2.6924	5.1156	12	0.4737	0.4481	5.0847	
		8-10	9	2.9616	5.1156	12	0.4211	0.3924	10.9572	
	เสา	0-2	1	2.4232	2.4232	12	0.0000	0.0000	0.0000	12.7085
		2-4	3	1.4808	2.4232	12	0.3889	0.3596	1.4502	
		4-6	5	2.0193	2.4232	12	0.1667	0.1488	23.5149	
		6-8	7	1.7501	2.4232	12	0.2778	0.2514	16.1531	
		8-10	9	1.3462	2.4232	12	0.4444	0.4168	9.7156	

ตารางที่ 21 ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_{(t,x)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	t (year)	erf(z)	z	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	$D_{ap(Average)}$
สะพานที่ 4	ราว	0-2	1	1.8847	1.8847	14	0.0000	0.0000	0.0000	10.1090
		2-4	3	1.7501	1.8847	14	0.0714	0.0634	40.0319	
		4-6	5	1.4808	1.8847	14	0.2143	0.1923	12.0773	
		6-8	7	2.5578	1.8847	14	-0.3571	-0.3278	8.1407	
		8-10	9	1.6154	1.8847	14	0.1429	0.1273	89.2193	
	คาน	0-2	1	3.5001	3.5001	14	0.0000	0.0000	0.0000	3.6922
		2-4	3	3.3655	3.5001	14	0.0385	0.0341	137.9450	
		4-6	5	2.1539	3.5001	14	0.3846	0.3552	3.5377	
		6-8	7	1.7501	3.5001	14	0.5000	0.4769	3.8467	
		8-10	9	2.9616	3.5001	14	0.1538	0.1372	76.8885	
	เสา	0-2	1	2.8270	2.8270	14	0.0000	0.0000	0.0000	7.2459
		2-4	3	2.9616	2.8270	14	-0.0476	-0.0422	90.2059	
		4-6	5	2.6924	2.8270	14	0.0476	0.0422	250.5719	
		6-8	7	1.2116	2.8270	14	0.5714	0.5597	2.7928	
		8-10	9	1.7501	2.8270	14	0.3810	0.3516	11.6989	

ตารางที่ 22 ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_{(t, x)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	t (year)	erf(z)	z	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	$D_{ap}$ (Average)
สะพานที่ 5	ราว	0-2	1	1.3462	1.3462	23	0.0000	0.0000	0.0000	6.1896
		2-4	3	1.0770	1.3462	23	0.2000	0.1791	3.0483	
		4-6	5	0.9423	1.3462	23	0.3000	0.2725	3.6605	
		6-8	7	1.2116	1.3462	23	0.1000	0.0889	67.4582	
		8-10	9	0.9423	1.3462	23	0.3000	0.2725	11.8600	
	คาน	0-2	1	2.9616	2.9616	23	0.0000	0.0000	0.0000	3.8238
		2-4	3	2.5578	2.9616	23	0.1364	0.1215	6.6294	
		4-6	5	1.3462	2.9616	23	0.5455	0.5289	0.9715	
		6-8	7	3.5001	2.9616	23	-0.1818	-0.1625	20.1608	
		8-10	9	1.4808	2.9616	23	0.5000	0.4769	3.8706	
	เสา	0-2	1	3.0963	3.0963	23	0.0000	0.0000	0.0000	5.9724
		2-4	3	3.3655	3.0963	23	-0.0870	-0.0773	16.3908	
		4-6	5	2.4232	3.0963	23	0.2174	0.1951	7.1380	
		6-8	7	2.2885	3.0963	23	0.2609	0.2355	9.6035	
		8-10	9	3.5001	3.0963	23	-0.1304	0.8654	1.1757	





ตารางที่ 23 ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 1 อำเภอหัวหิน

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	C <sub>o</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /year)	t (year)	C <sub>(t, x)</sub> จากการสำรวจ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>(t, x)</sub> จากการสำรวจ (g/conc.100g)	C <sub>(t, x)</sub> จากการคำนวณ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>(t, x)</sub> จากการคำนวณ (g/conc.100g)
สะพานที่ 1	ราว	0-2	1	7.4041	2.0958	17	7.4041	0.3085	6.7059	0.2794
		2-4	3	7.4041		17	3.0963	0.1290	5.3479	0.2228
		4-6	5	7.4041		17	2.9616	0.1234	4.0992	0.1708
		6-8	7	7.4041		17	3.7694	0.1571	3.0132	0.1255
		8-10	9	7.4041		17	3.0963	0.1290	2.1201	0.0883
	คาน	0-2	1	4.4425	10.0830	17	4.4425	0.1851	4.2511	0.1771
		2-4	3	4.4425		17	4.1732	0.1739	3.8707	0.1613
		4-6	5	4.4425		17	5.1156	0.2131	3.4968	0.1457
		6-8	7	4.4425		17	3.0963	0.1290	3.1336	0.1306
		8-10	9	4.4425		17	2.8270	0.1178	2.7850	0.1160
	เสา	0-2	1	1.8847	1.4238	17	1.8847	0.0785	1.6693	0.0696
		2-4	3	1.8847		17	2.5578	0.1066	1.2558	0.0523
		4-6	5	1.8847		17	2.8270	0.1178	0.8903	0.0371
		6-8	7	1.8847		17	1.6154	0.0673	0.5925	0.0247
		8-10	9	1.8847		17	2.0193	0.0841	0.3691	0.0154

ตารางที่ 24 ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 2 อำเภอหัวหิน

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	C <sub>o</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /year)	t (year)	C <sub>(t, x)</sub> จากการสำรวจ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>(t, x)</sub> จากการสำรวจ (g/conc.100g)	C <sub>(t, x)</sub> จากการคำนวณ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>(t, x)</sub> จากการคำนวณ (g/conc.100g)
สะพานที่ 2	ราว	0-2	1	7.8080	7.8013	21	7.8080	0.3253	7.4640	0.3110
		2-4	3	7.8080		21	6.4618	0.2692	6.7802	0.2825
		4-6	5	7.8080		21	5.9233	0.2468	6.1088	0.2545
		6-8	7	7.8080		21	5.7887	0.2412	5.4575	0.2274
		8-10	9	7.8080		21	5.1156	0.2131	4.8335	0.2014
	คาน	0-2	1	22.8854	9.8178	21	22.8854	0.9536	21.9866	0.9161
		2-4	3	22.8854		21	24.3663	1.0153	20.1976	0.8416
		4-6	5	22.8854		21	11.9812	0.4992	18.4344	0.7681
		6-8	7	22.8854		21	11.5773	0.4824	16.7134	0.6964
		8-10	9	22.8854		21	9.0196	0.3758	15.0498	0.6271
	เสา	0-2	1	19.1161	1.5951	21	19.1161	0.7965	17.2572	0.7191
		2-4	3	19.1161		21	9.4234	0.3926	13.6484	0.5687
		4-6	5	19.1161		21	25.9817	1.0826	10.3472	0.4311
		6-8	7	19.1161		21	21.8085	0.9087	7.5017	0.3126
		8-10	9	19.1161		21	18.4430	0.7685	5.1904	0.2163



