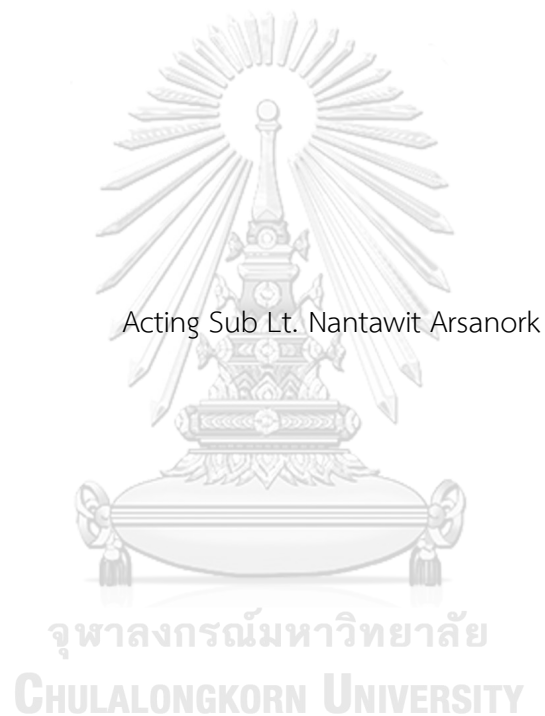


การข้ามผ่านของอนุภาคไอทะเลในตัวอย่างมอร์ตาร์ทผสมแก้วลอยต่างชนิด
ในบริเวณชายฝั่งทะเลภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Airborne Chloride penetration into mortar specimens with different types of fly ash in
coastal areas of Southern and Eastern Thailand



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การข้ามผ่านของอนุภาคไอททะเลในตัวอย่างมอร์ตาร์ดผสมแก้ว ลอยต่างชนิดในบริเวณชายฝั่งทะเลภาคใต้และภาค ตะวันออกของประเทศไทย
โดย	ว่าที่ ร.ต.นันทวิทย์ อาษานอก
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.รุ่งรวี วัฒนพรพรหม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.รุ่งรวี วัฒนพรพรหม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(นาวาเอก ดร.เสวียง เกื้อนบุญ)

นันทวิทย์ อาชานอก : การซึมผ่านของอนุภาคไอทะเลในตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่างชนิดในบริเวณชายฝั่งทะเลภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศไทย. (Airborne Chloride penetration into mortar specimens with different types of fly ash in coastal areas of Southern and Eastern Thailand) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.รุ่งรวี วัฒนพรพรหม

ประเทศไทยนั้นเป็นประเทศไทยที่ห้อมล้อมไปด้วยชายฝั่งทะเล อีกทั้งยังตั้งอยู่ในสภาวะอากาศร้อนชื้น ด้วยปัจจัยเหล่านี้ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งประเทศไทยนั้นมีแนวโน้มที่จะเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในเนื้อคอนกรีต อันเนื่องมาจากคลอไรด์ แม้ว่าโครงสร้างนั้นจะไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเข้มข้นของละอองคลอไรด์ในจังหวัดพังงาในระยะเวลา 84 วัน และจังหวัดชลบุรีในระยะเวลา 353 วัน โดยการใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 10 ซม.x10 ซม.x10 ซม. ที่ผสมเถ้าลอยชนิดทั้งสิ้น 3 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอยแม่เกาะ (class C), เถ้าลอย BLCP (class C) และเถ้าลอยจากประเทศญี่ปุ่น (class C) โดยการใช้เถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ควบคุม $w/b = 0.55$ ในทุกสัดส่วนผสม และบ่มในน้ำเป็นระยะเวลาทั้ง 28 วัน การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บข้อมูลปริมาณคลอไรด์สะสมในแต่ละชั้นความลึก รวมทั้งศึกษาผลกระทบของเนื่องจากการชะล้างของคลอไรด์ที่ผิวหน้า(washout effect) อีกประการหนึ่งจากการศึกษาพบว่าเถ้าลอยที่นำมาใช้นั้นถึงแม้ว่าจัดอยู่ในประเภทเดียวกันตามมาตรฐาน ASTM แต่ผลการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในมอร์ต้า่นั้นมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งยังพบว่าการชะล้างคลอไรด์ที่ผิวหน้าที่มีผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าผ่านการวิเคราะห์จากปริมาณน้ำฝนสะสมในจังหวัดพังงา

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีโอกาสสำเร็จลุล่วงได้หากปราศจากความกรุณาและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ของ รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้สละเวลาอันมีค่าในการให้ข้อชี้แนะ ตลอดทั้งเวลาที่ผู้เขียนได้ศึกษาใน หลักสูตรระดับมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ แห่งนี้ และ ดร.รุ่งรวี วัฒนพรพรหม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำ ชี้แนะแก้ไขในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาในตลอดทั้งระยะการศึกษาของผู้เขียนด้วย ผู้เขียนจึงใคร่ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชชา จองวิวัฒน์สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสวก ชัย ตั้งอร่ามวงศ์ และ นาวาเอก ดร.เสวียง เกื้อนบุญ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาร่วมเป็นคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ของผู้เขียน และได้แนะแนวทางการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

ผู้เขียนขอขอบคุณ นายพีรพงษ์ เจริญกิจวัฒน์กุล กับ นายศิวักร คำด้วง รุ่นน้องภาควิชาวิศวกรรม โยธาผู้ให้ความช่วยเหลือหยิบยืมทั้งร่างกายและแรงใจในทำการทดลองมาโดยตลอด และ ขอขอบคุณ นายภาคภูมิ ลิมทอง นิสิตปริญญาโทมหาวิทาลัยโตเกียวผู้ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยและคอย ประสานงานต่าง ๆ ให้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ รุ่นพี่และรุ่นน้อง ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้ความช่วยเหลือและ เป็นกำลังใจให้กับผู้เขียนมาโดยตลอดอย่างอบอุ่น

และผู้เขียนยังต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้ กำลังใจและสนับสนุนผู้เขียนมาโดยตลอดจนจบกระทั่งวันนี้ รวมถึงอาจารย์ทุกท่านในภาควิชา วิศวกรรมโยธาที่ได้มอบวิชาความรู้มาโดยตลอดหลายปีที่ผ่านมา

นันทวิทย์ อาษานอก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	1
สารบัญตาราง.....	4
บทที่ 1 บทนำ.....	5
1.1 ที่มา และ ความสำคัญ.....	5
1.2 วัตถุประสงค์	6
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ส่วนนำ.....	8
2.2 การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใกล้ทะเล.....	9
2.2.1 ชั้นพาสซีเวชันของเหล็กเสริม (Passivation layer) และการเกิดสนิม	10
2.2.2 ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน (Chloride content corrosion threshold).....	11
2.2.3 ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (Carbonation Reaction)	11
2.2.4 การทำลายโดยซัลเฟต	11
2.2.5 ระยะหุ้มเหล็กเสริมขั้นต่ำในคอนกรีต (Minimum concrete covering).....	12

2.3	อนุภาคคลอไรด์ในอากาศ (Airborne chloride particle)	15
2.3.1	การกำเนิดอนุภาคคลอไรด์ในอากาศ.....	15
2.3.2	การซึมผ่านของอนุภาคคลอไรด์ในคอนกรีต	18
2.3.3	สถานะของคลอไรด์ในคอนกรีต	19
2.3.4	ผลจากการชะล้างผิวของน้ำฝน (Washout Effect).....	20
2.4	คอนกรีตที่ผสมเกลือลอย	21
2.4.1	คุณสมบัติโดยทั่วไปของคอนกรีตที่ผสมเกลือลอย	21
2.4.2	การศึกษาการซึมผ่านได้ของอนุภาคคลอไรด์ต่อคอนกรีตผสมเกลือลอย	22
2.5	วิธีการวัดคลอไรด์ในอากาศ	26
บทที่ 3	ระเบียบและวิธีการดำเนินงานวิจัย	30
3.1	แนวคิดพื้นฐาน.....	30
3.2	การสำรวจพื้นที่.....	30
3.2.1	พื้นที่บ้านนาเกลือ ต.โคกกลอย อ.ตะกั่วทุ่ง จ.พังงา	30
3.2.2	พื้นที่บริเวณชายหาดม้าน้ำ หน่วยบัญชาการนาวิกโยธิน ต.สัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี ..	31
3.3	การเตรียมตัวอย่าง.....	32
3.3.1	ตัวอย่างมอร์ตาร์ซีพ.....	32
3.3.2	ตัวอย่างมอร์ตาร์ 10x10x10 ซม. ³	32
3.4	การติดตั้งและเก็บตัวอย่าง	35
3.4.1	ตัวอย่างมอร์ตาร์ซีพ.....	35
3.4.2	ตัวอย่างมอร์ตาร์ 10x10x10 ซม. ³	35
3.5	การทดสอบตัวอย่าง.....	37
3.5.1	การบดตัวอย่างมอร์ตาร์ซีพ.....	37
3.5.2	การเจาะตัวอย่างมอร์ตาร์ 10x10x10 ซม. ³	37
3.5.3	การไทเทรตเพื่อหาปริมาณคลอไรด์.....	38

บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ	40
4.1 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในอำเภอดงหลวง จังหวัด พังงา.....	40
4.2 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในอำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี.....	41
4.2.1 ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากมอร์ตาร์ซีพีในอำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี	41
4.2.2 ทิศทางของลมมรสุมในประเทศไทยประจำปีที่มีผลต่อค่าปริมาณคลอไรด์ใ.....	41
4.2.2 ปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดชลบุรีในช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคม พ.ศ.2561	42
4.2.3 ปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดชลบุรีในช่วงเดือนมิถุนายน-กรกฎาคม พ.ศ.2561	44
4.2.4 ปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดชลบุรีในช่วงเดือนสิงหาคม-กันยายน พ.ศ.2561.....	45
4.2.5 ปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดชลบุรีในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ.2561 – มกราคม พ.ศ.2562	46
4.3 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดพังงาและชลบุรีระหว่างเดือน เมษายน 2561 - ธันวาคม 2561	48
4.4 ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในชิ้นส่วนมอร์ตาร์ในจังหวัดชลบุรี	49
4.4.1 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในตัวอย่างมอร์ตาร์ ระยะเวลา 3 เดือน	49
4.4.2 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในตัวอย่างมอร์ตาร์ ระยะเวลา 6 เดือน	50
4.4.3 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในตัวอย่างมอร์ตาร์ ระยะเวลา 9.5 เดือน	50
4.4.4 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในตัวอย่างมอร์ตาร์ ระยะเวลา 12 เดือน	51
4.4.5 วิเคราะห์ผลการซึมผ่านของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยแต่ละชนิด.....	51
4.5 พิจารณาผลการซึมผ่านของอนุภาคคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่จังหวัดชลบุรีโดยเทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน	51
4.5.1 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 3 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ.....	52
4.5.2 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 6 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ.....	52

4.5.3 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 9.5 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ	53
4.5.4 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 11 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ	54
4.6 ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในตัวอย่าง (จังหวัดพังงา)	54
4.7 พิจารณาผลของการชะล้างคลอไรด์ที่ผิวหน้าในจังหวัดพังงา	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	59
5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณคลอไรด์	59
5.2 ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในตัวอย่าง	59
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม	61
ประวัติผู้เขียน	63



สารบัญภาพ

	หน้า
รูป 2-1 การถุบน้ำทะเลของโครงสร้างจำแนกตามส่วนที่โดนน้ำ.....	8
รูป 2-2 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพในพื้นที่ใกล้ทะเล.....	9
รูป 2-3 การแตกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม.....	9
รูป 2-4 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเมื่อชั้นพาสซีวชันถูกทำลาย.....	10
รูป 2-5 การเคลื่อนตัวของอนุภาคคลอไรด์เข้าสู่โครงสร้างในชายฝั่ง.....	15
รูป 2-6 ความถี่ในการปะทะของยอดคลื่นของหน้าพื้นที่ลาดชันและตื้นเรียบ.....	16
รูป 2-7 ผลการเก็บความถี่ในการกระจายตัวของอนุภาคน้ำทะเลในอากาศ.....	16
รูป 2-8 จุดตั้งสถานีวัดค่าอนุภาคคลอไรด์ ณ ชายฝั่งนครโจเอาเปสโซอา.....	17
รูป 2-9 ค่าปริมาณอนุภาคคลอไรด์จากสถานีวัดค่าที่ระยะทางต่างๆ.....	17
รูป 2-10 ค่าความเข้มข้นของอนุภาคคลอไรด์เปรียบเทียบกับความแรงของกระแสลมและระยะทาง18	
รูป 2-11 รูปแสดงการแพร่ย้อนกลับของอนุภาคคลอไรด์เมื่อถูกชะล้างโดยน้ำฝน.....	20
รูป 2-12 ปฏิบัติการทดลองผลกระทบจากการชะล้างผิว.....	20
รูป 2-13 ผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการและ ผลการทดลองจากปฏิบัติการภาคสนาม.....	21
รูป 2-14 ลักษณะอนุภาคของ Fly Ash จากกล้อง SEM.....	22
รูป 2-15 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการวัดปริมาณคลอไรด์.....	23
รูป 2-16 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด, คลอไรด์อิสระและคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บของตัวอย่างต่างชนิด.....	24
รูป 2-17 ความละเอียดของเถ้าลอยที่นำมาทดสอบ (Fineness).....	26
รูป 2-18 ขนาดช่องว่างเฉลี่ยในเนื้อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยความละเอียดแตกต่างกัน.....	26
รูป 2-19 อุปกรณ์ Wet candle.....	27
รูป 2-20 อุปกรณ์ Dry Gauze.....	27
รูป 2-21 อุปกรณ์ถึงดักคลอไรด์.....	28
รูป 2-22 แผนภาพอุปกรณ์ถึงดักคลอไรด์.....	28

รูป 2-23 การดักเก็บปริมาณคลอไรด์โดยใช้แผ่นมอร์ตาร์	29
รูป 3-1 แผนที่พื้นที่วางตัวอย่างบริเวณจังหวัดพังงา	30
รูป 3-2 หน่วยงานและพื้นที่วางตัวอย่างบริเวณจังหวัดพังงา	31
รูป 3-3 แผนที่พื้นที่วางตัวอย่างบริเวณจังหวัดชลบุรี	31
รูป 3-4 ลักษณะหน่วยงานและพื้นที่วางตัวอย่างบริเวณจังหวัดชลบุรี	32
รูป 3-5 รูปตัวอย่างและการติดตั้งแผ่นมอร์ตาร์	32
รูป 3-6 มอร์ตาร์ผสมแก้าลอยขนาด 10x10x10 ซม. ³	33
รูป 3-7 ชั้นวางสำหรับติดตั้งตัวอย่างมอร์ตาร์	36
รูป 3-8 ชั้นวางสำหรับติดตั้งตัวอย่างมอร์ตาร์ในสถานที่จริง	36
รูป 3-9 การบดตัวอย่างมอร์ตาร์ชิบเพื่อนำลงไปทดสอบ	37
รูป 3-10 การเจาะตัวอย่างเพื่อนำลงไปทดสอบ	38
รูป 4-1 ผลการทดสอบไอคลอไรด์ที่จังหวัดพังงา	40
รูป 4-2 ผลการทดสอบไอคลอไรด์ที่ อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี	41
รูป 4-3 ข้อมูลทิศทางลมมรสุมจากกรมอุตุนิยมวิทยา	42
รูป 4-4 ข้อมูลทิศทางและความเร็วลมจากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เดือน เม.ย.-พ.ค. พ.ศ.2561 .	43
รูป 4-5 ข้อมูลทิศทางและความเร็วลมจากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เดือน มิ.ย.-ก.ค. พ.ศ.2561 ...	44
รูป 4-6 ข้อมูลทิศทางและความเร็วลมจากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เดือน ส.ค.-ก.ย. พ.ศ.2561 ...	45
รูป 4-7 ข้อมูลทิศทางและความเร็วลมจากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เดือน ต.ค.-พ.ย. พ.ศ.2561...	46
รูป 4-8 ข้อมูลทิศทางและความเร็วลมจากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เดือน ธ.ค.61-ม.ค.62.....	47
รูป 4-9 ผลการทดสอบไอคลอไรด์ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี และ จังหวัดพังงา	48
รูป 4-10 ความแตกต่างของปริมาณน้ำฝนจังหวัดพังงาและชลบุรีช่วงเดือน ก.ค.-ส.ค. พ.ศ.2561	49
รูป 4-11 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในมอร์ตาร์ระยะเวลา 3 เดือน	49
รูป 4-12 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในมอร์ตาร์ระยะเวลา 6 เดือน	50
รูป 4-13 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในมอร์ตาร์ระยะเวลา 9.5 เดือน	50

รูป 4-14 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในมอร์ตาร์ระยะเวลา 12 เดือน	51
รูป 4-15 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 3 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ. 52	
รูป 4-16 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 6 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ. 53	
รูป 4-17 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 9.5 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ	53
รูป 4-18 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 12 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ	54
รูป 4-19 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อมอร์ตาร์ บริเวณจังหวัดพังงา	55
รูป 4-20 ข้อมูลปริมาณน้ำฝน จ.พังงา ในช่วงระยะเวลาการทดลอง.....	55
รูป 4-21 ข้อมูลค่าอุณหภูมิในช่วงระยะเวลาการวางตัวอย่าง.....	56
รูป 4-22 ข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงระยะเวลาการวางตัวอย่าง	56
รูป 4-23 ทิศทางการวางและติดตั้งตัวอย่าง	57
รูป 4-24 ค่าความเร็วและทิศทางของลม.....	58

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ระยะเวลาของคอนกรีตต่ำสุดตามมาตรฐาน วสท.....	13
ตารางที่ 2-2 ระยะเวลาของคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมใกล้ทะเลตามมาตรฐาน ACI 357R-84..	14
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผสม	33
ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสม	34
ตารางที่ 3-3 ข้อกำหนดที่ใช้แบ่งชั้นของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	34
ตารางที่ 3-4 สัดส่วนผสมสำหรับตัวอย่างมอร์ตาร์ 10x10x10 ซม. ³	35
ตารางที่ 3-5 ระยะเวลาที่ติดตั้งตัวอย่างมอร์ตาร์.....	36



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และ ความสำคัญ

คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างโดยทั่วไปทั้งในไทยและต่างประเทศ โดยปกติผู้ออกแบบมักให้ความสำคัญกับด้านการรับกำลังเป็นหลัก ขึ้นอยู่กับการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็แรงอัด แรงดัด หรือ แรงบิด แต่ทว่าในการใช้งานจริงนั้น ส่วนที่สำคัญหลังจากที่โครงสร้างต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมอีกหลายสิบปี คือความทนทาน ซึ่งโดยทั่วไปผู้ออกแบบไม่ได้คำนึงถึงส่วนนี้มากนัก อายุการใช้งานของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบไว้โดยเฉลี่ยสามารถใช้งานได้ยาวนานถึงมากกว่า 50 ปี แต่ในบางสภาวะ อายุการใช้งานกลับเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควรจะเป็นมาก ตัวอย่างเช่น ในภูมิภาคใต้และตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมีพื้นที่ติดกับชายฝั่งทะเล มักจะพบเห็นสภาพผิวคอนกรีตแตกและเหล็กเสริมเป็นสนิม โดยการลงพื้นที่สำรวจพบว่าตึกอายุเพียง 25 ปี ก็พบเจอปัญหาเช่นนี้แล้ว

หนึ่งในสาเหตุที่อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพเร็วขึ้นด้วยสภาวะอากาศริมทะเล สืบเนื่องจากอนุภาคคลอไรด์ในอากาศ หรืออีกชื่อหนึ่งคือไอน้ำทะเลที่ถูกพัดพามาในอากาศ โดยโครงสร้างมิได้ถูกน้ำทะเลโดยตรงเพียงอย่างเดียว สิ่งเหล่านี้เกิดขึ้นมาอย่างต่อเนื่องเกิดการกระทบสิ่งกีดขวางด้วยความรุนแรง โดยปริมาณอนุภาคคลอไรด์ที่พัดพาขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ ความเร็วลม ความสูงของผิวน้ำ และยอดคลื่น หลายปัจจัยร่วมกัน เมื่ออนุภาคคลอไรด์ถูกพัดพาผ่านพื้นผิวคอนกรีต อนุภาคจะค่อยๆ เกาะติดและซึมลึกเข้าไปในคอนกรีต ตามระยะเวลาที่ผ่านไป เมื่ออนุภาคคลอไรด์ซึมลึกถึงผิวเหล็กเสริม จะทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่เป็นชั้นฟิล์มเคลือบผิวเหล็กบริเวณที่เป็นจุดเกาะของเหล็กเสริมกับเนื้อคอนกรีต อันเป็นเหตุให้เหล็กเสริมถูกกัดกร่อนเกิดเป็นเนื้อสนิม และเกิดการขยายตัว จนดันเนื้อคอนกรีตแตกมาถึงผิว ทำให้อากาศสามารถไหลเข้าไปก่อสนิมที่มากขึ้นยิ่งไปกว่าเดิม

ถ้าล้อยเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมถ่านหินและโรงไฟฟ้า หากปล่อยไปสู่อากาศ จะกลายเป็นมลพิษ โดยคุณสมบัติของถ้าล้อยนั้น เมื่อถูกน้ำจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน จึงถูกนำไปใช้ประโยชน์หมุนเวียนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยใช้ในการผสมคอนกรีตโดยการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน การใช้ถ้าล้อยทดแทนปูนซีเมนต์ในบางส่วนนี้มีข้อดีหลายประการได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้และลดการเยิ้ม น้ำของคอนกรีตสด เพิ่มกำลังรับแรงอัดสูงสุด เพิ่มความต้านทานต่อปฏิกิริยาเคมี เพิ่มความทนทานของคอนกรีตในการใช้งานระยะยาว และที่สำคัญคือช่วยลดอัตราการซึมผ่านของน้ำได้ แต่ทว่าในหัวข้อการศึกษาพฤติกรรมคอนกรีตผสมถ้าล้อยที่มีต่ออนุภาคคลอไรด์นั้น มียังมีอยู่อย่างจำกัด โดยพื้นที่การศึกษาจะอยู่ในบริเวณจังหวัดพื้นที่จังหวัดพังงาและจังหวัดชลบุรี ซึ่งมีพื้นที่ติดกับชายทะเลเป็นส่วนมาก รวมถึงเป็นที่ตั้งของ ฐานทัพเรือสัตหีบ และฐานทัพเรือพังงา ซึ่งมี

โครงสร้างที่สำคัญอยู่เป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นในการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีต่ออนุภาคคลอไรด์ในพื้นที่ดังกล่าว เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนำไปใช้ประโยชน์ร่วมกับการออกแบบต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บข้อมูลอนุภาคคลอไรด์ในอากาศบริเวณภาคใต้และภาคตะวันออก และศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคคลอไรด์ที่มีผลต่อคอนกรีตผสมเถ้าลอยชนิดต่างๆ กัน เพื่อเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์พิจารณาออกแบบโครงสร้างคอนกรีตให้มีความทนทานเหมาะสมต่อสภาพแวดล้อมที่อยู่ใกล้ชายทะเลในอนาคตสืบเนื่องไป