ตารางที่ 25 ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 3 อำเภอหัวหิน

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	C <sub>o</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /year)	t (year)	C <sub>(t, x)</sub> จากการสำรวจ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>(t, x)</sub> จากการสำรวจ (g/conc.100g)	C <sub>(t, x)</sub> จากการคำนวณ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>(t, x)</sub> จากการคำนวณ (g/conc.100g)
สะพานที่ 3	ราว	0-2	1	4.9809	5.5642	12	4.9809	0.2075	4.6375	0.1932
		2-4	3	4.9809		12	2.0193	0.0841	3.9607	0.1650
		4-6	5	4.9809		12	2.4232	0.1010	3.3136	0.1381
		6-8	7	4.9809		12	2.1539	0.0897	2.7130	0.1130
		8-10	9	4.9809		12	3.2309	0.1346	2.1721	0.0905
	คาน	0-2	1	5.1156	4.5029	12	5.1156	0.2131	4.7235	0.1968
		2-4	3	5.1156		12	0.6731	0.0280	3.9538	0.1647
		4-6	5	5.1156		12	2.2885	0.0954	3.2256	0.1344
		6-8	7	5.1156		12	2.6924	0.1122	2.5615	0.1067
		8-10	9	5.1156		12	2.9616	0.1234	1.9778	0.0824
	เสา	0-2	1	2.4232	12.7085	12	2.4232	0.1010	2.3125	0.0964
		2-4	3	2.4232		12	1.4808	0.0617	2.0927	0.0872
		4-6	5	2.4232		12	2.0193	0.0841	1.8771	0.0782
		6-8	7	2.4232		12	1.7501	0.0729	1.6685	0.0695
		8-10	9	2.4232		12	1.3462	0.0561	1.4692	0.0612

ตารางที่ 26 ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 4 อำเภอหัวหิน

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	C <sub>o</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /year)	t (year)	C <sub>(t, x)</sub> จากการสำรวจ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>(t, x)</sub> จากการสำรวจ (g/conc.100g)	C <sub>(t, x)</sub> จากการคำนวณ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>(t, x)</sub> จากการคำนวณ (g/conc.100g)
สะพานที่ 4	ราว	0-2	1	1.8847	10.1090	14	1.8847	0.0785	1.7954	0.0748
		2-4	3	1.8847		14	1.7501	0.0729	1.6180	0.0674
		4-6	5	1.8847		14	1.4808	0.0617	1.4443	0.0602
		6-8	7	1.8847		14	2.5578	0.1066	1.2766	0.0532
		8-10	9	1.8847		14	1.6154	0.0673	1.1170	0.0465
	คาน	0-2	1	3.5001	3.6922	14	3.5001	0.1458	3.2259	0.1344
		2-4	3	3.5001		14	3.3655	0.1402	2.6879	0.1120
		4-6	5	3.5001		14	2.1539	0.0897	2.1802	0.0908
		6-8	7	3.5001		14	1.7501	0.0729	1.7191	0.0716
		8-10	9	3.5001		14	2.9616	0.1234	1.3163	0.0548
	เสา	0-2	1	2.8270	7.2459	14	2.8270	0.1178	2.6688	0.1112
		2-4	3	2.8270		14	2.9616	0.1234	2.3554	0.0981
		4-6	5	2.8270		14	2.6924	0.1122	2.0512	0.0855
		6-8	7	2.8270		14	1.2116	0.0505	1.7616	0.0734
		8-10	9	2.8270		14	1.7501	0.0729	1.4912	0.0621

ตารางที่ 27 ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 5 อำเภอหัวหิน

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	t (year)	$C_{(t, x)}$ จากการสำรวจ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{(t, x)}$ จากการสำรวจ (g/conc.100g)	$C_{(t, x)}$ จากการคำนวณ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{(t, x)}$ จากการคำนวณ (g/conc.100g)
สะพานที่ 5	ราว	0-2	1	1.3462	6.1896	23	1.3462	0.0561	1.2826	0.0534
		2-4	3	1.3462		23	1.0770	0.0449	1.1562	0.0482
		4-6	5	1.3462		23	0.9423	0.0393	1.0325	0.0430
		6-8	7	1.3462		23	1.2116	0.0505	0.9131	0.0380
		8-10	9	1.3462		23	0.9423	0.0393	0.7993	0.0333
	คาน	0-2	1	2.9616	3.8238	23	2.9616	0.1234	2.7836	0.1160
		2-4	3	2.9616		23	2.5578	0.1066	2.4316	0.1013
		4-6	5	2.9616		23	1.3462	0.0561	2.0914	0.0871
		6-8	7	2.9616		23	3.5001	0.1458	1.7700	0.0737
		8-10	9	2.9616		23	1.4808	0.0617	1.4731	0.0614
	เสา	0-2	1	3.0963	5.9724	23	3.0963	0.1290	2.9473	0.1228
		2-4	3	3.0963		23	3.3655	0.1402	2.6516	0.1105
		4-6	5	3.0963		23	2.4232	0.1010	2.3622	0.0984
		6-8	7	3.0963		23	2.2885	0.0954	2.0831	0.0868
		8-10	9	3.0963		23	3.5001	0.1458	1.8179	0.0757



ภาคผนวก ฉ  
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยวิธี Rebound Hammer Test  
(Schmidt Hammer Test) สะพานในอำเภอปราณบุรี



**ตารางที่ 28** ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 1 อำเภอปรางค์บุรี

ตำแหน่ง	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ksc)									ค่าเฉลี่ย (ksc)
ราวสะพาน	252	206	236	252	252	267	267	267	283	253.556
คานสะพาน	332	332	316	299	299	236	267	299	332	301.333
เสาสะพาน	715	694	715	715	493	493	550	493	512	597.778

**ตารางที่ 29** ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 2 อำเภอปรางค์บุรี

ตำแหน่ง	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ksc)									ค่าเฉลี่ย (ksc)
ราวสะพาน	269	252	267	299	283	283	283	493	384	312.556
คานสะพาน	267	267	252	316	299	299	299	299	299	288.556
เสาสะพาน	283	299	299	283	283	283	283	299	283	288.333

**ตารางที่ 30** ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 3 อำเภอปรางค์บุรี

ตำแหน่ง	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ksc)									ค่าเฉลี่ย (ksc)
ราวสะพาน	267	267	366	316	316	299	283	299	349	306.889
คานสะพาน	437	474	512	512	531	550	570	672	692	550.000
เสาสะพาน	401	419	474	493	493	349	316	316	299	395.556