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ขอบเขตบริเวณงานวิจัยและพื้นที่การทดลองอยู่ที่ พื้นที่บ้านนาเกลือ ต.โคกกลอย อ.ตะกั่วทุ่ง จ.พังงา และหาดม้าน้ำ ฐานทัพเรือสัตหีบ ต.สัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี
- 2) ระยะทางของจุดวางตัวอย่างอยู่บริเวณ 10 – 30 เมตรจากชายฝั่ง และเป็นบริเวณที่ไม่มีสิ่งกีดขวางเท่านั้น
- 3) การเก็บข้อมูลอนุภาคคลอไรด์ในอากาศทำโดยการใช้ตัวอย่างมอร์ต้าชิป (วิธีของ JSCE) ติดตั้ง ณ สถานที่ทำการทดลอง เพื่อเก็บตัวอย่าง แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ค่าอนุภาคคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C-1152 ซึ่งจะเป็นอนุภาคคลอไรด์จากการพัดพามาในอากาศเท่านั้น ไม่มีการสัมผัสน้ำทะเลโดยตรง
- 4) การเก็บข้อมูลการซึมลึกของอนุภาคคลอไรด์ ใช้ตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยชนิดต่างๆ ผสมปูนซึ่งเป็นปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่านั้น และเถ้าลอยที่ใช้มีสามชนิดได้แก่ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า BLCF และเถ้าลอยจาก SHIKOKU ELECTRIC POWER CO.,INC. ประเทศญี่ปุ่น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ทราบความเข้มข้นอนุภาคคลอไรด์ในอากาศ ในแต่ละช่วงเดือนของปี ของทั้งสองสถานที่
- 2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยทั้งสามชนิด ที่มีผลต่อการซึมลึกของอนุภาคคลอไรด์ที่เกาะพื้นผิว
- 3) สามารถทราบแนวทางในการเลือกเถ้าลอยให้เหมาะสมกับโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมริมทะเล

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) สืบหาภาคสนามและขอทำหนังสือใช้สถานที่
- 3) ทำชิ้นตัวอย่างการทดลอง
- 4) ติดตั้งตัวอย่าง ณ สถานที่ทดลอง
- 5) เก็บตัวอย่างตามวงรอบ และนำมาทดสอบหาผลการทดลอง
- 6) เขียนงานวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

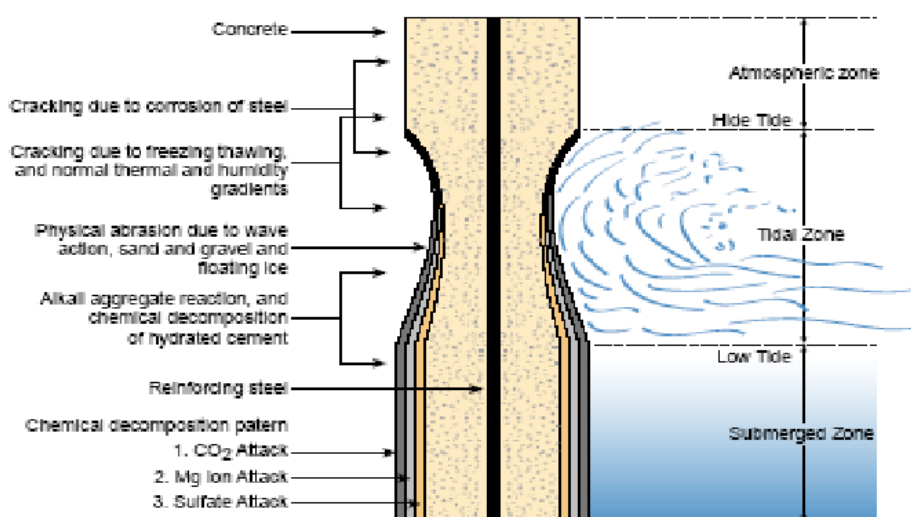


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ส่วนนำ

คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมติดทะเล อาจเกิดการเสื่อมสภาพได้เมื่อผ่านการใช้งานไปเป็นเวลายาวนาน เกิดขึ้นได้จากหลากหลายสาเหตุร่วมกัน ไม่ว่าจะเป็นการเสื่อมสภาพทางกายภาพและปฏิกิริยาเคมี อาทิเช่น การสึกหรอจากแรงปะทะของคลื่นเป็นระยะเวลายาวนานหรือการที่น้ำทะเลซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยแรงดันน้ำสำหรับส่วนคอนกรีตที่จมอยู่ใต้น้ำ (C.M. Hansson 2007) ซึ่งสามารถจำแนกลักษณะการเสื่อมสภาพตามลักษณะสาเหตุ ได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การเสื่อมสภาพจากการสัมผัสน้ำทะเลโดยตรงและโดยอ้อมดังรูป 2-1



รูป 2-1 การถูกน้ำทะเลของโครงสร้างจำแนกตามส่วนที่โดนน้ำ (Mehta (1980))

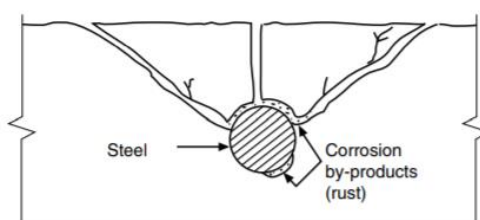
แม้ว่าจะโดนน้ำทะเลตลอดเวลาหรือโดนเพียงบางห้วงเวลานั้นก็นับว่าเป็นการเป็นการสัมผัสน้ำทะเลโดนตรงเช่นกัน ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสน้ำทะเลโดยอ้อมเป็นหลัก เนื่องจากโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่ที่ทำการลงสำรวจภาคสนามล้วนมีระยะห่างจากผิวน้ำทะเล แต่กลับได้รับความเสียหายจากการเสื่อมสภาพโดยน้ำทะเลทางอ้อมทั้งสิ้น ดังรูป 2-2



รูป 2-2 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพในพื้นที่ใกล้ทะเล

2.2 การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใกล้ทะเล

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใกล้ทะเล แบ่งตามลักษณะจุดเกิดความเสียหายได้เป็นสองรูปแบบ คือ การเสื่อมสภาพของเนื้อคอนกรีต และการเสื่อมสภาพอันมาจากเหล็กเสริมภายใน โดยรูปแบบความเสียหายหลักมักจะมาจากเหล็กเสริมภายในเสียมากกว่า เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิม เนื้อสนิมจะเกิดการขยายตัวและดันออกจากเนื้อเหล็กทำให้ปริมาตรภายในมากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตสามารถรับแรงกดได้ดี แต่ไม่สามารถรับแรงดึงได้มากนัก การเพิ่มปริมาตรจากภายใน จะทำให้เนื้อคอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมถูกดันออกและแตกร้าว โดยอาจเริ่มจากรอยร้าวเล็กๆ จนกระทั่งรอยร้าวเชื่อมต่อถึงกัน ทำให้เนื้อคอนกรีตแตกหรือหลุดร่อนออกมาเป็นแผ่นใหญ่ (Portland Cement Association 2002) นอกจากนี้การแตกร้าวของคอนกรีตยังส่งผลให้เหล็กเสริมถูกอากาศและอนุภาคสารเคมีชนิดต่างๆ ในอากาศมากยิ่งขึ้น ดังรูป 2-3

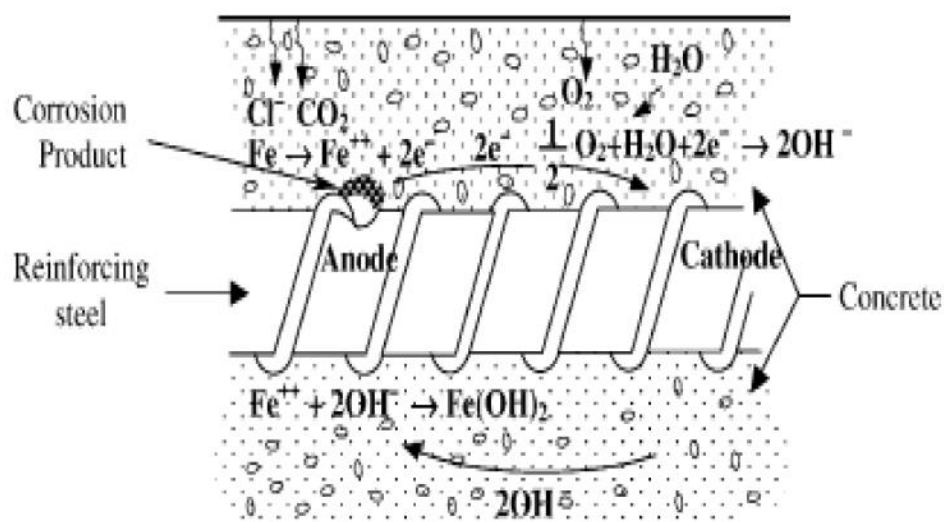


รูป 2-3 การแตกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม (Portland Cement Association 2002)

2.2.1 ชั้นพาสซีเวชันของเหล็กเสริม (Passivation layer) และการเกิดสนิม

โดยธรรมชาติของเหล็กเสริมซึ่งเป็นโลหะแล้ว การกัดกร่อนหรือเป็นสนิมถือเป็นเรื่องปกติ แต่ในเหล็กเสริมซึ่งอยู่ในคอนกรีตนั้น จะเกิดปฏิกิริยาเคมีอัลคาไลด้วยความแตกต่างของคอนกรีต ทำให้เกิดชั้นฟิล์มออกไซด์ต่างๆ ในบริเวณพื้นที่ระหว่างเหล็กเสริมกับเนื้อคอนกรีต ซึ่งเรียกว่า ชั้นพาสซีเวชัน โดยฟิล์มบางๆ นี้ เป็นสิ่งที่ปกป้องเนื้อเหล็กเสริมจากสารเคมีภายนอก ทำให้ไม่เกิดการกัดกร่อนเป็นสนิมเพิ่มเติมของเนื้อเหล็ก ชั้นพาสซีเวชันในเหล็กเสริมเป็นชั้นสารประกอบเคมีออกไซด์ที่มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไปและมีความหนาประมาณ 0.1 - 0.3 นาโนเมตร จากผลการวิจัยของ (Bockris and Reddy 2004)

เนื่องด้วยการปกป้องจากฟิล์มพาสซีเวชัน เหล็กเสริมในคอนกรีตมักจะไม่เกิดสนิมหรือการกัดกร่อนในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป แต่ทว่าเมื่อชั้นพาสซีเวชันถูกทำลายลง จะส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดการกัดกร่อนในอัตราที่เพิ่มขึ้น โดยชั้นพาสซีเวชันฟิล์มจะถูกทำลายเมื่อความเป็นต่างของคอนกรีตลดลง หรือ อนุภาคคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตมีปริมาณมากขึ้น โดยในเหล็กเสริมที่มีฟิล์มพาสซีเวชัน การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณ 0.1 ไมโครเมตรต่อปี ซึ่งถือว่าเป็นค่านี้น้อยและไม่นับสำคัญ แต่ในเหล็กเสริมที่ไม่มีชั้นพาสซีเวชัน อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นมากกว่าค่านี้ถึง 1000 เท่า (ACI Committee 222 2001) ดังรูป 2-4



รูป 2-4 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเมื่อชั้นพาสซีเวชันถูกทำลาย

2.2.2 ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน (Chloride content corrosion threshold)

จากการศึกษาของ (Lewis 1961) และ (Berman 1972) ได้แสดงให้เห็นถึงค่าปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน (Chloride content corrosion threshold) กล่าวคือค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำที่บริเวณผิวของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเมื่อมีความชื้น อากาศ และปัจจัยอื่นๆ ที่พอเพียงต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยมีค่าประมาณ 0.2-0.3 % ของคลอไรด์ไอออนต่อซีเมนต์ 1 กรัม หรือ 330 ppm ปริมาณคลอไรด์ต่อน้ำหนักคอนกรีต ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต 1.3 lb/yd^3 ในระบบหน่วยอังกฤษ หรือปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต 0.771 kg/m^3 ในระบบหน่วยวัดระหว่างประเทศ (International System of Units)

2.2.3 ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (Carbonation Reaction)

ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน เป็นปฏิกิริยาระหว่างก๊าซ CO_2 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรด เข้าไปทำปฏิกิริยากับ ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว (Alkaline Cement Paste) โดยทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 เป็นหลัก ทำให้ได้ แคลเซียมคาร์บอเนต CaCO_3 นอกจากนี้ยังอาจเกิดสารประกอบอื่นๆ เช่น ไฮเดรตของซิลิกา ไฮเดรตของอลูมินา การเกิดคาร์บอนเนชันโดยตัวของมันเองไม่ได้ทำให้คอนกรีตเสียหายแต่จะทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง โดยปกติคอนกรีตมีความเป็นด่างสูงโดยมีค่า pH 12.6 - 13.5 และอาจลดลงเหลือเพียง 8 - 9 อาจทำให้ชั้นพาสซีเวชันถูกทำลายลงในที่สุด (Sagues, Moreno et al. 1997)

โดยส่วนมากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันที่รุนแรง มักเกิดในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มของคอนกรีต (concrete covering) น้อย และอยู่ในพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงเช่น โครงสร้างตอมอเตอร์ไฟฟ้าบีทีเอสในเมืองหลวงซึ่งมีปริมาณรถยนต์หนาแน่น

2.2.4 การทำลายโดยซัลเฟต

เกลือซัลเฟตที่อยู่ในรูปสารละลายต่างๆ สามารถทำอันตรายต่อเนื้อคอนกรีตได้ โดยเกลือซัลเฟต จะมีอยู่มากในน้ำกร่อยและน้ำทะเล หรือบริเวณดินริมทะเล นอกจากนี้ยังพบได้ในท่อน้ำเสียจากบ้านเรือนอีกด้วย ตัวอย่างเกลือซัลเฟตที่พบมากได้ธรรมชาติได้แก่ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) และ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นต้น โดยซัลเฟตในรูปสารละลาย (SO_4^{2-}) จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต เช่น CH C-S-H และ C_3A และ C_4AF ทำให้เกิด สาร ettringite สารประเภท M-S-H และเกิดการสะสมของยิปซัมกับ Brucite ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสาน และมีความหนาแน่นต่ำ จึงขยายตัวเพิ่มปริมาตรและดันเนื้อคอนกรีตให้

แตกออก ส่วนมากคอนกรีตเสริมเหล็กจะได้รับผลกระทบจากซัลเฟตอย่างรุนแรงเมื่อสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง และอยู่ในวงจรเปียกแห้งอย่างสม่ำเสมอ

ปัจจัยที่ผลต่อการทำลายของซัลเฟตได้แก่ ความเข้มข้นของซัลเฟตในสิ่งแวดล้อม ยิ่งมีความเข้มข้นมากอัตราการเสื่อมสภาพก็จะเร็วมากขึ้นไปด้วย หากคอนกรีตมีความที่บ่งน้ำหรืออัตราการซึมผ่านได้ต่ำ จะช่วยให้ซัลเฟตซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้น้อยลงและเสื่อมสภาพช้าลงตามไปด้วย นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF ต่ำ จะมีความทนทานต่อซัลเฟตสูงกว่า เนื่องจากสารละลายเกลือซัลเฟต จะทำปฏิกิริยาให้เกิดสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตได้น้อยลง และถ้าสามารถลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตลงก็จะช่วยลดความรุนแรงของปฏิกิริยาที่เป็นอันตรายได้ด้วย ซึ่งสามารถทำได้โดยการใส่สารปอซโซลานแทนปูนซีเมนต์บางส่วน

2.2.5 ระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมขั้นต่ำในคอนกรีต (Minimum concrete covering)

ระยะเวลาของเหล็กเสริมในคอนกรีตนั้นมีเพื่อป้องกันมิให้เหล็กเสริมสัมผัสกับอากาศโดยตรง และยังช่วยป้องกันการที่เหล็กเสริมจะเกิดปฏิกิริยากับสารเคมีอื่น ๆ ที่ซึมลึกเข้ามาในเนื้อคอนกรีตอีกด้วย โดยนับระยะจากผิวคอนกรีตวัดเข้าไปจนถึงผิวเหล็กด้านนอกสุดที่อยู่ภายในคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตหล่อในที่ ควรมีระยะคอนกรีตหุ้มผิวเหล็กหรือระยะหุ้มของคอนกรีตต่ำสุดตามมาตรฐาน วสท. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งจัดทำขึ้นโดยยึดแนวของ (ACI Committee 318 1992) เป็นหลัก โดยได้ให้ค่าระยะหุ้มเหล็กเสริมขั้นต่ำในคอนกรีตสำหรับการใช้งานต่าง ๆ ไว้ดังตารางที่ 2-1 และ ยังได้มีการกำหนดระยะหุ้มของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้งานในบริเวณที่อยู่ในสถานะที่ถูกไอทะเลหรือสัมผัสกับทะเลโดยตรงอีกด้วยตามมาตรฐาน (ACI 1997) ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-1 ระยะหุ้มของคอนกรีตต่ำสุดตามมาตรฐาน วสท.

ชนิดของโครงสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (ซม.)
1. ฐานรากและองค์อาคารส่วนสำคัญที่สัมผัสกับดินตลอดเวลา	7.5
2. คอนกรีตที่สัมผัสกับดินหรือถูกแดดถูกฝน	
– สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 16 มม.	5
– สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	5
3. คอนกรีตที่ไม่สัมผัสกับดินหรือไม่ถูกแดดไม่ถูกฝน	-
3.1 ในแผ่นพื้น ผนัง และตง	-
– สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 44 มม.	4
– สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	2
3.2 ในคาน	-
– เหล็กเสริมหลักหรือเหล็กลูกตั้ง	3
3.3 ในเสา	-
– เหล็กปลอกเดี่ยวหรือเหล็กปลอกเกลียว	3.5
3.4 ในคอนกรีตเปลือบบางและพื้นแผ่นพับ	-
– สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 16 มม.	2
– สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	1.5
4. ให้เพิ่มความหนาของคอนกรีตหุ้มผิวเหล็กได้ตามความเหมาะสม เมื่ออยู่ในสภาวะรุนแรง หรือบรรยากาศที่อาจก่อให้เกิดการผุกร่อน	-
5. หากมีการใช้ร่วมกับมาตรฐานอื่นใด เช่น โครงสร้างผนังบาง หรือการป้องกันอัคคีภัย ให้ใช้ค่าที่มากกว่าเป็นมาตรฐาน	--

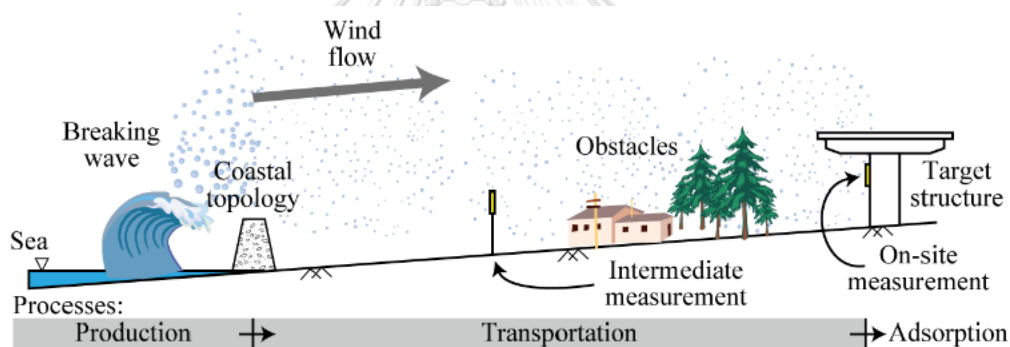
ตารางที่ 2-2 ระยะหุ้มของคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมใกล้ทะเลตามมาตรฐาน ACI 357R-84

Exposure Zone	Cover over reinforcing steel (mm)	Cover over post-tensioning ducts (mm)
Atmospheric zone not subject to salt spray (บริเวณที่ถูกไอทะเลแต่ไม่ถูกน้ำทะเลโดยตรง)	50	75
Splash and atmospheric zone subject to salt spray (บริเวณที่ถูกน้ำทะเลสาดกระเซ็นอยู่เป็นประจำ)	65	90
Submerged (จมอยู่ในน้ำทะเล)	50	75
Cover of stirrups (ระยะหุ้มของเหล็กปลอก)	น้อยกว่าเลขข้างบน 13 mm	–

2.3 อนุภาคคลอไรด์ในอากาศ (Airborne chloride particle)

สำหรับสาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่มีระยะห่างจากผิวน้ำทะเลแต่กลับได้รับผลการเสื่อมสภาพ นั้น เกิดจากสิ่งที่เรียกว่า “อนุภาคคลอไรด์ในอากาศ” ซึ่งเกิดขึ้นโดยธรรมชาติ เมื่อยอดคลื่นปะทะเข้ากับสิ่งกีดขวาง ละอองน้ำทะเลจะกระเซ็นขึ้นไปในอากาศและถูกพัดพาไปกับกระแสลมเข้าสู่ชายฝั่ง เมื่ออนุภาคเหล่านั้นพัดผ่านโครงสร้างก็จะเกาะติดกับพื้นผิวคอนกรีต อนุภาคคลอไรด์จะค่อยๆ ซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยตามระยะเวลาที่ผ่านมา ดังรูป 2-5

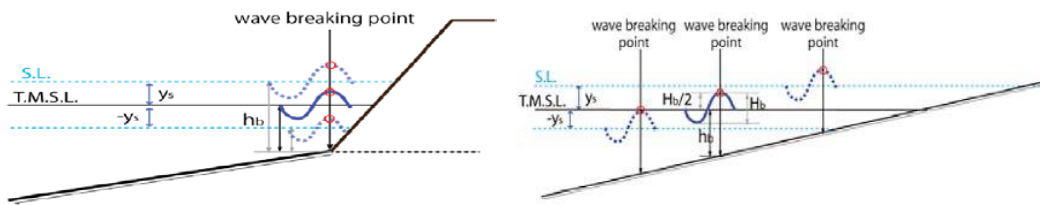
เนื่องด้วยปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคคลอไรด์ที่สามารถเกาะติดกับพื้นผิวคอนกรีตนั้น มีหลากหลายปัจจัย เช่น ความสูงและความรุนแรงของคลื่น ลักษณะของสิ่งกีดขวางที่คลื่นเข้ากระทบ ลักษณะภูมิประเทศจากจุดกำเนิดอนุภาคถึงพื้นผิวที่ได้รับผลกระทบ ทิศทางและความเร็วลม ปริมาณน้ำฝน จึงเป็นสาเหตุให้การกระจายความเข้มข้นของอนุภาคคลอไรด์บนพื้นผิวที่เกาะติด เป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ



รูป 2-5 การเคลื่อนตัวของอนุภาคคลอไรด์เข้าสู่โครงสร้างในชายฝั่ง

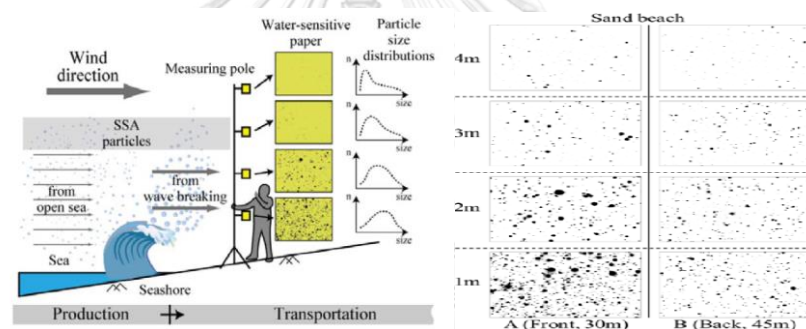
2.3.1 การกำเนิดอนุภาคคลอไรด์ในอากาศ

อนุภาคคลอไรด์ในอากาศประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ น้ำ และ คลอไรด์ไอออน เมื่อยอดคลื่นกระทบสิ่งกีดขวาง ขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดแปรผันตามลักษณะทางกายภาพของสิ่งกีดขวางหรือชายฝั่ง และ ลักษณะของสภาพภูมิอากาศในขณะนั้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ชายฝั่งที่มีลักษณะทางกายภาพลาดชัน ยอดคลื่นจะกระทบด้วยความรุนแรงมากกว่าชายฝั่งที่มีความชันและราบเรียบ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของคลื่นอย่างกะทันหัน ทำให้อนุภาคน้ำทะเลสาดกระเซ็นขึ้นสู่อากาศมากกว่า ส่งผลให้เกิดอนุภาคคลอไรด์ในอากาศมากขึ้นตามไปด้วย ดังรูป 2-6 เมื่อยอดคลื่นน้ำทะเลกระเซ็นขึ้นสู่อากาศถึงระยะความสูงหนึ่ง ก็จะถูกลมพัดพาเข้าสู่ชายฝั่ง และค่อยๆ ตกกลงสู่พื้นในที่สุดด้วยผลจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Saeki, Takeda et al. 2010)