**ตารางที่ 31** ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 4 อำเภอปรางค์บุรี

ตำแหน่ง	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ksc)									ค่าเฉลี่ย (ksc)
ราวสะพาน	252	252	236	236	236	267	283	267	283	256.889
คานสะพาน	366	267	267	299	316	366	384	401	384	338.889
เสาสะพาน	715	672	550	531	550	651	570	590	531	595.556

**ตารางที่ 32** ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต สะพานที่ 5 อำเภอปรางค์บุรี

ตำแหน่ง	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ksc)									ค่าเฉลี่ย (ksc)
ราวสะพาน	531	512	419	437	493	455	366	366	419	444.222
คานสะพาน	283	299	299	206	206	206	177	191	191	228.667
เสาสะพาน	299	384	419	419	332	316	384	283	570	378.444



ภาคผนวก ข  
ตารางบันทึกผลปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ  
สะพานในอำเภอปราณบุรี



ตารางที่ 33 ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 1 อำเภอปรางบุรี

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ (ml)(ml)			ปริมาตรAgNO <sub>3</sub> เฉลี่ย (ml)
		1	2	3	
ราว	0-2	1.00	1.50	1.00	1.17
	2-4	0.90	1.00	0.60	0.83
	4-6	0.60	0.70	0.80	0.70
	6-8	0.60	0.90	0.80	0.77
	8-10	0.60	0.60	1.00	0.73
คาน	0-2	1.40	1.40	1.30	1.37
	2-4	1.40	1.60	1.30	1.43
	4-6	1.00	1.10	1.30	1.13
	6-8	0.90	1.00	1.00	0.97
	8-10	1.00	1.00	1.00	1.00
เสา	0-2	2.30	2.40	2.40	2.37
	2-4	2.00	2.00	1.90	1.97
	4-6	1.50	2.10	1.90	1.83
	6-8	1.80	1.80	1.80	1.80
	8-10	1.80	1.90	1.60	1.77
แหล่งน้ำ	-	75.00	80.00	78.00	77.67



ตารางที่ 34 ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 2 อำเภอปรามบุรี

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้(ml)			ปริมาตรAgNO <sub>3</sub> เฉลี่ย (ml)
		1	2	3	
ราว	0-2	1.10	1.10	1.10	1.10
	2-4	1.00	1.30	1.10	1.13
	4-6	1.00	1.00	1.20	1.07
	6-8	1.00	1.10	1.00	1.03
	8-10	1.00	1.00	1.00	1.00
คาน	0-2	1.00	1.20	1.10	1.10
	2-4	1.40	1.30	1.40	1.37
	4-6	1.70	1.60	1.50	1.60
	6-8	1.00	1.50	1.70	1.40
	8-10	1.00	0.70	1.10	0.93
เสา	0-2	2.20	2.50	2.50	2.40
	2-4	3.80	4.00	4.00	3.93
	4-6	2.30	2.20	2.30	2.27
	6-8	1.70	1.80	1.70	1.73
	8-10	1.20	1.30	1.20	1.23
แหล่งน้ำ	-	15.00	17.00	15.00	15.67



ตารางที่ 35 ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 3 อำเภอปรานบุรี

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้(ml)			ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> เฉลี่ย (ml)
		1	2	3	
ราว	0-2	1.50	1.30	1.00	1.27
	2-4	2.00	2.30	1.70	2.00
	4-6	1.00	1.30	1.00	1.10
	6-8	1.00	1.00	1.20	1.07
	8-10	1.00	1.00	1.00	1.00
คาน	0-2	1.20	1.20	1.20	1.20
	2-4	1.50	1.60	1.40	1.50
	4-6	1.00	1.20	1.20	1.13
	6-8	1.00	1.20	1.00	1.07
	8-10	1.00	1.00	1.00	1.00
เสา	0-2	1.80	1.60	1.50	1.63
	2-4	1.50	1.30	1.30	1.37
	4-6	1.20	1.00	1.00	1.07
	6-8	1.00	1.00	1.10	1.03
	8-10	1.00	1.00	1.00	1.00
แหล่งน้ำ	-	1.50	1.70	1.90	1.70





ตารางที่ 36 ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 4 อำเภอปรามบุรี

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ (ml)			ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> เฉลี่ย (ml)
		1	2	3	
ราว	0-2	0.80	0.90	0.80	0.83
	2-4	0.80	0.80	0.70	0.77
	4-6	0.80	0.70	0.70	0.73
	6-8	0.60	0.50	0.40	0.50
	8-10	0.40	0.40	0.30	0.37
คาน	0-2	1.20	1.20	1.20	1.20
	2-4	1.20	1.10	1.20	1.17
	4-6	1.10	1.10	1.00	1.07
	6-8	0.80	0.80	1.00	0.87
	8-10	0.70	0.80	0.80	0.77
เสา	0-2	2.00	2.00	2.10	2.03
	2-4	1.40	1.50	1.40	1.43
	4-6	1.40	1.50	1.40	1.43
	6-8	1.00	1.00	1.00	1.00
	8-10	0.70	0.80	0.90	0.80
แหล่งน้ำ	-	1.40	1.30	1.30	1.33



ตารางที่ 37 ปริมาตรซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ในการทดสอบ สะพานที่ 5 อำเภอปรามบุรี

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> (ml)			ปริมาตร AgNO <sub>3</sub> เฉลี่ย (ml)
		1	2	3	
ราว	0-2	1.00	1.00	1.10	1.03
	2-4	1.00	1.20	1.00	1.07
	4-6	1.00	1.00	1.00	1.00
	6-8	0.50	0.50	0.50	0.50
	8-10	0.50	0.40	0.40	0.43
คาน	0-2	1.00	1.00	1.30	1.10
	2-4	1.10	1.20	1.20	1.17
	4-6	1.10	1.00	1.10	1.07
	6-8	1.00	0.90	0.90	0.93
	8-10	0.90	0.80	0.80	0.83
เสา	0-2	1.00	1.20	1.00	1.07
	2-4	1.00	1.00	1.10	1.03
	4-6	0.60	1.00	0.90	0.83
	6-8	0.80	0.80	0.80	0.80
	8-10	0.70	0.80	0.70	0.73
แหล่งน้ำ	-	1.00	1.20	1.00	1.07



ภาคผนวก ซ  
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก  
สะพานในอำเภอปราณบุรี





ตารางที่ 38 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 1 อำเภอปรางบุรี

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	น้ำหนักของคอนกรีต (g)	ความเข้มข้น $\text{AgNO}_3$ (N)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้ไต-เตรทแบบลงค์ (ml)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้ไต-เตรทตัวอย่าง (ml)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้คำนวณ (ml)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (g/conc. 1 g)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (%)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (kg/conc. 1 $\text{m}^3$ )	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ ในแหล่งน้ำ (kg/ $\text{m}^3$ )
ราว	0-2	10.00	0.0434	0.2333	1.1667	0.9333	0.0014	0.1434	3.4425	11.9362
	2-4	10.00	0.0434	0.2333	0.8333	0.6000	0.0009	0.0922	2.2131	
	4-6	10.00	0.0434	0.2333	0.7000	0.4667	0.0007	0.0717	1.7213	
	6-8	10.00	0.0434	0.2333	0.7667	0.5333	0.0008	0.0820	1.9672	
	8-10	10.00	0.0434	0.2333	0.7333	0.5000	0.0008	0.0768	1.8442	
คาน	0-2	10.00	0.0434	0.2333	1.3667	1.1333	0.0017	0.1742	4.1802	
	2-4	10.00	0.0434	0.2333	1.4333	1.2000	0.0018	0.1844	4.4261	
	4-6	10.00	0.0434	0.2333	1.1333	0.9000	0.0014	0.1383	3.3196	
	6-8	10.00	0.0434	0.2333	0.9667	0.7333	0.0011	0.1127	2.7049	
	8-10	10.00	0.0434	0.2333	1.0000	0.7667	0.0012	0.1178	2.8278	
เสา	0-2	10.00	0.0434	0.2333	2.3667	2.1333	0.0033	0.3279	7.8687	
	2-4	10.00	0.0434	0.2333	1.9667	1.7333	0.0027	0.2664	6.3933	
	4-6	10.00	0.0434	0.2333	1.8333	1.6000	0.0025	0.2459	5.9015	
	6-8	10.00	0.0497	0.2333	1.8000	1.5667	0.0028	0.2759	6.6205	
	8-10	10.00	0.0497	0.2333	1.7667	1.5333	0.0027	0.2700	6.4796	

ตารางที่ 39 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 2 อำเภอปรางบุรี

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	น้ำหนักของคอนกรีต (g)	ความเข้มข้น $\text{AgNO}_3$ (N)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้ไต-เตรทแบลนด์ (ml)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้ไต-เตรทตัวอย่าง (ml)	$\text{AgNO}_3$ ที่ใช้คำนวณ (ml)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (g/conc. 1 g)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (%)	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ (kg/conc. 1 $\text{m}^3$ )	ปริมาณของ $\text{Cl}^-$ ในแหล่งน้ำ (kg/ $\text{m}^3$ )	
ราว	0-2	10.00	0.0434	0.2333	1.1000	0.8667	0.0013	0.1332	3.1966	2.4077	
	2-4	10.00	0.0434	0.2333	1.1333	0.9000	0.0014	0.1383	3.3196		
	4-6	10.00	0.0434	0.2333	0.2333	1.0667	0.8333	0.0013	0.1281		3.0737
	6-8	10.00	0.0434	0.2333	0.2333	1.0333	0.8000	0.0012	0.1229		2.9508
	8-10	10.00	0.0434	0.2333	0.2333	1.0000	0.7667	0.0012	0.1178		2.8278
คาน	0-2	10.00	0.0434	0.2333	1.1000	0.8667	0.0013	0.1332	3.1966		
	2-4	10.00	0.0497	0.2333	1.3667	1.1333	0.0020	0.1996	4.7893		
	4-6	10.00	0.0434	0.2333	0.2333	1.6000	1.3667	0.0021	0.2100		5.0409
	6-8	10.00	0.0434	0.2333	0.2333	1.4000	1.1667	0.0018	0.1793		4.3032
	8-10	10.00	0.0497	0.2333	0.2333	0.9333	0.7000	0.0012	0.1233		2.9581
เสา	0-2	10.00	0.0434	0.2333	2.4000	2.1667	0.0033	0.3330	7.9916		
	2-4	10.00	0.0434	0.2333	3.9333	3.7000	0.0057	0.5686	13.6472		
	4-6	10.00	0.0497	0.2333	2.2667	2.0333	0.0036	0.3580	8.5925		
	6-8	10.00	0.0434	0.2333	1.7333	1.5000	0.0023	0.2305	5.5327		
	8-10	10.00	0.0497	0.2333	1.2333	1.0000	0.0018	0.1761	4.2258		

ตารางที่ 40 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 3 อำเภอปราณบุรี

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	น้ำหนักของคอนกรีต (g)	ความเข้มข้น AgNO <sub>3</sub> (N)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ไต-เตรทแบบลงค์ (ml)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ไต-เตรทตัวอย่าง (ml)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้คำนวณ (ml)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (g/conc. 1 g)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (%)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (kg/conc. 1 m <sup>3</sup> )	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> ในแหล่งน้ำ (kg/m <sup>3</sup> )
ราว	0-2	10.00	0.0434	0.2333	1.2667	1.0333	0.0016	0.1588	3.8114	0.2613
	2-4	10.00	0.0434	0.2333	2.0000	1.7667	0.0027	0.2715	6.5162	
	4-6	10.00	0.0434	0.2333	1.1000	0.8667	0.0013	0.1332	3.1966	
	6-8	10.00	0.0434	0.2333	1.0667	0.8333	0.0013	0.1281	3.0737	
	8-10	10.00	0.0434	0.2333	1.0000	0.7667	0.0012	0.1178	2.8278	
คาน	0-2	10.00	0.0434	0.2333	1.2000	0.9667	0.0015	0.1486	3.5655	
	2-4	10.00	0.0434	0.2333	1.5000	1.2667	0.0019	0.1947	4.6720	
	4-6	10.00	0.0434	0.2333	1.1333	0.9000	0.0014	0.1383	3.3196	
	6-8	10.00	0.0434	0.2333	1.0667	0.8333	0.0013	0.1281	3.0737	
	8-10	10.00	0.0434	0.2333	1.0000	0.7667	0.0012	0.1178	2.8278	
เสา	0-2	10.00	0.0434	0.2333	1.6333	1.4000	0.0022	0.2152	5.1638	
	2-4	10.00	0.0434	0.2333	1.3667	1.1333	0.0017	0.1742	4.1802	
	4-6	10.00	0.0434	0.2333	1.0667	0.8333	0.0013	0.1281	3.0737	
	6-8	10.00	0.0497	0.2333	1.0333	0.8000	0.0014	0.1409	3.3807	
	8-10	10.00	0.0497	0.2333	1.0000	0.7667	0.0013	0.1350	3.2398	



ตารางที่ 41 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 4 อำเภอปรางบุรี