รูป 2-6 ความถี่ในการปะทะของยอดคลื่นของหน้าพื้นที่ลาดชัน(ชายหาด) และดินเรียบ(खा)

(Bongochgetsakul and Kokubo 2011) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของอนุภาคน้ำทะเลที่ลอยเข้าสู่ชายฝั่งในจังหวัดโคจิ ประเทศญี่ปุ่น โดยการศึกษานี้ได้จำแนกขนาดของอนุภาค ณ ความสูงต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ดักจับอนุภาคซึ่งได้ติดกระดาษที่มีความไวต่อน้ำเป็นพิเศษเอาไว้ (Water Sensitive Paper Analysis) ดังรูป 2-7 เมื่ออนุภาคน้ำทะเลในอากาศลอยมากระทบกระดาษดังกล่าว จะเกิดเป็นคราบซึ่งง่ายต่อการมองเห็น ซึ่งจะนำไปกระดาษดังกล่าวไปประมวลผลเป็นรูปภาพและวัดขนาดของอนุภาคที่ตกกระทบ



รูป 2-7 ผลการเก็บความถี่ในการกระจายตัวของอนุภาคน้ำทะเลในอากาศ

จากการศึกษาทดลองดังกล่าวพบว่า ในเงื่อนไขที่ลักษณะภูมิอากาศ ภูมิประเทศ สถานที่ทิศทางและความเร็วมีค่าเท่ากัน ในความสูงที่ต่ำกว่าหรือใกล้พื้นดิน มีปริมาณการเกาะติดของอนุภาคน้ำทะเลที่มากกว่าบริเวณที่มีความสูงห่างจากพื้นดินขึ้นไป และอนุภาคน้ำทะเลที่มีขนาดใหญ่ มีการกระจายตัวอยู่บริเวณที่มีความสูงใกล้เคียงพื้นดิน ส่วนอนุภาคน้ำทะเลที่เล็กกว่านั้น จะถูกกระแสลมพัดพาไปได้ไกลกว่าและตกลงสู่พื้นดินช้ากว่า จึงสรุปได้ว่าในความสูงที่ต่ำกว่านั้น จะมีความเข้มข้นของอนุภาคคลอไรด์สูงกว่า

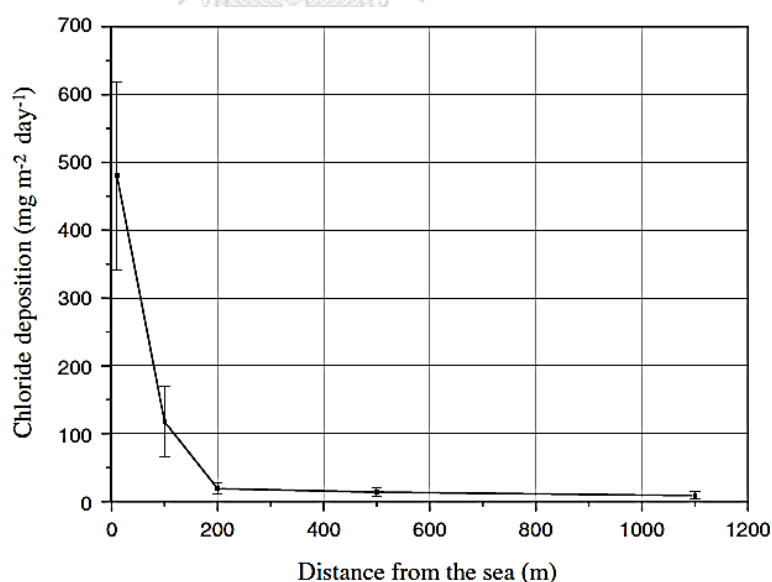
(Meira, Andrade et al. 2007) ศึกษาการพัดพาของอนุภาคคลอไรด์ในอากาศโดยการใช้วิธีเก็บปริมาณอนุภาคด้วยขวดแก้วและเชือกเปียก (Wet candle collection method) ตามมาตรฐาน ASTM G140 โดยตั้งสถานีวัดไว้ที่ชายฝั่งนครโจเอาเปสโซอา ตะวันออกเฉียงเหนือของ

ประเทศบราซิล (João Pessoa, Paraíba, Brazil) โดยตั้งสถานีไว้ที่ระยะ 10 100 200 500 1100 เมตร จากน้ำทะเล ดังรูป 2-8



รูป 2-8 จุดตั้งสถานีวัดค่าอนุภาคคลอไรด์ ณ ชายฝั่งนครโจอาเปสโซอา

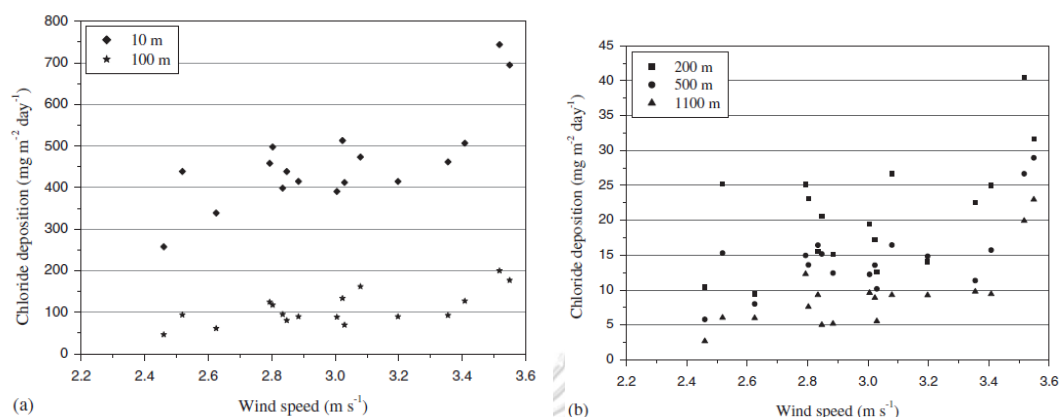
โดยผลการทดลองทำให้ทราบปริมาณอนุภาคคลอไรด์จากสถานี ณ จุดต่างๆ แสดงดังรูป 2-9 พบว่า หลังจาก 100 เมตรแรกจากน้ำทะเล ปริมาณอนุภาคคลอไรด์ที่วัดได้จากสถานีมีค่าลดลงอย่างมีนัยยะ และหลังจาก 200 เมตรเป็นต้นไป ค่าปริมาณอนุภาคคลอไรด์ที่วัดได้มีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับ 100 เมตรแรก



รูป 2-9 ค่าปริมาณอนุภาคคลอไรด์จากสถานีวัดค่าที่ระยะทางต่างๆ

นอกจากนี้พบว่า ความเร็วลมที่พัดเข้าชายฝั่ง มีผลกระทบต่อปริมาณอนุภาคคลอไรด์ที่วัดได้อย่างมาก เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้อนุภาคคลอไรด์ในอากาศเคลื่อนที่เข้าหาชายฝั่งจากทะเล กระแสลมที่รุนแรงสามารถพัดพาอนุภาคน้ำทะเลที่มีขนาดใหญ่ไปได้ไกลขึ้นก่อนจะตกลงสู่พื้นดินด้วย

แรงโน้มถ่วง สถานีวัดสามารถเก็บค่าปริมาณอนุภาคคลอไรด์ที่เข้มข้นขึ้นเมื่อกระแสลมแรงขึ้นตามไปด้วย แต่ผลกระทบนี้มีความสำคัญน้อยลงสำหรับสถานีวัดที่อยู่ไกลออกไปจากทะเลมากขึ้น ดังรูป 2-10



รูป 2-10 ค่าความเข้มข้นของอนุภาคคลอไรด์เปรียบเทียบกับความแรงของกระแสลมและระยะทาง

2.3.2 การซึมผ่านของอนุภาคคลอไรด์ในคอนกรีต

อนุภาคคลอไรด์ในสภาพแวดล้อม เป็นตัวการทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตลดลง เมื่อความเป็นต่างลดลงจะทำให้ ชั้นพาสีเวชันของเหล็กเสริมถูกทำลายลง ซึ่งชั้นพาสีเวชันเป็นสิ่งที่ยกกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิม หากมีน้ำและออกซิเจนที่เพียงพอ จะเป็นสาเหตุให้เหล็กเสริมเกิดสนิมและดันคอนกรีตให้แตกออก กล่าวคือ อนุภาคคลอไรด์ไม่ได้ทำลายเนื้อคอนกรีตโดยตรง แต่จะทำลายชั้นพาสีเวชัน อันส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมก่อนเนื้อคอนกรีตจะแตกกร่อนออก และทำให้ น้ำ อากาศ และสารเคมี เข้าไปทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมมากยิ่งขึ้นไปอีก

โดยปกติอนุภาคคลอไรด์ส่วนหนึ่งจะมีการเจือปนอยู่ในขั้นตอนการผสมคอนกรีตอยู่แล้ว ไม่ว่าจะมาจากน้ำประปาที่ใช้ผสม หรือ ทรายที่อยู่ใกล้กับน้ำกร่อยและน้ำทะเล ซึ่งตาม วสท.1014-40 ได้มีการกำหนดค่าคลอไรด์พื้นฐานในคอนกรีตสดที่ยอมรับได้ แต่ปัญหาที่แท้จริงมักจะเกิดขึ้นจากอนุภาคคลอไรด์ที่โครงสร้างได้รับขณะอยู่ในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งวิธีที่อนุภาคคลอไรด์จะซึมลึกเข้าไปในเนื้อคอนกรีตมีดังต่อไปนี้ (Kim, McCarter et al. 2016)

1. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary Suction)
2. การแพร่เมื่ออนุภาคคลอไรด์ภายนอกมีความเข้มข้นสูงกว่าจึงแพร่เข้าไปข้างใน (Diffusion)
3. การซึมผ่านเข้าไปโดยแรงดันน้ำ (Pore pressure)

แหล่งของอนุภาคคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีด้วยแรงดันน้ำ แต่ว่าไม่มีออกซิเจนหรืออาจมีออกซิเจนที่ละลายน้ำอยู่แต่ก็ถือว่าปริมาณน้อยมาก จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมาก จุดที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณ ที่โดนคลื่นสาดกระเซ็นและมีวงจรเปียกสลับแห้ง

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งการเกาะติดพื้นผิวและถูกดูดซึมเข้าไป (Capillary Suction) จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกผิวคอนกรีตแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตจะระเหยออกไปกลายเป็นคราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้น อนุภาคคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ (Diffusion) ซึ่งในแต่ละวงรอบของการเปียกและการแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่ บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตดูดซึมน้ำได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก ดังนั้น การแพร่ของอนุภาคคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

2.3.3 สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึดโดย กลไกดังต่อไปนี้

1. Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น ผลผลิตของหรือแม้แต่น้ำในโครงสร้างของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน
2. Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น CSH และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น มวลรวม หรือ ผงฝุ่น หินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำอยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้

ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นปริมาณมาก ก็จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

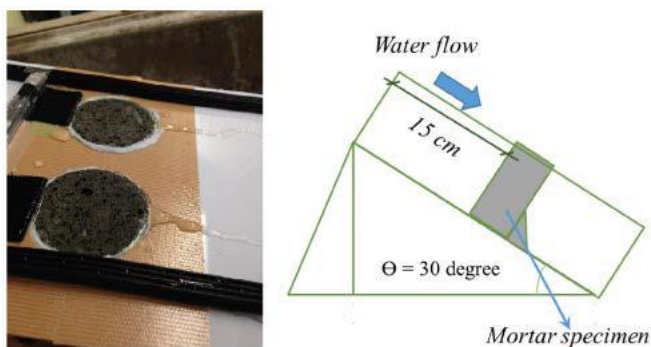
2.3.4 ผลจากการชะล้างผิวของน้ำฝน (Washout Effect)

(Wattanapornprom and Ishida 2017) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณน้ำฝนที่มีต่ออนุภาคคลอไรด์ที่เกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของคอนกรีต โดยพบว่าด้วยปริมาณน้ำฝนที่น้อย (1-3 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) ไม่เพียงพอที่จะชะล้างอนุภาคคลอไรด์บนพื้นผิวคอนกรีตออกไปได้ แต่เมื่อฝนตกรุนแรงถึง 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงหรือมากกว่า ความเข้มข้นของอนุภาคคลอไรด์บนพื้นผิวคอนกรีตจะถูกชะล้างออกไปทั้งหมด และเมื่อความเข้มข้นที่ผิวนอกน้อยกว่าความเข้มข้นภายใน จะทำให้อนุภาคคลอไรด์เกิดการแพร่ย้อนกลับออกมาข้างนอก ดังรูป 2-11



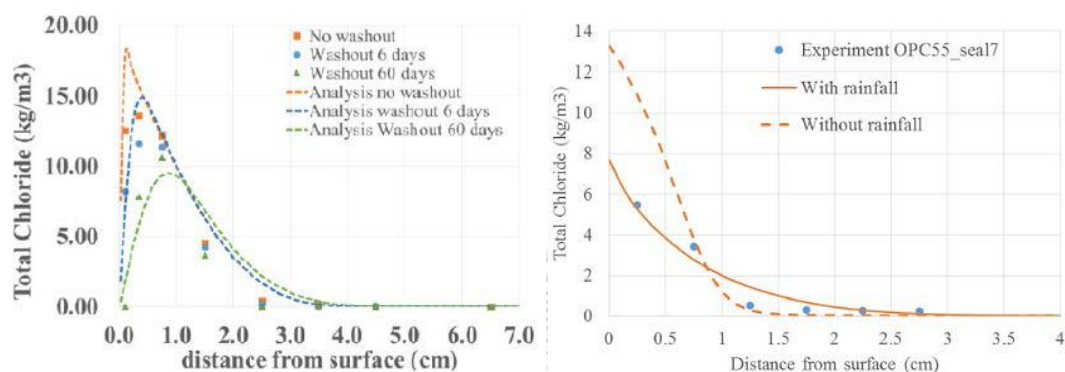
รูป 2-11 รูปแสดงการแพร่ย้อนกลับของอนุภาคคลอไรด์เมื่อถูกชะล้างโดยน้ำฝน

โดยได้ทำการทดลองทั้งในห้องปฏิบัติการและการทดลองภาคสนาม สำหรับชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ในห้องปฏิบัติการที่ทำการเคลือบ epoxy ไว้ที่พื้นผิวและแช่ไว้ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% เป็นเวลา 90 วัน และตั้งไว้บนพื้นเอียง 30 องศา และมีน้ำไหลผ่านด้วยอัตราเทียบเท่า 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ดังแสดงในรูป 2-12



รูป 2-12 ปฏิบัติการทดลองผลกระทบจากการชะล้างผิว (R. Wattanapornprom et al. 2017)

และในส่วนของการทดลองภาคสนาม ชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ได้ถูกนำไปติดตั้งโดยได้รับผลกระทบจากอนุภาคคลอไรด์ในอากาศและน้ำฝน โดยได้รับข้อมูลสภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดอากาศ AMEDAS ของสำนักอุตุนิยมวิทยา ประเทศญี่ปุ่น (Japan Meteorological Agency) ซึ่งนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลประกอบผลการวิจัย ดังรูป 2-13



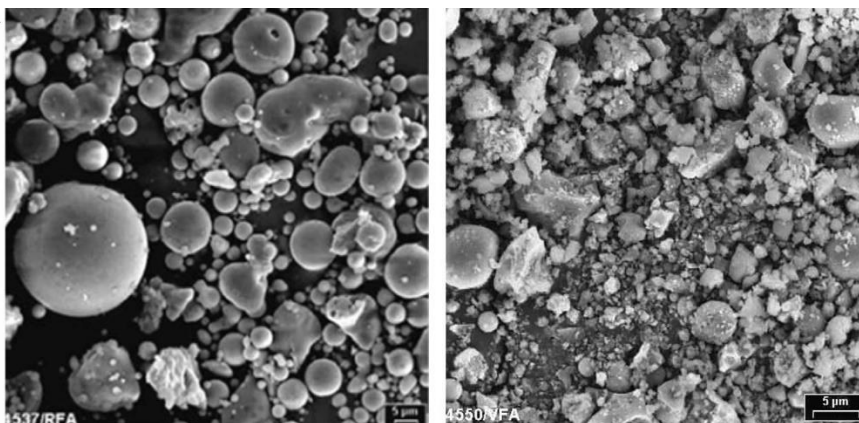
รูป 2-13 ผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ(ซ้าย) และ ผลการทดลองจากปฏิบัติการภาคสนาม(ขวา)
(R. Wattanapomprom et al. 2017)

จากผลการทดลองที่ได้ ทำให้สรุปได้ว่า การที่ปริมาณน้ำฝนมีความเข้มข้นเกิน 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ส่งผลทำให้เกิดการชะล้างของอนุภาคคลอไรด์ที่อยู่บนพื้นผิวคอนกรีต

2.4 คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

2.4.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

(ACI Committee 232 2002) ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยในคอนกรีต ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต ทำให้มีการใช้เถ้าลอยผสมคอนกรีตเป็นจำนวนมากขึ้นเพื่อลดต้นทุนในการผลิตพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต และปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต เมื่อเถ้าลอยผสมกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และน้ำ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นได้ผลิตภัณฑ์เป็นเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(C-S-H gel) กับเจลแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต(C-A-H gel) และสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และเนื่องจากเถ้าลอยมีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นเม็ดกลม ความละเอียดสูง ลักษณะทางกายภาพคล้ายปูนซีเมนต์และมี SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ดังรูป 2-14 ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มคุณสมบัติที่ดีให้ทั้งคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัว



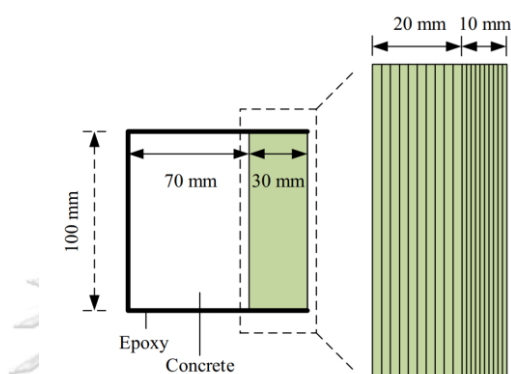
รูป 2-14 ลักษณะอนุภาคของ Fly Ash จากกล้อง SEM (Sanjay Kumar (2010))

(Chindaprasirt, Jaturapitakkul et al. 2007). ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าลอยมีหลากหลายประการ ในคอนกรีตสด จะช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ ช่วยลดอุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มต้นเพื่อป้องกันการแตกร้าว เพิ่มความต้านทานต่อสารละลายเกลือซัลเฟต ลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยา alkali-silica ในคอนกรีตที่แข็งตัว จะการช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีต และที่สำคัญคือช่วยเพิ่มความทึบน้ำของคอนกรีต การที่อนุภาคน้ำสามารถซึมผ่านคอนกรีตได้มากหรือน้อยขึ้นกับความพรุนของคอนกรีต และความสามารถในการซึมผ่านได้ ซึ่งมาจากหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณซีเมนต์ต่อน้ำ ขนาดคละของมวลรวม ระยะการบ่ม ลักษณะและขนาดของรูพรุนในคอนกรีต เป็นต้น

2.4.2 การศึกษาการซึมผ่านได้ของอนุภาคคลอไรด์ต่อคอนกรีตผสมเถ้าลอย

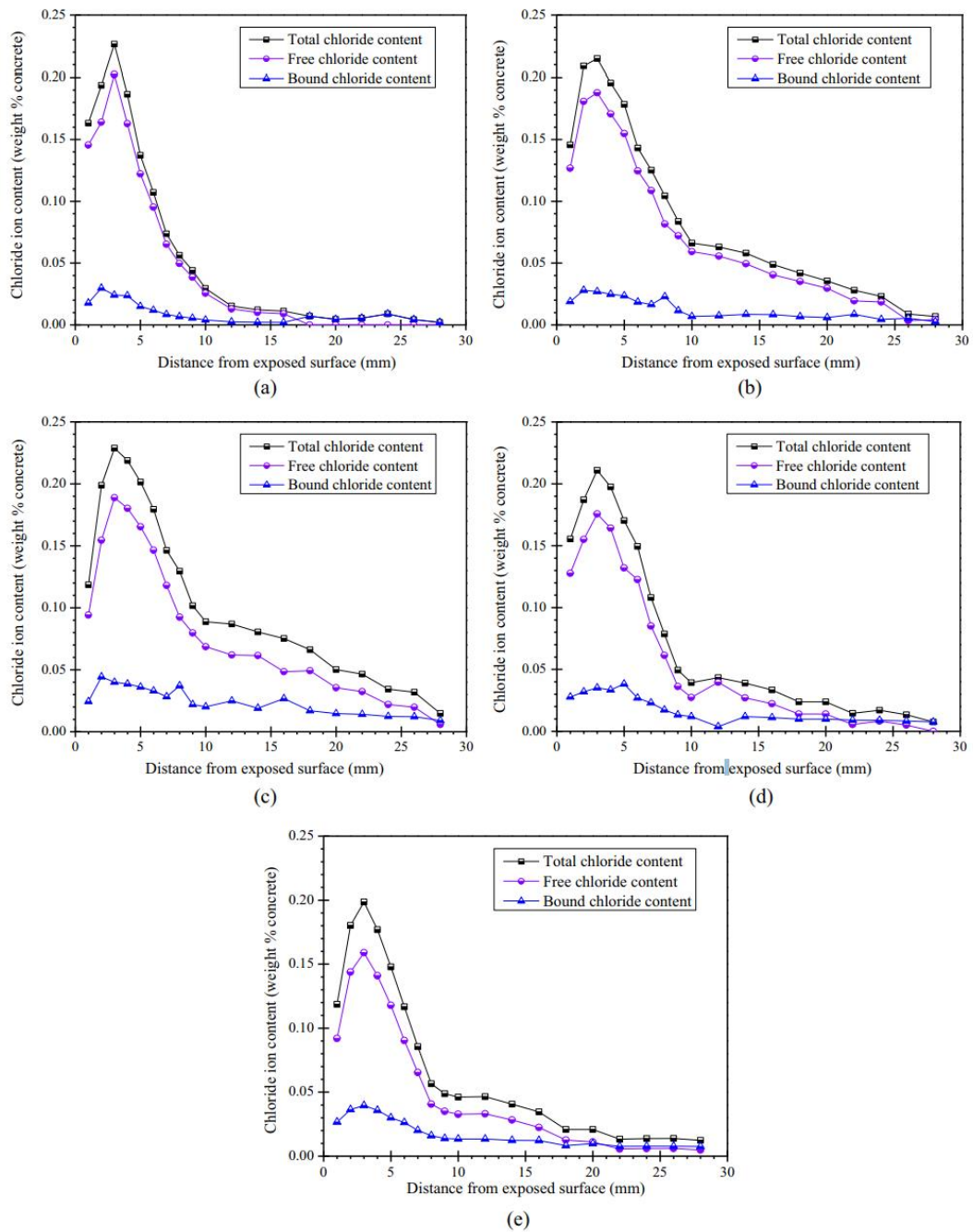
(Liu, Ou et al. 2017) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใส่และไม่ใส่เถ้าลอยภายใต้สภาวะบรรยากาศที่ได้รับอนุภาคคลอไรด์ ซึ่งเป็นการศึกษาผลกระทบของการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่ตัวอย่างคอนกรีต ที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอยภายใต้สภาวะใกล้เคียง โดยมิตัวอย่างคอนกรีต 3 ส่วนผสมสำหรับคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ผสมเถ้าลอย ซึ่งมีอัตรา w/c เท่ากับ 0.53, 0.47 และ 0.38 ตามลำดับ และ 2 ส่วนผสมสำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอย 15 เปอร์เซ็นต์และ 30 เปอร์เซ็นต์ ทั้งสองตัวอย่างมี w/c เท่ากับ 0.47 เมื่อผสมเสร็จแล้ว ตัวอย่างทั้งหมดถูกหล่อเข้าแบบขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร และถูกบ่มเป็นเวลาทั้งสิ้น 56 วัน หลังจากนั้นได้ทำการจำลองการเคลื่อนตัวของละอองคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการ ผ่านการใช้สเปรย์ที่บรรจุสารละลาย NaCl 5 เปอร์เซ็นต์ ถูกพ่นเข้าสู่คอนกรีตเป็นเวลา 10 ชั่วโมง/วัน และปล่อยให้ตัวอย่างแห้งเป็นเวลา 14 ชั่วโมง/วัน ทำการทดลองทั้งสิ้น 28 วัน ภายใต้อุณหภูมิที่ 35 องศา และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ (ภาวะอุณหภูมิและความชื้นในเขตร้อนชื้น)

ในส่วนการทดสอบตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมของคลอไรด์แล้วนั้น ได้ตัดตัวอย่างที่ระยะทั้งสิ้น 30 มิลลิเมตร และทำการทดลองหาปริมาณคลอไรด์ โดยแบ่งการหาปริมาณคลอไรด์เป็นช่วงๆ ตามระยะดังนี้ ที่ระยะ 0-10 มิลลิเมตรจากผิวหน้าจากแบ่งวัดคลอไรด์ทุกๆ 1 มิลลิเมตร รวมทั้งสิ้น 10 ค่า ที่ระยะ 10-30 มิลลิเมตรจากผิวหน้า จะแบ่งวัดคลอไรด์ทุกๆ 2 มิลลิเมตร รวมทั้งสิ้น 10 ค่า ดังนั้นในคอนกรีต 1 ตัวอย่างจะวัดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด 20 ค่า ดังรูป 2-15



รูป 2-15 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการวัดปริมาณคลอไรด์

และได้ทำการทดลองหาปริมาณคลอไรด์ทั้งสิ้น 3 ค่า คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด, คลอไรด์อิสระและคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บ ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังรูป 2-16



รูป 2-16 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด, คลอไรด์อิสระและคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บ : (a), (b), (c) ตัวอย่างที่มี w/c เท่ากับ 0.38, 0.47 และ 0.53 ตามลำดับ (d), (e) ตัวอย่างที่ใส่เถ้าลอย 15% และ 30% ตามลำดับ

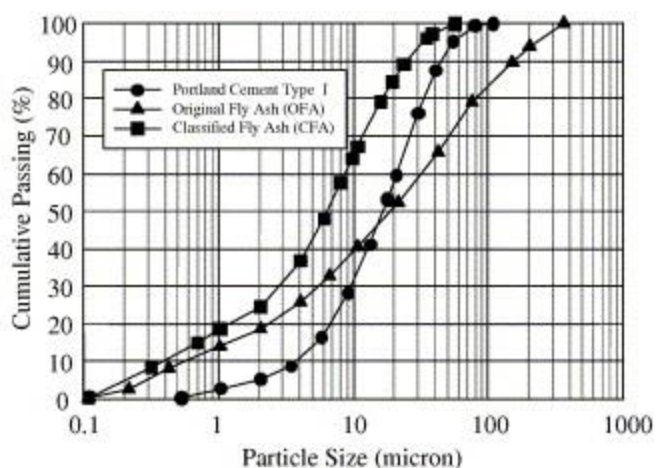
จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด, คลอไรด์อิสระ และคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บ นั้น มีรูปแบบที่ใกล้เคียงกันสำหรับ 0-3 มิลลิเมตรแรก หลังจากนั้นปริมาณคลอไรด์จะลดลงตามความลึกอย่างมีนัยสำคัญ พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคลอไรด์นั้นมาจากผลของการดูดของช่องว่าง capillary และการแพร่ ในช่วงที่มีการพ่นสเปรย์ NaCl นั้น ละอองคลอไรด์ได้สะสมบนผิวหน้าของ

คอนกรีตและดูดซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตผ่านการดูดของช่องว่าง capillary ในส่วนของคลอไรด์อิสระนั้น จะแพร่เข้าสู่คอนกรีตเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของคลอไรด์ภายในและภายนอก คอนกรีต จากนั้นตัวอย่างได้ถูกปล่อยให้แห้ง ซึ่งเมื่อคอนกรีตแห้งแล้วนั้นน้ำที่สะสมอยู่ในช่องว่างจะ ระเหยออกมา และทิ้งคลอไรด์ไว้ภายในเนื้อคอนกรีต หลังจากที่ตัวอย่างคอนกรีตผ่านวัฏจักรเปียก สลับกับแห้ง พบว่าปริมาณคลอไรด์มากที่สุดจะเกิดขึ้นเพียงไม่กี่มิลลิเมตรจากผิวหน้าของคอนกรีต

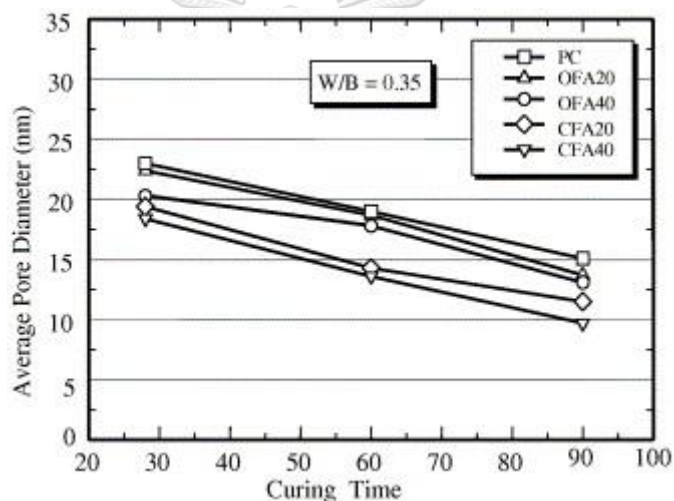
ในส่วนของอัตราส่วน w/c นั้นส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์และสัมประสิทธิ์ การแพร่ของคลอไรด์ภายใต้สภาวะแวดล้อมทางทะเลอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือความสามารถในการ กักเก็บคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ w/c อีกทั้งยังพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/c จาก 0.38 ถึง 0.53 จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้นด้วย ในส่วนของการใส่เถ้าลอย นั้นจะสามารถลดสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ภายใต้สภาวะแวดล้อมทางทะเลได้

ในส่วนกลไกการเคลื่อนที่ของละอองคลอไรด์นั้น จะมีความเกี่ยวข้องอย่างมีนัยกับการเรียง ตัวของช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต เมื่ออัตราส่วน w/c มีค่ามากจะส่งผลให้อัตราส่วนช่องว่างขนาดใหญ่ต่อช่องว่างรวมนั้นมีค่ามาก ซึ่งทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์เกิดมากขึ้น เถ้าลอยนั้นจะมี คุณสมบัติในการลดอัตราส่วนของช่องว่างขนาดใหญ่นี้ จากเหตุผลนี้ให้สามารถลดสามารถซึมผ่านของ คลอไรด์อย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการศึกษาของ (Chindaprasirt, Jaturapitakkul et al. 2005) ได้ทดสอบการผสม เถ้าลอยในคอนกรีตโดยใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียด (Fineness) ที่แตกต่างกัน แสดงดังรูป 2-17 โดยพบว่า Fly Ash ที่มีความละเอียดมากกว่า สามารถให้กำลังของคอนกรีตมากขึ้นเนื่องมาจาก ความสามารถในการเข้าไปเติมเต็มช่องว่างในขณะที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่ง CFA (Classified Fly Ash) คือ Fly Ash ที่นำมาคัดกรองให้มีขนาดอนุภาคละเอียด (particle size) ให้เล็กลง หรือค่าความ ละเอียด (fineness) มากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการซึมผ่าน (permeability) ที่ลดลง เมื่อเทียบกับ Fly Ash ที่มีความละเอียดต่ำกว่า (อนุภาคใหญ่กว่า) ดังแสดง ในรูป 2-18 และนอกจากนี้ (Papadakis 2000) ได้ทำการศึกษา Fly Ash ที่มีปริมาณแคลเซียมสูง หรือมีองค์ประกอบของ CaO อยู่มาก พบว่าใน Fly Ash ที่มี CaO มาก จะช่วยเพิ่มกำลังและลดความ พรุนของมอร์ตาร์ได้ เนื่องจาก ผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานให้ calcium silicate hydrate (C-S-H) และ Calcium aluminate ซึ่งมีความสามารถในการเติมเต็มช่องว่างในขณะที่คอนกรีตเซตตัวได้



รูป 2-17 ความละเอียดของเถ้าลอยที่นำมาทดสอบ (Fineness)



รูป 2-18 ขนาดช่องว่างเฉลี่ยในเนื้อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยความละเอียดแตกต่างกัน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

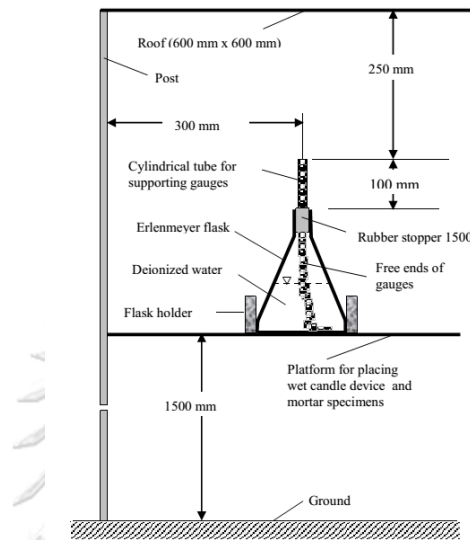
2.5 วิธีการวัดคลอไรด์ในอากาศ

วิธีการวัดคลอไรด์ในอากาศนั้น สามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีการที่มีการนิยมนั้น จะมี 4 วิธีหลักด้วยกัน คือ

1) การวัดโดยใช้วิธีการ Wet Candle

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีความนิยมในประเทศอเมริกา และ ยุโรป เนื่องจากเป็นวิธีการตามมาตรฐาน (ASTM G140-02) และ (ISO 9225) โดยอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยเทียนไข หรือแท่งแว็กซ์ โดยเทียนไขจะถูกพันด้วยผ้าก๊อชรอบๆ และปลายผ้าก๊อชจะจุ่มลงในขวดทดลองที่มีน้ำกลั่นอยู่ด้านใน

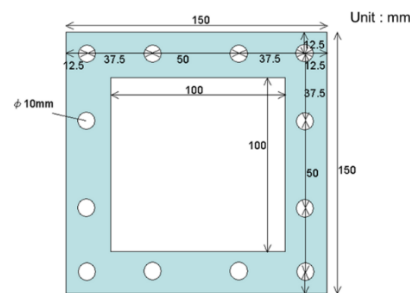
ชุดอุปกรณ์จะวางอยู่บริเวณริมทะเล ตามระยะเวลาที่กำหนด เมื่อครบกำหนดแล้ว จึงจะนำน้ำที่อยู่ในหลอดแก้วทดลองไปไตเตรท เพื่อหาปริมาณคลอไรด์ วิธีการนี้ สามารถรวมปริมาณคลอไรด์ได้จากทุกทิศทาง แต่อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งการวางก็มีความสำคัญมาก หากวางใกล้กำแพง หรือว่ามีสิ่งกีดขวางก็อาจทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนได้ ดังรูป 2-19



รูป 2-19 อุปกรณ์ Wet candle.

2) การวัดโดยใช้ผ้าก๊อซแห้ง (Dry Gauze)

การวัดปริมาณคลอไรด์ในอากาศโดยใช้ผ้าก๊อซแห้ง (Dry gauze) นั้น สามารถทำได้โดยการนำผ้าก๊อซ สะอาด และแห้ง ไปติดบนกรอบพลาสติก โดยผ้าก๊อซควรมีขนาดประมาณ 10 x 10 เซนติเมตร หลังจากนั้นจึงนำไปไว้ในบริเวณที่ต้องการวัดไอทะเล เป็นระยะเวลาประมาณ 1-4 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงจะนำผ้าก๊อซมาละลายให้น้ำกลั่น เพื่อหาปริมาณคลอไรด์ต่อไป วิธีการนี้สามารถเตรียมอุปกรณ์ได้ง่าย แต่ว่ามีข้อเสียคือไม่สามารถเก็บคลอไรด์ในระยะยาวได้ ข้อมูลที่ได้จึงไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนปริมาณคลอไรด์ในแต่ละพื้นที่ได้ ดังรูป 2-20



รูป 2-20 อุปกรณ์ Dry Gauze

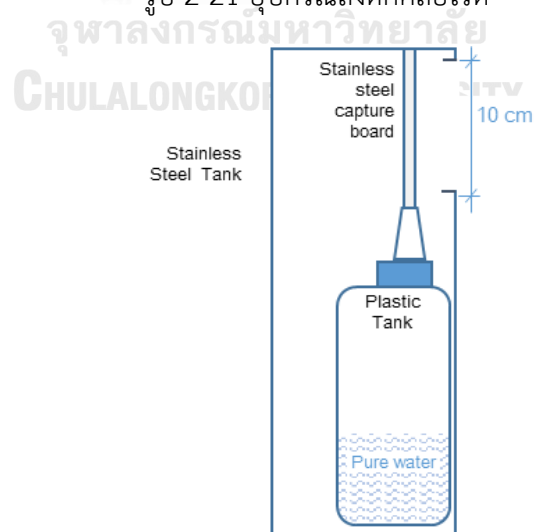
3) การวัดโดยใช้ถังดักคลอไรด์ (Chloride Capture Tank)

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีการนิยมใช้ในประเศญี่ปุ่น โดยผู้เริ่มต้นใช้งานคือหน่วยงาน Public Work Research Institute (PWRI) โดยอุปกรณ์จะประกอบด้วยกล่องสแตนเลส ที่ภายในมีแผ่นสแตนเลส ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร เมื่อลมที่มีคลอไรด์พัดผ่านถึง จะถูกดักจับด้วยแผ่นสแตนเลส และไหลลงไปยังถังพลาสติกที่ต่ออยู่ภายในกล่อง ดังภาพ วิธีการนี้ เป็นที่นิยมใช้สำหรับการเก็บปริมาณคลอไรด์เป็นระยะเวลาานาน เช่น ระยะเวลามากกว่า 1 เดือน

เมื่อตั้งไว้จนครบระยะเวลาที่กำหนด จะทำการล้างแผ่นสแตนเลสด้วยน้ำกลั่นเพื่อรวบรวมปริมาณคลอไรด์ แล้วจึงนำน้ำที่ได้จากการล้างลงไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ ดังรูป 2-21 และรูป 2-22



รูป 2-21 อุปกรณ์ถังดักคลอไรด์



รูป 2-22 แผนภาพอุปกรณ์ถังดักคลอไรด์

4) การวัดโดยใช้แผ่นมอร์ต้า (Mortar Chip)

วิธีการนี้เป็นการนำมอร์ต้ามาใช้ในการดักจับคลอไรด์ สามารถใช้ในการดักจับคลอไรด์ได้เป็นระยะเวลานาน แต่ว่ามีข้อเสียคือ คลอไรด์ที่อยู่บนผิวหน้าของแผ่นมอร์ต้าอาจถูกชะล้างด้วยน้ำฝนได้ รวมถึงในแต่ละงานวิจัยอาจมีการใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบของแต่ละงานวิจัยได้อย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ดี ข้อดีคือสามารถทำแผ่นมอร์ต้าให้มีขนาดเล็ก และติดในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัดได้ ดังรูป 2-23



รูป 2-23 การดักเก็บปริมาณคลอไรด์โดยใช้แผ่นมอร์ต้า

บทที่ 3

ระเบียบและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แนวคิดพื้นฐาน

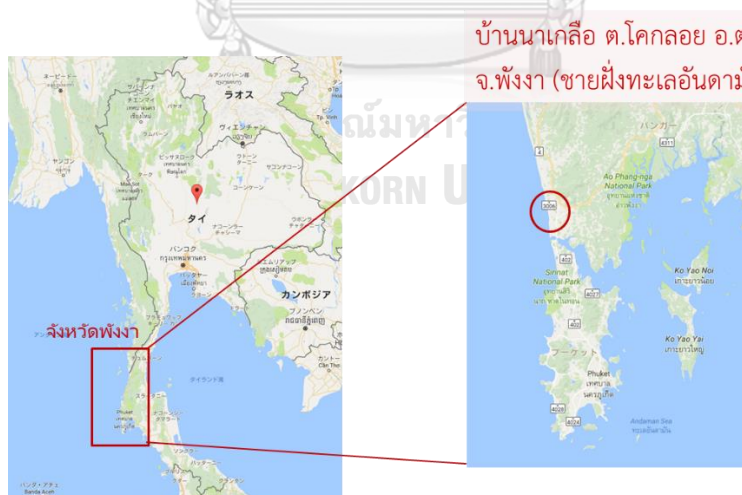
งานวิจัยนี้มุ่งที่จะเก็บข้อมูลปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านตัวอย่างที่มีส่วนประกอบแตกต่างกันในบริเวณชายฝั่งทะเลของจังหวัดพังงาและจังหวัดชลบุรี และนำผลที่ได้จากทั้งสองสถานที่มาเปรียบเทียบกัน โดยศึกษาผลกระทบของการใส่เกลือชนิดต่างๆ ในคอนกรีต โดยได้มีการวางแผนการดำเนินการเป็นขั้นตอนต่างๆคือ การสำรวจพื้นที่ การเตรียมตัวอย่าง การติดตั้งตัวอย่าง การเก็บตัวอย่าง การทดสอบตัวอย่าง และการวิเคราะห์ผล

3.2 การสำรวจพื้นที่

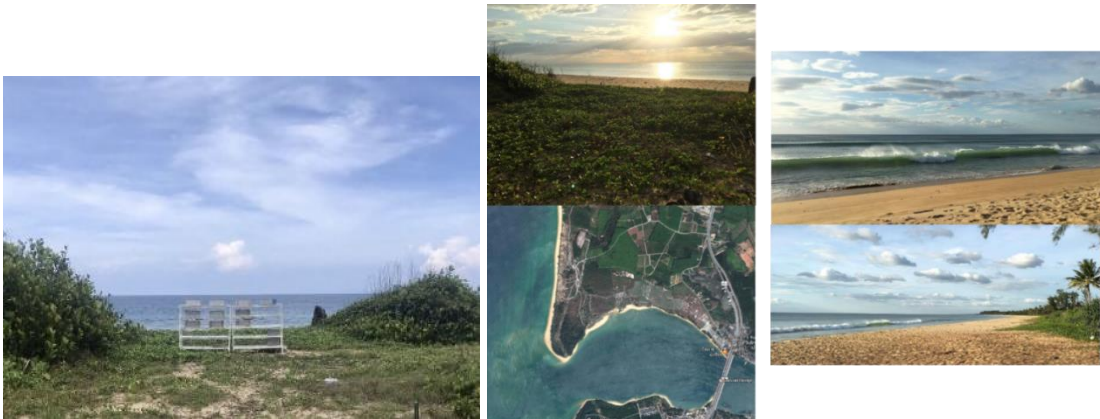
โดยพื้นที่ที่ผู้ศึกษาวิจัยจะทำการลงสำรวจคือ

3.2.1 พื้นที่บ้านนาเกลือ ต.โคกกลอย อ.ตะกั่วทุ่ง จ.พังงา

ได้รับอนุญาตจากทางการรถไฟแห่งประเทศไทยในการเข้าสำรวจพื้นที่จริง โดยพื้นที่สำรวจมีระยะห่างจากทะเลเป็นระยะห่าง 30 เมตร และมีความสูงเป็นระยะ 1 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง โดยทำการสำรวจลักษณะรอยร้าวและการเกิดสนิมของชิ้นส่วนหลายๆชิ้นส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณนั้น ดังรูป 3-1 และ รูป 3-2

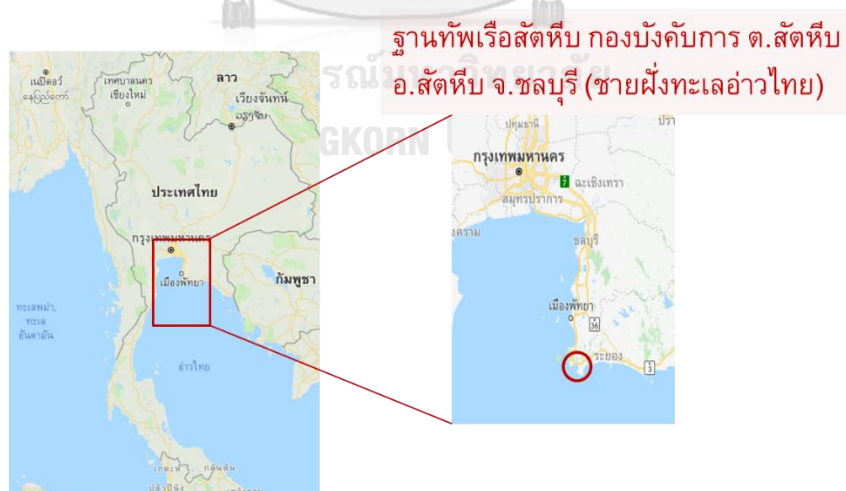


รูป 3-1 แผนที่พื้นที่วางตัวอย่างบริเวณจังหวัดพังงา



รูป 3-2 หน่วยงานและพื้นที่วางตัวอย่างบริเวณจังหวัดพังงา

3.2.2 พื้นที่บริเวณชายหาดม้าน้ำ หน่วยบัญชาการนาวิกโยธิน ต.สัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี
 ได้รับความอนุเคราะห์สถานที่จาก ฐานทัพเรือสัตหีบ ให้เข้าสำรวจพื้นที่จริง โดยพื้นที่สำรวจมี
 ระยะห่างจากทะเลเป็นระยะห่าง 30 เมตร เช่นกัน และมีความสูงเป็นระยะ 3 เมตรจาก
 ระดับน้ำทะเลปานกลาง ดังรูป 3-3 และรูป 3-4 โดยทำการสำรวจลักษณะรอยร้าวและการเกิดสนิม
 ของชิ้นส่วนหลายๆชิ้นส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณนั้น บริเวณที่ตั้งตัวอย่างเป็นพื้นที่
 ห่างจากถนนสุขุมวิท 2.5 กิโลเมตร บริเวณที่ตั้งตัวอย่างไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยมีการเริ่มต้นเก็บตัวอย่าง
 ตั้งแต่เดือนเมษายน ปี 2561 - มกราคม ปี 2562



รูป 3-3 แผนที่พื้นที่วางตัวอย่างบริเวณจังหวัดชลบุรี



รูป 3-4 ลักษณะหน้างานและพื้นที่วางตัวอย่างบริเวณจังหวัดชลบุรี

3.3 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1 ตัวอย่างมอร์ตาร์ซีพ

มอร์ตาร์ซีพมีลักษณะเป็นแผ่นมอร์ตาร์บาง มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 4×4 ซม.² และมีความหนาเท่ากับ 0.5 ซม. ดังรูป 3-5 ซึ่งความเข้มข้นของคลอไรด์จะสามารถหาได้จากปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปอยู่ภายในมอร์ตาร์ซีพนี้ อีกทั้งมอร์ตาร์ซีพนี้ถูกผลิตขึ้นโดยไม่มีปริมาณคลอไรด์เริ่มต้น(C_0) ภายในเนื้อมอร์ตาร์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มอร์ตาร์ซีพมีประสิทธิภาพในการใช้เก็บข้อมูลปริมาณคลอไรด์