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	น้ำหนักของคอนกรีต (g)	ความเข้มข้น AgNO <sub>3</sub> (N)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ไต-เตรทแบบลงค์ (ml)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ไต-เตรทตัวอย่าง (ml)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้คำนวณ (ml)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (g/conc. 1 g)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (%)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (kg/conc. 1 m <sup>3</sup> )	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> ในแหล่งน้ำ (kg/m <sup>3</sup> )
ราว	0-2	10.00	0.0497	0.2333	0.8333	0.6000	0.0011	0.1056	2.5355	0.2348
	2-4	10.00	0.0497	0.2333	0.7667	0.5333	0.0009	0.0939	2.2538	
	4-6	10.00	0.0497	0.2333	0.7333	0.5000	0.0009	0.0880	2.1129	
	6-8	10.00	0.0497	0.2333	0.5000	0.2667	0.0005	0.0470	1.1269	
	8-10	10.00	0.0497	0.2333	0.3667	0.1333	0.0002	0.0235	0.5634	
คาน	0-2	10.00	0.0497	0.2333	1.2000	0.9667	0.0017	0.1702	4.0850	
	2-4	10.00	0.0497	0.2333	1.1667	0.9333	0.0016	0.1643	3.9441	
	4-6	10.00	0.0497	0.2333	1.0667	0.8333	0.0015	0.1467	3.5215	
	6-8	10.00	0.0497	0.2333	0.8667	0.6333	0.0011	0.1115	2.6764	
	8-10	10.00	0.0497	0.2333	0.7667	0.5333	0.0009	0.0939	2.2538	
เสา	0-2	10.00	0.0497	0.2333	2.0333	1.8000	0.0032	0.3169	7.6065	
	2-4	10.00	0.0497	0.2333	1.4333	1.2000	0.0021	0.2113	5.0710	
	4-6	10.00	0.0497	0.2333	1.4333	1.2000	0.0021	0.2113	5.0710	
	6-8	10.00	0.0497	0.2333	1.0000	0.7667	0.0013	0.1350	3.2398	
	8-10	10.00	0.0497	0.2333	0.8000	0.5667	0.0010	0.0998	2.3946	

ตารางที่ 42 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 5 อำเภอปรางบุรี

ตำแหน่ง	ความลึก (cm)	น้ำหนักของคอนกรีต (g)	ความเข้มข้น AgNO <sub>3</sub> (N)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ไตเตรทแบลนด์ (ml)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง (ml)	AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้คำนวณ (ml)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (g/conc. 1 g)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (%)	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> (kg/conc. 1 m <sup>3</sup> )	ปริมาณของ Cl <sup>-</sup> ในแหล่งน้ำ (kg/m <sup>3</sup> )	
ราว	0-2	10.00	0.0434	0.2333	1.0333	0.8000	0.0012	0.1229	2.9508	0.1639	
	2-4	10.00	0.0434	0.2333	1.0667	0.8333	0.0013	0.1281	3.0737		
	4-6	10.00	0.0434	0.2333	0.2333	1.0000	0.7667	0.0012	0.1178		2.8278
	6-8	10.00	0.0497	0.2333	0.2333	0.5000	0.2667	0.0005	0.0470		1.1269
	8-10	10.00	0.0497	0.2333	0.2333	0.4333	0.2000	0.0004	0.0352		0.8452
คาน	0-2	10.00	0.0434	0.2333	1.1000	0.8667	0.0013	0.1332	3.1966		
	2-4	10.00	0.0434	0.2333	1.1667	0.9333	0.0014	0.1434	3.4425		
	4-6	10.00	0.0434	0.2333	0.2333	1.0667	0.8333	0.0013	0.1281		3.0737
	6-8	10.00	0.0434	0.2333	0.2333	0.9333	0.7000	0.0011	0.1076		2.5819
	8-10	10.00	0.0434	0.2333	0.2333	0.8333	0.6000	0.0009	0.0922		2.2131
เสา	0-2	10.00	0.0434	0.2333	1.0667	0.8333	0.0013	0.1281	3.0737		
	2-4	10.00	0.0434	0.2333	1.0333	0.8000	0.0012	0.1229	2.9508		
	4-6	10.00	0.0434	0.2333	0.2333	0.8333	0.6000	0.0009	0.0922		2.2131
	6-8	10.00	0.0497	0.2333	0.2333	0.8000	0.5667	0.0010	0.0998		2.3946
	8-10	10.00	0.0497	0.2333	0.2333	0.7333	0.5000	0.0009	0.0880		2.1129

ภาคผนวก ฅ  
ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก  
สะพานในอำเภอปราณบุรี





ตารางที่ 43 ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 1 อำเภอปราณบุรี

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_{(t,x)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	t (years)	erf(z)	z	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	$D_{ap}$ (Average)
สะพานที่ 1	ราว	0-2	1	3.4425	3.4425	20	0.0000	0.0000	0.0000	2.8810
		2-4	3	2.2131	3.4425	20	0.3571	0.3278	1.0467	
		4-6	5	1.7213	3.4425	20	0.5000	0.4769	1.3738	
		6-8	7	1.9672	3.4425	20	0.4286	0.4002	3.8240	
		8-10	9	1.8442	3.4425	20	0.4643	0.4379	5.2794	
	คาน	0-2	1	4.1802	4.1802	20	0.0000	0.0000	0.0000	8.8841
		2-4	3	4.4261	4.1802	20	-0.0588	-0.0522	41.3543	
		4-6	5	3.3196	4.1802	20	0.2059	0.1845	9.1755	
		6-8	7	2.7049	4.1802	20	0.3529	0.3237	5.8451	
		8-10	9	2.8278	4.1802	20	0.3235	0.2950	11.6317	
	เสา	0-2	1	7.8687	7.8687	20	0.0000	0.0000	0.0000	5.0773
		2-4	3	6.3933	7.8687	20	0.1875	0.1677	3.9989	
		4-6	5	5.9015	7.8687	20	0.2500	0.2253	6.1558	
		6-8	7	6.6205	7.8687	20	0.1586	0.1415	30.5935	
		8-10	9	6.4796	7.8687	20	0.1765	0.1577	40.7041	

ตารางที่ 44 ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 2 อำเภอปราณบุรี

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_{(t,x)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	t (years)	erf(z)	z	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	$D_{ap}$ (Average)
สะพานที่ 2	ราว	0-2	1	3.1966	3.1966	16	0.0000	0.0000	0.0000	45.1328
		2-4	3	3.3196	3.1966	16	-0.0385	-0.1554	5.8265	
		4-6	5	3.0737	3.1966	16	0.0385	-0.0773	65.4493	
		6-8	7	2.9508	3.1966	16	0.0769	-0.1161	56.8168	
		8-10	9	2.8278	3.1966	16	0.1154	-0.1554	52.4385	
	คาน	0-2	1	3.1966	3.1966	16	0.0000	0.0000	0.000	3.1512
		2-4	3	4.7893	3.1966	16	-0.4982	-0.4749	0.6234	
		4-6	5	5.0409	3.1966	16	-0.5769	-0.5664	1.2175	
		6-8	7	4.3032	3.1966	16	-0.3462	-0.3171	7.6128	
		8-10	9	2.9581	3.1966	16	0.0746	0.0662	288.7148	
	เสา	0-2	1	7.9916	7.9916	16	0.0000	0.0000	0.0000	5.4707
		2-4	3	13.6472	7.9916	16	-0.7077	-0.7446	0.2536	
		4-6	5	8.5925	7.9916	16	-0.0752	-0.0667	87.6891	
		6-8	7	5.5327	7.9916	16	0.3077	0.2798	9.7777	
		8-10	9	4.2258	7.9916	16	0.4712	0.4454	6.3808	

ตารางที่ 45 ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 3 อำเภอปรางมบุรี

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_{(t,x)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	t (years)	erf(z)	z	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	$D_{ap}$ (Average)
สะพานที่ 3	ราว	0-2	1	3.8114	3.8114	22	0.0000	0.0000	0.0000	12.3574
		2-4	3	6.5162	3.8114	22	-0.7097	-0.7477	0.1829	
		4-6	5	3.1966	3.8114	22	0.1613	0.1439	13.7125	
		6-8	7	3.0737	3.8114	22	0.1935	0.1732	18.5614	
		8-10	9	2.8278	3.8114	22	0.2581	0.2329	16.9726	
	คาน	0-2	1.0000	3.5655	3.5655	22	0.0000	0.0000	0.0000	46.4847
		2-4	3.0000	4.6720	3.5655	22	-0.3103	-0.2823	1.2831	
		4-6	5.0000	3.3196	3.5655	22	0.0690	0.0612	75.7852	
		6-8	7.0000	3.0737	3.5655	22	0.1379	0.1228	36.9093	
		8-10	9.0000	2.8278	3.5655	22	0.2069	0.1855	26.7595	
	เสา	0-2	1.0000	5.1638	5.1638	22	0.0000	0.0000	0.0000	5.3224
		2-4	3.0000	4.1802	5.1638	22	0.1905	0.1704	3.5208	
		4-6	5.0000	3.0737	5.1638	22	0.4048	0.3757	2.0132	
		6-8	7.0000	3.6884	5.1638	22	0.2857	0.2589	8.3089	
		8-10	9.0000	3.1966	5.1638	22	0.3810	0.3516	7.4469	



ตารางที่ 46 ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 4 อำเภอปราณบุรี

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_{(t, x)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	t (years)	erf(z)	z	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	$D_{ap}$ (Average)
สะพานที่ 4	ราว	0-2	1	2.5355	2.5355	20	0.0000	0.0000	0.0000	7.2730
		2-4	3	2.2538	2.5355	20	0.1111	0.0988	11.5296	
		4-6	5	2.1129	2.5355	20	0.1667	0.1488	14.1090	
		6-8	7	1.1269	2.5355	20	0.5556	0.5408	2.0944	
		8-10	9	0.5634	2.5355	20	0.7778	0.8632	1.3590	
	คาน	0-2	1	4.0850	4.0850	20	0.0000	0.0000	0.0000	5.9295
		2-4	3	3.9441	4.0850	20	0.0345	0.0306	120.2690	
		4-6	5	3.5215	4.0850	20	0.1379	0.1228	20.7144	
		6-8	7	2.6764	4.0850	20	0.3448	0.3158	6.1432	
		8-10	9	2.2538	4.0850	20	0.4483	0.4209	5.7158	
	เสา	0-2	1	7.6065	7.6065	20	0.0000	0.0000	0.0000	2.1297
		2-4	3	5.0710	7.6065	20	0.3333	0.3045	1.2130	
		4-6	5	5.0710	7.6065	20	0.3333	0.3045	3.3695	
		6-8	7	3.2398	7.6065	20	0.5741	0.5630	1.9322	
		8-10	9	2.3946	7.6065	20	0.6852	0.7108	2.0041	

ตารางที่ 47 ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 5 อำเภอปราณบุรี

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_{(t,x)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	t (years)	erf(z)	z	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	$D_{ap}$ (Average)
สะพานที่ 5	ราว	0-2	1	2.9508	2.9508	22	0.0000	0.0000	0.0000	1.5382
		2-4	3	3.0737	2.9508	22	-0.0417	-0.0370	74.8173	
		4-6	5	2.8278	2.9508	22	0.0417	0.0370	207.8259	
		6-8	7	1.1269	2.9508	22	0.6181	0.6183	1.4565	
		8-10	9	0.8452	2.9508	22	0.7136	0.7538	1.6199	
	คาน	0-2	1	3.1966	3.1966	22	0.0000	0.0000	0.0000	17.5017
		2-4	3	3.4425	3.1966	22	-0.0769	-0.0683	21.9517	
		4-6	5	3.0737	3.1966	22	0.0385	0.0341	243.8421	
		6-8	7	2.5819	3.1966	22	0.1923	0.1721	18.7985	
		8-10	9	2.2131	3.1966	22	0.3077	0.2798	11.7550	
	เสา	0-2	1	3.0737	3.0737	22	0.0000	0.0000	0.0000	9.9821
		2-4	3	2.9508	3.0737	22	0.0400	0.0355	81.3178	
		4-6	5	2.2131	3.0737	22	0.2800	0.2535	4.4219	
		6-8	7	2.3946	3.0737	22	0.2209	0.1983	14.1548	
		8-10	9	2.1129	3.0737	22	0.3126	0.2845	11.3696	



ภาคผนวก ญ

ผลการคำนวณปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก  
(จากสัมประสิทธิ์การแพร่) สะพานในอำเภอบัวชุม



ตารางที่ 48 ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 1 อำเภอปรางบุรี

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	C <sub>o</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /year)	t (year)	C(t, x) จากการสำรวจ (kg/m <sup>3</sup> )	C(t, x) จากการสำรวจ (g/conc.100g)	C(t, x) จากการคำนวณ (kg/m <sup>3</sup> )	C(t, x) จากการคำนวณ (g/conc.100g)
สะพานที่ 1	ราว	0-2	1	3.4425	2.8810	20	3.4425	0.1434	3.1870	0.1328
		2-4	3	3.4425		20	2.2131	0.0922	2.6848	0.1119
		4-6	5	3.4425		20	1.7213	0.0717	2.2080	0.0920
		6-8	7	3.4425		20	1.9672	0.0820	1.7707	0.0738
		8-10	9	3.4425		20	1.8442	0.0768	1.3833	0.0576
	คาน	0-2	1	4.1802	8.8841	20	4.1802	0.1742	4.0034	0.1668
		2-4	3	4.1802		20	4.4261	0.1844	3.6517	0.1522
		4-6	5	4.1802		20	3.3196	0.1383	3.3058	0.1377
		6-8	7	4.1802		20	2.7049	0.1127	2.9696	0.1237
		8-10	9	4.1802		20	2.8278	0.1178	2.6463	0.1103
	เสา	0-2	1	7.8687	5.0773	20	7.8687	0.3279	7.4285	0.3095
		2-4	3	7.8687		20	6.3933	0.2664	6.5567	0.2732
		4-6	5	7.8687		20	5.9015	0.2459	5.7103	0.2379
		6-8	7	7.8687		20	6.6205	0.2759	4.9045	0.2044
		8-10	9	7.8687		20	6.4796	0.2700	4.1523	0.1730

ตารางที่ 49 ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 2 อำเภอปรางบุรี

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	C <sub>o</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /year)	t (year)	C <sub>(t, x)</sub> จากการสำรวจ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>(t, x)</sub> จากการสำรวจ (g/conc.100g)	C <sub>(t, x)</sub> จากการคำนวณ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>(t, x)</sub> จากการคำนวณ (g/conc.100g)
สะพานที่ 2	ราว	0-2	1	3.1966	45.1328	16	3.1966	0.1332	3.1295	0.1304
		2-4	3	3.1966		16	3.3196	0.1383	2.9955	0.1248
		4-6	5	3.1966		16	3.0737	0.1281	2.8620	0.1193
		6-8	7	3.1966		16	2.9508	0.1229	2.7295	0.1137
		8-10	9	3.1966		16	2.8278	0.1178	2.5982	0.1083
	คาน	0-2	1	3.1966	3.1512	16	3.1966	0.1332	2.9431	0.1226
		2-4	3	3.1966		16	4.7893	0.1996	2.4459	0.1019
		4-6	5	3.1966		16	5.0409	0.2100	1.9773	0.0824
		6-8	7	3.1966		16	4.3032	0.1793	1.5528	0.0647
		8-10	9	3.1966		16	2.9581	0.1233	1.1831	0.0493
	เสา	0-2	1	7.9916	5.4707	16	7.9916	0.3330	7.5102	0.3129
		2-4	3	7.9916		16	13.6472	0.5686	6.5581	0.2733
		4-6	5	7.9916		16	8.5925	0.3580	5.6381	0.2349
		6-8	7	7.9916		16	5.5327	0.2305	4.7691	0.1987
		8-10	9	7.9916		16	4.2258	0.1761	3.9668	0.1653

ตารางที่ 50 ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 3 อำเภอปรางบุรี

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$D_a$ (cm <sup>2</sup> /year)	t (year)	$C_{(x,t)}$ จากการสำรวจ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{(x,t)}$ จากการสำรวจ (g/conc.100g)	$C_{(x,t)}$ จากการคำนวณ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{(x,t)}$ จากการคำนวณ (g/conc.100g)
สะพานที่ 3	ราว	0-2	1	3.8114	12.3574	22	3.8114	0.1588	3.6810	0.1534
		2-4	3	3.8114		22	6.5162	0.2715	3.4212	0.1426
		4-6	5	3.8114		22	3.1966	0.1332	3.1643	0.1318
		6-8	7	3.8114		22	3.0737	0.1281	2.9120	0.1213
		8-10	9	3.8114		22	2.8278	0.1178	2.6661	0.1111
	คาน	0-2	1	3.0737	46.4847	22	3.0737	0.1281	3.0195	0.1258
		2-4	3	3.0737		22	4.7950	0.1998	2.9111	0.1213
		4-6	5	3.0737		22	2.9508	0.1229	2.8031	0.1168
		6-8	7	3.0737		22	2.9508	0.1229	2.6956	0.1123
		8-10	9	3.0737		22	2.8278	0.1178	2.5889	0.1079
	เสา	0-2	1	5.1638	5.3224	22	5.1638	0.2152	4.8948	0.2039
		2-4	3	5.1638		22	4.1802	0.1742	4.3613	0.1817
		4-6	5	5.1638		22	3.0737	0.1281	3.8412	0.1601
		6-8	7	5.1638		22	3.6884	0.1537	3.3429	0.1393
		8-10	9	5.1638		22	3.1966	0.1332	2.8734	0.1197



ตารางที่ 51 ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 4 อำเภอปรางบุรี

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	t (year)	$C_{(t, x)}$ จากการสำรวจ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{(t, x)}$ จากการสำรวจ (g/conc.100g)	$C_{(t, x)}$ จากการคำนวณ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{(t, x)}$ จากการคำนวณ (g/conc.100g)
สะพานที่ 4	ราว	0-2	1	2.5355	7.2730	20	2.5355	0.1056	2.4170	0.1007
		2-4	3	2.5355		20	2.2538	0.0939	2.1815	0.0909
		4-6	5	2.5355		20	2.1129	0.0880	1.9508	0.0813
		6-8	7	2.5355		20	1.1269	0.0470	1.7280	0.0720
		8-10	9	2.5355		20	0.5634	0.0235	1.5156	0.0631
	คาน	0-2	1	4.0850	5.9295	20	4.0850	0.1702	3.8735	0.1614
		2-4	3	4.0850		20	3.9441	0.1643	3.4541	0.1439
		4-6	5	4.0850		20	3.5215	0.1467	3.0451	0.1269
		6-8	7	4.0850		20	2.6764	0.1115	2.6530	0.1105
		8-10	9	4.0850		20	2.2538	0.0939	2.2833	0.0951
	เสา	0-2	1	7.6065	2.1297	20	7.6065	0.3169	6.9502	0.2896
		2-4	3	7.6065		20	5.0710	0.2113	5.6680	0.2362
		4-6	5	7.6065		20	5.0710	0.2113	4.4727	0.1864
		6-8	7	7.6065		20	3.2398	0.1350	3.4093	0.1421
		8-10	9	7.6065		20	2.3946	0.0998	2.5064	0.1044

ตารางที่ 52 ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานที่ 5 อำเภอปรางบุรี

สะพาน	ตำแหน่ง	Depth (cm)	x (cm)	$C_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /year)	t (year)	$C_{(t, x)}$ จากการสำรวจ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{(t, x)}$ จากการสำรวจ (g/conc.100g)	$C_{(t, x)}$ จากการคำนวณ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{(t, x)}$ จากการคำนวณ (g/conc.100g)
สะพานที่ 5	ราว	0-2	1	2.9508	1.5382	22	2.9508	0.1229	2.6653	0.1111
		2-4	3	2.9508		22	3.0737	0.1281	2.1109	0.0880
		4-6	5	2.9508		22	2.8278	0.1178	1.6033	0.0668
		6-8	7	2.9508		22	1.1269	0.0470	1.1651	0.0485
		8-10	9	2.9508		22	0.8452	0.0352	0.8084	0.0337
	คาน	0-2	1	3.1966	17.5017	22	3.1966	0.1332	3.1048	0.1294
		2-4	3	3.1966		22	3.0737	0.1281	2.9215	0.1217
		4-6	5	3.1966		22	3.3196	0.1383	2.7396	0.1141
		6-8	7	3.1966		22	2.9508	0.1229	2.5600	0.1067
		8-10	9	3.1966		22	2.8278	0.1178	2.3837	0.0993
	เสา	0-2	1	3.0737	9.9821	22	3.0737	0.1281	2.9567	0.1232
		2-4	3	3.0737		22	2.9508	0.1229	2.7238	0.1135
		4-6	5	3.0737		22	2.2131	0.0922	2.4941	0.1039
		6-8	7	3.0737		22	2.3946	0.0998	2.2695	0.0946
		8-10	9	3.0737		22	2.1129	0.0880	2.0520	0.0855



ภาคผนวก ก  
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำทะเล  
ในพื้นที่อำเภอหัวหินและปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



ตารางที่ 53 ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำทะเล

สถานที่เก็บตัวอย่าง	ลำดับที่	ปริมาณAgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ (mL)	ปริมาณคลอไรด์ (kg/m <sup>3</sup> )	ปริมาณคลอไรด์ เฉลี่ย (kg/m <sup>3</sup> )
หาดเขาเต่า	1	92.50	16.42	15.58
	2	89.20	15.83	
	3	81.70	14.50	
หาดหัวหิน	1	94.90	16.84	16.93
	2	96.85	17.19	
	3	94.40	16.76	
หาดสวนสนประดิพัทธ์	1	82.00	14.56	14.61
	2	84.60	15.02	
	3	80.30	14.25	
หาดวนอุทยาน ปราณบุรี	1	126.00	22.37	22.31
	2	125.50	22.28	
	3	125.60	22.29	
ปริมาณคลอไรด์เฉลี่ย ทั้งหมด (kg/m <sup>3</sup> )			17.36	
ปริมาณโซเดียมคลอ ไรด์ทั้งหมด			11.25	
ปริมาณโซเดียมคลอ ไรด์ (kg/m <sup>3</sup> )			28.61	

ประวัติผู้วิจัย



## ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ศิริรัตน์

2. ตำแหน่งปัจจุบันรองคณบดีประจำพื้นที่วิทยาเขตวังไกลกังวล คณะวิศวกรรมศาสตร์

3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ถ.เพชรเกษม ต.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110 โทรศัพท์ 0 3261 8500, 0 1646 5423 โทรสาร 0 3261 8570  
chusak@rmutr.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญาเอก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ว.ด.บ. วิศวกรรมโยธา, 2556

ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วศ.ม. วิศวกรรมโยธา, 2542

ปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ค.อ.บ. วิศวกรรมโยธา, 2538

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Computer Programming (Visual Basic)

การประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) กับงานทางด้านวิศวกรรม

ธรณีวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (Geo-environment Engineering)

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย, แหล่งทุน

1) การพัฒนาโปรแกรมคำนวณวงรอบและเส้นชั้นความสูงด้วยภาษาวิซวลเบสิก

แหล่งทุน : งบวัสดุฝึกแผนกวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2544

2) โครงการวิจัยศึกษาการนำฐานข้อมูลมาประยุกต์ใช้กับการสอบทางคอมพิวเตอร์

แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2545

3) โครงการศึกษาผลกระทบของอุทกภัย ระยะเวลา และสารอินทรีย์ ต่อการอบดินเพื่อ

ใช้หาค่าปริมาณความชื้นในมวลดิน

แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2545

4) เครื่องมือทดสอบกำลังแบกทานของดินแบบหยั่งเบา

แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2549



5) การพัฒนาสื่อผสมร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตสำหรับการทดสอบวัสดุทางด้าน  
วิศวกรรมโยธา

แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2550

6) การสร้างสื่อผสมบนระบบอินเทอร์เน็ตร่วมกับโปรแกรมทดสอบวัสดุทางด้าน  
วิศวกรรมโยธา

แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2551

7) การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการทดสอบวัสดุก่อสร้างทางด้านวิศวกรรม  
โยธาประยุกต์ร่วมกับการใช้สื่อผสมบนระบบอินเทอร์เน็ต

แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2552

8) การศึกษาความเหมาะสมของการใช้ดินผสมซีเมนต์และเบนโทไนท์เพื่อการป้องกัน  
การแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในดิน

แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2552

6.2 ผู้ร่วมโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย, แหล่งทุน

1) โครงการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับงานปฏิบัติการทดสอบวัสดุทางด้าน  
วิศวกรรมโยธา

แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2547

2) โครงการศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าการใช้ PVD และ Cement Column ในการ  
ปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนเชิงเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรม

แหล่งทุน : สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ประจำปี 2549

3) การพัฒนาขึ้นรูปวัสดุแผ่นวัสดุผสมจากเส้นใยมะพร้าว-พลาสติกโพลีเอทิลีนเพื่องาน  
วัสดุก่อสร้างและหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์

แหล่งทุน : งบประมาณเครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนล่าง ปี 2549

4) การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างเหล็กด้วยโปรแกรมภาษาวิซวลเบสิก 6.0

แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2550

5) การพัฒนากระเบื้องยางปูพื้นจากเส้นใยมะพร้าวผสมยางธรรมชาติ

แหล่งทุน : งบประมาณเครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนล่าง ปี 2551

6) การออกแบบจุดต่อโครงสร้างเหล็กโดยวิซวลเบสิก 6-V.2.1

แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2551

7) การสร้างแบบจำลองขนาดเล็กเพื่อศึกษาการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนในดินผ่าน  
กำแพงดินซีเมนต์

แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2552

8) การศึกษาพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ โดย  
การสร้างบ่อทดสอบในสนาม

แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2553

## หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ สกุล ศุภชัย ไทยพุ่ม

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ถ.เพชรเกษม ต.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110 โทรศัพท์ 0 3261 8500, 0 1646 5423 โทรสาร 0 3261 8570  
spcrmutr@hotmail.com

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วศ.ม. วิศวกรรมโยธา, 2556  
ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล วศ.บ.  
วิศวกรรมโยธา, 2552

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่เกิดปัญหา (ALKALI-SILICA REACTION)  
การประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) กับงานทางด้านวิศวกรรม

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย, แหล่งทุน

1) การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างที่ถ่ายแรงไม่ตรงจุดศูนย์กลางรวมแรงขององค์อาคาร  
แหล่งทุน : งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2558