รูป 3-5 รูปตัวอย่างและการติดตั้งแผ่นมอร์ตาร์

3.3.2 ตัวอย่างมอร์ตาร์ $10 \times 10 \times 10$ ซม.³

ในการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยนั้น จะใช้เถ้าลอยทั้งหมด 3 ชนิดคือ เถ้าลอยแม่เมาะ, เถ้าลอย BLCP และ เถ้าลอยจากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเป็นไปตามตารางที่ 3-1 และตารางที่ 3-2 ตามลำดับ และได้ทำการแบ่งชั้นของเถ้าลอยที่ใช้

ออกเป็น 2 ชั้นคือ แก้วลอยในชั้น C และแก้วลอยในชั้น F ซึ่งเกณฑ์การแบ่งชั้นแก้วลอยเป็นไปตามมาตรฐาน (ASTM C618-17a) ดังแสดงในตารางที่ 3-3 จากการวิเคราะห์คุณสมบัติพบว่า แก้วลอยทุกชนิดที่นำมาทดลองนั้นอยู่ในชั้น C ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่า 50% แต่ไม่ถึง 70%)

เพื่อศึกษาปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ $10 \times 10 \times 10$ ซม.³ เพื่อจำลองนั้น ตัวอย่างได้ถูกหล่อขึ้นด้วยส่วนผสมทั้งหมด 4 ส่วนผสม และถูกบ่มในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 28 วัน ดังรูป 3-6 โดยส่วนผสมทั้งหมดแสดงใน ตารางที่ 3-4 โดยส่วนผสมที่ 1 คือส่วนผสมเปล่าที่ไม่ได้ทำการผสมแก้วลอย, ส่วนผสมที่ 2 คือส่วนผสมที่ผสมแก้วลอยจากประเทศญี่ปุ่นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน, ส่วนผสมที่ 3 คือส่วนผสมที่ผสมแก้วลอย BLCP ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และ ส่วนผสมที่ 4 คือส่วนผสมที่ผสมแก้วลอยแม่เมาะร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อศึกษาผลกระทบของการใส่แก้วลอยในมอร์ตาร์ดังกล่าว



รูป 3-6 มอร์ตาร์ผสมแก้วลอยขนาด $10 \times 10 \times 10$ ซม.³

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผสม

item	Moisture	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI	Na_2O	K_2O	Free CaO	Luble Resi	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$
unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
FA Maemoh	0.05	38.26	18.54	11.46	20.94	2.82	3.1	0.18	1.59	2.18	1.64				
FA BLCP	0.14	42.38	16.24	3.45	30.59	1.31	1.17	2.56	0.3	0.76	0.54				
FA JP		66.50				2.10		2.10							
Sand		92.5	3.66	0.27	0.08			0.49							
Cement						1.4	2.5	2				0.3	65	8	0.4

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสม

item	unit	Control mix	FA Maemoh	FA BLCF	FA JP	Sand	Cement
			Test mix	Test mix			
Finess by Air Perneability	cm ² /g	-	2690	3000	3700		3500
Finess by 45 mn(No.325)sieve, Corrected Residue	%	-	37.4	15.6		2.88	
Density	g/cm ³	-	2.35	2.55	2.22	2.52	
Specific Gravity		-	2.35	2.55	2.22	2.52	3.15
Autclave Expansion	%	-0.04	0	-0.04			0.03
Normal Consistency	%	27	24	0.26			
Strength Activity Index							
7 day Compressive Strength	Mpa	39.2	31.1	35.6			
Stength Activity Index at 7 day	%	-	79	91			
28 Day Compressive strength	Mpa	48.3	40.2	43.9			
Strength Activity Index at 28 days	%	-	83	91			
Water Required	ml	242	222	236			
Water Required in Percent of Control	%		92	98			
Time of setting(Vical Test)							
Initial stage	min						>90
Final setting time	min						>190
Air Content Of Mortar	%						5
Compressive Strength							
1 day in moisture	2 day in water	ksc					240
1 day in moisture	6 day in water	ksc					300
1 day in moisture	27 day in water	ksc					400

ตารางที่ 3-3 ข้อกำหนดที่ใช้แบ่งชั้นของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

Chemical Composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ (SiO ₂ +Al ₂ O ₂ และFe ₂ O ₃), min%	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์(SO ₃), max%	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max%	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญเสียนเนื่องจากการเผา(Loss on Ignition(LOI)), max%	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์(Na ₂ O), max%	1.5	1.5

ตารางที่ 3-4 สัดส่วนผสมสำหรับตัวอย่างมอร์ตาร์ 10x10x10 ซม.³

Mix No.	w/b	Cement (kg)	Fly ash (kg)	Water (kg)	Sand (kg)
1.OPC	0.55	590	0	325	1280
2.OPC+FA JP 30%	0.55	395	170	315	1280
3.OPC+FA BLCF 30%	0.55	395	170	315	1280
4.OPC+FA แม่เมาะ 30%	0.55	395	170	315	1280

หลังจากที่ตัวอย่างได้ถูกหล่อและบ่มเป็นเวลา 28 วันแล้ว จะทำการเคลือบ epoxy resin ทั้งสิ้น 5 ด้าน และทั้ง 1 ด้านที่เหลือไว้สำหรับรับปริมาณคลอไรด์ เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์การซึมของคลอไรด์เพียงมิติเดียวคือความลึกที่ซึมผ่านได้

3.4 การติดตั้งและเก็บตัวอย่าง

3.4.1 ตัวอย่างมอร์ตาร์ซีพ

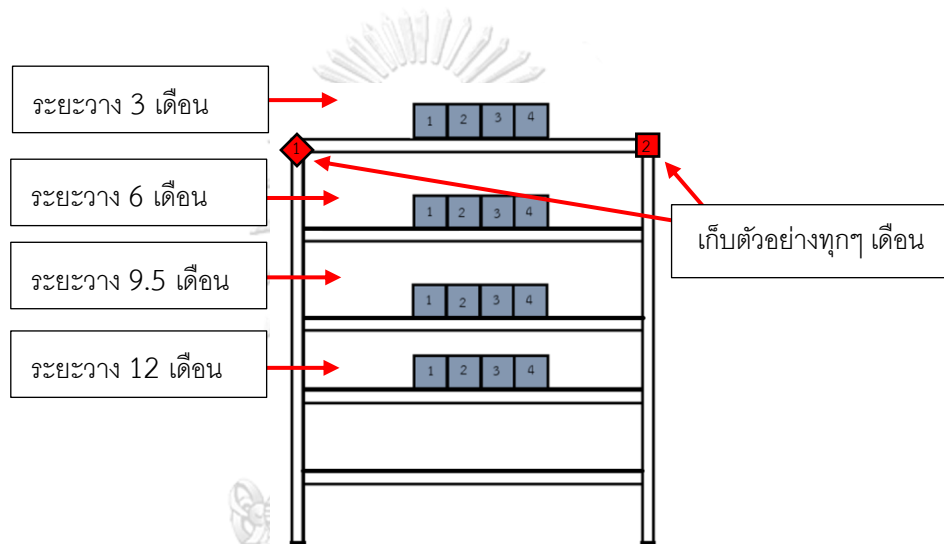
การติดตั้งมอร์ตาร์ซีพจะทำการติดตั้งบนชั้นวางของที่ทำขึ้นดังรูป 3-1 โดยมีลักษณะการจัดมอร์ตาร์ซีพชั้นที่ 1 ติดตั้งทำมุม 45 กับแนวระดับ และชั้นที่ 2 ตั้งขนานกับแนวระดับ และเก็บตัวอย่างมอร์ตาร์ซีพนี้ทุกๆ 1 เดือน

3.4.2 ตัวอย่างมอร์ตาร์ 10x10x10 ซม.³

การติดตั้งตัวอย่างมอร์ตาร์จะทำการติดตั้งโดยทำการติดตั้งบนชั้นวางของที่ทำขึ้นและจัดวางตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมแล้วลอยเรียงตามลำดับ ดังรูป 3-7 และรูป 3-8 โดยชั้นที่ 1 คือชั้นตัวอย่างเปล่าที่ไม่ได้ทำการผสมแล้วลอย ชั้นที่ 2 คือชั้นตัวอย่างที่ผสมแล้วลอยแม่เมาะร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ชั้นที่ 3 คือชั้นตัวอย่างที่ผสมแล้วลอย BLCF ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ชั้นที่ 4 คือชั้นตัวอย่างที่ผสมแล้วลอยจากประเทศญี่ปุ่นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และเก็บตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อเวลาผ่านไป 3 เดือน

ตารางที่ 3-5 ระยะเวลาที่ติดตั้งตัวอย่างมอร์ตาร์

รอบที่	วันที่ติดตั้ง	วันที่เก็บตัวอย่าง	ระยะเวลาที่ตั้งริมทะเล
1	4 เมษายน 2561	14 กรกฎาคม 2561	101 วัน (3 เดือน)
2	4 เมษายน 2561	6 ตุลาคม 2561	185 วัน (6 เดือน)
3	4 เมษายน 2561	13 มกราคม 2562	284 วัน (9.5 เดือน)
4	4 เมษายน 2561	23 มีนาคม 2562	353 วัน (12 เดือน)



รูป 3-7 ชั้นวางสำหรับติดตั้งตัวอย่างมอร์ตาร์



รูป 3-8 ชั้นวางสำหรับติดตั้งตัวอย่างมอร์ตาร์ในสถานที่จริง

3.5 การทดสอบตัวอย่าง

ตัวอย่างมอร์ตาร์ซีพและตัวอย่างมอร์ตาร์ 10x10x10 ซม.³ จะถูกเก็บมาเพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการทันที หลังการเก็บตัวอย่างตามระยะเวลา ซึ่งตัวอย่างจะถูกทดสอบโดยอ้างอิงมาตรฐาน (ASTM C1152)

3.5.1 การบดตัวอย่างมอร์ตาร์ซีพ

- 1) ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างมอร์ตาร์ซีพด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.01 กรัม ทำการบดแบบหยาบโดยใช้ถ้วยบด จากนั้นนำตัวอย่างที่บดแบบหยาบแล้วใส่ลงในเครื่องบดละเอียด โดยระวังไม่ให้มีผงตัวอย่างหลุดออกจากเครื่องบดละเอียด ดังรูป 3-9
- 2) นำผงที่ตัวอย่างที่ได้ไปผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และเก็บผงที่ผ่านตะแกรงใส่ถุงเก็บตัวอย่าง



รูป 3-9 การบดตัวอย่างมอร์ตาร์ซีพเพื่อนำผงไปทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.5.2 การเจาะตัวอย่างมอร์ตาร์ 10x10x10 ซม.³

จากหลังเก็บตัวอย่างมาจากพื้นที่จริงแล้ว ผู้ทดลองได้ใช้แผ่นพลาสติกใส่พันรอบชิ้นตัวอย่างเพื่อรักษาสภาพตัวอย่างไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพความเข้มข้นคลอไรด์ จากนั้นทำเครื่องหมายตำแหน่งเจาะตัวอย่างและถูกเจาะที่ระยะ 0-0.50, 0.5-1.0, 1.0-1.5 และ 1.5-2.0 เซนติเมตร จากผิวหน้า รวมทั้งหมด 4 ผงตัวอย่าง แล้วนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป ดังรูป 3-10



รูป 3-10 การเจาะตัวอย่างเพื่อนำลงไปทดสอบ

3.5.3 การไทเทรตเพื่อหาปริมาณคลอไรด์

- 1) ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักโดยประมาณ 5 กรัม ด้วยความละเอียด 0.01 กรัม จากนั้นนำตัวอย่างใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังรูป 3-10
- 2) ใส่กรดไนตริกเข้มข้น 2 โมล/ลิตร จำนวน 25 มิลลิลิตร เพื่อล้างปริมาณคลอไรด์ที่ค้างอยู่ในตัวอย่างออกมา และใส่ไฮโดรเจน เพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จำนวน 5 มิลลิลิตร เพื่อลดแก๊สที่เกิดขึ้น จากนั้นปิดปากบีกเกอร์ด้วยแผ่นแก้วและทิ้งไว้ 1-2 นาที
- 3) ทำการให้ความร้อนตัวอย่างโดยใช้แท่นให้ความร้อน ระวังไม่ให้อ่างตัวอย่างเดือดเกิน 10 วินาที เพื่อป้องกันการสูญเสียคลอไรด์จากการระเหย โดยให้สังเกตการเดือดจากการเปลี่ยนสีของสารในบีกเกอร์ (สีเหลืองหายไป)
- 4) ลดอุณหภูมิของบีกเกอร์ทดสอบให้อุณหภูมิลดลงเหลือเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการล้างผนังที่เหลือติดอยู่บริเวณขอบข้างบีกเกอร์ด้านใน ด้วยน้ำกลั่น
- 5) ปิเปตต์สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 5 โมล/ลิตร จำนวน 5 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนกระทั่งถึงระดับ 100 มิลลิลิตร

- 6) ใส่แท่งคนแม่เหล็ก ลงในบีกเกอร์ และจุ่มหลอดอิเล็กโทรดลงไปในสารละลาย ซึ่งส่วนปลายสีเงินของหลอดอิเล็กโทรดต้องจมนอยู่ในสารละลายทั้งหมด โดยระวังไม่ให้แท่งคนแม่เหล็กกระทบกับหลอดอิเล็กโทรดขณะทำการไทเทรต
- 7) ไทเทรตสารละลายด้วยเครื่อง จากนั้นบันทึกค่าสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต AgNO_3 ที่ใช้ในการไทเทรตเพื่อให้ถึงจุดสมมูล
- 8) ทำการเตรียมตัวอย่างเปล่า ทำการทดลองตามขั้นตอนเริ่มต้นจากขั้น 2
- 9) เปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์ทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-1 คำนวณโดยไม่ให้มีความละเอียดถึง 0.001 เปอร์เซ็นต์

$$\% \text{Cl} = \frac{3.545(V_1 - V_2) \times N}{W} \quad (3-1)$$

โดยที่ V_1 = ปริมาณสารละลาย AgNO_3 ที่ใช้ในการไทเทรตสำหรับตัวอย่างมอร์ตาร์ (มิลลิลิตร)

V_2 = ปริมาณสารละลาย AgNO_3 ที่ใช้ในการไทเทรตสำหรับตัวอย่างเปล่า (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของสารละลาย AgNO_3 (โมล/ลิตร)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

สำหรับการหาค่าน้ำหนักของคลอไรด์ไอออนคำนวณได้จากร้อยละความเข้มข้นคลอไรด์คูณกับความหนาแน่นตัวอย่างที่ความละเอียดทศนิยมตำแหน่ง 0.1 ดังสมการที่ 3-2

$$\text{Cl}^- \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \% \text{Cl} \cdot \frac{\text{AirDryDensity}}{100} \quad (3-2)$$

โดยที่ $\% \text{Cl}$ = ร้อยละความเข้มข้นของคลอไรด์จากสมการที่ 3-1

สำหรับความเข้มข้นของละอองคลอไรด์ที่เก็บได้ด้วยตัวอย่างมอร์ตาร์ซีพ สามารถหาได้จากสมการ 3-3 ในรูปสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในหน่วย $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$

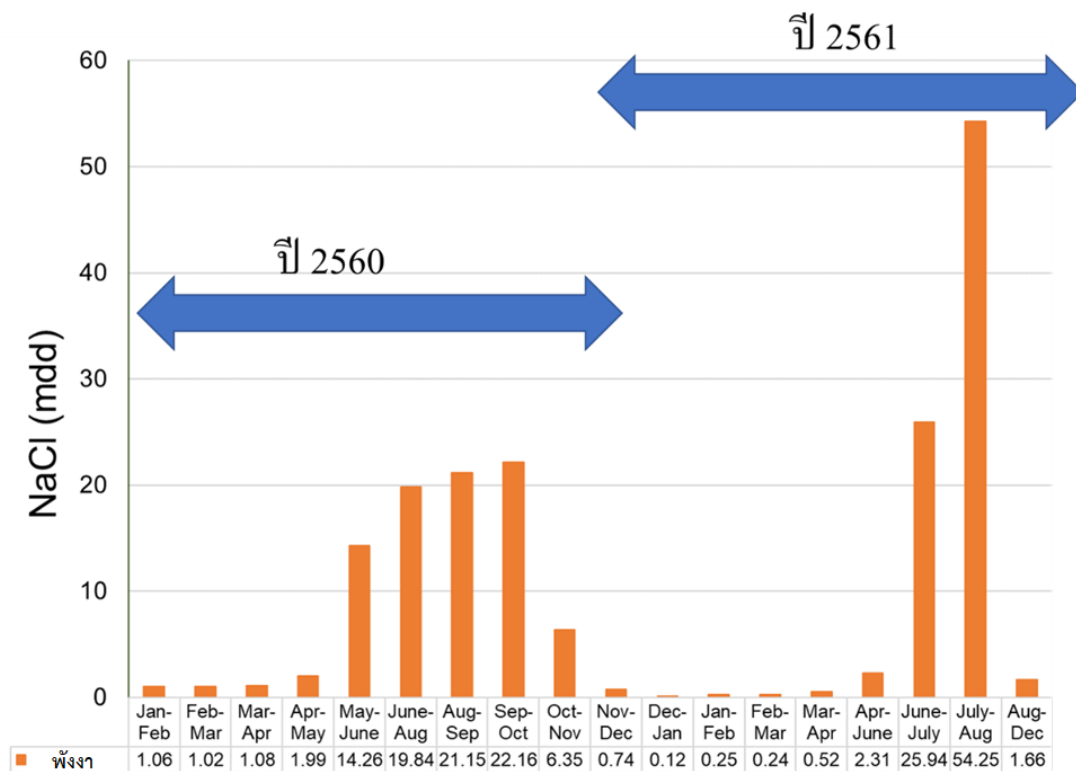
$$\text{NaCl}[\text{mdd}] = \left(\frac{5.844}{3.545} \right) \left(\text{Cl}^- \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \right) \left(\frac{1}{\text{day}} \right) \quad (3-3)$$

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในอำเภอ ตะกั่วทุ่ง จังหวัด พังงา

จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณไอโตะเลในปี 2560 ที่ต่ำสุดมีค่าประมาณ 3 mdd และมีค่าสูงสุดประมาณ 22 mdd ในขณะที่ปี 2561 มีค่าต่ำสุดประมาณ 1 mdd และมีค่าสูงสุดประมาณ 55 mdd จากการทดสอบพบว่าในช่วง 1 ปีปริมาณคลอไรด์ในช่วงเดือน มกราคม ถึงเดือน พฤษภาคมมีแนวโน้มต่ำกว่าช่วงเดือนมิถุนายนไปจนถึงเดือนกันยายน เนื่องจากทิศทางของลมในบริเวณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างปี



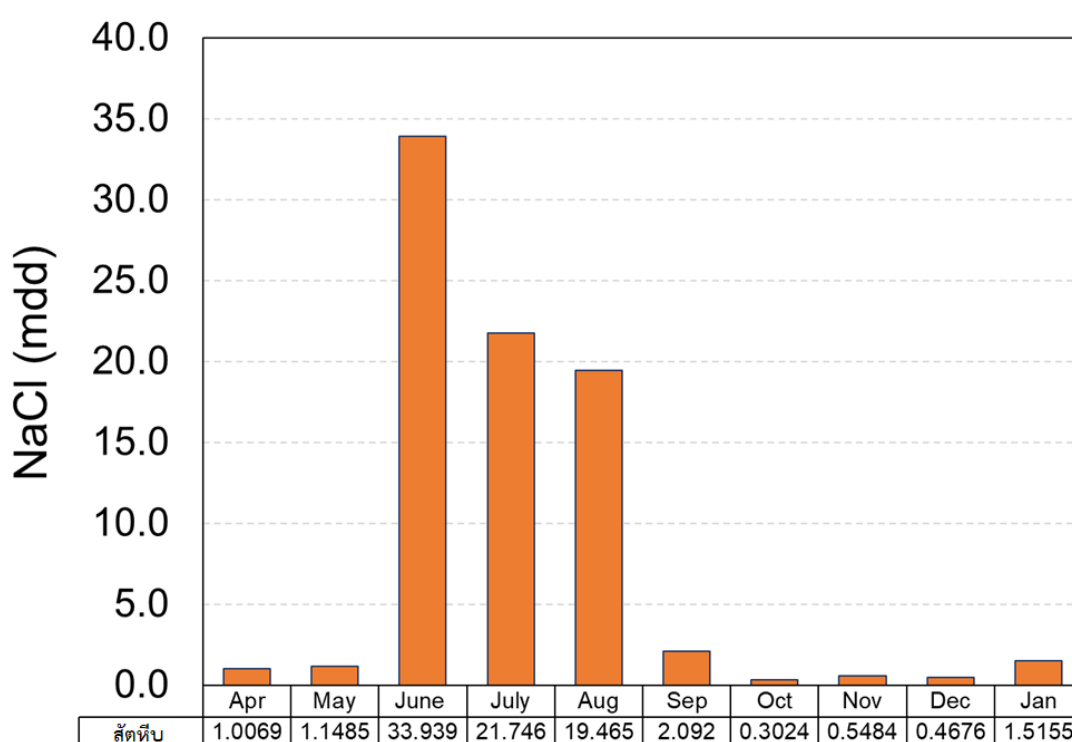
รูป 4-1 ผลการทดสอบไอคลอไรด์ที่จังหวัดพังงา

(มิลลิกรัมต่อ 100 ตารางเซนติเมตรต่อวัน)

4.2 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในอำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี

4.2.1 ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากมอร์ตาร์ซีพในอำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี

ในบริเวณพื้นที่อำเภอสัตหีบ ปริมาณไอทะเลที่ต่ำสุดอยู่ในช่วงเดือน ตุลาคม โดยมีค่าประมาณ 0.75 mdd และมีค่าสูงสุดในเดือน มิถุนายน โดยมีค่าประมาณ 34 mdd จากการทดสอบพบว่า ในช่วง 1 ปีปริมาณคลอไรด์ในอากาศ ในช่วงเดือน มกราคม ถึงเดือน พฤษภาคมมีแนวโน้มต่ำกว่าช่วงเดือนมิถุนายนไปจนถึงเดือนกันยายน เนื่องจากทิศทางของลมในบริเวณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างปี

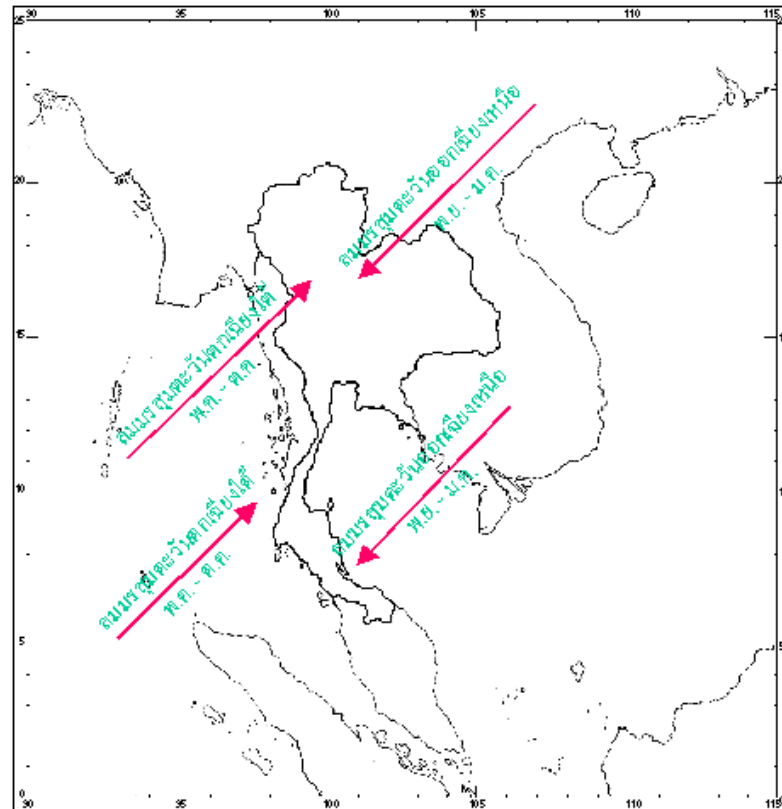


รูป 4-2 ผลการทดสอบไอคลอไรด์ที่ อำเภอสัตหีบ จังหวัด ชลบุรี

(มิลลิกรัมต่อ 100 ตารางเซนติเมตรต่อวัน)

4.2.2 ทิศทางของลมมรสุมในประเทศไทยประจำปีที่มีผลต่อค่าปริมาณคลอไรด์

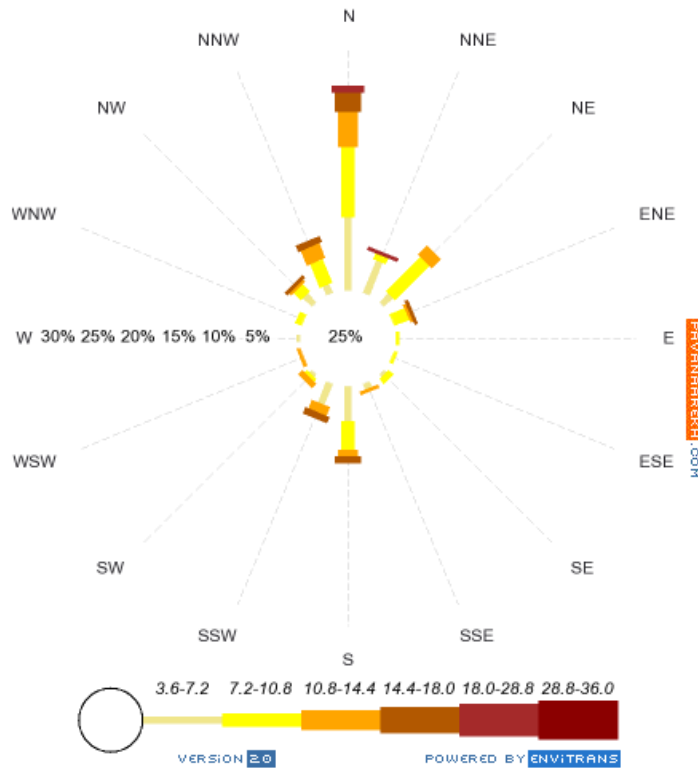
จากการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมจากกรมอุตุนิยมวิทยา พบว่าในช่วงเดือน พฤษภาคม ไป จนถึงเดือน ตุลาคม มีลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดเข้าหาชายฝั่งในบริเวณภาคตะวันตกและภาคใต้ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่ทำให้ปริมาณคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ



รูป 4-3 ข้อมูลทิศทางลมมรสุมจากกรมอุตุนิยมวิทยา

4.2.2 ปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดชลบุรีในช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคม พ.ศ.2561

เมื่อนำผลปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากมอร์ตาร์ซีพในอำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี มาเปรียบเทียบกับข้อมูลทิศทางและความเร็วลมที่ได้จากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ของกรมอุตุนิยมวิทยาแล้ว พบว่าลักษณะของทิศทางและความเร็วลมในแต่ละเดือนเปลี่ยนแปลงตามมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยสังเกตได้ว่าในเดือนเมษายน-พฤษภาคม เป็นช่วงก่อนลมมรสุมเข้า ทิศทางลมพัดไปในทุกทิศทางตามช่วงเวลาของวัน ความเร็วเฉลี่ยของลมเพียง 5.8 กม./ชม. และ 4.4 กม./ชม. ตามลำดับ ลมสงบ (Calm) 24.6% และ 36.4% ตามลำดับ ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ได้ในช่วงเดือนนี้มีค่าน้อย คือ 1.0069 mdd ในเดือนเมษายน และ 1.1485 mdd ในเดือนพฤษภาคม โดยความเร็วและทิศทางของลมแสดง ตามรูป 4-4



Title
WINDROSE PLOT

Station
Sattahip 1st Month

Plot Period
04 / 04 / 2018 :: 12:00 am
04 / 05 / 2018 :: 12:00 am

Display
Wind Speed [Row: 248]

Unit
km/h

Average Speed
5.8 km/h

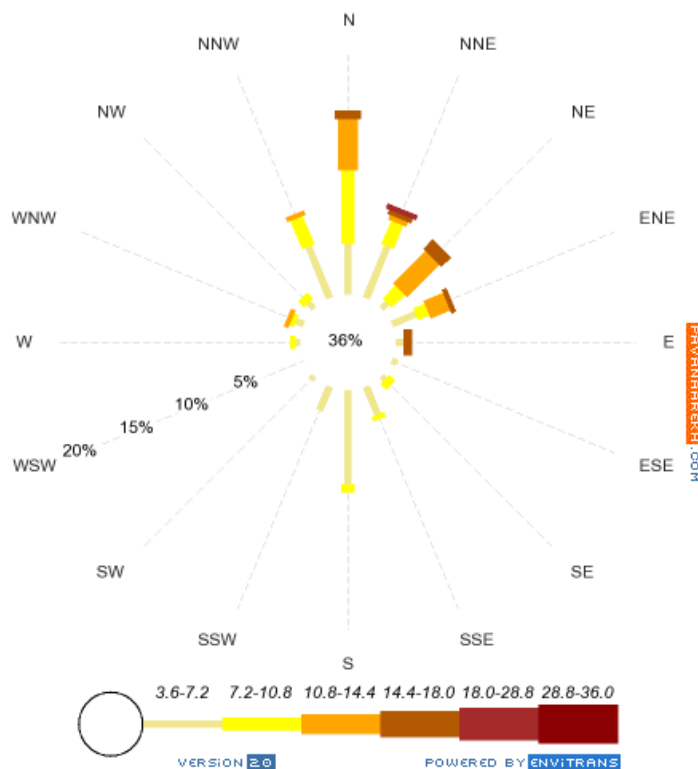
Orientation
Direction (blow to)

Calm
24.6%

Modeler
Nantawit

Company

Plotted on
June 03, 2019 16:28:10



Title
WINDROSE PLOT

Station
Sattahip 2nd Month

Plot Period
05 / 05 / 2018 :: 12:00 am
08 / 06 / 2018 :: 12:00 am

Display
Wind Speed [Row: 280]

Unit
km/h

Average Speed
4.4 km/h

Orientation
Direction (blow to)

Calm
36.4%

Modeler
Nantawit

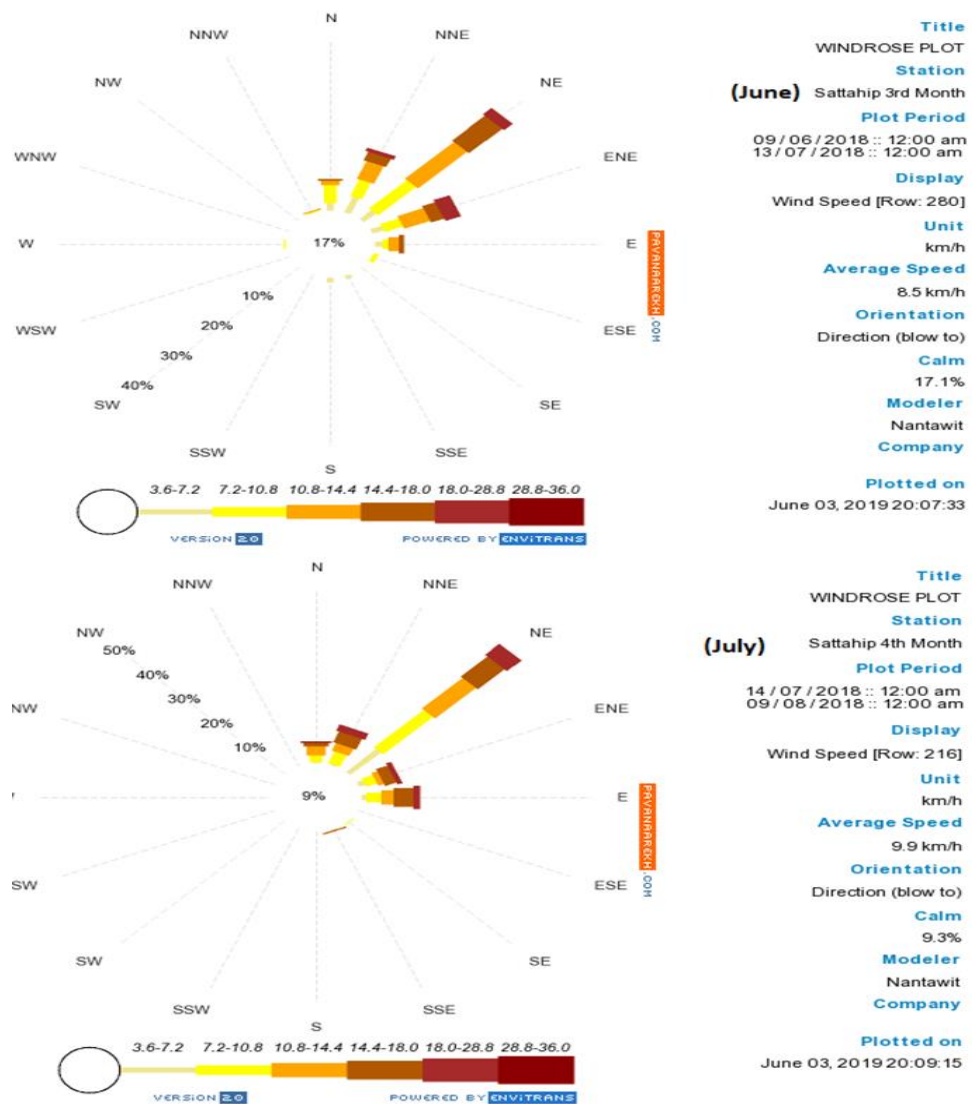
Company

Plotted on
June 03, 2019 20:05:00

รูป 4-4 ข้อมูลทิศทางและความเร็วลมจากสถานีสี่ตึก จังหวัดชลบุรี เดือน เม.ย.-พ.ค. พ.ศ.2561

4.2.3 ปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดชลบุรีในช่วงเดือนมิถุนายน-กรกฎาคม พ.ศ.2561

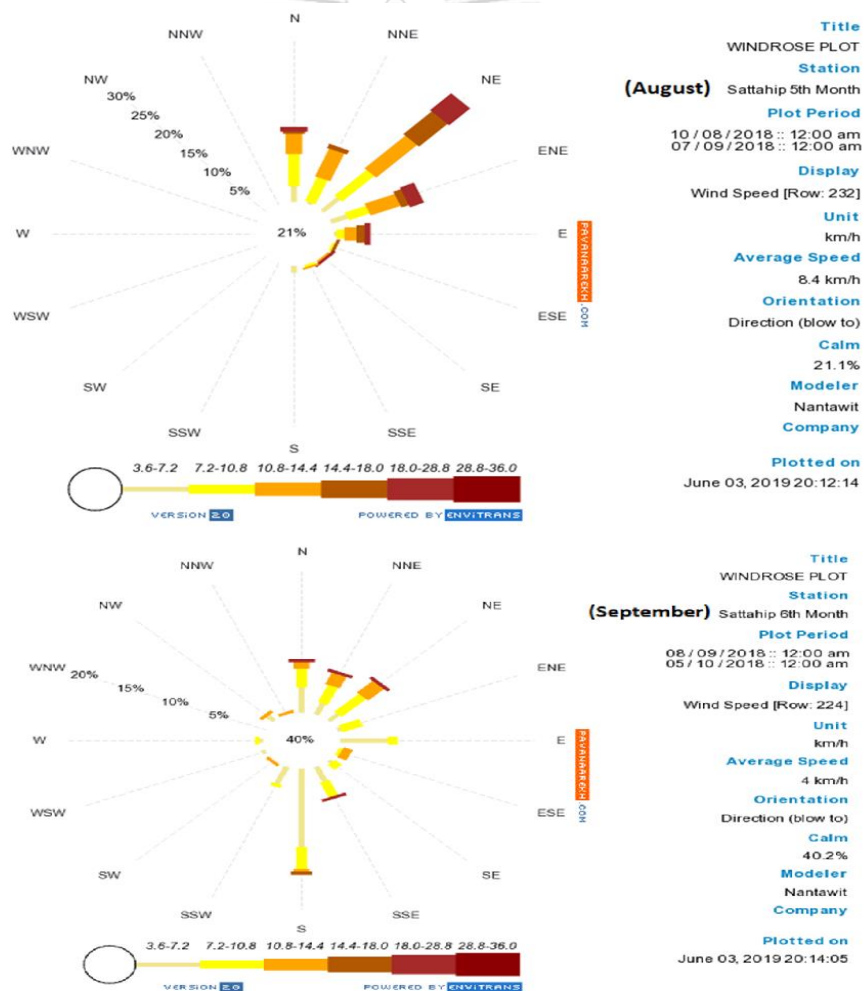
ผลปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากมอร์ตาร์ซีพในอำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี มาเปรียบเทียบกับข้อมูลทิศทางและความเร็วลมที่ได้จากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ของกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงเดือนมิถุนายน-กรกฎาคม พบว่า เป็นเดือนที่ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดเข้าชายฝั่งประเทศไทย ทิศทางส่วนมากพัดไปเข้าชายฝั่งสู่ผิวน้ำของตัวอย่างโดยเกือบตลอดช่วงเดือน ความเร็วเฉลี่ยของลมมากถึง 8.8 กม./ชม. และ 9.9 กม./ชม. ตามลำดับ อัตราลมสงบในแต่ละช่วงวันค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ได้ในช่วงเดือนนี้มีค่ามาก คือ 33.939 mdd ในเดือนมิถุนายน และ 21.746 mdd ในเดือนกรกฎาคม โดยความเร็วและทิศทางของลมแสดงตาม รูป 4-5



รูป 4-5 ข้อมูลทิศทางและความเร็วลมจากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เดือน มิ.ย.-ก.ค. พ.ศ.2561

4.2.4 ปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดชลบุรีในช่วงเดือนสิงหาคม-กันยายน พ.ศ.2561

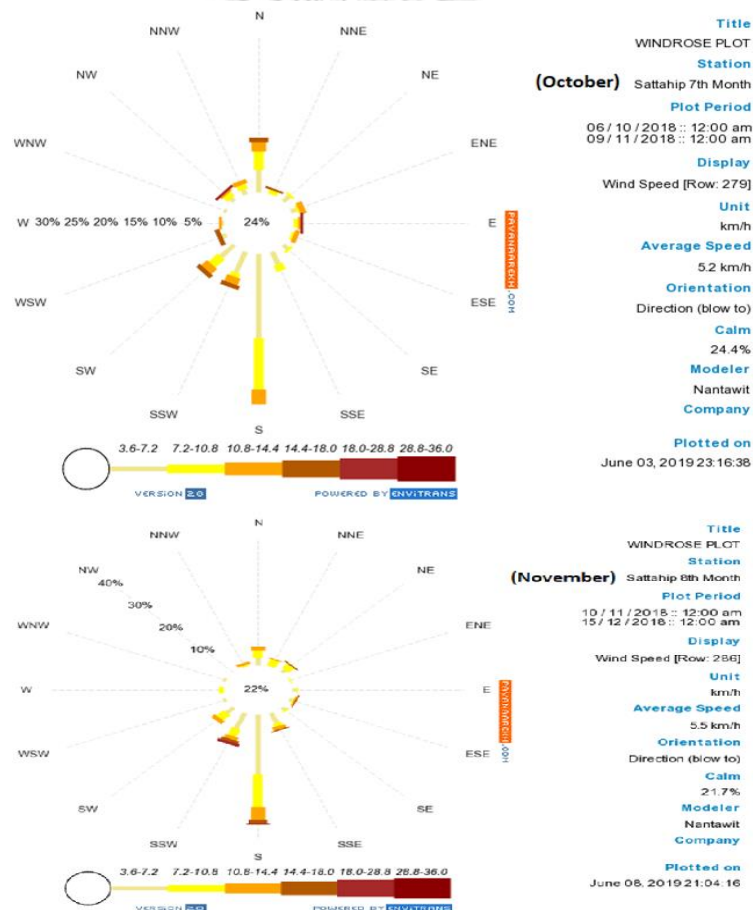
ผลปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากมอร์ตาร์ซีพในอำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี มาเปรียบเทียบกับข้อมูลทิศทางและความเร็วลมที่ได้จากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ของกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงเดือนสิงหาคม-กันยายน พบว่า เป็นช่วงที่ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังหมดยุติพล และลมกระแสมกำลังเปลี่ยนทิศกลับในเดือนกันยายน ซึ่งในเดือนสิงหาคมนั้นทิศทางลมส่วนมากยังคงพัดไปเข้าชายฝั่งสู่นิวหน้าของตัวอย่างอยู่ โดยความเร็วเฉลี่ยของลมมากถึง 8.8 กม./ชม. ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ได้มีค่ามากอยู่ คือ 19.465 mdd แต่ทว่าในเดือนกันยายนนั้น กระแสลมได้เริ่มเปลี่ยนทิศทางและอ่อนกำลังโดยมีพัดออกจากชายฝั่งบ้างในช่วงหลัง โดยมีความเร็วเฉลี่ยเพียง 4 กม./ชม. อัตราลมสงบเดือนกันยายนมีถึง 40.2 % ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ได้มีค่าน้อยลงมากจากเดือนก่อนหน้า คือ 2.092 mdd โดยความเร็วและทิศทางของลมแสดงตาม รูป 4-6



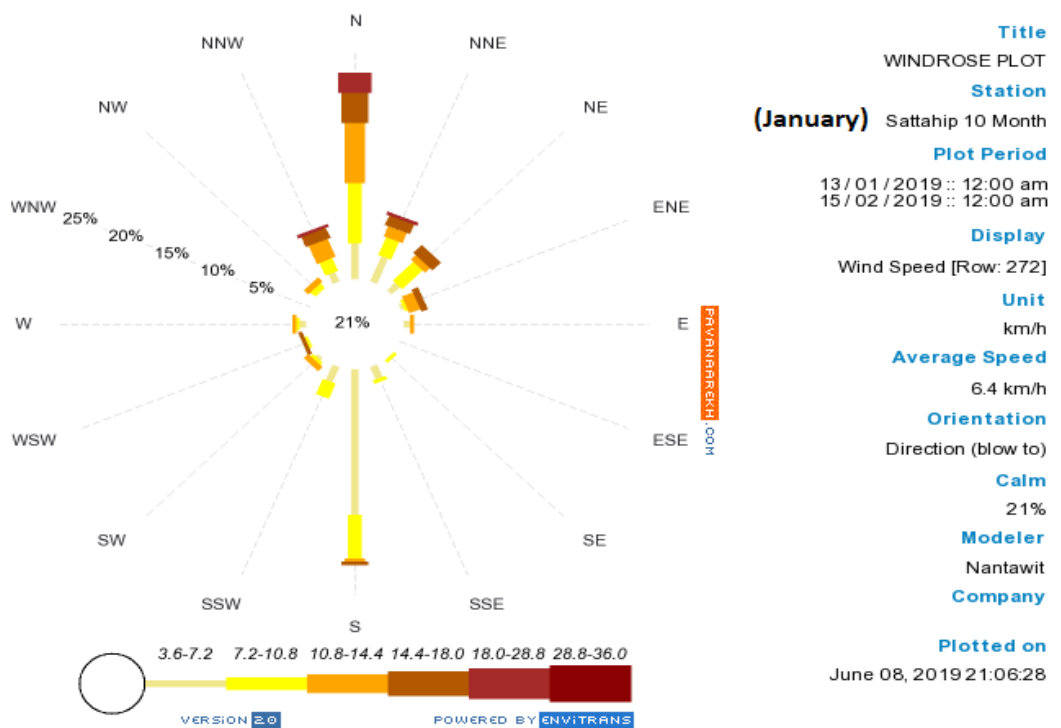
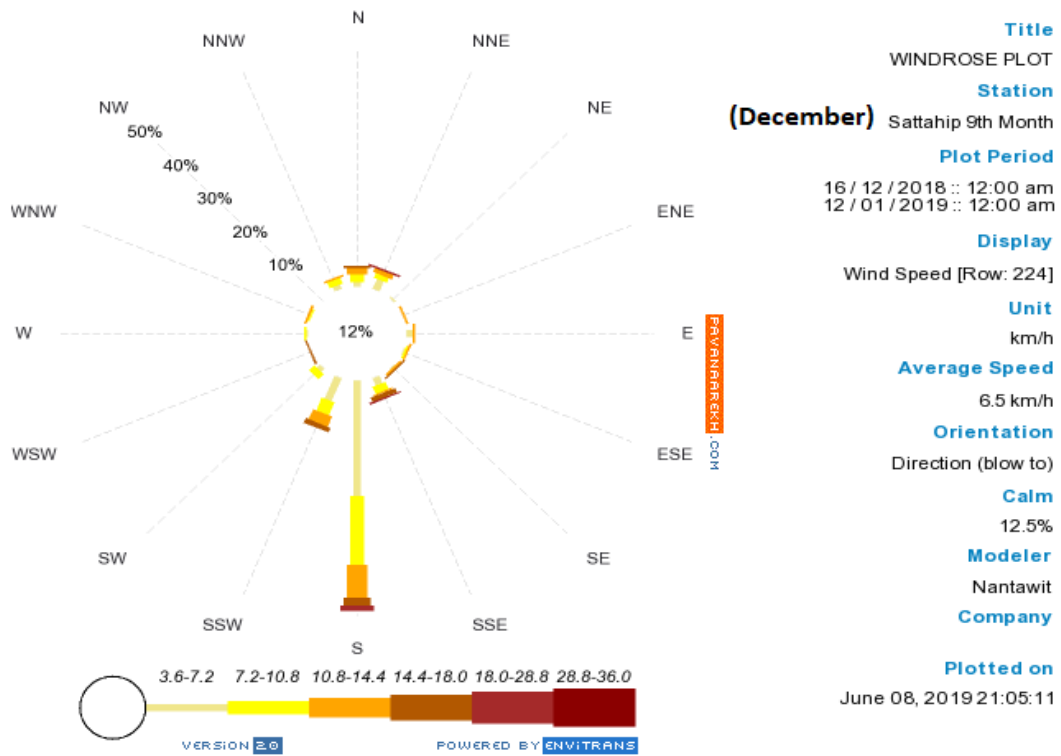
รูป 4-6 ข้อมูลทิศทางและความเร็วลมจากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เดือน ส.ค.-ก.ย. พ.ศ.2561

4.2.5 ปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดชลบุรีในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ.2561 – มกราคม พ.ศ.2562

ผลปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากมอร์ตาร์ซีพในอำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี มาเปรียบเทียบกับข้อมูลทิศทางและความเร็วลมที่ได้จากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ของกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ.2561-มกราคม พ.ศ.2562 พบว่า เป็นช่วงที่มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือกำลังส่งอิทธิพลต่อประเทศไทย กระแสลมส่วนใหญ่พัดออกจากชายฝั่งไปยังทิศใต้และทิศตะวันตกเฉียงใต้ กล่าวคือพัดออกฝั่งตรงข้ามกับผิวหน้าตัวอย่าง ส่งผลให้ค่าคลอไรด์มีค่าน้อย โดยเดือนตุลาคม ความเร็วลมเฉลี่ย 5.2 กม./ชม. ปริมาณคลอไรด์ 0.3024 mdd ในเดือนพฤศจิกายน ความเร็วลมเฉลี่ย 5.5 กม./ชม. ปริมาณคลอไรด์ 0.5484 mdd ในเดือนธันวาคม ความเร็วลมเฉลี่ย 6.5 กม./ชม. ปริมาณคลอไรด์ 0.4676 mdd และในเดือนมกราคม ความเร็วลมเฉลี่ย 6.4 กม./ชม. ปริมาณคลอไรด์ 1.5155 mdd ซึ่งจะเห็นว่าเดือนมกราคม ลมพัดกลับสู่ทิศเหนือมากขึ้นกว่าสองเดือนก่อนหน้า จึงส่งผลให้ค่าปริมาณคลอไรด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยความเร็วและทิศทางของลมแสดงตาม รูป 4-7 และ รูป 4-8



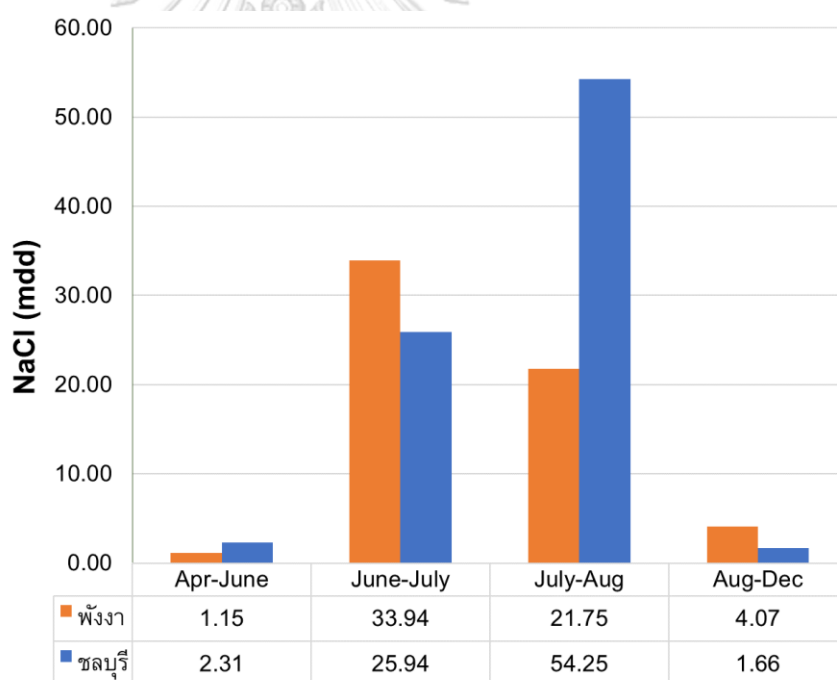
รูป 4-7 ข้อมูลทิศทางและความเร็วลมจากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เดือน ต.ค.-พ.ย. พ.ศ.2561



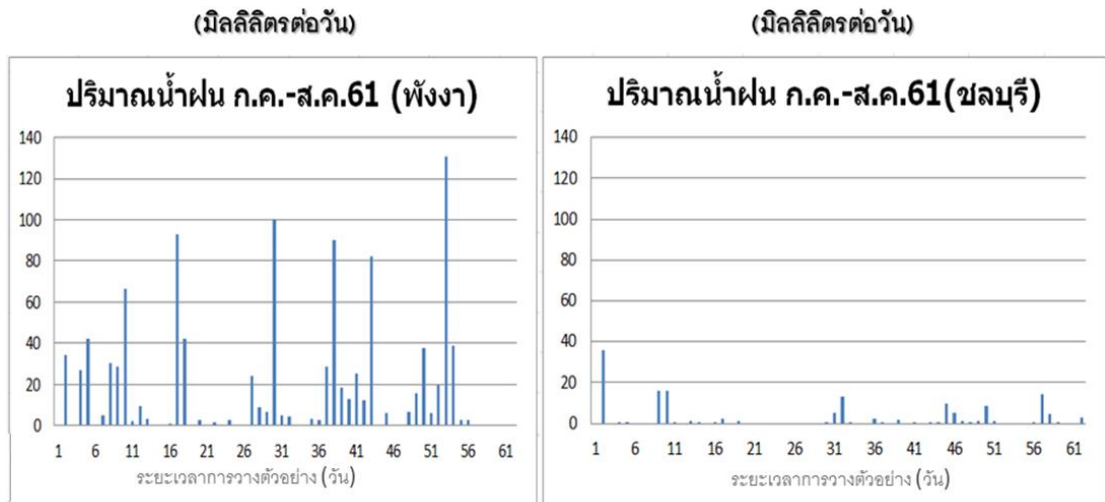
รูป 4-8 ข้อมูลทิศทางและความเร็วลมจากสถานีสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เดือน ธ.ค.61-ม.ค.62

4.3 การเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดพังงาและชลบุรีระหว่างเดือน เมษายน 2561 - ธันวาคม 2561

จากผลการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดพังงา และ ชลบุรีพบว่าปริมาณคลอไรด์ไม่แตกต่างกันมากนักในทั้งสองพื้นที่ แต่ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม บริเวณจังหวัดชลบุรีมีปริมาณสูงกว่าจังหวัดพังงาอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งปริมาณน้ำฝนในจังหวัดพังงาในช่วงเดือนดังกล่าว นั้น มีปริมาณน้ำฝนรวมสูงถึง 1084.3 มิลลิเมตร และมี 23วันที่ปริมาณน้ำฝนเกิน 5 มิลลิเมตร/ชั่วโมง (เกิด washout effect) ในขณะที่จังหวัดชลบุรีนั้นในช่วงเดือนดังกล่าวมีปริมาณน้ำฝนรวมเพียง 146.5 มิลลิเมตร และมีจำนวนวันที่ปริมาณน้ำฝนเกิน 5 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เพียงแค่ 5 วัน ซึ่งด้วยผลจากปริมาณน้ำฝนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญของสองพื้นที่ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคมนี้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์แตกต่างกัน เนื่องจากน้ำฝนสามารถชะล้างปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในชั้นตัวอย่างออกทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่วัดโดยใช้มอร์ตาร์ซีพมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ดังรูป 4-9 และ รูป 4-10



รูป 4-9 ผลการทดสอบไอคลอไรด์ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี และ จังหวัดพังงา
(มิลลิกรัมต่อ 100 ตารางเซนติเมตรต่อวัน)

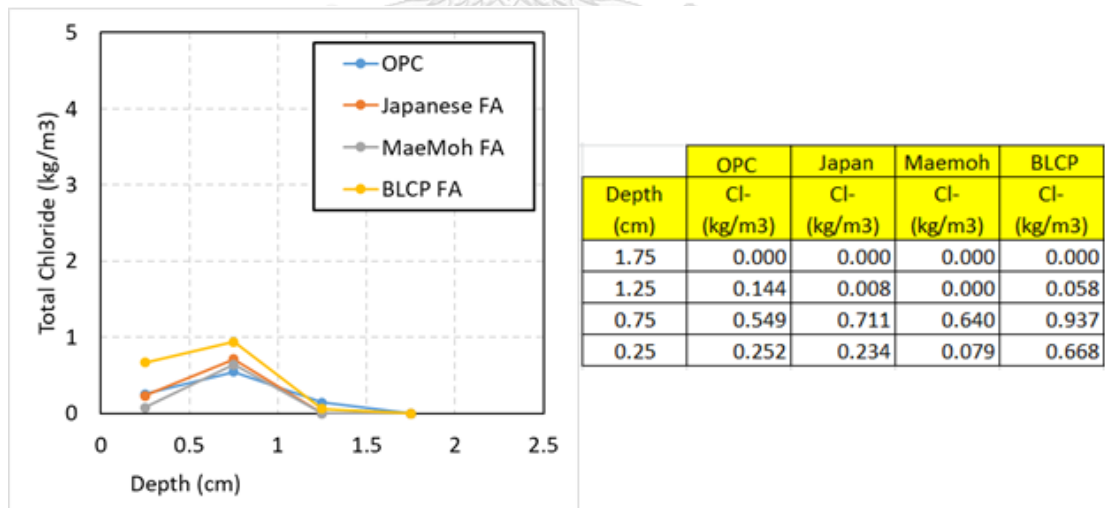


รูป 4-10 ความแตกต่างของปริมาณน้ำฝนจังหวัดพังงาและเชียงรายช่วงเดือน ก.ค.-ส.ค. พ.ศ.2561

4.4 ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในชั้นส่วนมอร์ตาร์ในจังหวัดชลบุรี

4.4.1 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในตัวอย่างมอร์ตาร์ ระยะเวลา 3 เดือน

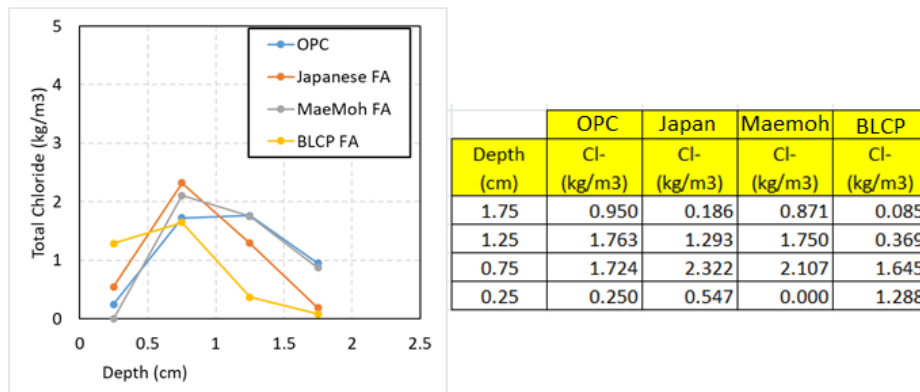
จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในระยะความลึก 1 – 2 เซนติเมตร ส่วนผสมที่ไม่ผสมเกลือลอยมีปริมาณคลอไรด์สูงที่สุด ในขณะที่ระยะ 0 – 1 เซนติเมตร คอนกรีตที่ผสมเกลือลอย BLCP มีปริมาณคลอไรด์สูงที่สุด เนื่องจากคลอไรด์ไม่สามารถไหลเข้าไปในส่วนลึกของมอร์ตาร์ได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้ามีคลอไรด์สูงกว่า ดังรูป 4-11



รูป 4-11 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในมอร์ตาร์ระยะเวลา 3 เดือน

4.4.2 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในตัวอย่างมอร์ตาร์ ระยะเวลา 6 เดือน

จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในระยะความลึก 1 – 2 เซนติเมตร ส่วนผสมที่ไม่ผสมเถ้าลอยมีปริมาณคลอไรด์สูงที่สุด รองลงมาคือ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าลอยญี่ปุ่น และเถ้าลอย BLCP ตามลำดับ ในขณะที่ระยะ 0 – 1 เซนติเมตร คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจากญี่ปุ่นมีปริมาณคลอไรด์สูงที่สุด ดังรูป 4-12

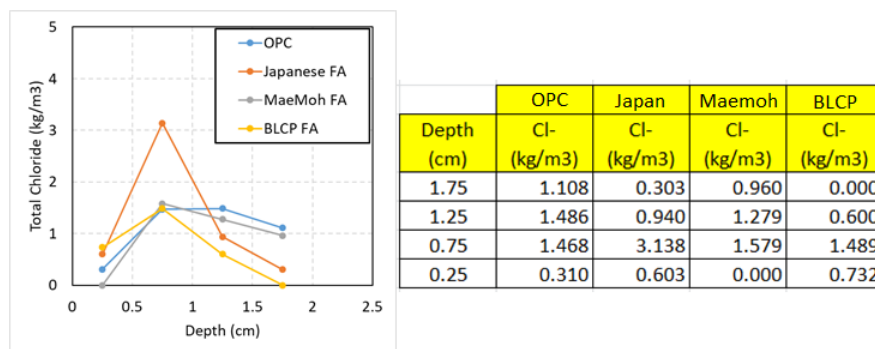


รูป 4-12 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในมอร์ตาร์ระยะเวลา 6 เดือน

4.4.3 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในตัวอย่างมอร์ตาร์ ระยะเวลา 9.5 เดือน

จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในระยะความลึก 1 – 2 เซนติเมตร ส่วนผสมที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีปริมาณคลอไรด์สูงที่สุด แต่มีปริมาณที่ใกล้เคียงส่วนผสมที่ไม่ใส่เถ้าลอยเลย รองลงมาคือ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอยญี่ปุ่น มีปริมาณคลอไรด์ต่ำสุด ดังรูป 4 -13

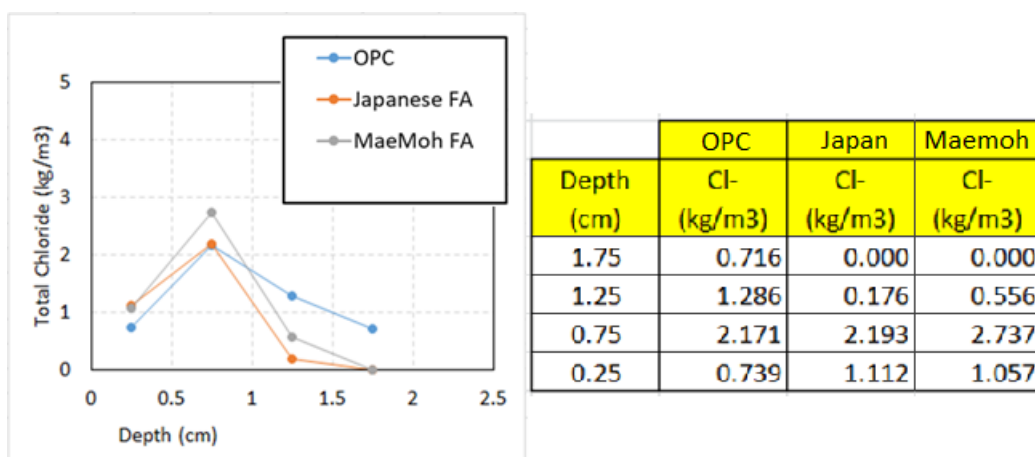
จะเห็นได้ว่า เถ้าลอยญี่ปุ่น มีปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าสูง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่เถ้าลอยญี่ปุ่นสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีทำให้คลอไรด์ไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในบริเวณด้านในของชิ้นงานได้น้อย และเป็นช่วงเดือนตุลาคม-ธันวาคมซึ่งมีปริมาณคลอไรด์จากทะเลน้อยประกอบกับการชะล้างผิวหน้าของน้ำฝน เป็นเหตุให้คลอไรด์จะพยายามแพร่กลับออกไปที่ผิวหน้าทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์แพร่กลับมายู่บริเวณช่วง 0.5-1 เซนติเมตร



รูป 4-13 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในมอร์ตาร์ระยะเวลา 9.5 เดือน

4.4.4 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในตัวอย่างมอร์ตาร์ ระยะเวลา 12 เดือน

จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในระยะความลึก 1 – 2 เซนติเมตร ส่วนผสมที่ผสมไม่ผสมเถ้าลอยเลยมีปริมาณคลอไรด์สูงที่สุด และในตลอดระยะความลึก 0.5 – 2 เซนติเมตร นั้น ส่วนผสมเถ้าลอยญี่ปุ่นมีปริมาณที่คลอไรด์ที่น้อยกว่าเถ้าลอยแม่เมาะ และสำหรับตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอย BLCP นั้นสูญหายระหว่างการทดสอบ ดังรูป 4-14



รูป 4-14 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในมอร์ตาร์ระยะเวลา 12 เดือน

4.4.5 วิเคราะห์ผลการซึมผ่านของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด

จากคุณสมบัติทางกายภาพในตารางที่ 3-2 นั้น เถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าลอย BLCP และเถ้าลอยญี่ปุ่นมีค่า Fineness เท่ากับ 2690, 3000 และ 3700 cm^2/g ตามลำดับ ซึ่งเถ้าลอยญี่ปุ่นกับเถ้าลอย BLCP มีค่าความละเอียดสูง ส่งผลในมอร์ตาร์มีรูพรุนที่น้อยกว่า ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านในชั้นความลึกที่น้อยกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจากแม่เมาะ และ เถ้าลอย BLCP นั้น มีปริมาณ CaO ในเถ้าลอยสูงที่สุดคือ 30.59% ซึ่งช่วยในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ให้ calcium silicate hydrate (C-S-H) และ Calcium aluminate ส่งผลให้รูพรุนต่ำลงไปอีก ในขณะที่เถ้าลอยญี่ปุ่นแม้จะมีค่า fineness ที่สูงมาก แต่กลับไม่มี CaO ผสมหรืออาจมีน้อยจนวัดค่าไม่ได้ ปัจจัยในการช่วยลดรูพรุนจึงน้อยกว่าเถ้าลอย BLCP

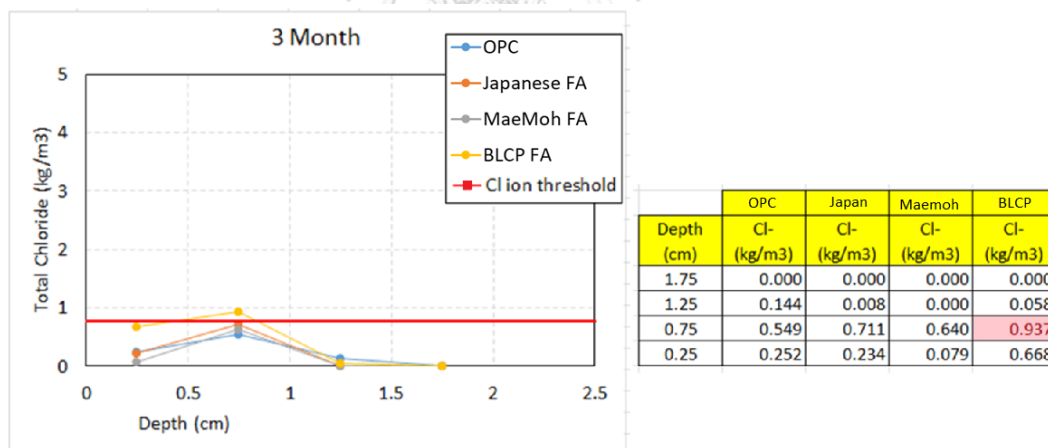
4.5 พิจารณาผลการซึมผ่านของอนุภาคคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่จังหวัดชลบุรีโดยเทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน

เมื่อนำผลการทดลองหาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ได้ซึมลึกเข้าไปในเนื้อคอนกรีตระยะต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเดือนที่ได้ทำการทดลอง มาเทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำที่บริเวณผิวของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (Chloride content corrosion

threshold) โดยมีค่าปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตที่จะเริ่มทำให้เกิดการกัดกร่อนประมาณเท่ากับ 0.771 kg/m^3 ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งการเปรียบเทียบดังกล่าวจะช่วยให้คาดเดาโอกาสการเกิดสนิมหรือการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ณ ชั้นความลึกต่าง ๆ ได้ ซึ่งความลึกดังกล่าวเปรียบได้กับการเลือกใช้ระยะหุ้มคอนกรีต (concrete covering) ในการออกแบบใช้งานจริง หากว่า ณ ระยะความลึกนั้นมีค่าปริมาณคลอไรด์ที่วัดได้เกินกว่า Chloride content corrosion threshold แสดงว่ามีโอกาสเกิดสนิมและการกัดกร่อนในเหล็กเสริม

4.5.1 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 3 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ

ในตัวอย่างมอร์ตาร์ระยะเวลา 3 เดือนพบว่า ตลอดทุกชั้นความลึกที่วัดค่าได้ ยังถือว่ามีปริมาณคลอไรด์ใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันมากอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งแนวโน้มจะเห็นได้ว่า ณ ชั้นความลึกในช่วง 0.5-1 เซนติเมตร เกิดการสะสมของปริมาณคลอไรด์ที่มากกว่าผิวหน้าและชั้นที่ลึกกว่า เนื่องจากการซึมผ่านของอนุภาคคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงและมีได้จมอยู่ในน้ำนั้น จะเกิดการซึมผ่านของอนุภาคคลอไรด์โดยวิธีการแพร่ (diffusion) คือการแพร่จากชั้นที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังต่ำกว่า ซึ่งในบางครั้งเมื่อเกิดฝนตกหนักและทำให้เกิด washout effect ทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าจะมีความเข้มข้นกว่าปริมาณคลอไรด์ชั้นด้านใน และทำให้คลอไรด์พยายามแพร่กลับสู่ผิวหน้าสลับกับการแพร่เข้าไปข้างในชั้นความลึก ดังรูป 4-15

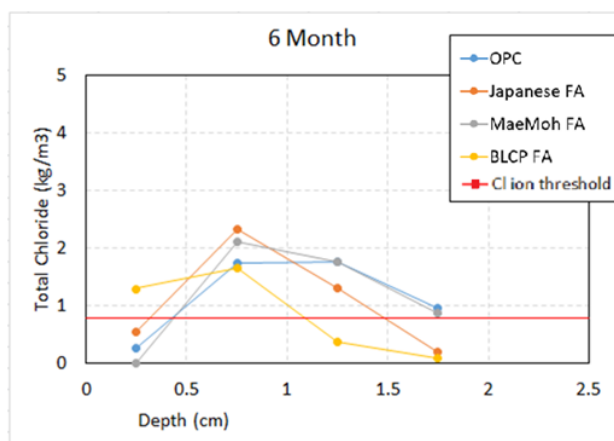


รูป 4-15 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 3 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ

4.5.2 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 6 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ

ในตัวอย่างมอร์ตาร์ระยะเวลา 6 เดือนพบว่า ที่ช่วง 0.5-1 เซนติเมตรนั้น ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากทั้ง 4 ตัวอย่าง มีปริมาณเกินค่า Chloride content corrosion threshold อันเป็นเหตุให้เกิดสนิมและการกัดกร่อนได้ ซึ่งโดยหลักการคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปจะมีระยะหุ้มคอนกรีตที่ลึกกว่านี้ แต่ในบางกรณีเช่นการทำคอนกรีตผนังผิวบาง หรือการหล่อคอนกรีตที่ไม่ได้มาตรฐานอาจทำให้เหล็กเสริมอยู่ในระยะตื้นกว่า 1 เซนติเมตรได้ จึงเป็นข้อควรระวังว่าหากทำการหล่อคอนกรีตในที่สำหรับใช้

งานในบรรยากาศที่ถูกไอทะเล จะต้องมีการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างให้ดี ในช่วง 1.5-2 เซนติเมตร นั้น ขึ้นตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยญี่ปุ่นและขึ้นตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอย BLCP ยังไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมและการกัดกร่อน ในขณะที่ ขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ล้วนไม่ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย แม้จะมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมและการกัดกร่อนแล้ว และเถ้าลอย BLCP มีปริมาณคลอไรด์ซึ่มล็กที่น้อยที่สุดในตลอดช่วงความลึก 0.5-2 เซนติเมตร ดังรูป 4-16

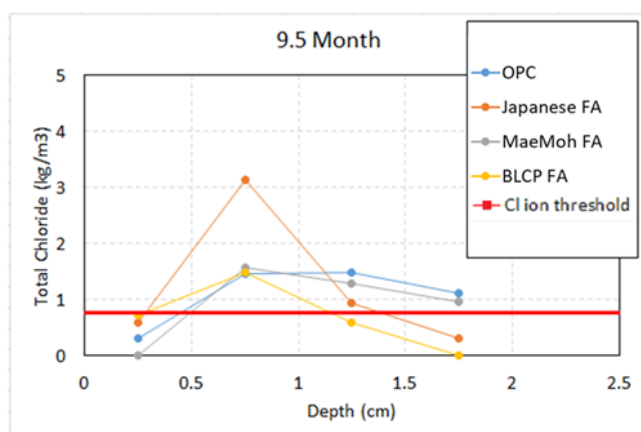


	OPC	Japan	Maemoh	BLCP
Depth (cm)	Cl- (kg/m³)	Cl- (kg/m³)	Cl- (kg/m³)	Cl- (kg/m³)
1.75	0.950	0.186	0.871	0.085
1.25	1.763	1.293	1.750	0.369
0.75	1.724	2.322	2.107	1.645
0.25	0.250	0.547	0.000	1.288

รูป 4-16 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 6 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ

4.5.3 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 9.5 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ

ในตัวอย่างมอร์ตาร์ระยะเวลา 9.5 เดือนพบว่า ที่ช่วง 0.5-1.5 เซนติเมตรนั้น ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากทั้ง 3 ตัวอย่าง มีปริมาณเกินค่า Chloride content corrosion threshold ยกเว้นตัวอย่างผสมเถ้าลอย BLCP ซึ่งใกล้เคียงกับค่าดังกล่าว ในส่วนของช่วง 1.5-2 เซนติเมตรนั้น ขึ้นตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยญี่ปุ่นและขึ้นตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอย BLCP ยังไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมและการกัดกร่อน ในขณะที่ ขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ล้วนไม่ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยแม้จะมี ความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมและการกัดกร่อนแล้ว ดังรูป 4-17

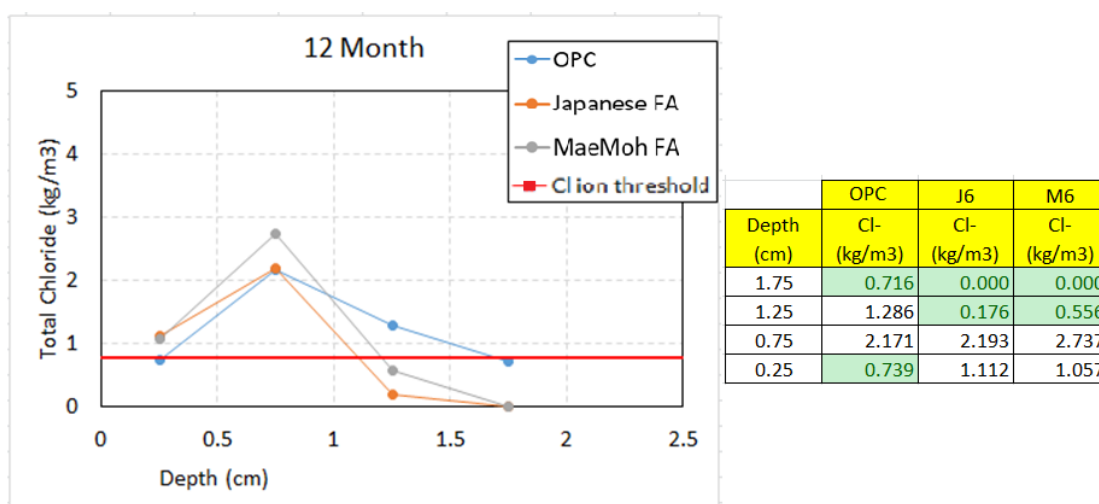


	OPC	Japan	Maemoh	BLCP
Depth (cm)	Cl- (kg/m³)	Cl- (kg/m³)	Cl- (kg/m³)	Cl- (kg/m³)
1.75	1.108	0.303	0.960	0.000
1.25	1.486	0.940	1.279	0.600
0.75	1.468	3.138	1.579	1.489
0.25	0.310	0.603	0.000	0.732

รูป 4-17 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 9.5 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ

4.5.4 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 11 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ

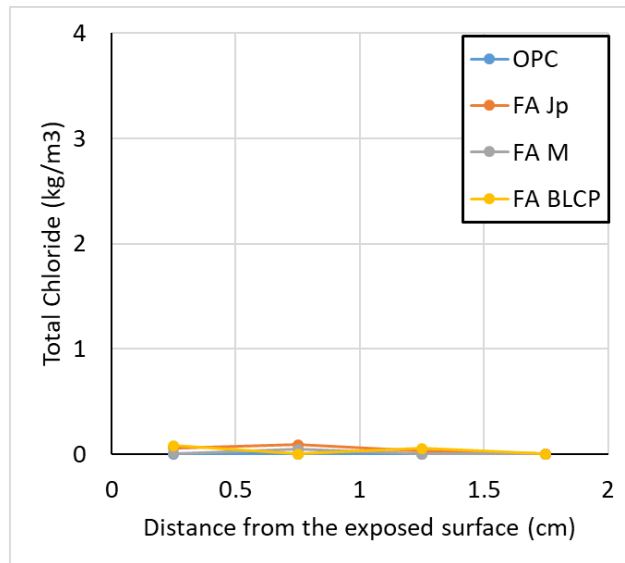
ในตัวอย่างมอร์ตาร์ระยะเวลา 11 เดือนพบว่า ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากทั้ง 3 ตัวอย่าง ช่วงผิวหน้ามีแนวโน้มเดิมเหมือนช่วงเดือนก่อนหน้าคือ ปริมาณคลอไรด์จะมากที่สุดในระยะ 0.5-1 เซนติเมตร และส่วนที่ลึกเข้ามาในช่วง 1-2 เซนติเมตรนั้น ขึ้นตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยญี่ปุ่นและขึ้นตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ มีโอกาสเกิดสนิมน้อยกว่า ขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ล้วนไม่ผสมเถ้าลอย ดังรูป 4-18



รูป 4-18 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในระยะเวลา 12 เดือน เทียบกับค่าปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำ

4.6 ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในตัวอย่าง (จังหวัดพังงา)

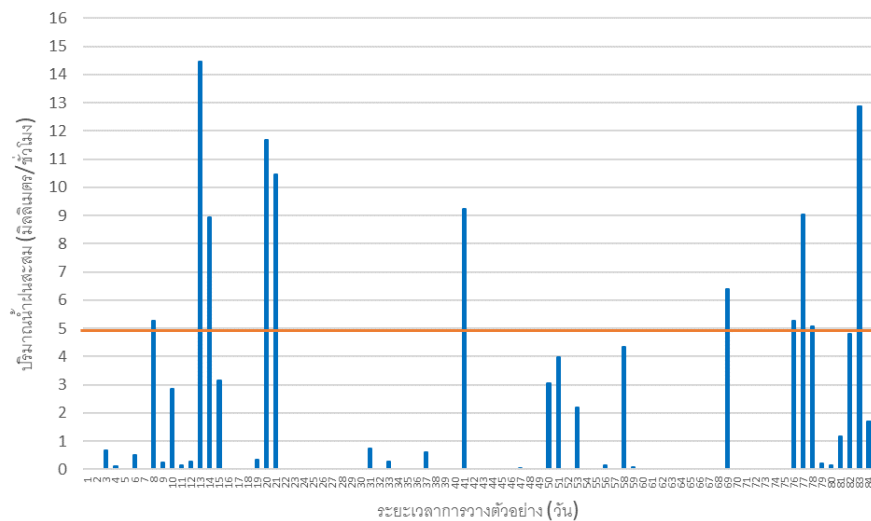
เมื่อนำตัวอย่างมอร์ตาร์ไปวางบริเวณจังหวัดพังงา เป็นระยะเวลา 3 เดือนตั้งแต่เดือนมกราคม จนถึงเดือนเมษายน 2561 เป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่าในแต่ละตัวอย่างมีปริมาณคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปแต่ว่ามีปริมาณน้อย และ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญในแต่ละตัวอย่าง เนื่องจากในช่วงเวลาที่วางตัวอย่างนั้น เป็นช่วงเดือนที่มีปริมาณไคคลอไรด์ต่ำ และมีปริมาณน้ำฝนมาก จนเกิด washout effect เป็นประจำ ทำให้ไม่สามารถเห็นความแตกต่างของการซึมผ่านของคลอไรด์ได้อย่างชัดเจน ผลการทดสอบแสดงในรูป 4-19



รูป 4-19 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อมอร์ตาร์ บริเวณจังหวัดพังงา

4.7 พิจารณาผลของการชะล้างคลอไรด์ที่ผิวหน้าในจังหวัดพังงา

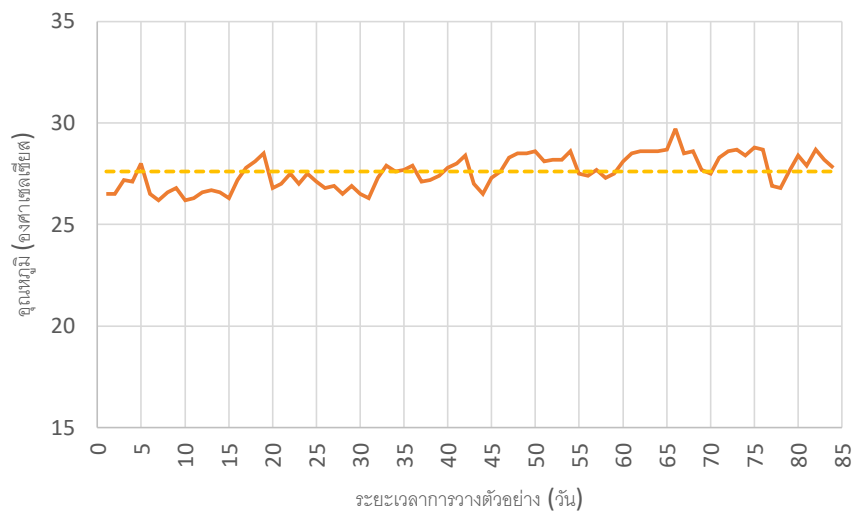
จากรูป 4-20 แสดงผลของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในแต่ละวัน โดยเส้นสีส้ม (ปริมาณฝนสะสมเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร/ชั่วโมง) แสดงถึงปริมาณน้ำฝนที่ต้องพิจารณาผลของการชะล้างคลอไรด์ที่ผิวหน้า (washout effect threshold)



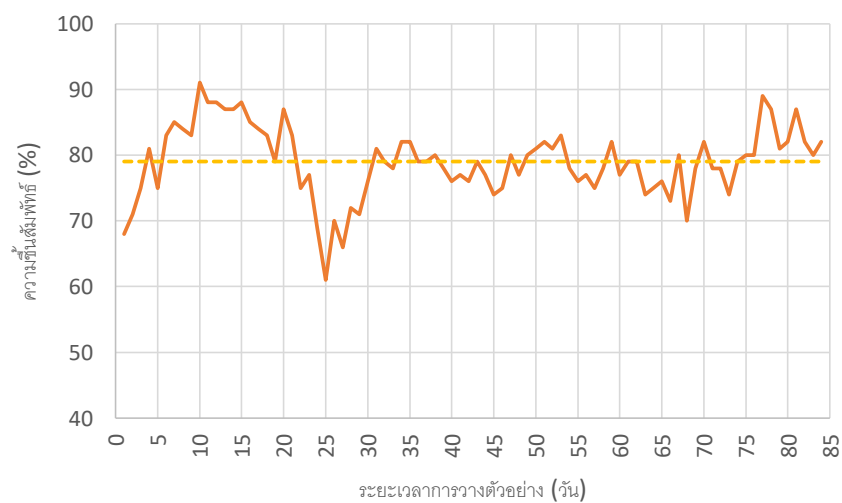
รูป 4-20 ข้อมูลปริมาณน้ำฝน จ.พังงา ในช่วงระยะเวลาการทดลอง

จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยสูงสุดในแต่ละวันของจังหวัดพังงา พบว่าจำนวนวันที่ปริมาณฝนมีค่าเกิน 5 มิลลิเมตร/ชั่วโมง อยู่ที่ทั้งสิ้น 11 วัน คิดเป็นร้อยละ 13.10 ของเวลาทั้งหมดและ จาก

รูป 4-21 อุดหนุนในช่วงระยะเวลาการวางตัวอย่างนั้น พบว่าอุดหนุนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 27.6 องศาเซลเซียส ประกอบกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงระยะเวลาการวางตัวอย่าง จากรูป 4-22 ซึ่งพบว่ามีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 79 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าความชื้นเฉลี่ยนั้นมีค่าสูง ซึ่งจะเป็นการช่วยเร่งให้การชะล้างคลอไรด์ที่ผิวหน้าเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เนื่องจากการแพร่ผ่านผลต่างของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีประสิทธิภาพสูงในสภาพอากาศชื้น จึงทำให้ต้องมีการพิจารณาการชะล้างคลอไรด์ที่ผิวหน้าของตัวอย่างประกอบด้วย



รูป 4-21 ข้อมูลค่าอุณหภูมิในช่วงระยะเวลาการวางตัวอย่าง



รูป 4-22 ข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงระยะเวลาการวางตัวอย่าง

นอกจากนี้ ทิศทางการวางและติดตั้งตัวอย่าง ในการทดลองอาจส่งผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ในจังหวัดพังงา จากการทดสอบตัวอย่างทั้งหมดบนชั้นวางตัวอย่างหันหน้าตัวอย่างเข้าหาชายฝั่งทะเลซึ่งอยู่ทางทิศตะวันตก ซึ่งเป็นการหันหน้าเข้าหาทิศทางของคลื่น ดังรูป 4-23 และจากรูป 4-24 ค่าความเร็วและทิศทางของลม พบว่าทิศทางของลมในช่วงที่วางตัวอย่างนั้น มีแนวโน้มทิศทางพัดจากทิศใต้มุ่งสู่ทิศเหนือ จากการวิเคราะห์พบว่าทิศทางลมที่พัดจากทิศใต้ไปเหนือ นั้น จะพัดชนานกับหน้าตัวอย่างที่วางตั้งเข้าหาชายฝั่งทะเล ซึ่งเป็นผลให้ละอองคลอไรด์ที่เกิดขึ้นจากคลื่น ไม่สามารถพัดเข้าสู่หน้าตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันเป็นสาเหตุให้ปริมาณคลอไรด์ในช่วงที่วางตัวอย่างนั้นมีค่าน้อย



รูป 4-23 ทิศทางการวางและติดตั้งตัวอย่าง



รูป 4-24 ค่าความเร็วและทิศทางของลม

จากผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่าปริมาณละอองคลอไรด์ที่พัดเข้าสู่ชายฝั่งเป็นผลกระทบโดยตรงจากทิศทางการพัดของลม แม้ว่าค่าความเร็วของลมก็จะมีค่ามาก แต่หากว่าทิศทางของลมไม่ได้พัดเข้าสู่ชายฝั่งโดยตรง ค่าปริมาณคลอไรด์ก็จะมีแนวโน้มที่ต่ำ ซึ่งทิศทางลมและความเร็วลมนี้เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องพิจารณาประกอบกับข้อมูลสภาพอากาศต่างๆ อาทิ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นและความสูงของคลื่น เป็นต้น โดยสรุปคือ การทดลองหาค่าปริมาณคลอไรด์นี้ควรจะทำในพื้นที่และช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงเพื่อที่จะได้ค่าปริมาณคลอไรด์ที่เป็นค่าวิกฤต

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณคลอไรด์

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณคลอไรด์จากที่ได้ทำการศึกษาจากแหล่งข้อมูลต่างๆ รวมถึงจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ในช่วงเดือน มิถุนายนไปจนถึงเดือนตุลาคม ปริมาณคลอไรด์ในจังหวัดพังงา และ จังหวัดชลบุรี มีปริมาณสูงขึ้นเนื่องจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จึงทำให้ปริมาณคลอไรด์สูงขึ้นในช่วงเดียวกันของทุกปี ถึงแม้ว่าปริมาณคลอไรด์ในแต่ละปีอาจเปลี่ยนแปลงก็ตาม

นอกจากนี้จากข้อมูลงานวิจัยในอดีตได้มีการระบุว่า หากมอร์ตาร์ซีพิดติดตั้งในบริเวณที่มีปริมาณฝนมาก อาจทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากน้ำฝนสามารถชะปริมาณคลอไรด์ออกจากชิ้นงานได้ ดังนั้น ในงานวิจัยในอนาคตควรมีการเปรียบเทียบการหาปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการที่หลากหลายเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุด

5.2 ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในชิ้นตัวอย่าง

จากผลการทดสอบพบว่าถ้าลดช่วยลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในส่วนลึกของตัวอย่างมอร์ตาร์ได้อย่างมีนัยยะสำคัญ โดยถ้าลดแม่เมาะ เมื่อใช้ในปริมาณร้อยละ 30 ไม่สามารถป้องกันคลอไรด์ในช่วง 9.5 เดือนแรกได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่ากับถ้าลดจาก BLCF และถ้าลดจากประเทศญี่ปุ่น แม้ว่าจะป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ได้ผสมถ้าลด แต่ระหว่างช่วงเดือนแรกที่โครงสร้างถูกไอทะลาก็อาจจะเกิดสนิมได้แล้วโดยเฉพาะในโครงสร้างที่มีระยะหุ้มของเหล็กเสริมประมาณ 2 เซนติเมตรหรือต่ำกว่า ดังนั้นเมื่อใช้ในปริมาณร้อยละ 30 ควรใช้ถ้าลดจาก BLCF และญี่ปุ่นซึ่งเห็นประสิทธิภาพจากการทดลองในระยะยาวมากกว่า ซึ่งทั้งสองชนิด เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมี จัดอยู่ในถ้าลด Class C ตามมาตรฐาน ASTM แต่ด้วยความต่างขององค์ประกอบทางเคมีที่เป็นปัจจัยช่วงลดรูปหุ้มคือปริมาณ CaO ในถ้าลด และความต่างทางกายภาพคือค่าความละเอียดของอนุภาค (Fineness) จึงให้ผลที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบทำให้ทราบได้ว่าถ้าลดที่นำมาใช้นั้น ถึงแม้ว่าจัดอยู่ในประเภทเดียวกันตามมาตรฐาน ASTM แต่ผลการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในมอร์ตาร์นั้นมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าถ้าลดที่มาจากแหล่งโรงไฟฟ้าที่ต่างกัน มีคุณสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ที่ต่างกัน ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

จากการรวบรวมข้อมูลปริมาณคลอไรด์และการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อมอร์ตาร์ พบว่ามีปัญหาและอุปสรรคซึ่งควรปรับปรุง จึงได้มีการรวบรวมเป็นข้อเสนอแนะดังนี้

- 1) การทดสอบปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ควรมีการเตรียมตัวอย่างมากขึ้นโดยปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถจัดทำฐานข้อมูลเพื่อแนะนำการใช้งานได้อย่างเหมาะสม
- 2) ควรมีการตรวจสอบปริมาณคลอไรด์อย่างต่อเนื่องและเพิ่มจุดทดสอบเพื่อให้สามารถรวบรวมข้อมูลไว้ในฐานข้อมูลได้มากที่สุด
- 3) จากการสำรวจพื้นที่พบว่ามีโครงสร้างหลายจุดที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการเกิดสนิม จึงควรมีการป้องกัน เช่น การเคลือบผิวของโครงสร้างคอนกรีต การเลือกใช้คอนกรีตที่มีวัสดุ น้ำต่อวัสดุประสานต่ำ หรือ การเลือกค่าระยะหุ้มคอนกรีตให้เหมาะสมไม่น้อยจนเกินไป
- 4) ควรมีการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ เนื่องจากจากการทดสอบพบว่าถึงแม้เถ้าลอยแต่ละแหล่งจะจัดอยู่ในประเภทเดียวกันตามมาตรฐาน แต่สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้แตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรมีการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี และความเร็วในการทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมต่อไป
- 5) ในการทดสอบในอนาคตควรเพิ่มการทดสอบโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าลอยในคอนกรีต เพื่อพิจารณาผลของปริมาณเถ้าลอยที่กระทบต่อการซึมผ่านของคลอไรด์
- 6) ควรมีการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านอื่นเพิ่มเติม เช่น กำลังอัด ระยะเวลาการเซตตัว เนื่องจากหากมีการแทนที่คอนกรีตด้วยเถ้าลอยอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติในด้านอื่นๆ ได้

บรรณานุกรม

- ACI, A. (1997). 357R-84 (reappmved 1997) Guide for the De-sign and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures, California: American Certification Institute.
- ACI Committee 222 (2001). Protection of metals in concrete against corrosion. Farmington Hills, Michigan, American Concrete Institute: 41.
- ACI Committee 232 (2002). Use of Fly Ash in Concrete. Farmington Hills, Michigan, American Concrete Institute.
- ACI Committee 318, S. B. C. (1992). Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89)(Revised 1992) and Commentary-ACI 318R-89 (Revised 1992), American Concrete Institute.
- ASTM C618-17a (2017). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1152 (2008). Standard Test Method for Acid-soluble chloride in mortar and concrete. American Society for Testing Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM G140-02 (2002). Standard Test Method for Determining Atmospheric Chloride Deposition Rate by Wet Candle Method, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Berman, H. A. (1972). Determination of chloride in hardened portland cement paste, mortar, and concrete.
- Bockris, J. O. M. and A. K. N. Reddy (2004). Modern Electrochemistry 2B, Electrodicts in Chemistry, Engineering, Biology and Environmental Science. Boston, MA, Springer US.
- Bongochgetsakul, N. and S. Kokubo (2011). Measurement of Airborne chloride particle sizes distribution for infrastructures maintenance. IESL-SSMS Joint Symposium. Colombo, Srilanka. : 1-8.
- C.M. Hansson, A. P.,
- S. J. Jaffer, (2007). "Corrosion of reinforcing bars in concrete." Waterloo, Canada.
- Chindaprasirt, P., C. Jaturapitakkul and T. Sinsiri (2005). "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste." Cement and Concrete Composites **27**(4): 425-428.

Chindaprasirt, P., C. Jaturapitakkul and T. Sinsiri (2007). Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste.

ISO 9225 (1992). Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Measurement of pollution. Genève, Switzerland, International Organization for Standardization.

Kim, J., W. J. McCarter, B. Suryanto, S. Nanukuttan, P. A. M. Basheer and T. M. Chrisp (2016). "Chloride ingress into marine exposed concrete: A comparison of empirical- and physically- based models." Cement and Concrete Composites **72**: 133-145.

Lewis, D. (1961). Some aspects of the corrosion of steel in concrete, Council for Scientific and Industrial Research, National Building Research

Liu, J., G. Ou, Q. Qiu, X. Chen, J. Hong and F. Xing (2017). "Chloride transport and microstructure of concrete with/without fly ash under atmospheric chloride condition." Construction and Building Materials **146**: 493-501.

Meira, G. R., C. Andrade, C. Alonso, I. J. Padaratz and J. Borba (2007). Salinity of marine aerosols in a Brazilian coastal area—Influence of wind regime.

Papadakis, V. G. (2000). "Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. High-calcium fly ash." Cement and Concrete Research **30**(10): 1647-1654.

Portland Cement Association (2002). Types and causes of concrete deterioration. Skokie, Ill.

Saeki, T., M. Takeda, K. Sasaki and T. Shima (2010). STUDY ON QUANTITATIVE ESTIMATION OF AEROSOL CHLORIDES CONDITION.

Sagues, A. A., E. Moreno, W. Morris and C. Andrade (1997). Carbonation in concrete and effect on steel corrosion.

Wattanapornprom, R. and T. Ishida (2017). "Modeling of Chloride Penetration into Concrete under Airborne Chloride Environmental Conditions Combined with Washout Effects." Journal of Advanced Concrete Technology **15**(3): 126-142.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ว่าที่ ร.ต.นันทวิทย์ อาษานอก
วัน เดือน ปี เกิด	16 กรกฎาคม 2536
สถานที่เกิด	จังหวัดสมุทรปราการ
วุฒิการศึกษา	ประถมศึกษา-มัธยมศึกษา โรงเรียนอัสสัมชัญสมุทรปราการ ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	80/576 หมู่5 ถนนเทพารักษ์ ตำบลบางเมืองใหม่ อำเภอมะเมือง จังหวัด สมุทรปราการ 10270



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY