

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

ความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอย
ผงหินปูนและสารขยายตัว

เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต

31 ส.ค. 2559
365503 TH 00 24529

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
พฤษภาคม 2555
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา ได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

(ดร. ภัควัฒน์ แสนเจริญ)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชงชัย ศรีวิริรัตน์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร. อาณัติ ดิพัฒนา)

วันที่ 18 เดือน พ.ค. พ.ศ.2555

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา
และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา
(Construction & Maintenance Technology Research Center, CONTEC)
สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย ดำราญวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล ประจำศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อานนท์ วงษ์แก้ว หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา และ ดร. ภักวิวัฒน์ แสนเจริญ นักวิจัย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่กรุณาให้ความรู้ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขและวิจารณ์ผลงานทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบรวมทั้งให้คำแนะนำต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพาและจากศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (Construction & Maintenance Technology Research Center, CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเกรียงศักดิ์ คุณแม่กฤษณา ถกขมहालिचित และทุก ๆ คนที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิตาแด่บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

เอกศักดิ์ ถกขมहालिचित

50911603 : สาขาวิชา : วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ : ความต้านทานคลอไรด์, มอร์ตาร์, เถ้าลอย, ผงหินปูน, สารขยายตัว

เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาสิทธิ์: ความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว (CHLORIDE RESISTANCE OF PORTLAND CEMENT MORTAR WITH FLY ASH, LIMESTONE POWDER AND EXPANSIVE ADDITIVES)
 อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์ : ทวีชัย สำราญวานิช, Ph.D. 248 หน้า. ปี พ.ศ. 2555

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ทำการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ด้วยวิธี Bulk diffusion test วิธี Rapid chloride penetration test (RCPT) วิธี Rapid migration test (RMT) และวิธี Water absorption test

จากผลการทดลองของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด (Binary binder) พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนสารขยายตัวต่อวัสดุประสาน 0.10 มีความต้านทานคลอไรด์มากกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน และมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05 0.15 และ 0.25 มีความต้านทานคลอไรด์น้อยลงตามอัตราส่วนผงหินปูนที่เพิ่มขึ้น สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานสามชนิด (Ternary binder) พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.15 และ 0.15 มอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.25 และ 0.05 และมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนสารขยายตัวและเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.10 และ 0.30 มีความต้านทานคลอไรด์มากกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้มอร์ตาร์ทุกส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานคลอไรด์มากกว่ามอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานมีความต้านทานคลอไรด์ที่สูงกว่ากับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน

นอกจากนี้พบว่า การทดสอบความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ด้วยวิธี Bulk diffusion test วิธี RCPT และวิธี RMT ให้ผลทดสอบความต้านทานคลอไรด์ไปในแนวทางเดียวกัน แต่วิธี Water absorption test ให้ผลทดสอบแตกต่างจากวิธีอื่น ๆ อยู่บ้าง และสุดท้ายได้เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ เพื่อใช้ทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

50911603 : MAJOR : CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS : CHLORIDE RESISTANCE, MORTAR, FLY ASH, LIMESTONE POWDER
EXPANSIVE ADDITIVES

AKEKASAK RERKMAHALIKHIT: CHLORIDE RESISTANCE OF PORTLAND
CEMENT MORTAR WITH FLY ASH, LIMESTONE POWDER AND EXPANSIVE
ADDITIVES. ADVISORY COMMITTEE : TAWEECHAI SAMRANWANICH, Ph.D.

248 P. 2012

This research aims to study the chloride resistance of mortar whose binder was partially replaced by fly ash, limestone powder and expansive additives at different ratio. The water to binder ratio (w/b) was employed at 0.40 and 0.50. Bulk diffusion test, rapid chloride penetration test (RCPT), rapid migration test (RMT) and water absorption test were determined to investigate chloride resistance.

From the experimental results of mortar with binary binder, it was found that mortar with fly ash to binder ratio of 0.30 and mortar with expansive to binder ratio of 0.10 has higher chloride resistance than cement-only mortar. The more higher limestone powder to binder ratio from 0.05, 0.15 and 0.25 results in lower chloride resistance. For mortar with ternary binder, it was found that mortar with fly ash and limestone powder to binder ratio of 0.15 and 0.15, mortar with fly ash and limestone powder to binder ratio of 0.25 and 0.05 and mortar with expansive additives and fly ash to binder ratio of 0.10 and 0.30 have higher chloride resistance than cement-only mortar. It was clearly note that mortar with w/b of 0.40 has higher chloride resistance than mortar with w/b of 0.50. Type 1 Portland cement mortar has higher chloride penetration resistance than type 5 Portland cement mortar.

Furthermore, it was found that the investigations of chloride resistance of mortar by bulk diffusion test, RCPT and RMT give same tendency results of chloride resistance. But, water absorption test still gives different tendency of results from others. Finally, mathematical models for determining surface chloride content and chloride diffusion coefficient of mortar is presented for predicting chloride penetration of mortar in chloride environment.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์.....	6
กลไกการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยคลอไรด์.....	6
ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต.....	12
แหล่งที่มาของคลอไรด์.....	14
การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต.....	15
ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	20
ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต.....	22
ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	24
สารผสมเพิ่ม.....	24
แร่ผสมเพิ่ม.....	25
ถั่วลอย ฟูนหินปูนและสารขยายตัว.....	27
วิธีทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์.....	30
การเปรียบเทียบผลการทดสอบความต้านทานคลอไรด์.....	47

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย และวิธีดำเนินการวิจัย..... 53
	การทดลอง..... 53
	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง..... 53
	อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีที่ใช้ในการทดลอง..... 56
	การทดสอบการแพร่ทั้งหมด..... 56
	การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง..... 65
	การทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง..... 68
	การทดสอบการดูดซึมน้ำ..... 73
	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบหา ความต้านทานคลอไรด์..... 76
	การวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สัมประสิทธิ์การแพร่ของ คลอไรด์ของมอร์ตาร์..... 77
	ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์การ แพร่ของคลอไรด์ของมอร์ตาร์..... 78
4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง..... 79
	ผลกระทบของประเภทปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์..... 79
	การแพร่ทั้งหมด..... 79
	การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง..... 81
	การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง..... 83
	การดูดซึมน้ำ..... 84
	อภิปรายผลกระทบของประเภทปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานคลอไรด์ ของมอร์ตาร์จากผลการทดสอบต่าง ๆ..... 84
	ผลกระทบของการใช้สารผสมเพิ่มแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานต่อความ ต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์..... 85
	ผลกระทบของการใช้ถ้ำลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานต่อความ ต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์..... 85
	การแพร่ทั้งหมด..... 85

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง.....	88
การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง.....	89
การดูดซึมน้ำ.....	90
อภิปรายผลกระทบของเกลือต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ จากผลการทดสอบต่าง ๆ.....	91
ผลกระทบของการใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานต่อความ ต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์.....	92
การแพร่ทั้งหมด.....	92
การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง.....	99
การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง.....	101
การดูดซึมน้ำ.....	102
อภิปรายผลกระทบของผงหินปูนต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ จากผลการทดสอบต่าง ๆ.....	102
ผลกระทบของการใช้สารขยายตัวแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานต่อความ ต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์.....	104
การแพร่ทั้งหมด.....	104
การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง.....	109
การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง.....	111
การดูดซึมน้ำ.....	112
อภิปรายผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานคลอไรด์ของ มอร์ตาร์จากผลการทดสอบต่าง ๆ.....	113
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความต้านทานคลอไรด์ ของมอร์ตาร์.....	114
การแพร่ทั้งหมด.....	114
การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง.....	133
การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง.....	133

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การดูดซึมน้ำ.....	134
อภิปรายผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความต้านทาน คลอไรด์ของมอร์ตาร์จากผลการทดสอบต่าง ๆ.....	135
ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่อความต้านทานคลอไรด์ของ มอร์ตาร์.....	136
การแพร่ทั้งหมด.....	136
ผลกระทบของอายุการบ่มต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์.....	139
การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง.....	139
ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์.....	141
แนวทางการเลือกวิธีทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์.....	143
การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์.....	144
การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อใช้คำนวณคลอไรด์ที่ผิวหน้า (Cs) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ (Da).....	145
ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ (Cs).....	147
สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ (Da).....	161
การตรวจสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ	166
5 สรุปผล.....	203
บรรณานุกรม.....	205
ภาคผนวก	211
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดสอบความสามารถกักเก็บคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมฝุ่นหินปูน.....	212
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดสอบการแพร่ทั้งหมด.....	214
ภาคผนวก ค ตัวอย่างข้อมูลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง.....	221
ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง.....	227
ภาคผนวก จ ตัวอย่างข้อมูลการทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	232
ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างข้อมูลการหาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจากการ ลากเส้นแนวโน้มโดยใช้วิธีผลรวมของผลต่างกำลังสองน้อยสุด.....	236

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ข ตัวอย่างข้อมูลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยวิธี Trial & Error	242
ประวัติย่อของผู้วิจัย	248

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ	11
2-2	ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต	13
2-3	องค์ประกอบของน้ำทะเล	15
2-4	เกณฑ์วัดคุณภาพความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต	35
2-5	สรุปวิธีการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์	48
3-1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5	54
3-2	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย, ผงหินปูนและสารขยายตัว	56
3-3	สัดส่วนผสมมอร์ตาร์	61
4-1	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์และข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการพัฒนา แบบจำลอง	149
4-2	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ (D_u) และข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการ พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์	163

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	แสดงความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์.....	7
2-2	กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์.....	8
2-3	กลไกการเกิดสนิมใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	8
2-4	แบบจำลองวงจรชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	10
2-5	กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	11
2-6	กลไกการดึงดูคแบบคาพิลลารี.....	17
2-7	กลไกการดึงดูคไอออนเข้าไปในคอนกรีต.....	17
2-8	ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	20
2-9	แบบจำลองของโครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล.....	22
2-10	แผนผังแสดงชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต.....	23
2-11	แผนผังแสดงประเภทของสารผสมเพิ่ม.....	26
2-12	รายละเอียดวิธีการทดสอบ Salt Ponding Test.....	31
2-13	การทดสอบ Salt Ponding Test.....	32
2-14	ตัวอย่าง Chloride Profile.....	32
2-15	ปรากฏการณ์ Wick action.....	32
2-16	รายละเอียดวิธีการทดสอบ Bulk Diffusion Test.....	33
2-17	รายละเอียดวิธีการทดสอบ RCPT.....	34
2-18	รายละเอียดวิธีการทดสอบ Electrical Migration Techniques.....	37
2-19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์ต่อเวลา.....	37
2-20	รายละเอียดวิธีการทดสอบ RMT.....	39
2-21	ตัวอย่างคอนกรีตหลังพ่นด้วยสารละลาย Silver Nitrate.....	39
2-22	รายละเอียดวิธีการทดสอบ Resistivity Techniques.....	41
2-23	Wenner array probe.....	42
2-24	รายละเอียดวิธีการทดสอบ Pressure Penetration Techniques.....	44
2-25	รายละเอียดวิธีการทดสอบ Sorptivity.....	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2-26	อุปกรณ์ทดสอบ Sorptivity ในสนาม.....	46
2-27	กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดลองด้วยวิธีการทดสอบตาม มาตรฐานของ NordTest.....	50
2-28	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดสอบ Salt ponding test กับสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดสอบ ACMT.....	50
2-29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดสอบ Salt ponding test ด้วยวิธี Colourimetric method และวิธี Chloride profile.....	51
2-30	เปรียบเทียบผลทดลองหาค่าความต้านทานคลอไรด์ระหว่างวิธีแบบระยะสั้น ด้วย วิธี RCPT และ RMT และวิธีแบบระยะยาวด้วยวิธี Immersion test.....	52
3-1	เถ้าลอย (Fly Ash).....	55
3-2	ฝุ่นหินปูน (Limestone Powder).....	55
3-3	สารขยายตัว (Expansive Additives).....	55
3-4	เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ.....	57
3-5	ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้ว.....	58
3-6	เครื่อง Potentiometric titration.....	58
3-7	เครื่องดูด (Suction apparatus).....	58
3-8	เครื่องต้ม (hot plate).....	59
3-9	เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล.....	59
3-10	แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 ซม.....	59
3-11	ชิ้นตัวอย่างที่เคลือบผิวด้านข้างด้วยสารกันซึม.....	60
3-12	การแช่ตัวอย่างในสารละลายเกลือเข้มข้น 5%.....	60
3-13	การกรองสารละลายตัวอย่าง.....	64
3-14	การไตเตรท โดยเครื่อง Potentiometric titration.....	65
3-15	แบบหล่อตัวอย่างทดสอบ RCPT.....	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-16 เซลล์ทดสอบ RCPT.....	66
3-17 เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า.....	67
3-18 การบ่มตัวอย่างในน้ำ.....	67
3-19 การทดสอบ RCPT.....	68
3-20 เซลล์ตัวอย่างทดสอบ RMT.....	69
3-21 ท่อวางทดสอบ RMT.....	69
3-22 Cathode (Stainless steel).....	70
3-23 Anode (Stainless steel).....	70
3-24 การใส่ชิ้นทดสอบในท่อวาง.....	71
3-25 การตรวจสอบการรั่วซึม.....	72
3-26 การทดสอบ RMT.....	72
3-27 การผ่าแยกตัวอย่าง.....	72
3-28 แสดงตำแหน่งการวัดความลึก.....	73
3-29 อุปกรณ์การทดสอบ Water absorption.....	74
3-30 การเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50° C.....	75
3-31 การเก็บตัวอย่างในภาชนะ.....	75
3-32 การหุ้มปิดตัวอย่าง.....	75
3-33 การทดสอบ Water absorption test.....	76
3-34 แสดงตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบ Water absorption test.....	76
4-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน.....	80
4-2 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน.....	80

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-3 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน	81
4-4 ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์อายุ 7, 28 และ 91 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับ 5 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40.....	82
4-5 ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์อายุ 7, 28 และ 91 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับ 5 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	82
4-6 ผลทดสอบ RMT ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับ 5 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50	83
4-7 ผลทดสอบ Water absorption test ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับ 5 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50	84
4-8 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้เกลือแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเกลือต่อวัสดุประสาน 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 35 วัน.....	86
4-9 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้เกลือแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเกลือต่อวัสดุประสาน 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 91 วัน.....	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-10	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน	87
4.11	ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์อายุ 7, 28 และ 91 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน กับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	88
4.12	ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์อายุ 7, 28 และ 91 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน กับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50	89
4.13	ผลทดสอบ RMT ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน กับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50	90
4.14	ผลทดสอบ Water absorption test ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน กับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50	91
4-15	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน	93

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-16	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน	93
4-17	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน	94
4-18	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน	94
4-19	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน	95
4-20	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน	95

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-26	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 182 วัน	98
4-27	ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05, 0.15 และ 0.25 และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อผงหินปูน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50	100
4-28	ผลทดสอบ RMT ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมผงหินปูน ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน 0.05, 0.15 และ 0.25 ตามลำดับ และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมผงหินปูนและเถ้าลอยที่อัตราส่วน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50	101
4-29	ผลทดสอบ Water absorption test ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05, 0.15 และ 0.25 ตามลำดับ และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมผงหินปูนและเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50	103

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4-36	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและแก้ลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับแก้ลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนออก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กัน ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน.....	108
4-37	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและแก้ลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับแก้ลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนออก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กัน ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน.....	108
4-38	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและแก้ลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับแก้ลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนออกที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กัน ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน.....	109
4-39	ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและแก้ลอย ที่อัตราส่วน 0.10 : 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50.....	110

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4-40	ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.10 : 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50.....	112
4-41	ผลทดสอบ Water absorption test ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.10 : 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50.....	113
4-42	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน.....	115
4-43	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน.....	115
4-44	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วัน.....	116
4-45	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 35 วัน.....	116

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-53	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้วยนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน...	120
4-54	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเกลือลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเกลือลอยเท่ากับ 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวด้วยนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน.....	121
4-55	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเกลือลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเกลือลอย เท่ากับ 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวด้วยนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน.....	121
4-56	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเกลือลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเกลือลอยเท่ากับ 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวด้วยนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน.....	122
4-57	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเกลือลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเกลือลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน.....	122
4-58	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเกลือลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเกลือลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน.....	123

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-59	ปริมาณคลอรีนทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 182 วัน.....	123
4-60	ปริมาณคลอรีนทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 35 วัน.....	124
4-61	ปริมาณคลอรีนทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 91 วัน.....	124
4-62	ปริมาณคลอรีนทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 182 วัน.....	125
4-63	ปริมาณคลอรีนทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.15 เทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 35 วัน.....	125
4-64	ปริมาณคลอรีนทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.15 เทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 91 วัน.....	126

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-71	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน.....	129
4-72	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน.....	130
4-73	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน.....	130
4-74	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน.....	131

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-75	131
ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน.....	
4-76	132
ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน.....	
4-77	132
ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน.....	
4-78	133
ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50.....	
4-79	134
ผลทดสอบ RMT ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50.....	
4-80	135
ผลทดสอบ Water absorption ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50.....	
4-81	136
ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35, 91 และ 182 วัน.....	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-82 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 35, 91 และ 182 วัน	137
4-83 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 35, 91 และ 182 วัน	137
4-84 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 35, 91 และ 182 วัน	138
4-85 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 35, 91 และ 182 วัน	138
4-86 ผลการทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์อายุ 7, 28, 91 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50	140
4-87 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการทดสอบ RMT-RCPT ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน	141
4-88 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการทดสอบ RMT-Water absorption test ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน	142
4-89 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการทดสอบ RCPT- Water absorption test ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน	142
4-90 แผนภาพโดยรวมแสดงการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์	147
4-91 ตัวอย่างการหาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์	148

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4-92	ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตและแนวโน้มของปริมาณเกลือคลอไรด์ จากงานวิจัยของ Song et al. (2008).....	150
4-93	แผนภาพแสดงขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์.....	152
4-94	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักจากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาดัดที่ผิวหน้า....	155
4-95	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักจากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาดัดที่ผิวหน้า....	156
4-96	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาดัดที่ผิวหน้า	156
4-97	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาดัดที่ผิวหน้า.....	157
4-98	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาดัดที่ผิวหน้า....	157

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-99	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับจากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า.....	158
4-100	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์ จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า....	158
4-101	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า....	159
4-102	ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูนในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณเกลือคลอไรด์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า.....	159
4-103	ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับจากการคำนวณเทียบกับปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณเกลือคลอไรด์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า.....	160

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-104 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับจากการคำนวณเทียบกับปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณเกลือคลอไรด์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า.....	160
4-105 ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับจากการคำนวณเทียบกับปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณเกลือคลอไรด์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า.....	161
4-106 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์แบบปรากฏในคอนกรีตของมอร์ตาร์.....	164
4-107 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....	167
4-108 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....	167
4-109 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....	168

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-116	171
<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	171
4-117	172
<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	172
4-118	172
<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	172
4-119	173
<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่ วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการ คำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	173
4-120	173
<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่ วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการ คำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	173

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4-126	<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่ วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการ คำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	176
4-127	<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่ วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการ คำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	177
4-128	<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่ วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการ คำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	177
4-129	<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่ วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการ คำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	178
4-130	<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่ วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการ คำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	178

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
<p>4-141 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	184
<p>4-142 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	184
<p>4-143 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	185
<p>4-144 สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	185

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-145	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....	186
4-146	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....	186
4-147	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....	187
4-148	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....	187
4-149	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....	188

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-150	188
<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	
4-151	189
<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	
4-152	189
<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	
4-153	190
<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	
4-154	190
<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4-160	<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือ คลอไรด์จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น.....</p>	193
4-161	<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น..</p>	194
4-162	<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น..</p>	194
4-163	<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น..</p>	195
4-164	<p>สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น..</p>	195

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-175	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น...	201
4-176	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น...	201
4-177	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น...	202
4-178	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น...	202

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลักการออกแบบโครงสร้างที่ดีคือการออกแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักออกแบบได้ตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความคงทนของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างควบคู่ไปกับการออกแบบความแข็งแรงของโครงสร้างนั้นด้วย แต่ในหลายสภาวะแวดล้อมคอนกรีตจะมีคุณสมบัติทางกลโดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติการรับน้ำหนักบรรทุกค่าไปตามกาลเวลา เนื่องจากถูกกระทำจากปัจจัยหลายอย่างในสิ่งแวดล้อม

ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากคลอไรด์เป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete structures) โดยเมื่อเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สะสมบริเวณผิวเหล็กเสริมมีค่ามากเพียงพอ ก่อให้เกิดเป็นสาเหตุเริ่มต้นในการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ทำให้คอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมเกิดการแตกร้าว และหลุดออกเป็นแผ่น ๆ ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างลดลง และทำให้เกิดผลกระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีต ดังนั้นจึงเป็นเรื่องจำเป็นและสำคัญที่จะต้องทำการป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

แนวทางการพัฒนาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความทนทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ วิธีหนึ่งก็คือ การใช้กากของเสียที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีต เช่น การใช้เถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน และเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้า หรือ การใช้ผงหินปูน (Limestone powder) ที่เป็นกากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมการย่อยหินเพื่อการผลิตปูนซีเมนต์ มาใช้เป็นวัสดุอุดรูพรุน (Filler material) เพื่อต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ เป็นอีกหนึ่งวิธีที่จะช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องนำไปกำจัด (Treatment) โดยการเปลี่ยนของเสียจากแหล่งผลิตหนึ่ง ๆ ไปเป็นวัสดุที่มีประโยชน์สำหรับแหล่งผลิตอื่น ๆ ด้วย หลักการนี้ กากทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นวัสดุไม่มีมูลค่า จะถูกเปลี่ยนเป็นวัสดุภัณฑ์ ซึ่งมีมูลค่าและใช้แทนวัสดุตามธรรมชาติได้ (Raw material) ช่วยลดการสูญเสียของสมดุลธรรมชาติจากการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดในการผลิตปูนซีเมนต์ ทำให้ประหยัดงบประมาณมหาศาลใน

การกำจัดของเสีย นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาโลกร้อน (Global warming) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ทำให้ลดปัญหามลภาวะและ ปัญหาสุขภาพที่เกิดขึ้นกับชุมชนที่อยู่อาศัยใกล้เคียงได้ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้นำสารขยายตัว (Expansive additives) มาใช้ในงานคอนกรีตด้วย เพื่อลดปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีต ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาหาความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว โดยใช้วิธีการทดสอบหาค่าความต้านทานคลอไรด์รวมทั้งสิ้นจำนวน 4 วิธี คือ การทดสอบแบบระยะยาว (Long-term test) ใช้วิธีการทดสอบการแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test) การทดสอบระยะสั้น (Short-term test) ใช้วิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test: RCPT) และการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid migration test: RMT) การทดสอบทางอ้อม (Indirect test) ใช้วิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test) ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด ในงานวิจัยครั้งนี้จะนำผลการทดสอบที่ได้รับจาก 4 วิธีดังกล่าว (ผู้วิจัยได้ทดสอบหาความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์พิเศษบางส่วนผสม แสดงไว้ในภาคผนวก ก) มาวิเคราะห์ เปรียบเทียบ เพื่อนำไปใช้พิจารณาหาส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดี นอกจากนี้ในงานวิจัยจะพิจารณาถึงแนวโน้มและความสัมพันธ์ของผลการทดสอบที่ได้รับจากแต่ละวิธีการทดสอบหาค่าความต้านทานคลอไรด์ด้วย เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการพิจารณาเลือกใช้วิธีการทดสอบ บนเงื่อนไขและข้อจำกัดของแต่ละวิธีทดสอบ เพื่อให้เลือกวิธีการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ได้อย่างเหมาะสม

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัว และเพื่อหาส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดี
2. เพื่อศึกษาหาแนวทางการเลือกวิธีทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์แบบระยะยาว แบบระยะสั้นและแบบทดสอบทางอ้อม ที่เหมาะสมกับประเภทของงานที่ต้องการการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์
3. เพื่อศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อนำไปหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว

ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยแบ่งออกเป็น

1. วัสดุประสานที่ใช้

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้วัสดุผสมเพิ่มเติมที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ จำนวน 3 ชนิดคือ เถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว

2. ส่วนผสม

ใช้มอร์ตาร์เป็นตัวอย่างทดสอบ โดยใช้อัตราส่วนทรายอิมควิวแห้ง (SSD) ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 2 ค่า คือ 0.40 และ 0.50 โดยนำให้น้ำประปาในห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยวัสดุผสมเพิ่ม คือ

มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด (Binary binder)

เถ้าลอย แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ผงหินปูน แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 5, 15 และ 25 โดยน้ำหนัก

สารขยายตัว แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานสามชนิด (Ternary binder)

เถ้าลอยและสารขยายตัว แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 30 และ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตามลำดับ

เถ้าลอยและผงหินปูน แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 และร้อยละ 25, ร้อยละ 15 และ ร้อยละ 15, ร้อยละ 25 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

3. การทดสอบ

ใช้การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ 3 แบบ จำนวน 4 วิธี ดังนี้ คือ

3.1 การทดสอบแบบระยะยาว (Long-term test)

ใช้วิธีการทดสอบการแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test) ทดสอบ โดยแช่มอร์ตาร์ที่มีอายุครบ 28 วัน ในสารละลาย NaCl เข้มข้น 5% เป็นเวลา 35, 91, 182 วัน แล้วนำไปทดสอบหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่แทรกซึมในเนื้อมอร์ตาร์ที่ระยะความลึกต่าง ๆ จากผิวมอร์ตาร์ โดยใช้วิธีทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบบางส่วนของ ASTM C1556

3.2 การทดสอบแบบระยะสั้น (Short-term test)

ใช้วิธีทดสอบ 2 วิธี คือ

3.2.1 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test: RCPT) ใช้มอร์ตาร์ที่มีอายุครบ 7, 28, 91 วัน ติดตั้งระหว่างเซลล์ทดสอบโดยใช้สารละลาย NaCl

เข้มข้น 3 % ในเซลล์ฝั้งแคโทด และใช้สารละลาย 0.1M NaOH ในเซลล์ฝั้งแอโนด ใช้แรงดันไฟฟ้า 60 โวลต์ เป็นเวลา 6 ชม. ในการทดสอบ อ้างอิงวิธีทดสอบบางส่วนตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C1202

3.2.2 การทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid migration test: RMT) ใช้มอร์ตาร์ที่มีอายุครบ 28 วัน คัดตั้งในท่ออย่าง แซ่ในเซลล์ทดสอบโดยใช้สารละลาย NaCl เข้มข้น 3% ฝั้งแคโทด และใช้สารละลาย 0.1M NaOH ฝั้งแอโนด ใช้แรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์ เป็นเวลา 8 ชม. ในการทดสอบ โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบบางส่วนตามมาตรฐานการทดสอบ NT BUILD 443, Tang and Nilsson (1991) และ Tong and Gjørsv (2001)

3.3 การทดสอบแบบทางอ้อม (Indirect test)

ใช้วิธีทดสอบการดูดซึ้มน้ำ (Water absorption test) โดยนำมอร์ตาร์ที่มีอายุครบ 28 วัน เก็บในตู้อบที่อุณหภูมิ 50° C เป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นแยกเก็บในภาชนะมีฝาปิดอีก 15 วัน นำตัวอย่างไปทดสอบหาปริมาณการดูดซึ้มน้ำ โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบบางส่วนตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C1585

สำหรับการทดสอบการแพร่ทั้งหมด แสดงผลการทดสอบในรูปความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือคลอไรด์เทียบกับระยะทางจากผิวนอกมอร์ตาร์ (Chloride penetration profile) หลังจากนั้นใช้ข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ (Chloride diffusion coefficient) ในหน่วย ($\text{cm}^2/\text{ปี}$)

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง แสดงผลการทดสอบในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (Charge passed) ในหน่วยคูลอมบ์ (Coulomb) เปรียบเทียบกันระหว่างมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมต่าง ๆ

การทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่งแสดงผลการทดสอบในรูประยะความลึก เนื่องจากการแทรกซึมของคลอไรด์เปรียบเทียบกันระหว่างมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมต่าง ๆ

การทดสอบการดูดซึ้มน้ำ แสดงผลการทดสอบในรูปความสัมพันธ์ของค่าการดูดซึ้มน้ำ (Sorptivity or Rate of water absorption) ในหน่วย ($\text{mm.} / \text{วินาที}^{0.5}$) เปรียบเทียบกันระหว่างมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมต่าง ๆ

นำผลการทดสอบจากวิธีทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์ทั้ง 4 วิธี มาพิจารณาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดี และเพื่อพิจารณาหาความสัมพันธ์หรือเปรียบเทียบแนวโน้มของผลการทดลองที่ได้รับจากการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์ด้วยวิธีต่าง ๆ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ทำให้ทราบถึงความต้านทานคลอไรด์เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว และทราบถึงส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดี
2. ทำให้ทราบถึงแนวโน้มหรือความสัมพันธ์ของผลการทดลองของการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์ของการทดสอบแบบระยะยาว แบบระยะสั้น และแบบทดสอบทางอ้อม
3. เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการพิจารณาเลือกใช้วิธีทดสอบหาค่าความต้านทานคลอไรด์ที่เหมาะสมกับประเภทของงานที่ต้องการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์
4. ทำให้ทราบถึงสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัว

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

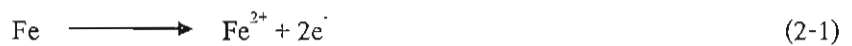
การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์เป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ ดังแสดงในภาพ 2-1 โดยเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบาง ๆ (Passive film) ที่มีคุณสมบัติเป็นด่างเคลือบผิวเหล็กไว้เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก และถ้าคลอไรด์ไอออนสามารถแทรกซึมผ่านเนื้อคอนกรีตและสะสมรวมตัวกันที่ผิวเหล็กเสริมจนมีปริมาณมากพอจนถึงค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) ฟิล์มนี้ก็จะถูกทำลาย และเมื่อมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอบริเวณที่เหล็กเสริมไม่มีฟิล์มป้องกันอยู่ จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มต้นเกิดสนิม (Depassivation) โครงสร้างเกิดการแตกร้าว และคอนกรีตหลุดออกเป็นแผ่น ๆ (Delamination) ดังแสดงในภาพที่ 2-2

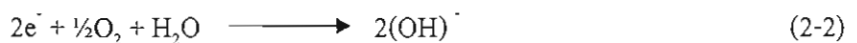
กลไกการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยคลอไรด์

1. ปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ดังแสดงในภาพ 2-3 ในคอนกรีตเริ่มต้นจาก บริเวณที่ฟิล์มถูกทำลายมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่เหมาะสม กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrolysis) จะเกิดขึ้น กล่าวคือ บริเวณที่ฟิล์มออกไซด์ถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก (Anodic process) ดังสมการเคมีต่อไปนี้



อิเล็กตรอน (e^-) ที่เกิดขึ้นนี้ จะวิ่งผ่านไปยังฟิล์มที่ไม่ได้ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathodic) ทำปฏิกิริยากับน้ำ และออกซิเจน จนเกิดกระบวนการคะโทดิก (Cathodic process) เกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน ($(\text{OH})^-$) ดังสมการเคมีต่อไปนี้

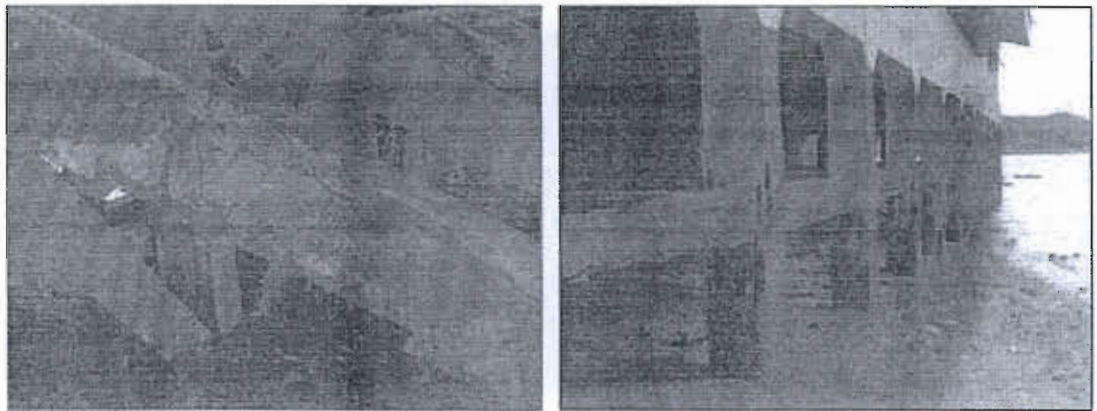


หลังจากนั้นปฏิกิริยาการเกิดสนิมจะเกิดขึ้น โดยที่ Fe_2O_3 ก็คือ เฟอริกออกไซด์ หรือสนิม (Rust) นั่นเอง ดังสมการต่อไปนี้

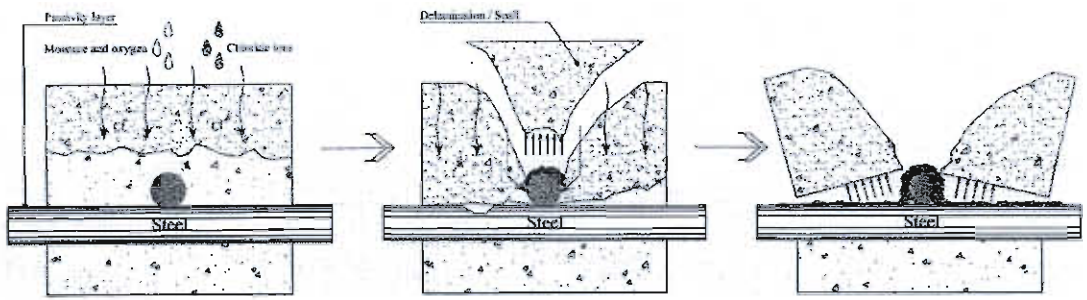


2. กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543)

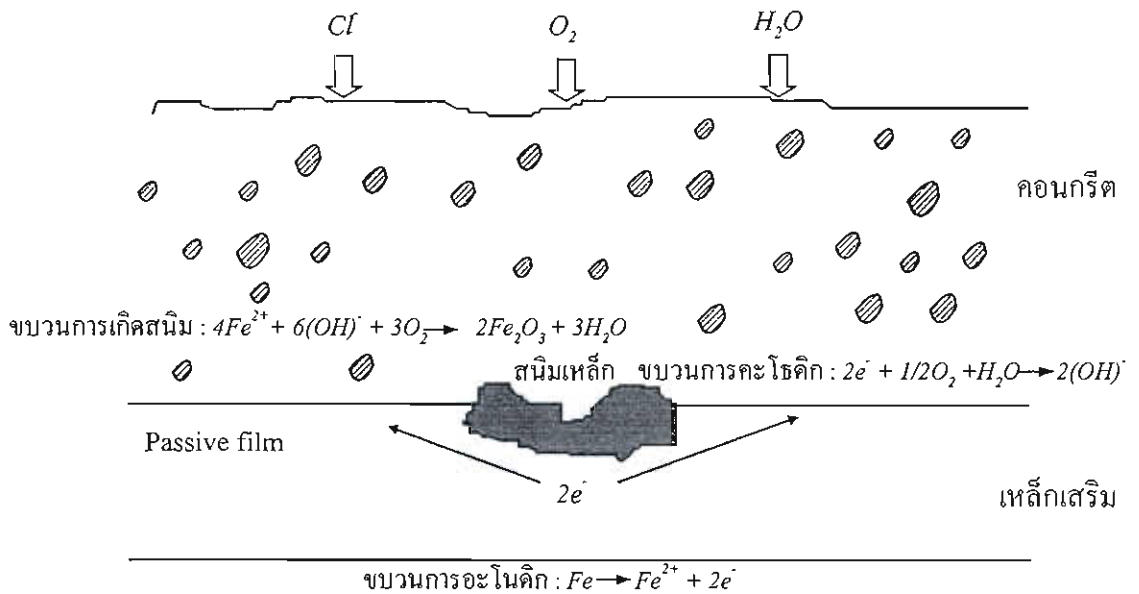
คลอไรด์ไอออนเป็นตัวการที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เมื่อคลอไรด์ไอออนเข้าไปสะสมที่ผิวของเหล็กเสริมมากจนถึงจุดวิกฤต เหล็กเสริมจะเริ่มเกิดสนิมและพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ โดยกระบวนการในการเกิดสนิมจากสาเหตุของการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออนผ่านเนื้อคอนกรีตนั้น สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอนคือ Initial period และ Propagation period ดังแสดงในภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-1 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการทำลายของคลอไรด์



ภาพที่ 2-2 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์



ภาพที่ 2-3 กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

1. Initial period หรือ ระยะเวลาช่วงแรก (t_0) หมายถึง ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่หล่อคอนกรีตเสร็จจนถึงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วงนี้คลอไรด์ไอออนจะแพร่ผ่านเข้ามาสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต นอกจากนั้นออกซิเจนและน้ำจะซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปยังเหล็กเสริมเช่นกัน ซึ่งระยะเวลาช่วงแรก (t_0) นี้จะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ความสามารถซึมผ่านได้ของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต และความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น

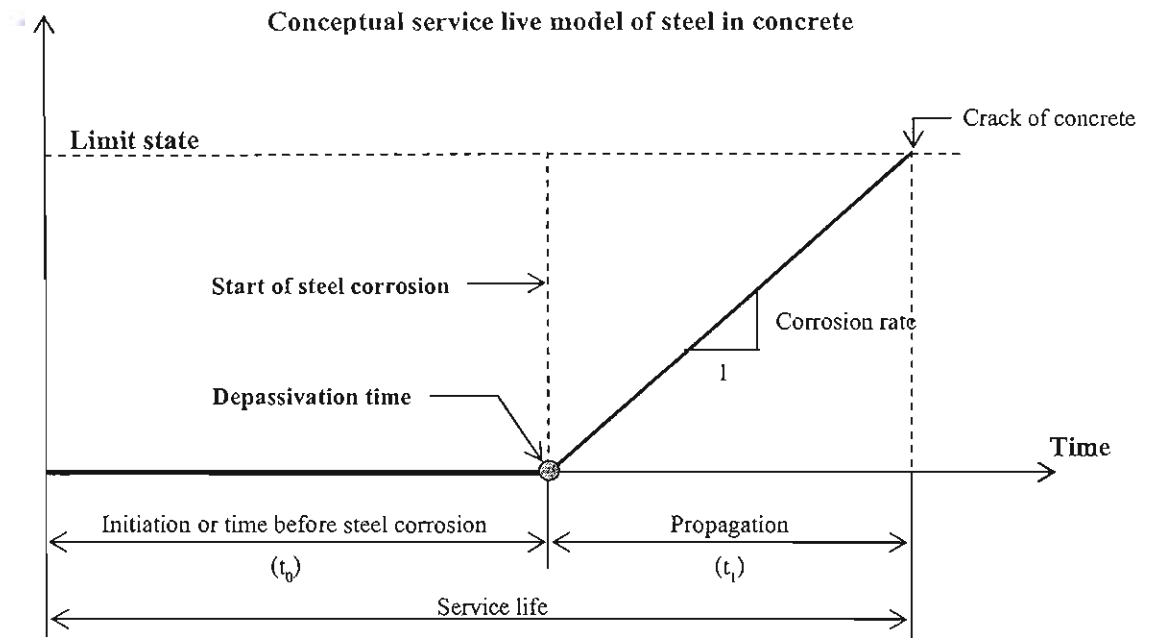
2. Propagation period หรือ ระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง (t_1) หมายถึง ช่วงระยะเวลาของการพัฒนาการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในคอนกรีต คือ เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งาน

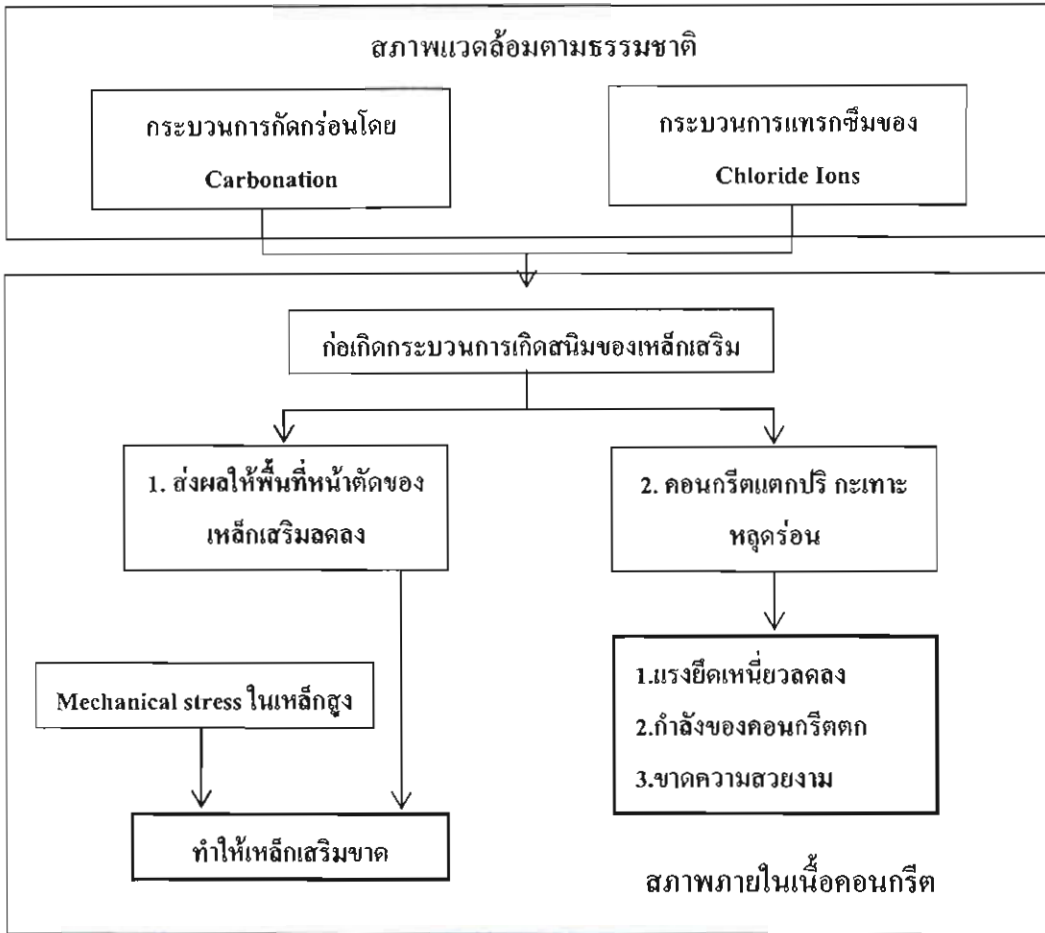
กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น จะทำให้เหล็กเสริมบริเวณขั้วลบลูกกัดกร่อนทำให้เหล็กเสริมมีขนาดหน้าตัดเล็กลง และเหล็กเสริมบริเวณขั้วบวกก็จะเกิดเป็นสนิม ซึ่งสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะมีการพัฒนาเพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อย ๆ ประมาณ 4-6 เท่า คัดน้ำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่กะเทาะออก เมื่อการเกิดสนิมเพิ่มมากขึ้น คอนกรีตก็จะหลุดร่อนออกเป็นชั้น ๆ ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เป็นผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนี้สูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่นคงแข็งแรงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง อัตราการพัฒนากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ความรุนแรงของสภาพแวดล้อมรอบโครงสร้างนั้น ๆ นอกจากการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออนผ่านเนื้อคอนกรีต จะเป็นสาเหตุของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว ปฏิริยาคาร์บอนชั้นยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริมคอนกรีต ดังแสดงในแผนภาพที่ 2-5 ซึ่งปฏิริยาคาร์บอนชั้นนี้จะลดความเป็นด่างของคอนกรีตลง ซึ่งความเป็นด่างของคอนกรีตนี้จะเป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมเกิดสนิม โดยปกติ ค่า pH ของคอนกรีตจะอยู่ระหว่าง 12-13 หากค่า pH ของคอนกรีตลดลงจนถึงจุดวิกฤต รวมทั้งมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ซึ่งค่า pH ก็จะเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่ามีโอกาสเกิดสนิมได้มากน้อยเพียงใด แสดงในตารางที่ 2-1

Funahashi M. (1990) กล่าวว่า การเกิดสนิมแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ 1. Initial period จะเริ่มเมื่อคลอไรด์ไอออนซึมผ่านเข้าไปสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤติ โดยมีค่าปริมาณของคลอไรด์อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.2 – 1.33 กก/ม³ หรือตั้งแต่ 75 – 1175 ppm. ของคอนกรีต หลังจากนั้นคือ 2. Propagation period ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดปฏิริยาทางไฟฟ้าเคมี ส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กขึ้นอย่างต่อเนื่อง

Bakker (1988) กล่าวว่า ในกรณีที่คอนกรีตปนเปื้อนคลอไรด์ตั้งแต่เริ่มผสม การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ส่วนกรณีสัมผัสกับเกลือที่ละลายในน้ำทะเล ปริมาณของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามเวลา และอาจนำไปสู่สภาวะที่คอนกรีตไม่สามารถปกป้องเหล็กเสริมจากการกัดกร่อนได้อีกต่อไป



ภาพที่ 2-4 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต (ทวิชัย, 2550)



ภาพที่ 2-5 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ทวีชัย, 2550)

ตารางที่ 2-1 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ (Shamsad, 2003)

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

ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) ของคอนกรีต

ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤต หมายถึงระดับหรือปริมาณคลอไรด์ที่มากเพียงพอที่ทำให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มเกิดสนิม ทั้งนี้ต้องมีปัจจัยอื่นร่วมด้วยนั่นคือ ความชื้นและออกซิเจนในปริมาณที่เหมาะสม โดยกระบวนการในการเกิดสนิมดังกล่าวนี้จะอยู่ในช่วงขยายตัวต่อเนื่อง Propagation period ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีอย่างต่อเนื่อง ในการศึกษาเกี่ยวกับระดับคลอไรด์วิกฤตนั้นเราสามารถเปรียบเทียบค่าระดับคลอไรด์วิกฤตในรูปของค่าเปอร์เซ็นต์ของปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต ค่าเปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์อิสระต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และอัตราส่วน Cl^-/OH^- จากการทดลองของนักวิจัยหลายท่านได้สรุปค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 2-2

Alonso et al. (2000) สรุปค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตที่เหล็กเสริมภายในคอนกรีตจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา แสดงดังในตารางที่ 2-2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตมีค่าที่กระจุกกระจายในช่วงกว้าง ๆ ทั้งนี้เป็นเพราะมีความแตกต่างของปริมาณคลอไรด์ที่ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตและลักษณะต่าง ๆ ของค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤต ค่าอัตราส่วน Cl^-/OH^- หรือ ปริมาณเกลือคลอไรด์โดยน้ำหนักของซีเมนต์

Thomas (1996) ศึกษาประสิทธิภาพของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน ที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเผชิญในสภาวะน้ำขึ้นน้ำลงในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 4 ปี เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเหล็กเสริมในตัวอย่างคอนกรีต ที่ใช้เหล็กเสริมที่มีคุณภาพ และการใช้เถ้าลอยในปริมาณต่าง ๆ พบว่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตมีค่าที่ลดลงเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้น โดยจะมีค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤต 0.70%, 0.65%, 0.50%, และ 0.20% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 0%, 15%, 30% และ 50% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน สามารถป้องกันเหล็กเสริมภายในสิ่งแวดล้อมทะเลได้ เนื่องจากเถ้าลอยจะเพิ่มความสามารในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน

ตารางที่ 2-2 ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต(Alonso et al., 2000)

Condition	Reference	Environment	Values or intervals			Depassivation detection method
			Free Cl (%wc)	Total Cl (%wc)	Cl/OH	
Solution simulating the Concrete	Hausmann	Solution			0.60	Shift in corrosion potential visual inspection
Solution simulating the Concrete	Gouda	Solution			0.35	Anodic polarization, shift in potentials and visual observation
Steel in alkaline solution with chloride	Goni and Andrade	Solutions			0.25 - 0.80	Averaged corrosion rate
Mortar suspensions	Gouda and Halaka	OPC BFSC		2.42 1.21		Anodic polarization
Cements with high or low alkali content	Pettersson	Mortar 80% RH 100%RH		0.6 - 1.8 0.5 - 1.7	2.5 - 6.0 1.7 - 2.6 1.7 - 2.6	Corrosion rate
Brit. OPC and Sp. BFSC (Cl- added as admixture)	Andrade and page	OPC BFSC			0.15 - 0.69 0.12 - 0.44	Corrosion rate
Three OPC mortar (external chloride)	Hansson and Sorenson	100% RH 50% RH		0.6 - 1.4		Increase in current density potentiostatic test
Concrete slabs stored in 10% Cl seawater	Pettersson	Concrete			1.8 - 2.9	Corrosion rate
Concrete exposed to external chloride contamination	Lambert et al.	Concrete			3.00	Corrosion rate
Concrete with added Cl	Gouda and Halaka	OPC BFSC		3.04 1.01		Anodic polarization
No pre-cleaning the bars	Gouda and Halaka	OPC		0.60		Anodic polarization
Cl added as admixture Mediun strength concrete High strength concrete High strength concrete + Supplement High strength concrete + Supplement + flyash	Kayyali and Haque	Concrete MS HS HSS HSSFA	1.15 0.85 0.80 0.45			Assumeing a threshod Cl/OH value of 0.6, calculation of free chlorides

ตารางที่ 2-2 ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต(Alonso et al., 2000) (ต่อ)

Condition	Reference	Environment	Values or intervals			Depassivation detection method
			Free Cl (%wc)	Total Cl (%wc)	Cl/OH	
Cement with different C3A content C3A content = 2.43% C3A content = 7.59% C3A content = 14.00%	Hussain et al.	Concretes	0.14 0.17 0.22	0.35 0.62 1.00		Assuming a threshold Cl/OH value 0.3
Concrete with admixed Cl And externally exposed to Cl	Schiessl and Breit	OPC BFSC FA		0.5-1.0 1-1.5 1-1.5		Macrocells currents
Concrete prisms at marine exposure	Thomas et al.			0.50		Visual odservation + mass loss
Reinforced concrete prisms with Fly ash at marine exposure Fly ash content = 0 Fly ash content = 15% Fly ash content = 30% Fly ash content = 50%	Thomas	Concrete		0.70 0.65 0.50 0.20		Mass loss
Conerete slabs with added Cl to various exposure conditions	Hope and Ip	OPC		0.097- 0.19		Corrosion rate , AC impedance, visual inspection, gravimetric mass loss

แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์ในเนื้อของคอนกรีตนั้นอาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง หรือมาจากภายนอกโครงสร้างคอนกรีตในช่วงเวลาที่ใช้งาน โดยคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเองนั้นอาจมาจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หิน ทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หิน ทราย จากแหล่งที่อยู่ใกล้ทะเล หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ซึ่งจะมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนมากจะมาจากคลอไรด์ภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาพแวดล้อมทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing salt) (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543) โดยทั่วไปแล้ว แหล่งที่มาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมาจากน้ำทะเล ซึ่งการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยน้ำทะเลนั้น จะเกิดขึ้นได้ทั้งจากเกลือซัลเฟต และเกลือคลอไรด์ โดยสาเหตุการเกิดสนิมของเหล็ก

เสริมภายในโครงสร้างนั้น จะมีสาเหตุจากเกลือคลอไรด์เป็นหลัก เนื่องจากในน้ำทะเลมีสารละลายคลอไรด์อยู่เป็นส่วนใหญ่ (มากกว่า 90 %) เมื่อเปรียบเทียบกับซัลเฟต ดังแสดงในตารางที่ 2-3 ซึ่งมีปริมาณมากถึง 27,000 ส่วนในล้านส่วน ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลเสื่อมสภาพได้ง่าย อย่างไรก็ตามสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น แม้คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้มาก แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน หรือมีออกซิเจนในปริมาณที่ไม่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างก็ไม่สามารถเกิดขึ้น ดังนั้นผลกระทบของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงมีไม่มากนัก

การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีตได้ ซึ่งจะมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเสื่อมสภาพลง โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่าง ๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้นแรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้น กลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไก ดังนี้

ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบของน้ำทะเล (Mindess and Young, 1981)

Composition of seawater	Quantity (ppm)
Sodium chloride	27,000
Magnesium chloride	3,200
Magnesium sulphate	2,200
Calcium sulphate	1,100
Calcium chloride	500
Total dissolved salts	34,000

1. การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่นี้จะผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อิมด้ว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์ไอออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของไอออน โดยคลอไรด์ไอออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูง ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนต่ำ ซึ่งจะเป็นไปตามกฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งแสดงดังสมการ 2-4 ดังนี้

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial x^2} \quad (2-4)$$

โดยที่ $C_i(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวค้ำานนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

$C_f(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง x จากผิวค้ำานนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

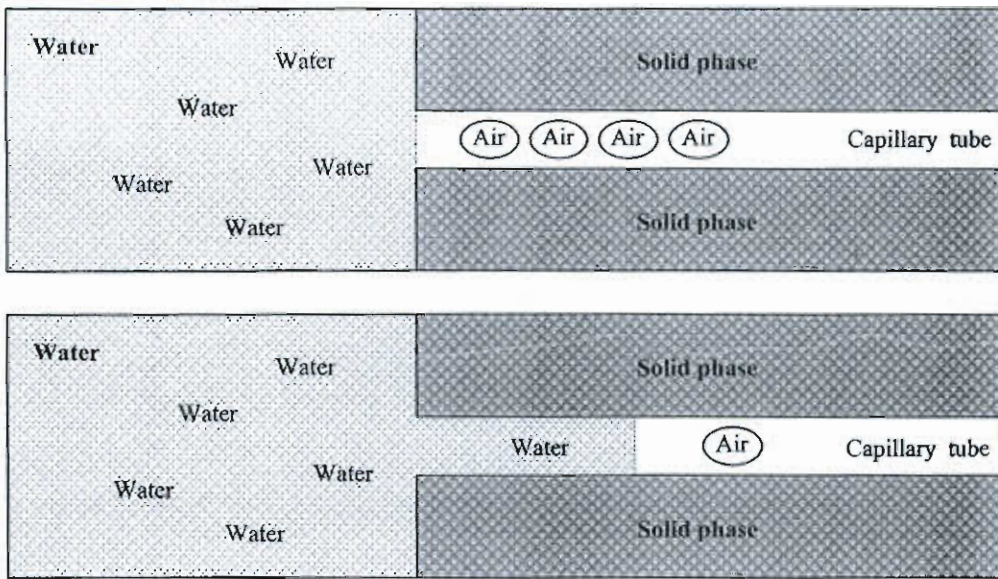
D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.²/ปี)

x คือ ระยะทางจากผิวค้ำานนอกของคอนกรีต (ซม.)

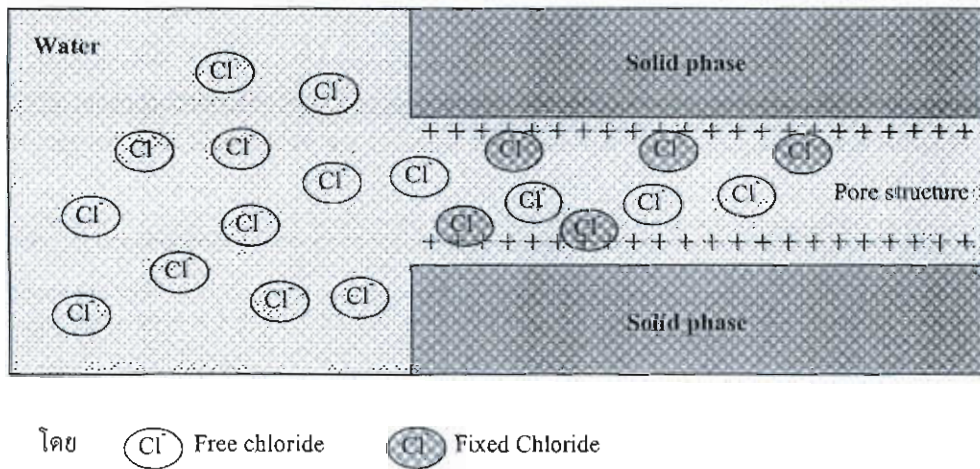
t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

2. การดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) โดยการดึงดูดแบบคาพิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปในโพรงแห่งขนาดเล็กในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลมักจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กภายในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาอันสั้น ดังแสดงในภาพที่ 2-6

3. การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนจะเกิดสูงขึ้นเนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างใน



ภาพที่ 2-6 กลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารี (ทวีชัย, 2550)



ภาพที่ 2-7 กลไกการดึงดูดไอออนเข้าไปในคอนกรีต (ทวีชัย, 2550)

คอนกรีต จะดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น ดังแสดงในภาพที่ 2-7

4. แรงดันน้ำ (Permeability /Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำ

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยที่ในคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตนั้นสัมผัสอยู่จะแพร่จากคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูง ไปสู่คอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำกว่า และเมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตแล้วคลอไรด์ก็จะแพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง ไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า จึงทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์ เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

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

Khatip and Mangat (2002) ทำการทดลองถึงผลกระทบของการบ่มที่อุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้วัสดุแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน โดยใช้อัตราส่วนผสมของคอนกรีต 3 อัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งอัตราส่วนผสมที่ 1 ใช้ซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน และอัตราส่วนผสมที่ 2 และ 3 ใช้เถ้าลอย 20% และ ซิลิกาฟุ่ม 9% แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ผลการทดสอบของการแช่ตัวอย่างในช่วงเวลาสั้น ๆ พบว่า การบ่มในช่วงต้นจะส่งผลกระทบต่อ การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต และผลของอุณหภูมิที่สูง และความชื้นที่ต่ำส่งผลกระทบต่อ การแทรกซึมของการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตในช่วงที่เผชิญเกลือคลอไรด์สั้น ๆ มากกว่า ตัวอย่างที่อยู่ในอุณหภูมิปกติ และใช้วิธีการบ่มเปียก ทั้งนี้เนื่องจากการบ่มแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้น้ำที่ผิวหน้าของตัวอย่างสูญหายไป และปฏิกิริยาไฮเดรชันถูกจำกัดผลกระทบของการบ่มจะส่งผลกระทบต่อตัวอย่างเผชิญกับคลอไรด์ในช่วงเวลานานและ การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์จะลดลงเมื่อให้เถ้าลอย และซิลิกาฟุ่ม แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต

Thomas and Bamforth (1999) พบว่า ถ้าลดยาส่งผลกระทบต่อการแทรกซึมของคลอไรด์สำหรับคอนกรีตในช่วงอายุสั้น ๆ แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุยาวนานขึ้นแล้วลดยาส่งจะช่วยให้ปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้อย่างมาก

Dhir et al. (1998) ได้เสนอวิธีการทำนายการกระจายตัวของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดภายในคอนกรีต พบว่า การกระจายตัวของคลอไรด์ทั้งหมดสามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลแบบน้อยลง

Wee et al. (1997) ได้เสนอวิธีการคำนวณค่าการกระจายตัวของปริมาณคลอไรด์ในวัสดุซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยคำนึงถึงผลของความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งพบว่าให้ผลการคำนวณเป็นที่น่าพอใจ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

Tumidajski and Chan (1996) พบว่า สารซัลเฟตและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่จะปรากฏผลตรงกันข้ามในกรณีที่เป็นคอนกรีตที่ผสมตะกั่วเหล็ก

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

Kayyali and Haque (1988) กล่าวว่า คอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมที่มีเกลือคลอไรด์ต้องการระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตที่มากเพียงพอ เนื่องจากการบ่มคอนกรีตที่นานเพียงพอจะทำให้โครงสร้างของโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตมีขนาดเล็ก และส่งผลทำให้การแพร่ของคลอไรด์ในเนื้อของคอนกรีตเกิดขึ้นได้ยาก

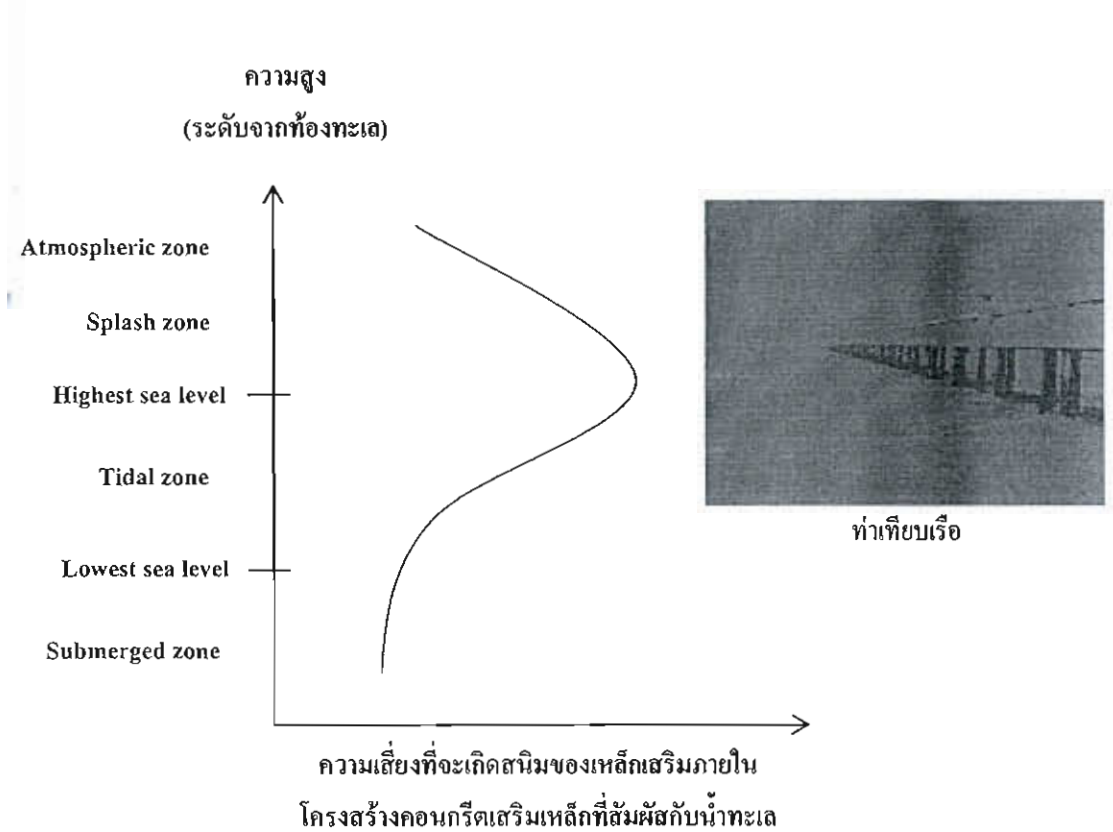
Gjølrv and Vennesland (1979) พบว่า อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีตมีผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตส่วนที่อยู่ใกล้ผิวด้านนอกของคอนกรีตมากกว่าชนิดของปูนซีเมนต์ เมื่อช่วงระยะเวลาการแช่น้ำทะเลสั้น ๆ แต่หากเมื่อระยะเวลาในการแช่น้ำทะเลมากขึ้นแล้ว ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในผสมของคอนกรีต จะมีผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีตส่วนที่อยู่ลึกเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีต มากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์



อ.
624-1821
0644
2555
พ.5

ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ความเสี่ยงที่จะเกิดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะ มีมากที่สุด ในบริเวณ โครงสร้างที่อยู่ในบริเวณคลื่นละอองน้ำ ร่องลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมบนเหล็กเสริมใน โครงสร้างได้น้อยมาก ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2-8



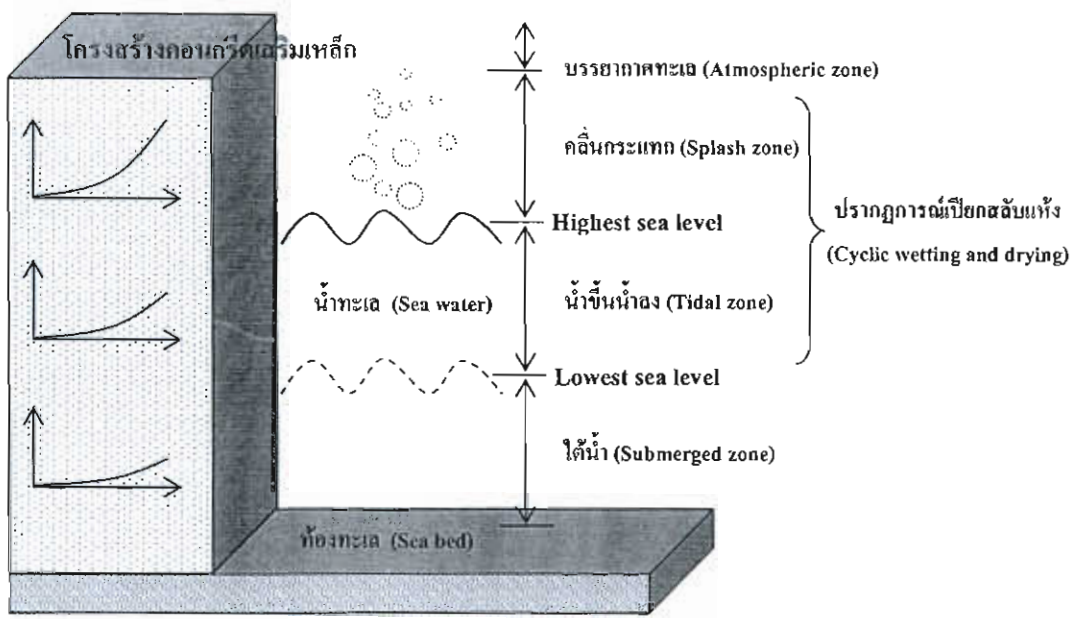
ภาพที่ 2-8 ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
(ทวิชัย, 2550)

การที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมบนเหล็กเสริมในโครงสร้างน้อยกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำ เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีต อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนจะละลายในน้ำได้น้อยมาก เป็นผลทำให้อัตราการแพร่ในคอนกรีตเกิดขึ้นน้อยถึงแม้ว่า จะมีปริมาณออกซิเจนมากในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมภายใน

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นก็จะถูกจำกัดไปด้วย อัตราการแพร่ของออกซิเจนที่ต่ำ ผ่านช่องว่างที่อึดด้วยตัวของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่สภาพเปียกสลัดแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้ง โดยการแพร่ หรือการซึมผ่าน จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อึดตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง น้ำที่ผิวของคอนกรีตจะระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจะสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อคลอไรด์อึดอนที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต มีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ และกระจายเข้าสู่ภายในคอนกรีต ทำให้คลอไรด์เข้าสู่บริเวณผิวของเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติคอนกรีตจะเปียกได้เร็วแต่จะแห้งได้ช้า และภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้น การแพร่ของคลอไรด์อึดอนเข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปในคอนกรีตของคลอไรด์อึดอนในสภาพเปียกสลัดแห้ง โดยภาพที่ 2-9 แสดงแบบจำลองของโครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์อึดอนเข้าไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียก และแห้ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางของลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และสภาพการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันในแต่ละส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกจะเร่งให้คลอไรด์อึดอนเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง โดยมีช่วงแห้งที่นานกว่านั้น จะมีโอกาสเกิดปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ได้มากกว่า และสนิมจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณคลอไรด์อึดอนที่ผิวของเหล็กเสริมมีมากพอที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเริ่มเกิดสนิมได้



ภาพที่ 2-9 แบบจำลองของโครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล (ทวีชัย, 2550)

ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้น ๆ เผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีตนั้น เกิดจากผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท ดังแสดงตามภาพที่ 2-10 ได้แก่

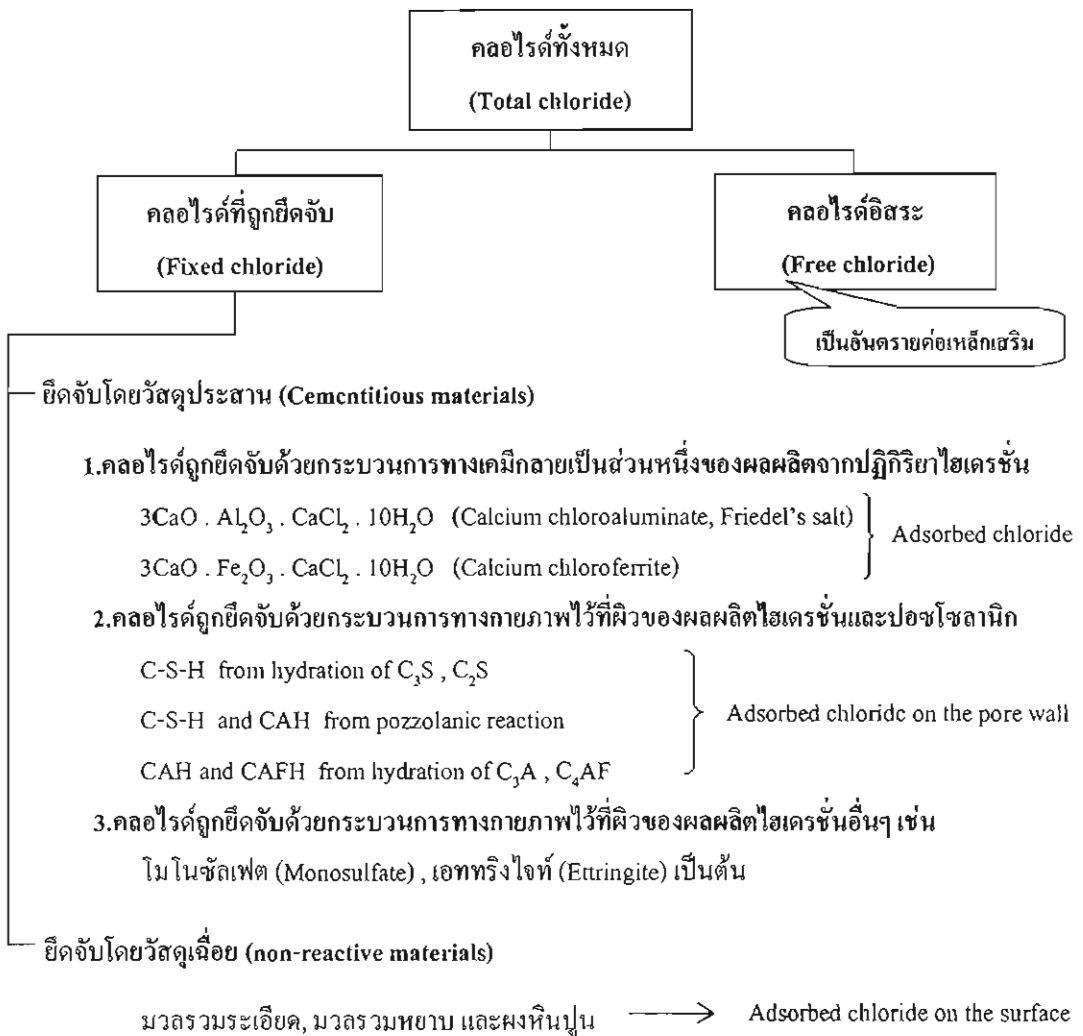
1. คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้ คือ

1.1 Chemical binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับยึดโดยผลผลิตที่เกิดขึ้นเนื่องจากจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Friedal's salt) หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Calcium chloroferrite)

1.2 Physical binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกจับยึดด้วยลักษณะและแรงทางกายภาพ (Surface force) ตามผิวหรือโพรงของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกจับยึดอยู่บนผิวของวัสดุเนื้อเยื่อ เช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหิน ได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

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

Types of chloride in concrete



ภาพที่ 2-10 แผนผังแสดงชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต (ทวีชัย, 2550)

ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูญเสียการรับแรงลงไป เนื่องจากสาเหตุการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีอยู่ 2 ประการ คือ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543)

1. ขนาดของเหล็กเสริมบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะ โนดิก (เหล็กเสริมสูญเสียอิเล็กตรอน) จะมีหน้าตัดของเหล็กเสริมเล็กลงอย่างต่อเนื่อง เนื้อเหล็กบางส่วนกลายเป็นสารละลาย (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน (e) ทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเพื่อรับแรงของโครงสร้างในบริเวณนั้น ๆ ลดลง
2. การเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตที่อยู่บริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาณมากกว่าเนื้อเหล็กเดิม ซึ่งในบางกรณีสนิมเหล็กอาจจะมีปริมาตรที่มากกว่า 6 เท่าของเนื้อเหล็กเดิม โดยจะทำให้คอนกรีตที่หุ้มหุ้มเหล็กเสริมอยู่นั้นแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมได้ (Splitting crack)

ดังนั้น ผลกระทบ โดยรวมจากสาเหตุข้างต้นนี้ คือ จะส่งผลทำให้กำลังรับแรงของโครงสร้างนั้นลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานความล้า (Fatigue strength) และความสามารถในการแอ่นตัว หรือเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย นอกจากนี้ความยืดหยุ่น (Stiffness) ก็ลดลง ทั้งนี้การเกิดรอยร้าวเป็นการเร่งให้น้ำ และออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็ว และมากยิ่งขึ้นซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เร่งอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็ว และรุนแรงมากขึ้น

สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่ม หมายถึง สารใด ๆ นอกเหนือไปจากปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวม อันใช้เติมลงไปในส่วนผสมของคอนกรีตไม่ว่าจะก่อนหรือกำลังผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพคอนกรีตสดหรือคอนกรีตแข็งตัวแล้วให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ อาจแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 ประเภท คือ (เครื่องซีเมนต์ไทย, 2548)

1. สารเคมีผสมเพิ่ม เป็นสารเคมีที่ใช้เติมลงในส่วนผสมคอนกรีตก่อนผสมหรือขณะผสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่น ลดปริมาณน้ำในส่วนผสม, เร่งหรือหน่วงการก่อตัวและการแข็งตัว, ปรับปรุงความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสด เป็นต้น
2. แร่ผสมเพิ่ม มีลักษณะเป็นผงละเอียด ที่เติมลงไปในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการใช้งาน เช่น เพิ่มกำลัง, เพิ่มความคงทน, ทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถในการยึดเกาะตัวดีขึ้น, สามารถใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ได้บางส่วน เป็นต้น

3. สารผสมเพิ่มชนิดอื่น ๆ ได้แก่ สารผสมเพิ่มอื่น ๆ ที่ไม่จัดอยู่ในสองประเภทแรก ซึ่งผลิตขึ้นมาใช้งานเฉพาะอย่างเท่านั้น

รายละเอียดของการจำแนกประเภทของสารผสมเพิ่มแต่ละชนิดแสดงไว้ในรูปที่ 2-11

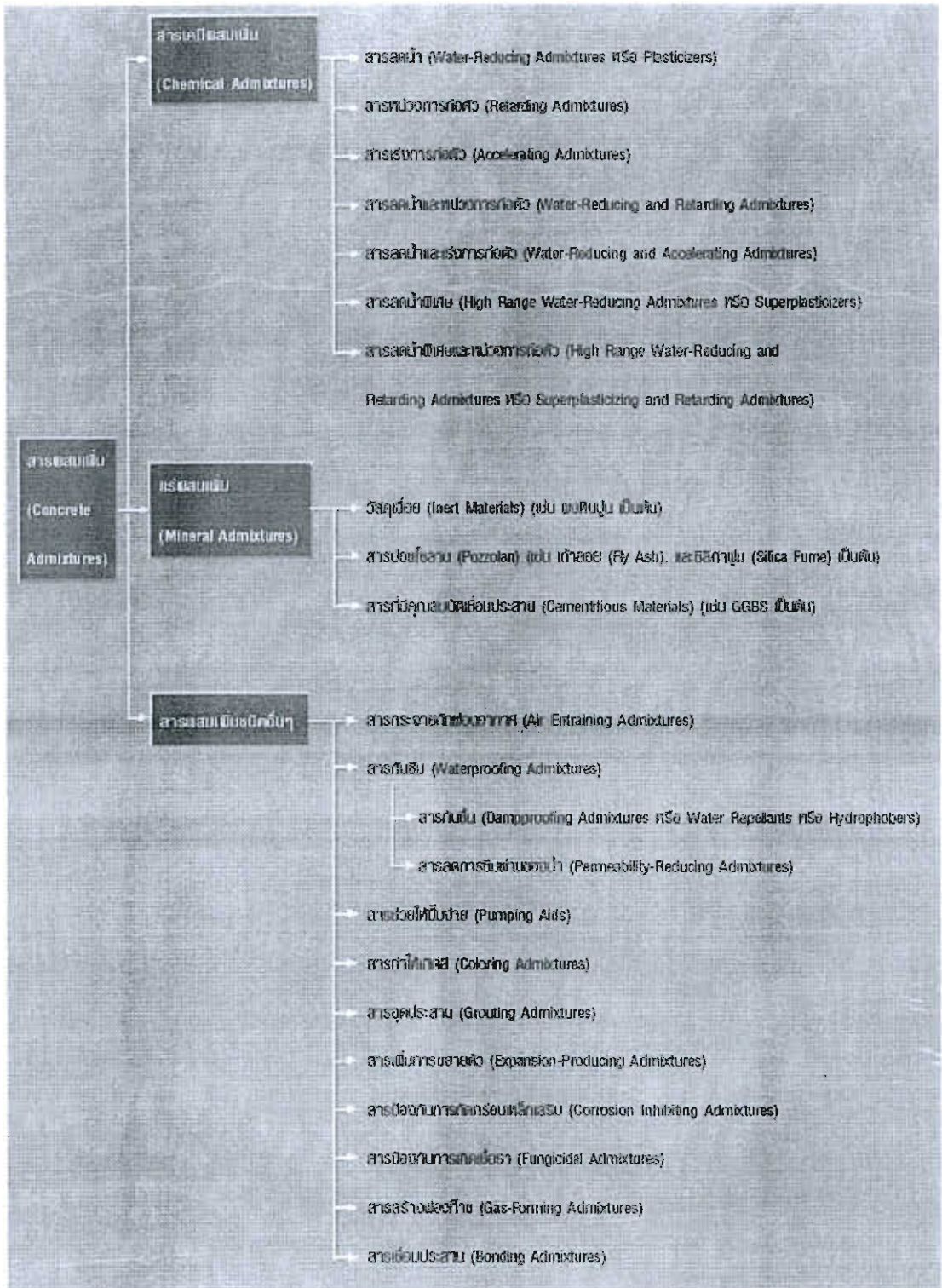
แร่ผสมเพิ่ม

แร่ผสมเพิ่ม (Mineral admixtures) มักจะเป็นผงละเอียดใส่รวมในคอนกรีต เพื่อปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตสด และเพิ่มความคงทนของคอนกรีตแข็งตัวแล้ว โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ (เครื่องซีเมนต์ไทย, 2548)

1. วัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาดำหรือวัสดุเฉื่อย (Inert materials) สารผสมเพิ่มชนิดนี้ใช้เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ขาดอนุภาคขนาดเล็ก เช่น คอนกรีตที่ทำจากทรายหยาบ หรือที่มีปริมาณซีเมนต์อยู่น้อย คอนกรีตนี้อาจแยกตัวได้ง่าย ไม่เหมาะสำหรับการลำเลียงและการเทลงแบบ การปรับปรุงการเกาะตัวและความเหลวของคอนกรีตนี้ด้วยการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์อาจทำไม่ได้ด้วยเหตุผลทางเทคนิค เช่น ทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมาก เป็นต้น วิธีการที่ทำได้คือ การใส่แร่ เช่น ผงหินปูน หรือ ผงหินปูน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาดำ ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสาน เหมาะสำหรับการปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูงเท่านั้น

2. สารปอซโซลาน (Pozzolan) คือ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาหรือซิลิกาและอลูมินา มีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่อุณหภูมิปกติ ร่วมกับความชื้น ก่อให้เกิดสารเชื่อมประสานใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน นั่นคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) เพิ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

การใช้สารปอซโซลานโดยทั่วไป จะช่วยเพิ่มความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตสดที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อยู่น้อย มีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรก แต่กำลังจะสูงขึ้น



ภาพที่ 2-11 แผนผังแสดงประเภทของสารผสมเพิ่ม (เครือซีเมนต์ไทย, 2548)

เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นและจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุมากกว่า 28 วัน และยังคงช่วยให้ทำให้คอนกรีตมีความคงทนต่อสารเคมีสูงขึ้น เพราะปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลง นอกจากนี้สารปอซโซลานยังช่วยลดปริมาณและอัตราความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมสารปอซโซลานจะขึ้นอยู่กับประเภทและปริมาณสารปอซโซลานในส่วนผสมคอนกรีต การบ่ม และอุณหภูมิ การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตอาจจำเป็นต้องมีการทดลองผสม ต้องควบคุมการบ่มให้ดีและนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ปริมาณการใช้ข้อมขึ้นอยู่กัประเภทและลักษณะงาน โครงสร้าง และชนิดและคุณสมบัติของสารปอซโซลาน โดยอาจใช้ได้ปริมาณมากถึง 15-40% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์หรือมากกว่านี้ ตัวอย่างสารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ เป็นต้น

3. สารที่มีความสามารถเป็นตัวเชื่อมประสาน (Cementitious materials) คือ สารซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเมื่อผสมน้ำ เช่น GGBS (Ground granulated blast-furnace slag)

เถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว

เถ้าลอย (Fly Ash) มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ที่เป็นกากของเสียที่ได้รับจากโรงงานไฟฟ้า ในแต่ละปีในประเทศไทยจะเกิดเถ้าลอยประมาณ 3 ล้านตัน(ปริญา และชัย, 2549) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไฟฟ้า และต้องใช้งบประมาณมหาศาลในการกำจัดหรือหาที่กองเก็บ ซึ่งนอกจากจะก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อม ยังก่อให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะทางอากาศเกิดเป็นปัญหาด้านสุขภาพกับชุมชนอาศัยใกล้เคียง ดังนั้นการนำเถ้าลอยมาใช้ให้เกิดประโยชน์นอกจากจะเป็นการช่วยลดปัญหาดังกล่าวแล้ว ยังช่วยลดการสูญเสียของสมมูลธรรมชาติจากการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดในการผลิตปูนซีเมนต์ ทำให้ประหยัดงบประมาณมหาศาลในการกำจัดของเสีย และยังช่วยลดปัญหาโลกร้อน (Global warming) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์

เถ้าลอยเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในคอนกรีตไม่ใช่เรื่องใหม่ มีรายงานเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยมาใช้แทนปูนซีเมนต์โดย Davis และคณะ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2480 (ค.ศ. 1937) หลังจากนั้นมามีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์อีกเป็นจำนวนมาก และมีการนำเถ้าลอยไปใช้ในงานจริงเป็นจำนวนมาก ด้วยเช่นกัน (ปริญา และชัย, 2552) การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการ ซึ่งรวมถึงการเพิ่มความทนทานให้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete structures) ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ดังนั้นจึงได้มีการนำเถ้าลอยไปใช้เป็นส่วนผสมของโครงสร้างคอนกรีตเสริม

เหล็กที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ในงานจริงอย่างแพร่หลาย แต่การผสมเกลือในงานคอนกรีตก็มีข้อดีขอยบางประการ เช่น ต้องใช้เวลาในการบ่มนาน, กำลังคอนกรีตในช่วงเริ่มต้นขึ้นช้า เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (ปริญญา, 2548)

ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นกากของเสียที่เป็นผลพลอยได้จากการข่อยหินเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และในงานคอนกรีต ที่ก่อให้เกิดผงหินปูนในประเทศไทยถึง 2.25 ล้านตันต่อปี (ปิติ และคณะ, 2543) ถึงแม้ว่าผงหินปูนจะเป็นวัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำเป็นวัสดุเฉื่อย และไม่ได้มีคุณสมบัติของวัสดุประสาน แต่ก็มีการวิจัยหลายงานที่รายงานถึงประโยชน์ของการนำผงหินปูนไปใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต เนื่องจากการใช้ผงหินปูนช่วยทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กำลังในช่วงอายุเริ่มต้นของคอนกรีตสูงขึ้น (Lawrence et al., 2003)

สารขยายตัว (Expansive additives) มีสารเคมีหลัก คือ Calcium Aluminate และ sulphate หรือ Calcium Sulpho-Aluminate ซึ่งจะขยายตัวในระหว่างช่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีต หรือทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบอื่น ๆ ในคอนกรีต ก่อให้เกิดการขยายตัว โดยใช้หลักการของการขยายตัวเริ่มแรกก่อนที่จะมีการหดตัว อาศัยการทำให้เกิดสารเอททริงโกต์ในช่วงอายุเริ่มแรกโดยการใส่สารแคลเซียมอลูมิเนตและสารซัลเฟตหรือใช้สารแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เมื่อทำการปรับส่วนผสมให้พอเหมาะ สามารถทำให้เกิดการขยายตัวเริ่มแรกและการหดตัวภายหลังใกล้เคียงกัน การผสมสารขยายตัวเพิ่มในคอนกรีตเพื่อลดผลกระทบจากการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ให้เหลือน้อยที่สุด ใช้ทดแทนการหดตัวของคอนกรีตในการก่อสร้างทั่ว ๆ ไปทั้งงานคอนกรีตชนิดที่มีการยึดรั้งและไม่ยึดรั้ง (ปริญญา และชัย, 2552)

เอกศักดิ์ และคณะ (2551) ทำการศึกษาเรื่องความสามารถกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงหินปูน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.40 และ 0.50 และอัตราการผสมผงหินปูนที่ 0.05, 0.15, 0.25 พบว่าค่าความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานพบว่าที่อัตราส่วนน้ำ 0.40 ความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีค่าลดลง แต่ที่อัตราส่วน 0.50 ค่าความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการแพร่ของคลอไรด์พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำหรืออัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเพิ่มขึ้น สำหรับกำลังรับแรงอัดที่ 91 วันจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานหรืออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเพิ่มขึ้น

ปิติ และคณะ (2543) ศึกษาเรื่องการใช้ประโยชน์จากผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอชโซลาน ตัวอย่างทดสอบใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนตั้งแต่ร้อยละ 20 จนถึง 60 โดยน้ำหนักของ วัสดุผงทั้งหมด และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.485 พบว่า ความสามารถในการรับแรงอัดของ ซีเมนต์เพสต์ จะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนที่ร้อยละ 20 ในขณะที่เดียวกันที่ร้อยละการแทนที่ 40 และ 60 การใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนที่ได้จากหินแม่ ประเภทโคลิเมติก และโคลโม่ไมต์ ก็สามารถแสดงให้เห็นถึงผลของความสามารถในการรับแรงอัด ที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าการใช้วัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงชนิดเดียว

Chindaprasirt et al. (2008) ทำการศึกษาเรื่องความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสม เถ้าปาล์ม เถ้าแกลบ และเถ้าลอย โดยมีอัตราซีเมนต์ล้วนจะถูกแทนที่ด้วยสารปอชโซลานเหล่านี้ที่ อัตราการแทนที่ 20% และ 40% อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ทำการทดสอบหากำลังรับ แรงอัด หากความต้านทานคลอไรด์ด้วยวิธี RCPT, RMT, Immersion test ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานคลอไรด์มีค่าที่ดีขึ้น จากการผสมด้วยสารปอชโซลานเหล่านี้ ค่าความ ต้านทานมีค่าสูงขึ้น เมื่อผสมด้วยปริมาณที่สูงขึ้น และการใช้เถ้าลอยยังสามารถช่วยลดปริมาณ สารลดน้ำ (SP) เนื่องจากทำให้มีความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น สุดท้าย ส่วนผสมที่เกิดจากการ ผสมด้วยปริมาณที่เท่ากันของเถ้าปาล์มกับเถ้าลอย และเถ้าแกลบกับเถ้าลอย เป็นสัดส่วนการผสมที่ ให้กำลังรับแรงอัดและค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดี

Lam et al. (2008) ศึกษาคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตกับสารขยายตัว ทำการ ทดสอบความต้านทานคาร์บอนเนชั่น ความต้านทานซัลเฟต ความต้านทานคลอไรด์และ ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ พบว่าเมื่อเติมสารขยายตัวควบคุมให้ไม่เกิน 30 kg/m^3 ค่า ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์มีค่าลดลง แต่มีแนวโน้มที่จะลดค่าการซึมผ่านของคลอไรด์

Ghrici et al. (2007) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีตและ มอร์ตาร์ที่ผสมสารปอชโซลานและผงหินปูน โดยผสมตัวอย่าง 3 อย่างเข้าด้วยกัน คือ ปูน สารปอชโซลาน ผงหินปูน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจนถึง 20% แทนที่สารปอชโซลาน จนถึง 30% ทำการทดสอบแรงดัด และกำลังรับแรงอัด ที่อายุ 2, 7, 28, 90 วัน และนำไปทดสอบค่า การซึมผ่านของคลอไรด์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของทั้ง 3 อย่างที่ช่วง อายุเริ่มต้น และในระยะยาว ช่วยพัฒนากำลังรับแรงดัดและแรงอัด และพบว่าค่าการซึมผ่านของ คลอไรด์ก็มีค่าที่ดีขึ้น

Tsivilis et al. (2000) ทำการศึกษาเรื่องคุณสมบัติและพฤติกรรมของคอนกรีตและ มอร์ตาร์ผสมผงหินปูน โดยใช้ Portland limestone cement ที่มีความละเอียดและปริมาณผงหินปูน แดกต่างกัน เกิดจากการบดรวมกันระหว่าง เม็ดปูนดิบ (Clinker) ยิปซัม และผงหินปูน โดยตัวอย่าง

จะถูกผสม โดยให้มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากัน พบว่า Portland limestone cement ที่มีอัตราการผลิตผสมผงหินปูนจนกระทั่งถึง 20% มีค่ากำลังรับแรงอัดและความสามารถในการเทได้ที่น่าพอใจ ในขณะที่ค่า Sorptivity และค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ มีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสมที่เป็นคอนกรีตล้วน

Homain et al. (1995) ได้ทำการทดสอบหาค่าการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูน เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเติมผงหินปูน โดยทุกตัวอย่างใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.55 พบว่าการเติมผงหินปูนมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง เชื่อว่าน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคของผงหินปูนช่วยเติมเต็ม โพรงช่องว่าง ให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น นอกจากนั้นผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ ITZ มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยกับค่าการแพร่ของคลอไรด์

วิธีการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ (Stanish et al., 2000)

1. วิธีทดสอบแบบระยะยาว (Long-term test)

1.1 AASHTO T259 : Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration (Salt Ponding Test)

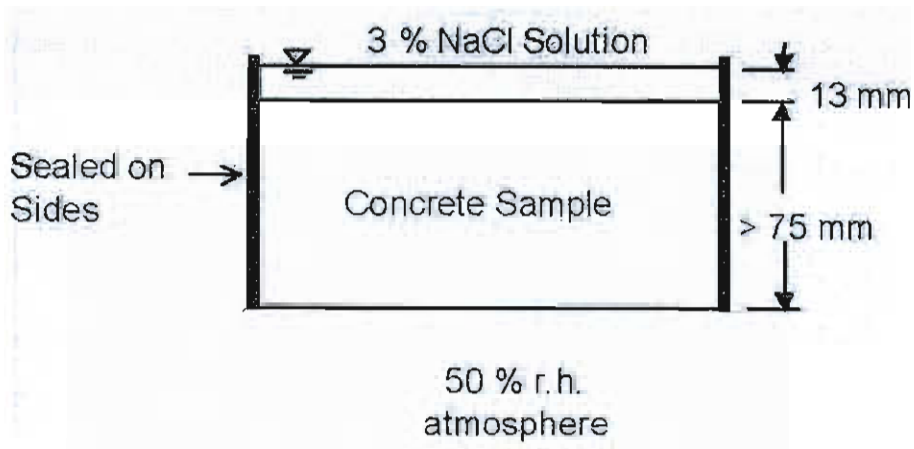
การทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T259 หรือที่เรียกกันทั่ว ๆ ไปว่า Salt Ponding Test เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างทดสอบความหนาไม่น้อยกว่า 75 มม. พื้นที่หน้าตัด 300 ตร.มม. ใช้วิธีการบ่มชื้นเป็นเวลา 14 วัน ก่อนนำตัวอย่างเก็บในที่แห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 50% เป็นเวลา 28 วัน เคลือบผิวด้านข้างของตัวอย่างด้วยวัสดุที่เหมาะสม ยกเว้นบริเวณผิวหน้าทั้งสองด้าน เมื่อครบกำหนด ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3% เทจบบริเวณผิวหน้าด้านบนของตัวอย่างเป็นเวลา 90 วัน ขณะที่ผิวด้านล่างปล่อยให้สัมผัสกับอากาศ รายละเอียดการแสดงในภาพ 2-12 และ 2-13 เมื่อครบกำหนด 90 วัน ตัดตัวอย่างเป็นชิ้น ๆ จากฝั่งด้านที่สัมผัสกับสารละลายเกลือ ให้มีความหนาประมาณ 0.5 นิ้ว แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ โดยค่าที่ได้ถือเป็นค่าเฉลี่ยที่เป็นตัวแทนสำหรับตัวอย่างแผ่นนั้น ๆ นำข้อมูลที่ได้แสดงผลในรูปของกราฟ Chloride Profile ดังแสดงในภาพที่ 2-14 ที่เกิดจากการแทรกซึมของคลอไรด์ในทิศทางเดียว

การทดสอบด้วยวิธี Salt Ponding Test การแทรกซึมของคลอไรด์มิได้เกิดเนื่องจากกลไกของการแพร่เพียงอย่างเดียว เนื่องจากตัวอย่างถูกปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 28 วัน ดังนั้นเมื่อผิวด้านบนสัมผัสกับสารละลายเกลือเป็นครั้งแรก สารละลายจะถูกดูดเข้าไปในโพรงช่องว่างของคอนกรีตอย่างรวดเร็ว ด้วยกลไกของการดูดซับเริ่มต้น (Initial sorption effect) นอกจากนั้นผิวด้านล่างของตัวอย่างที่สัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50 % ตลอดเวลาในระหว่างการ

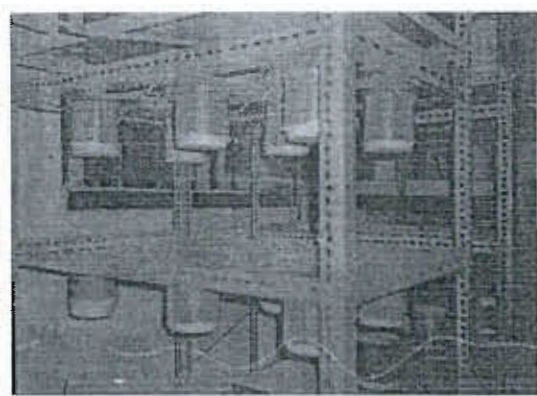
ทดสอบ ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอน้ำจากด้านบน เปียกไปสู่ด้านแห้งเป็นสาเหตุให้น้ำถูกดึงเข้าไปในคอนกรีตพร้อมนำคลอไรด์ไอออนบางส่วนไปด้วย ปรากฏการณ์ดังกล่าว เรียกว่า Wick action ดังภาพที่ 2-15

กลไกการเคลื่อนที่ดังกล่าว สามารถเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างจริง แต่ความสัมพันธ์ของแต่ละกลไกไม่ได้ถูกคำนึงถึงจากขั้นตอนของวิธีการทดสอบนี้ การทดสอบไม่ได้ให้ความสำคัญกับค่าการดูดซับเริ่มต้นและผลกระทบจากปรากฏการณ์ Wick action ซึ่งมีค่าไม่มากนัก แต่ความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกดึงเข้าไปในคอนกรีตเนื่องจากการดูดซับแบบคาพิลลารีต่อจำนวนคลอไรด์ที่ผ่านเข้าไปด้วยการแพร่จะมีสัดส่วนที่มากกว่าอัตราส่วนที่เกิดขึ้นจริงเมื่อเปรียบเทียบเวลาของการทดสอบที่ใช้เวลา 90 วัน กับอายุของโครงสร้างจริง ๆ ทำให้การประเมินอัตราการแพร่ของคลอไรด์อาจเกิดความไม่แม่นยำ

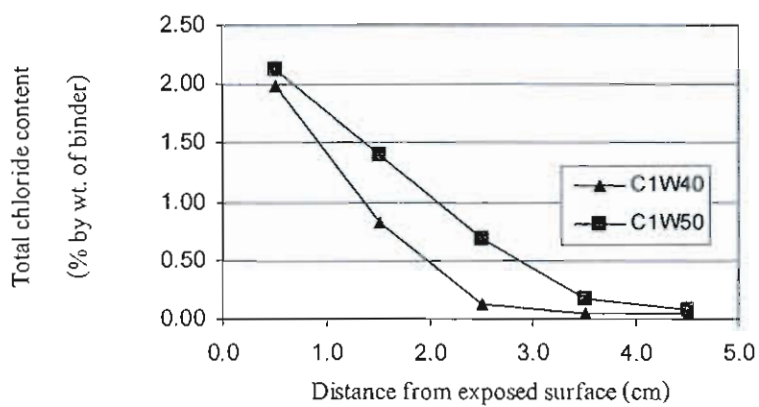
สำหรับคอนกรีตคุณภาพสูง ระยะเวลาการทดสอบ 90 วัน อาจไม่เพียงพอต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ และทำให้ Chloride Profile ออกมาไม่สมบูรณ์ ดังนั้นระยะเวลาการทดสอบอาจต้องใช้เวลาดทดสอบมากกว่า 90 วัน



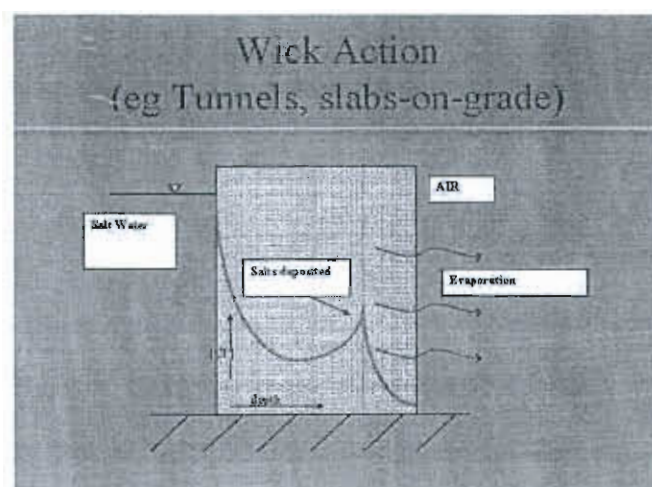
ภาพที่ 2-12 รายละเอียดวิธีทดสอบ Salt Ponding Test (Stanish et al., 2000)



ภาพที่ 2-13 การทดสอบ Salt Ponding Test (Chia and Zhang, 2001)



ภาพที่ 2-14 ตัวอย่าง Chloride Profile



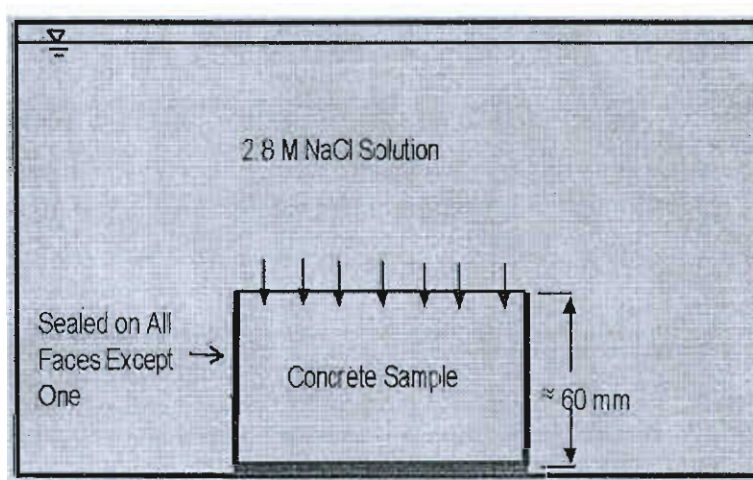
ภาพที่ 2-15 ปรากฏการณ์ Wick action [Hooton, 2006]

1.2 Bulk Diffusion Test (NordTest NTBuild 443)

เป็นวิธีการทดสอบที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อลดข้อบกพร่องจากการทดสอบ Salt Ponding Test เพื่อใช้หาการแพร่ของคลอไรด์ โดย NordTest เป็นรายการแรกที่มีมาตรฐานการทดสอบด้วยวิธีนี้ ใช้อย่างเป็นทางการ ในชื่อของ NTBuild 443 โดยความแตกต่างอย่างแรกของการทดสอบนี้กับ Salt Ponding Test คือ สภาวะของความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างที่ถูกทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำปูนใส แทนการเก็บตัวอย่างในที่แห้ง 28 วัน เพื่อช่วยป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์จากกลไกการดูดซับเริ่มต้น นอกจากนั้นการเคลื่อนตัวอย่าง จะทำโดยเว้นเฉพาะผิวด้านที่สัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ทำการแช่ตัวอย่างในสารละลายเกลือเป็นเวลาอย่างน้อย 35 วัน ดังแสดงในภาพที่ 2-16 ทำให้ไม่เกิดผลกระทบเนื่องจาก Wick action

หลังจากนั้นนำ ตัวอย่างไปตัดในแนวตั้งฉากกับผิวด้านที่สัมผัสกับสารละลายเกลือ ไปตามแนวแกนครึ่งละ 0.5 มม. ตัวอย่างในแต่ละชั้นจะถูกบดเป็นผง และนำไปหาค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ตาม AASHTO T260 หลังจากได้ Chloride Profile นำสมการกฎข้อที่ 2 ของฟิกส์ช่วยในการปรับแนวโน้มของกราฟ (Fit curve) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวต่อไป

ปัจจุบัน NordTest มีแบบจำลองค่าการแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต แต่ทว่าก็ยังคงเป็นการทดสอบระยะยาว สำหรับคอนกรีตคุณภาพต่ำ ต้องใช้เวลาอย่างน้อย 35 วัน สำหรับคอนกรีตคุณภาพสูงอาจต้องใช้เวลาการทดสอบถึง 90 วัน หรือมากกว่านั้น



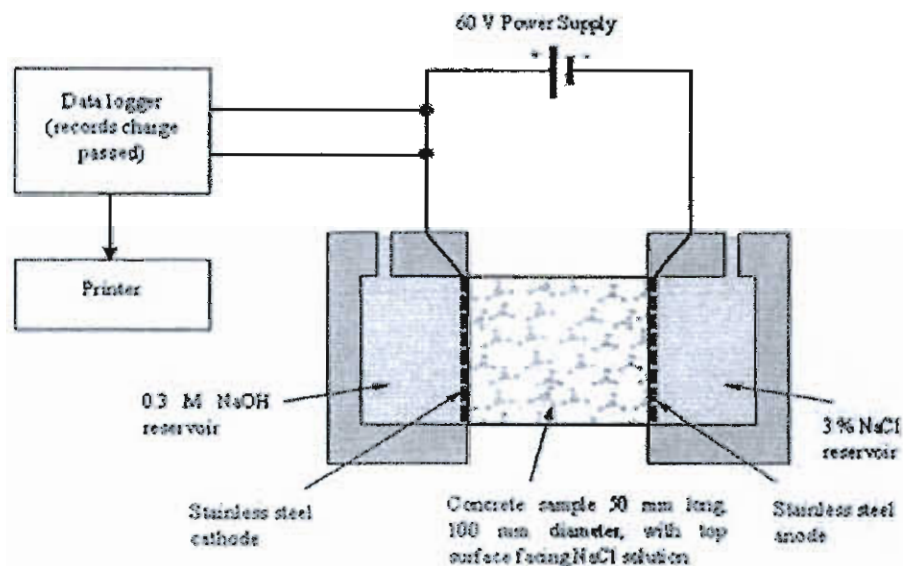
ภาพที่ 2-16 รายละเอียดวิธีทดสอบ Bulk Diffusion Test (Stanish et al., 2000)

2. วิธีทดสอบแบบระยะสั้น (Short-term test)

2.1 AASHTO T277 : Rapid Chloride permeability Test (RCPT)

สำหรับการทดสอบ AASHTO T277 ใช้ตัวอย่างทดสอบอิมิตัวด้วยน้ำ ความหนา 50 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. การทดสอบได้ประยุกต์นำค่าแรงดันไฟฟ้าขนาด 60V DC มาใช้ในการทดสอบ โดยใช้เวลาทดสอบ 6 ชม. ใช้อุปกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 2-17 ด้านหนึ่งใช้สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 3% อีกด้านใช้สารละลาย 0.3M NaOH รายงานการทดสอบจากการวัดค่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่วิ่งไหลผ่านคอนกรีต (Total charge passed) และใช้ค่าดังกล่าวในการประเมินจัตระดับคุณภาพของคอนกรีต ดังตารางที่ 2-4 การทดสอบวิธีนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Whiting (1981) และถูกเรียกว่า Rapid chloride permeability test (RCPT) โดยค่าที่ได้เกิดจากการวัดการเคลื่อนที่จากการแทรกซึมของไอออนทั้งหมด มิใช่เพียงแค่อิออนคลอไรด์อย่างเดียว

RCPT เป็นหนึ่งในวิธีมาตรฐานเพื่อทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์ และได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลาย ๆ งานวิจัย นอกจากนี้ RCPT ยังถูกนำไปใช้เป็นมาตรฐาน (CSA/S413-94) เพื่อทดสอบหาค่าการซึมผ่านอีกด้วย แต่พบว่ามีข้อบกพร่องหลายประการ สำหรับการทดสอบดังกล่าว คือ (1) ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเกิดขึ้นเนื่องจากไอออนทั้งหมดในโพรงช่องว่าง มิใช่แต่เฉพาะคลอไรด์ไอออน (2) การวัดเกิดขึ้นในช่วง Non-steady-state (3) การประยุกต์ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาดสูง ทำให้เกิดอุณหภูมิสูง ส่งผลให้ค่า charge passed สูงขึ้นกว่าปกติ



ภาพที่ 2-17 รายละเอียดวิธีการทดสอบ RCPT (Stanish et al., 2000)

ตารางที่ 2-4 เกณฑ์วัดคุณภาพความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต (ASTM C1202)

Charge passed (coulomb)	Chloride ion penetration
> 4,000	Hight
2,000 – 4,000	Moderate
1,000 – 2,000	Low
100 – 1,000	Very Low
<100	Negligible

โดยเฉพาะคอนกรีตคุณภาพต่ำ ความร้อนที่เกิดขึ้นขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น มีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า โดยคอนกรีตคุณภาพต่ำจะก่อให้เกิดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มากกว่า ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนเพิ่มมากขึ้น และความร้อนนี้เองจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่า Charge passed ซึ่งสูงเกินกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในคอนกรีตคุณภาพต่ำค่าที่ได้รับจึงมีค่า Charge passed มากกว่าที่ควรเป็น

นอกจากนั้นแล้ว รายงานจาก ASTM C1202 ในเรื่องของความแม่นยำ ซึ่งอ้างอิงจาก Mobasher and Mitchell (1988) กำหนดว่า การทดสอบด้วยผู้ทดสอบคนเดียว หนึ่งการทดสอบ ผลการทดสอบสามารถคลาดเคลื่อนได้ถึง 12.3% และถ้าเป็นการทดสอบ 2 ครั้ง ผลทดสอบที่ยอมรับได้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 35% สำหรับผู้ทดสอบคนเดียว และถ้าเป็นการทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ การทดสอบครั้งหนึ่งมีความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ถึง 18% และเพื่อให้เกิดความถูกต้องที่สุด แนะนำให้ใช้ 3 ตัวอย่างทดสอบ และใช้ค่าเฉลี่ยรายงานเป็นผลการทดสอบ อย่างไรก็ตามการรายงานความแม่นยำของการทดสอบแบบนี้ ยังพบว่าผลทดสอบของตัวอย่างทั้งสามที่ยอมรับได้ สามารถคลาดเคลื่อนกันได้ถึง 29% ระหว่างแต่ละห้องปฏิบัติการ

ค่าการนำไฟฟ้าของคอนกรีตเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การทดสอบ RCPT เนื่องจาก สื่อทางไฟฟ้าที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตจะส่งผลต่อค่าการทดสอบให้สูงเกินจริง ตัวอย่างเช่น เหล็กเสริมในคอนกรีต วัสดุไฟเบอร์ที่นำไฟฟ้า (คาร์บอน, เหล็ก) หรือ อีออนที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง ๆ ที่อยู่ในสารละลายที่ค้างอยู่ในโพรงช่องว่าง เช่น ในกรณีที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช่เป็นส่วนผสมเพื่อต้านการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (ASTM C1202) รวมถึงสารผสมเพิ่มอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบได้ เนื่องจากตัวนำไฟฟ้าต่าง ๆ เหล่านี้มีผลทำให้ค่า charge passed สูงเกินกว่าความเป็นจริง ดังนั้นการควบคุมคุณภาพของการทดสอบ หรือตัวอย่างทดสอบ จึงจำเป็นสำหรับการทดสอบ แต่ในกรณีดังกล่าว การทดสอบ RCPT ก็ยังสามารถนำค่าที่ได้จากการทดสอบ

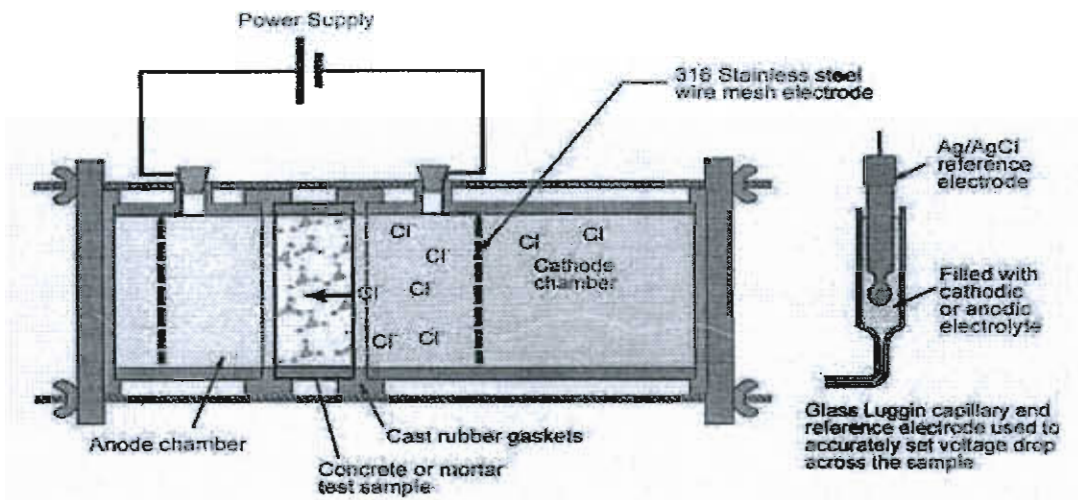
ของคอนกรีตนั้น ๆ มาเปรียบเทียบกับค่าต่าง ๆ ในตารางการประเมินคุณภาพคอนกรีต เพื่อพิจารณาคุณภาพของคอนกรีตนั้น ๆ ได้เช่นกัน

2.2 Electrical migration techniques

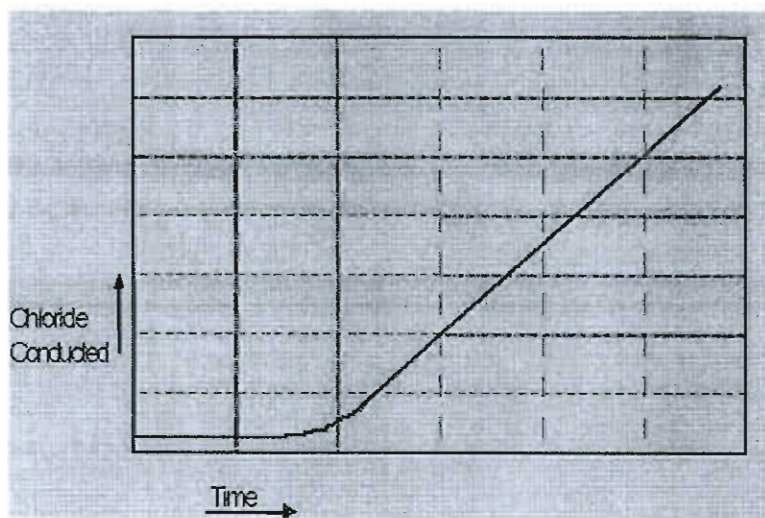
เครื่องมือทดสอบประกอบด้วยเซลล์ 2 ข้าง โดยมีคอนกรีตอยู่ระหว่างเซลล์ ดังแสดงในภาพที่ 2-18 โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวอย่างทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. หนา 15-50 มม. โดยขนาดความหนาของแผ่นทดสอบมีผลต่อระยะเวลาการทดสอบ แต่ขนาดของตัวอย่างจะต้องหนามากพอที่จะไม่เกิดผลกระทบเนื่องจากมวลรวมหยาบ (Aggregate interface effect) โดยขนาดของมวลรวมหยาบจะต้องมีความเหมาะสมกับขนาดความหนาของตัวอย่างทดสอบ เนื่องจากบริเวณโดยรอบมวลรวมหยาบกับวัสดุประสาน (Transition zone) เป็นบริเวณที่ง่ายต่อการแทรกซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนมากกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อคอนกรีตล้วน ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบดังกล่าว ความหนาของตัวอย่างจะต้องมากกว่าขนาดใหญ่ที่สุดของวัสดุมวลรวม [McGrath, 1996] เริ่มต้นเซลล์ด้านแคโทดจะบรรจุด้วยคลอไรด์ไอออน และเซลล์ฝั่งแอโนดใช้น้ำกลั่นหรือน้ำปูนใส และค่าแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งจะถูกใช้เพื่อเร่งคลอไรด์ไอออนให้เคลื่อนย้าย (Migration) ผ่านเนื้อคอนกรีต แล้วสังเกตค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่เปลี่ยนแปลงที่เซลล์ด้านท้าย โดยใช้วิธีตรวจสอบสารละลายจากเซลล์ด้านท้าย เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ เพื่อนำไปเขียนกราฟค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ต่อเวลา เพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่อไป

ความแตกต่างอีกอย่างระหว่างการทดสอบด้วยวิธีนี้กับ RCPT คือ การใช้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า โดยปกติขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในหลาย ๆ งานวิจัยใช้ค่าอยู่ระหว่าง 10-12 V โดยค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้ช่วยลดปัญหาความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างแต่ว่าการทดสอบก็ต้องใช้เวลานานเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการลดความหนาของตัวอย่างทดสอบเพื่อลดระยะเวลาทดสอบนั้น ขนาดความหนาน้อยที่สุดที่ยอมรับได้ คือ 5 มม.

ด้วยวิธีการประเมินการทดสอบที่ต่างจากเดิม โดยการตรวจสอบค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ของสารละลายที่เซลล์ด้านท้าย เป็นระยะ เพื่อให้การเคลื่อนย้ายของคลอไรด์ไอออนเท่านั้นที่ถูกนำไปประเมินเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่เซลล์ด้านท้ายจะถูกนำมาเขียนกราฟเทียบกับเวลา ดังแสดงในภาพ 2-19 ซึ่งโดยปกติจะมีค่าความเข้มข้นน้อย ๆ ของคลอไรด์ในช่วงเวลาเริ่มต้นอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งน่าจะเกิดจากคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตตั้งแต่แรกเริ่ม



ภาพที่ 2-18 รายละเอียดวิธีการทดสอบ Electrical Migration Techniques (Stanish et al., 2000)



ภาพที่ 2-19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์ต่อเวลา (Stanish et al., 2000)

ความเข้มข้นดังกล่าวนี้จะมีค่าคงที่จนกระทั่งเวลาผ่านไปชั่วขณะหนึ่ง เรียกช่วงเวลานั้นว่า Breakthrough Time เป็นช่วงเวลาที่คลอไรด์ไอออนจากเซลล์ด้านหน้าแทรกซึมผ่านคอนกรีตไปถึงเซลล์ด้านท้ายพอดี ณ จุดเริ่มต้นจากสภาวะนั้น เรียกว่า Steady-State หลังจากนั้นข้อมูลต่างๆ จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยพิจารณาว่าเมื่อเริ่มต้นสภาวะ Steady-State การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคลอไรด์ที่เซลล์ด้านท้ายเทียบเท่าได้กับ Chloride Flux (Pure

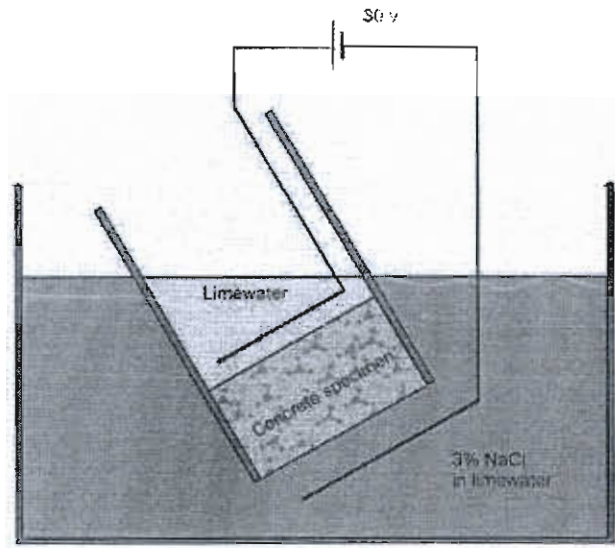
diffusion + Electrical migration + Convection) ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับสมการของ Nemst-Planck (Andrade, 1993) ซึ่งเป็นเทคนิควิธีการคิดที่นิยมใช้ทั่วไปในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เนื่องจากการเคลื่อนย้ายไอออน

แม้ว่าจะเป็นการทดสอบในช่วง Steady-State แต่การทดสอบนี้ก็ยังมีปัญหาในเรื่องของการพิจารณาเวลาในช่วง Breakthrough Time ซึ่งมีหลายแนวทาง บางครั้งการพิจารณาค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ว่าถึงระดับคงที่ กำหนดให้ใช้ค่า 25 มก. แต่บางครั้งจะใช้วิธีการหาจุดร่วมระหว่างกราฟช่วงแรกกับกราฟช่วงที่สอง ซึ่งต้องใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน และอาจส่งผลกระทบต่อผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (McGrath, 1996)

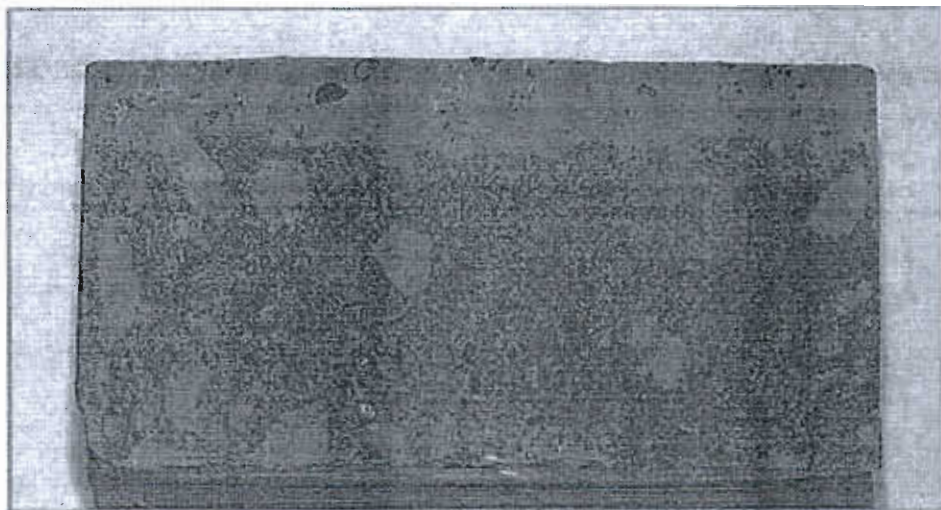
การทดสอบสามารถลดข้อบกพร่องจากการทดสอบ RCPT เช่น เรื่องอุณหภูมิสูง และทำให้สามารถพิจารณาเฉพาะการเคลื่อนย้ายของคลอไรด์ไอออน แต่ว่าการทดสอบแบบนี้ก็ยังมีข้อบกพร่องอยู่หลายประการดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งรวมถึงเรื่องวัสดุนำไฟฟ้า เช่น เหล็กหรือคาร์บอน ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านตัวนำไฟฟ้ามากกว่าผ่านไอออนในสารละลายตามโพรงช่องว่าง เช่น ในกรณีของไอออนที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง เช่น แคลเซียมไนไตรต์ แทนที่กระแสไฟฟ้าจะวิ่งผ่านคลอไรด์ไอออน กระแสไฟฟ้าจะเลือกวิ่งผ่านไอออนที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า เพื่อลดระยะทางที่ต้องเดินทางในเวลาที่กำหนด ดังนั้นคลอไรด์ไอออนก็จะถูกขับเคลื่อนด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง

2.3 The Rapid Migration Test (CTH / RMT)

Tang and Nilsson (1991) ได้เสนอวิธีการทดสอบการเคลื่อนย้าย (Migration) ของคลอไรด์อีกวิธีหนึ่ง คือ ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาดความหนา 50 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. แรงดันไฟฟ้าขนาด 30 V ดังแสดงในภาพที่ 2-20 ขั้นตอนการทดสอบเหมือนการทดสอบ Electrical migration test ต่างกันคือ จะไม่พิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์ที่เซลล์ด้านท้าย โดยเมื่อครบกำหนดเวลาทดสอบ (Tang and Nilsson ใช้เวลาทดสอบ 8 ชม.) ตัวอย่างจะถูกนำไปผ่า และซีกหนึ่งจะถูกนำไปหาค่าความลึกที่เกิดจากการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยใช้วิธี Colorimetric Technique โดยใช้สารละลาย Silver nitrate ฟันลงบนก้อนตัวอย่าง บริเวณใดที่มีคลอไรด์ ก็จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างคลอไรด์กับซิลเวอร์เกิดเป็นซิลเวอร์คลอไรด์ มีลักษณะเป็นสีออกขาว ๆ สำหรับบริเวณที่ไม่มีคลอไรด์ สารซิลเวอร์ก็จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลที่อยู่ในคอนกรีตปรากฏเป็นสีน้ำตาลอ่อน ดังตัวอย่าง ในภาพ 2-21 วิธีนี้ได้ถูกคิดค้นครั้งแรกโดย Collepardi et al. (1970) และพัฒนาจนใช้ได้โดย Otsuki et al. (1992) พบว่าค่าความเข้มข้นของซิลเวอร์ในเตรทที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คือ 0.1M และพบว่าพื้นที่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี คือ บริเวณที่มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ 0.15% โดยน้ำหนักของซีเมนต์



ภาพที่ 2-20 รายละเอียดวิธีการทดสอบ RMT (Stanish et al., 2000)



ภาพที่ 2-21 ตัวอย่างคอนกรีตหลังพ่นด้วยสารละลาย Silver nitrate (Hooton, 2006)

ในงานของ Otsuki et al. (1992) ยังได้ตรวจสอบค่าความเข้มข้นทั้งหมดของคลอไรด์ดังกล่าวกับปัจจัยอื่นๆ เช่น แหล่งที่มาของคลอไรด์ ทั้งจากภายนอกหรืออยู่ในส่วนผสมตั้งแต่แรกเริ่ม อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ชนิดของตัวอย่างทดสอบ ทั้งคอนกรีต มอร์ตาร์ และซีเมนต์ペースต์ พบว่าความเข้มข้นคลอไรด์ดังกล่าวมีค่าคงที่เท่ากัน

ความลึกจากการแทรกซึมนี้สามารถนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ โดยใช้กับสมการที่ประยุกต์มาจาก Nemst-Einstein equation (Tang and Nilsson, 1991)

$$D = \frac{RT}{zFE} \times \frac{x_f}{t} \quad (2-5)$$

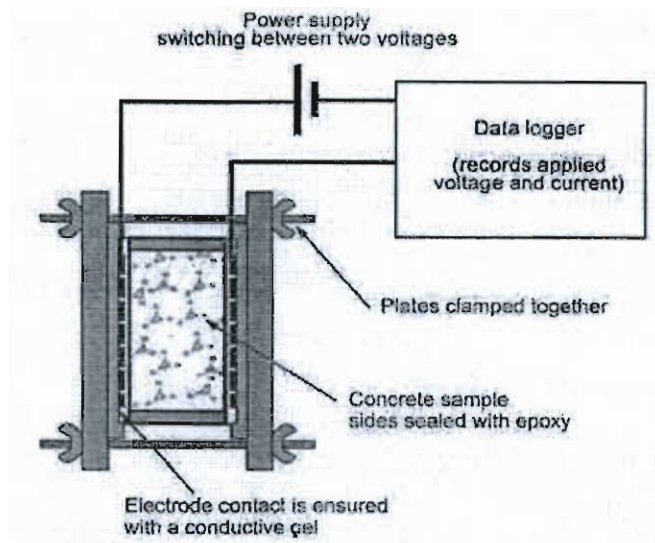
$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (2-6)$$

โดยที่	D	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้าย (m^2/s)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ, $R = 8.314 \text{ J/K mol}$
	T	คือ	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเมื่อเริ่มและสิ้นสุดการทดสอบของสารละลายด้านแอโนด (K)
	z	คือ	Value of ion valence, สำหรับคลอไรด์, $z = 1$
	F	คือ	ค่าคงที่ฟาราเดย์, $F = 9.648 \times 10^4 \text{ J/V mol}$
	U	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้จริง (V)
	L	คือ	ความหนาของตัวอย่าง (m)
	x_f	คือ	ค่าความลึกเฉลี่ยจากการแทรกซึมของคลอไรด์ (m)
	t	คือ	ระยะเวลาทดสอบ (hr)

เหมือนกับการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์อออนแบบปกติ สามารถลดข้อบกพร่องจากการทดสอบ RCPT ทั้งในเรื่องของการพิจารณาการเคลื่อนย้ายอออนเนื่องจากคลอไรด์อออนเพียงอย่างเดียว และเรื่องของอุณหภูมิการทดสอบที่สูง แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบดังกล่าวก็ยังเป็นการทดสอบโดยใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอก ดังนั้นวัสดุนำไฟฟ้าทั้งหลาย จำพวกเหล็กหรือคาร์บอน ก็ยังคงทำให้เกิดปัญหาการลัดวงจรในอุปกรณ์การทดสอบ เนื่องจากกระแสไฟฟ้ายังคงวิ่งผ่านตัวนำไฟฟ้ามากกว่าที่จะวิ่งผ่านอออนที่อยู่ในละลายในโพรงช่องว่าง และถึงแม้ว่าตัวนำไฟฟ้าจะไม่ทำให้เกิดการลัดวงจร เช่น ในกรณีชิ้นส่วนของเหล็กวางขนานกับพื้นที่หน้าตัด ก็ยังคงมีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลกระทบต่อผลของการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ แต่ถ้าคลอไรด์อออนไม่แทรกซึมลงไปในเหล็ก ก็จะไม่ก่อให้เกิดปัญหา เช่นเดียวกันกับกรณีของแคลเซียมไนไตรต์ กระแสไฟฟ้าก็จะพาอออนที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงไปมากกว่าคลอไรด์อออนเพื่อเป็นการลดระยะทางที่มันต้องผ่าน ส่งผลให้คลอไรด์อออนได้รับการขับเคลื่อนจากแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าความเป็นจริง

2.4 Resistivity Techniques

เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการประเมินค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต โดย Resistivity คือ ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของวัตถุคูณกับพื้นที่หน้าตัดต่อความยาว ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าการนำไฟฟ้า และได้ค่า Formation Factor (FF) ซึ่งคือ ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุพูนปานกลางที่อิ่มน้ำต่อค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายในโพรง มาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การช่องว่าง (Kyi and Batchelor, 1994; Streicher and Alexander, 1995) แพร่โดยใช้หลักการที่ว่าค่าการนำไฟฟ้าและค่าการแพร่ในวัสดุพูนปานกลางมีความสัมพันธ์กันเนื่องจากมีผลกระทบขึ้นอยู่กับปัจจัยกลุ่มเดียวกัน ดังนั้นถ้าสามารถหาค่า Resistivity ของคอนกรีตก็จะสามารถหาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายในโพรงช่องว่างได้ และจากค่า FF ทำให้สามารถหาค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุพูนปานกลางที่อิ่มน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ (Streicher and Alexander, 1995) รายละเอียดการทดสอบแสดงดังภาพที่ 2-22

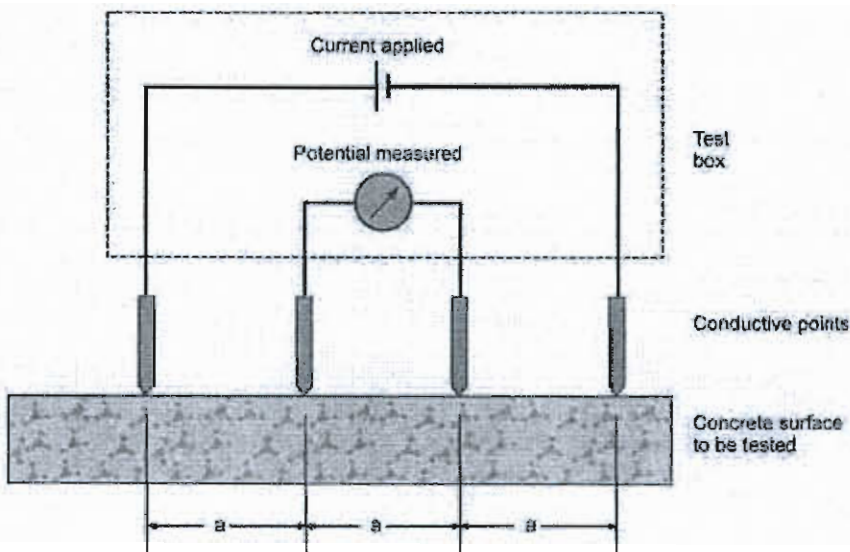


ภาพที่ 2-22 รายละเอียดวิธีการทดสอบ Resistivity techniques (Stanish et al., 2000)

การทดสอบสามารถทำได้ 2 วิธีหลัก ๆ คือ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟฟ้ากระแสสลับ (Monfore, 1968) โดยจัดอุปกรณ์ทดสอบตามภาพ ใช้แรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งแล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้างกล่าว นำไปใช้ในสมการของ Monfore (1968) เพื่อหาค่า Resistivity แล้วนำไปคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าต่อไป

Wenner array probe เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการวัดค่า Resistivity ในสนาม โดยไม่ต้องทำการเจาะตัวอย่างเพื่อนำมาทดสอบ เครื่องมือทดสอบติดตั้งที่ 4 ตำแหน่ง แต่ละจุดอยู่ห่างกันด้วยระยะทางที่เท่ากัน คู่ที่อยู่ภายในตำแหน่งที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า ส่วนคู่ในวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 2-23 โดยความหนาของตัวอย่างจะต้องมากกว่าระยะห่างระหว่างแต่ละจุด จากนั้นนำข้อมูลไปคำนวณหาค่า Resistivity ด้วยสมการของ Morris et al. (1996)

Resistivity Techniques มีประโยชน์มากโดยเฉพาะในเรื่องของความรวดเร็ว และสามารถนำไปใช้ในการหาค่าอัตราการเกิดสนิมในคอนกรีต ในชื่อของ Resistivity of concrete การทดสอบนี้ช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาเรื่องความร้อนเนื่องจากใช้ขนาดแรงดันไฟฟ้าต่ำ ปกติจะใช้ในช่วงต่ำกว่า 10 V (Streicher and Alexander, 1995) และใช้เวลาทดสอบเพียงสั้น ๆ แต่ก็มีปัญหาหลักในการหาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายในโพรง ซึ่งอาจใช้วิธีนำสารละลายภายในโพรงคอนกรีต ออกจากคอนกรีตเพื่อคำนวณหาค่า Resistivity หรือทำให้ตัวอย่างคอนกรีตอิ่มน้ำด้วยสารละลายที่ทราบค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งแต่ละวิธีก็มีขั้นตอนการทำที่ค่อนข้างยุ่งยาก



ภาพที่ 2-23 Wenner array probe (Stanish et al., 2000)

การหาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายในโพรงช่องว่างมีข้อดีอยู่หลายประการ อย่างแรกก็คือ การทดสอบไม่อยู่ในสถานะ Steady-state และวิธีการวิเคราะห์ค่อนข้างซับซ้อน (Andrade et al., 1993) สำหรับคอนกรีตคุณภาพสูงเป็นเรื่องยากที่จะดูสารละลายในโพรงออกจากตัวอย่าง

แต่มีวิธีในทางทฤษฎีที่ใช้การประมาณหาค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายในโพรง (Andrade et al., 1993) แต่สภาพคอนกรีตในธรรมชาติที่มีเนื้อคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ ก็ไม่เหมาะสมที่จะใช้หลักการนี้

Resistivity Techniques ยังคงเป็นวิธีพื้นฐานสำหรับหาความต้านทานคลอไรด์โดยใช้วิธีการทางไฟฟ้า และสำหรับวัดคานาไฟฟ้าในเนื้อคอนกรีตก็เป็นปัญหาเช่นเดียวกับการทดสอบ RCPT และ RMT

2.5 Pressure Penetration Techniques

เป็นการทดสอบที่ใช้วิธีการเร่งคลอไรด์ไอออนแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต โดยให้ด้านหนึ่งของตัวอย่างสัมผัสกับสารละลายที่บรรจุด้วยคลอไรด์ภายใต้สภาวะแรงดัน ซึ่งทำให้เกิดการขับเคลื่อนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตด้วยกลไกของ Diffusion และ Convection และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และ Chloride profile ได้ (Freeze and Cherry, 1979)

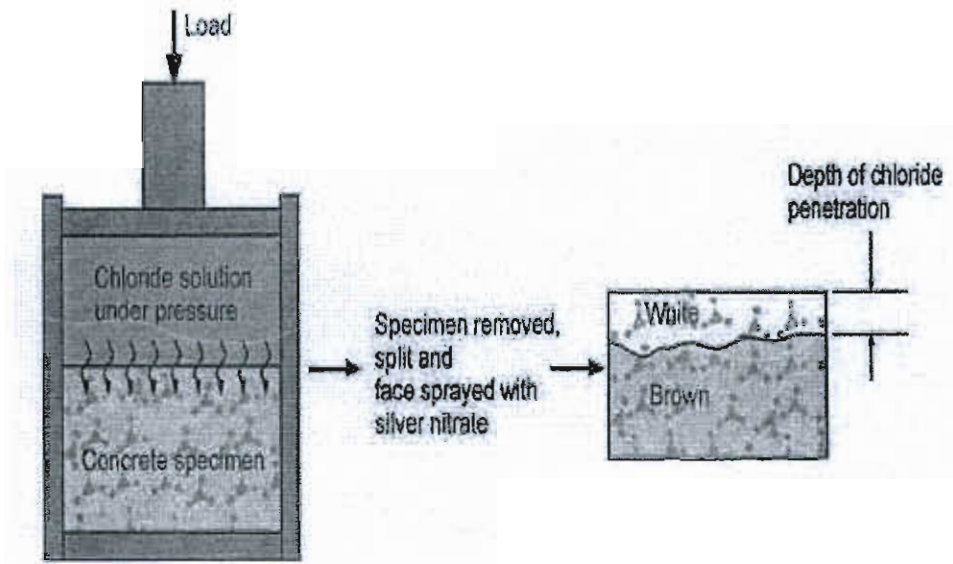
การทดสอบหาค่าการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้แรงดันคล้ายกับการหาค่าการซึมของน้ำที่ทดสอบโดยใช้ Pressure cell (ภาพที่ 2-24) โดยตัวอย่างจะถูกทำให้อิ่มน้ำและใส่ลงใน Pressure cell เคลือบผิวตัวอย่างทดสอบให้ดี ป้องกันการรั่วซึม ใช้สารละลายคลอไรด์เหลวในเซลล์สัมผัสกับด้านหนึ่งของตัวอย่าง และเริ่มให้ความดันค้างอยู่ระยะเวลาหนึ่ง เมื่อครบกำหนดเวลาย้ายตัวอย่างออกจากเซลล์

การวิเคราะห์ผลการทดสอบกระทำได้ 2 วิธี อย่างแรกโดยใช้วิธีสมการเชิงอนุพันธ์ช่วยในการหาแนวโน้มของกราฟ (Fit curve) วิธีนี้มีข้อเสีย คือ มีขั้นตอนมาก ทั้งการหั่น บด แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ ซึ่งการวิเคราะห์ต้องใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน อีกหนึ่งวิธี คือ การหาค่าความลึกจากการแทรกซึมด้วยวิธี Colorimetric technique โดยค่าความลึกที่ได้สามารถนำไปหาค่าการซึมของน้ำจาก Valenta equation (Valenta, 1996)

2.6 Indirect measurement Techniques

การหาค่าการซึมผ่านของคอนกรีต มีวิธีหาอยู่หลายวิธี อาจโดยใช้การซึมผ่านของน้ำหรือแก๊ส ซึ่งทั้งหมดพิจารณาบนทฤษฎีของ Darcy flow

การซึมของของเหลว (โดยปกติใช้น้ำ) โดยทั่วไปสามารถเลือกวัดค่าใดค่าหนึ่งจากความลึกของการซึมผ่านในเวลาที่กำหนด หรือค่าอัตราการไหลเข้าหรือไหลออก ซึ่งข้อมูลนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน โดยเลือกใช้สมการของ Darcy (ใช้อัตราการไหลเข้าหรือไหลออก) หรือสมการของ Valenta (ใช้ค่าความลึกของการซึมผ่าน) โดยการคำนวณต้องทราบค่าความหนืดของของเหลวที่ต้องทำการวัดค่าก่อน ถึงแม้ว่าจะมีหลายสูตรคำนวณที่สามารถใช้หาค่าความหนืดของของเหลวได้ (Bamforth, 1994)



ภาพที่ 2-24 รายละเอียดวิธีการทดสอบ Pressure Penetration Techniques (Stanish et al., 2000)

การวัดค่าการซึมผ่าน โดยใช้แก๊สใช้เทคนิควิธีการทดสอบที่คล้ายกันกับการวัดค่าโดยใช้ของเหลว โดยสูตรการคำนวณจริงหรือสูตรที่นำมาประยุกต์ใช้ที่มีความใกล้เคียงกัน ต่างต้องใช้ค่าความดันของแก๊สร่วมในการคำนวณด้วย โดยค่าการซึมผ่านของแก๊สมีผลขึ้นอยู่กับค่าความดันของแก๊สที่วัดได้อย่างมาก (Bamforth, 1994)

แม้ว่าหลายวิธีที่ได้รับการพัฒนาให้สามารถวัดค่าการซึมผ่านของคอนกรีตโดยใช้ของเหลวหรือแก๊ส แต่ก็พบว่าวิธีเหล่านี้ไม่เหมาะสมในการประเมินหาค่าความสามารถด้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต (Armaghani and Bloomquist, 1993) ได้ประเมินหาความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของน้ำและการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออน (จากการทดสอบ RCPT) พบว่าผลทดสอบที่ได้รับไม่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับทฤษฎีการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน แต่เป็นการสร้างความสัมพันธ์กับการทดสอบ RCPT โดยอาศัยประสบการณ์และการสังเกต คุณสมบัติที่วัดได้มีความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อย ที่จะอธิบายได้ว่าคลอไรด์ไอออนแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างคอนกรีตได้อย่างไร

3. การทดสอบแบบทางอ้อม (Indirect test)

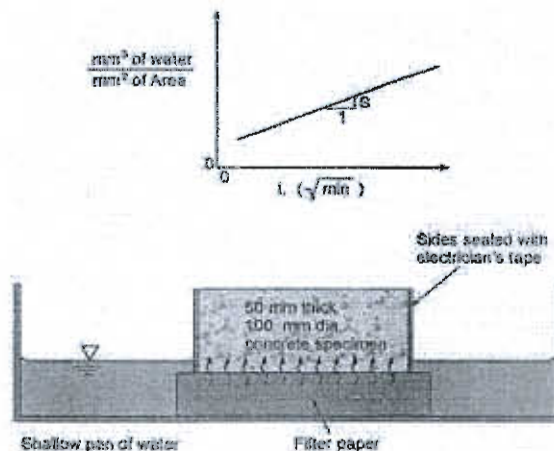
3.1 Sorptivity

ค่า Sorptivity ของคอนกรีตเป็นการวัดปริมาณของเหลวที่ผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่ไม่อิ่มน้ำ (Hall, 1989) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแรงคาпилลารีที่เกิดขึ้นเนื่องจากโพรงช่องว่างในคอนกรีตดึงของเหลวเข้าไปในเนื้อคอนกรีต ซึ่งเป็นไปได้ในทางทฤษฎีที่จะพิจารณาการไหลในทุก ๆ ทิศทาง แต่จะเป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนเกินไป เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้จริงเมื่อพิจารณาการไหลในทิศทางเดียว สามารถคำนวณได้จากสมการของ Hall (1989)

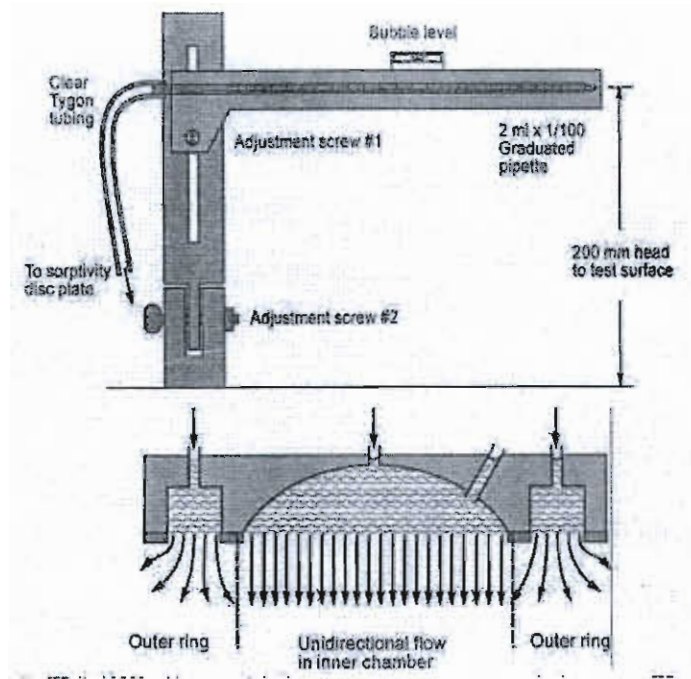
$$i = S t^{\frac{1}{2}} \quad (2-7)$$

- โดยที่ I คือ ผลรวมอัตราการดูดซึมน้ำต่อพื้นที่ (mm)
 S คือ ค่าการดูดซึมน้ำ / Sorptivity (mm / s^{1/2})
 t คือ เวลาการทดสอบ (s)

การทดสอบแสดงรายละเอียดดังรูป 2-25 นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำกับรากที่สองของเวลา ความชันของเส้นแนวโน้มที่ที่สุดของกราฟจะถูกรายงานเป็นค่า Sorptivity ต่อ ไป (ASTM C1585) นอกจากนั้นแล้วยังได้มีการพัฒนาอุปกรณ์การทดสอบ Sorptivity สำหรับใช้ในทดสอบในสนาม โดย University of Toronto (Desouza, 1996) ดังแสดงในภาพ 2-26



ภาพที่ 2-25 รายละเอียดวิธีการทดสอบ Sorptivity (Stanish et al., 2000)



ภาพที่ 2-26 อุปกรณ์ทดสอบ Sorptivity ในสนาม (Stanish et al., 2000)

3.2 การทดสอบอื่น ๆ (Other test methods)

Feldman (1987) วัดค่าการแพร่โดยใช้ Propane-2-ol แทรกซึมผ่านซีเมนต์เพสต์ที่อิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำหนักที่เปลี่ยนไปของซีเมนต์เพสต์ที่อิ่มน้ำที่แช่ใน Propane-2-ol จะถูกสังเกตตัวอย่างที่ Feldman ใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.3 ถึง 1.0 ความหนา 1.14 มม. ตัวอย่างต้องถูกตรวจเฝ้า 3-7 วัน น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงนำไปใช้คำนวณหาค่าการแพร่ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Propane-2-ol ผ่านเข้าไปในคอนกรีต

Sharif et al. (1997) เสนอความสัมพันธ์ของค่าการแพร่ของแก๊สผ่านคอนกรีตกับค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต อุปกรณ์การทดสอบใช้เซลล์ทดสอบ 2 ข้าง โดยมีคอนกรีตกั้นกลาง ด้านหนึ่งบรรจุด้วยแก๊สไนโตรเจน ขณะที่อีกด้านบรรจุด้วยแก๊สฮีเลียม ด้วยค่าความดันที่กำหนดไว้ ค่าความเข้มข้นของแก๊สทั้งคู่จะถูกสังเกตความเปลี่ยนแปลง ถ้าปรากฏแก๊สต่างชนิดในเซลล์แสดงว่าเกิดจากการแพร่ของแก๊สผ่านคอนกรีต ข้อมูลต่าง ๆ จะถูกนำไปคำนวณหาค่าการแพร่ (สมการการคำนวณดูเพิ่มเติมจาก Sharif et al., 1997) ค่าต่าง ๆ ได้ถูกรายงานโดย Sharif et al. (1997) ในรายงานได้เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดสอบ Chloride ponding และค่าที่ได้จากการทดสอบการแพร่โดยแก๊ส พบว่ามีค่าความสัมพันธ์ที่ดี

ขณะที่ผลการทดสอบที่ได้นำเสนอโดยวิธีการทดสอบเหล่านี้ แสดงให้เห็นถึงค่าที่ นำเชื่อถือได้ แต่พบว่ามีขั้นตอนที่ยุ่งยากในการทดสอบ อย่างเช่น Propane-2-ol การทดสอบใช้ ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่บางมากและใช้เวลาทดสอบ 14 วัน ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมในการนำไปใช้กับ ตัวอย่างคอนกรีตในเรื่องของเวลาทดสอบจริง สำหรับวิธีการแพร่ด้วยแก๊ส การเตรียมตัวอย่าง โดยเฉพาะการเคลือบผิวตัวอย่างด้านข้างไม่ให้เกิดการรั่วซึมนั้นทำได้ค่อนข้างยาก นอกจากนั้น วิธีการคำนวณเพื่อหาค่าการแพร่ ต้องใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน และยังมีข้อสงสัยที่ว่า ซีเมนต์เพสต์จะแสดงค่า porosity-tortousity ที่เหมือนกันกับอิออนที่แตกต่างกัน (ฮีเลียม, ไนโตรเจน, คลอไรด์) หรือไม่ นอกจากนั้นแล้วการทดสอบด้วยวิธีการเหล่านี้ไม่สามารถที่จะนำไป พิจารณาค่าความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ได้

การเปรียบเทียบผลทดลองของการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์ด้วยวิธีต่าง ๆ

การทดสอบหาค่าความต้านทานคลอไรด์พบว่าแต่ละวิธีก็มีข้อดี ข้อเสีย แตกต่างกันไป ตามที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2-5 สำหรับข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบที่ได้รับจาก แต่ละการทดสอบเป็นข้อมูลที่สำคัญอีกประการหนึ่ง เพื่อใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจในการ เลือกใช้วิธีการทดสอบหาคลอไรด์อย่างถูกต้องและเหมาะสม

ASTM C1202 รายงานว่าผลการทดสอบหาค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ได้รับจากการ ทดสอบ RCPT ส่วนใหญ่แล้วมีความสัมพันธ์ที่ดีกับผลการทดสอบ Chloride ponding test (AASHTO T259) ซึ่งเป็นการทดสอบแบบระยะยาว

ตารางที่ 2-5 สรุปวิธีการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์ (Stanish et al., 2000)

Test Method		Considers Chloride Ion Movement	At a Constant Temperature	Unaffected by Conductors in the Concrete	Approximate Duration of Test Procedure
Long Term	AASHTO T259 (salt ponding)	Yes	Yes	Yes	90 Day after curing and conditioning
	Bulk Diffusion (Nordtest)	Yes	Yes	Yes	40-120 Day after curing and
Short Term	RCPT (T277)	No	No	No	6 Hours
	Electrical Migration	Yes	Yes	No	Depends on Voltage and Concrete
	Rapid Migration (CTH)	Yes	Yes	No	8 Hours
	Resistivity	No	Yes	No	30 Minutes
	Pressure Penetration	Yes	Yes	Yes	Depend on Pressure and Concrete (but potentially long)
Other	Sorptivity_Lab	No	Yes	Yes	1 week incl. Conditioning
	Sorptivity_Field	No	Yes	Yes	30 minutes
	Propan-2-ol Counter-diffusion	No	Yes	Yes	14 days with thin paste samples
	Gas Diffusion	No	Yes	Yes	2-3 hrs.

Tang and Sorensen (2001) ทดสอบความแม่นยำของวิธีทดสอบ 3 วิธี คือ Immersion test (NT BUILD443), Electrical migration test (NT BUILD355), Rapid migration test (NT BUILD492) ตามมาตรฐาน NordTest ทดสอบตามห้องปฏิบัติการทดสอบ 9 แห่ง พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการทดสอบแบบระยะสั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สัมประสิทธิ์การแพร่จากการ

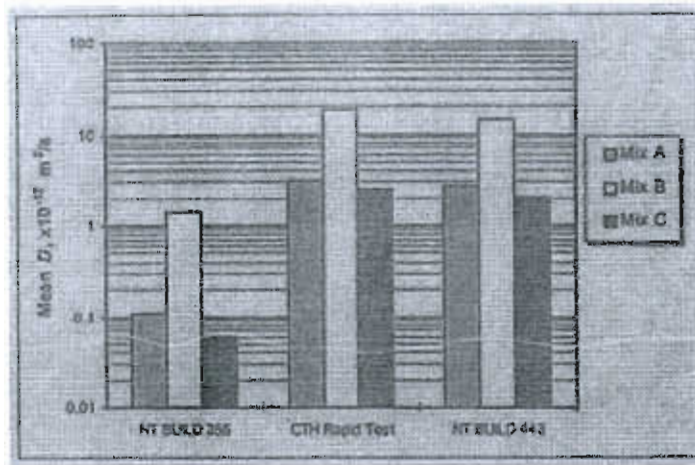
ทดสอบแบบระยะยาวมีค่าต่ำกว่าการทดสอบแบบระยะสั้น ดังแสดงตามภาพที่ 2-27 แต่เมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มการทดสอบพบว่าการทดสอบแบบระยะยาวให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบแบบระยะสั้น การหาค่า การทำซ้ำ (Repeatability) และการทำใหม่ (Reproducibility) พบว่าการทดสอบ RMT โดยทั่วไปให้ค่าที่แม่นยำที่สุดในการหาค่าสัมประสิทธิ์คลอไรด์ ขณะที่การทดสอบ Immersion test ให้ผลการทดสอบความแม่นยำที่น่าพอใจ และการทดสอบ Electrical migration test ให้ผลการทดสอบความแม่นยำที่น่าพอใจในกลุ่มของตัวอย่างที่เนื้อไม่แน่น แต่ให้ผลการทำใหม่ที่ไม่ดีนักกับกลุ่มตัวอย่างที่เนื้อแน่น

Chia and Zhang (2002) ทดสอบหาค่าความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต ด้วยวิธีการทดสอบต่างกัน 3 วิธี พบว่าผลการทดลองที่ได้รับจากการทดสอบแบบระยะสั้นด้วยวิธีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT) มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบแบบระยะยาวด้วยวิธีการทดสอบ Immersion test และ Salt ponding test

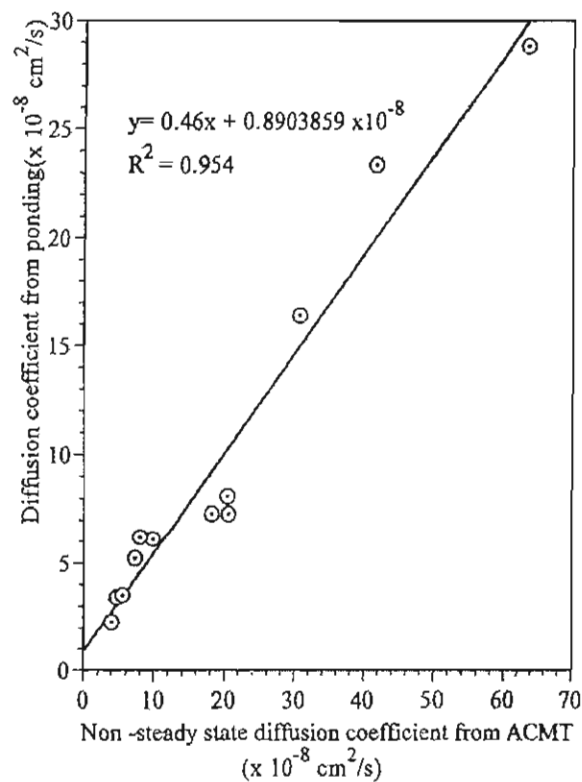
Yang and Wang (2004) ได้ทำการทดสอบเรื่องพฤติกรรมของการแพร่ของคอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มระหว่างทดสอบ Salt ponding test และ Accelerated chloride migration test และเมื่อนำผลทดสอบที่ได้รับจากการทดสอบทั้ง 2 แบบมาเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้รับจากการทดสอบทั้งสองวิธีมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-28

Chiang and Yang (2007) ทำการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ของค่าการแพร่ของคอนกรีตจากการทดสอบ Salt ponding test และ Accelerated chloride migration test แล้วนำผลการทดสอบที่ได้รับจากการทดสอบทั้งสองวิธีการเปรียบเทียบกัน ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้รับจากการทดสอบ Salt ponding test กับสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นที่ดีต่อกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-29

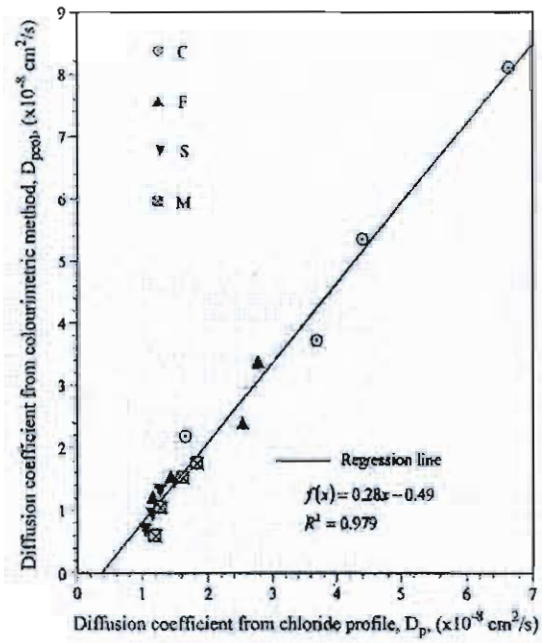
P. Chindaprasert et al. (2008) ทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต พบว่าค่า Charge passed จากการทดสอบ RCPT และค่า Chloride penetration depth จากการทดสอบ RMT ของการทดสอบแบบระยะสั้น มีแนวโน้ม ความสัมพันธ์ ไปในทิศทางเดียวกันกับค่า Chloride penetration depth ของการทดสอบแบบระยะยาวด้วยวิธีการทดสอบ Immersion test ดังแสดงในภาพที่ 2-30



ภาพที่ 2-27 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดลองด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐานของ NordTest (Tang and Sorensen, 2001)



ภาพที่ 2-28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดสอบ Salt ponding test กับสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดสอบ ACMT (Yang and Wang, 2004)



ภาพที่ 2-29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดสอบ Salt ponding test ด้วยวิธี Colourimetric method และวิธี Chloride profile (Chiang and Yang, 2007)

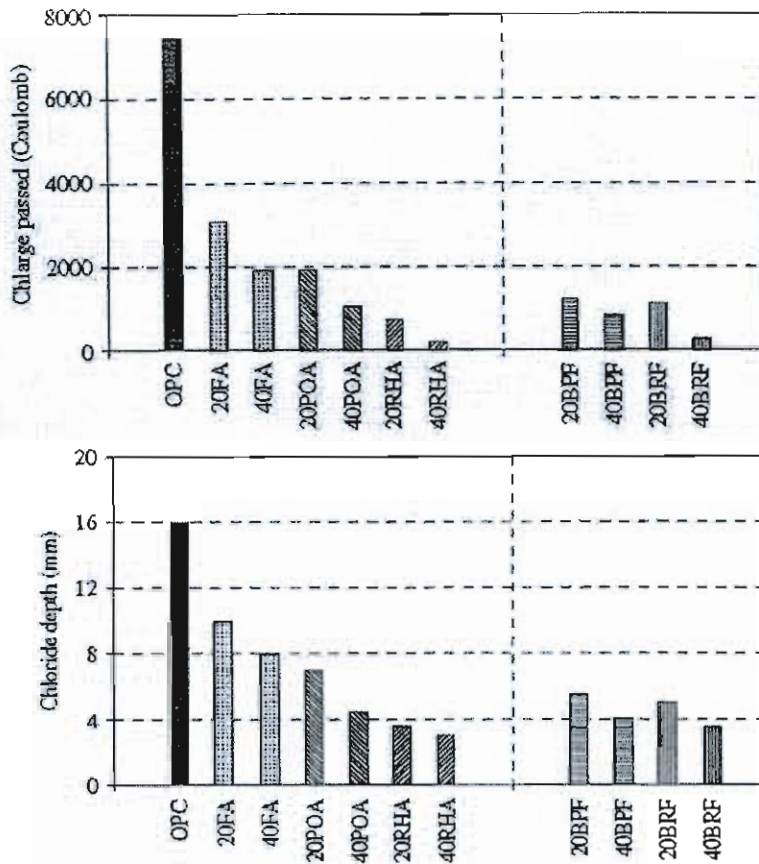


Fig. 6. Chloride depths of rapid migration test (RMT).

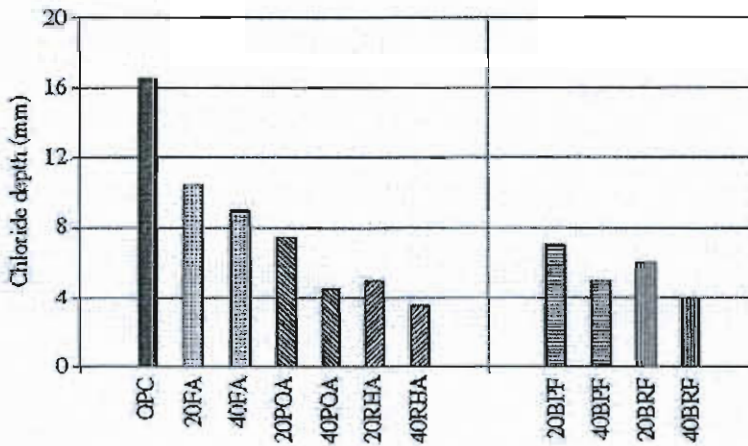


Fig. 7. Chloride depths after 30 days immersion in 3% NaCl solution.

ภาพที่ 2-30 เปรียบเทียบผลทดลองหาค่าความต้านทานคลอไรด์ระหว่างวิธีแบบระยะสั้น ด้วยวิธี RCPT และ RMT และวิธีแบบระยะยาวด้วยวิธี Immersion test (P. Chindaprasert et al., 2008)

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย

ขอบเขตงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือ การทดลอง เพื่อหาความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัว ที่ปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ชนิดของวัสดุที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยทำการทดสอบรวม 4 วิธี คือ การแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test) การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test-RCPT) การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid migration test-RMT) และการดูดซึมน้ำ (Water absorption test) ส่วนที่ 2 คือ การนำผลการทดลองจากการทดสอบส่วนที่ 1 มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อหาส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดี เพื่อหาแนวโน้มนหรือความสัมพันธ์ของผลการทดสอบแต่ละวิธี รวมถึงเพื่อสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ต่อไป

การทดลอง

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตาม มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก.15-2532 ดังแสดงในตารางที่ 3.1

1.1.1 ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทย ใช้ในงานก่อสร้าง ทำคอนกรีตหรือทำผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ เหมาะสำหรับงานคอนกรีต โดยทั่วไป ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนตราช้าง (ช้างแดง) สำหรับงานโครงสร้าง

1.1.2 ปูนซีเมนต์ประเภทห้า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภททนซัลเฟตสูง (Sulfate resistance Portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มี C3A ไม่เกิน 5% เพื่อป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต และให้กำลังต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับเกลือซัลเฟตอย่างรุนแรง จากดินและน้ำที่มีปริมาณซัลเฟตสูง เช่น งานก่อสร้างบ่อบำบัดน้ำเสีย, โครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียโดยตรง, และโครงสร้างใต้ดิน ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนตราช้าง (ช้างฟ้า) สำหรับงานทนซัลเฟตสูง

ตารางที่ 3-1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5

องค์ประกอบทางเคมี (% by weight)	Type I cement	Type V cement
Silicon Dioxide ,SiO ₂	20.80	21.52
Aluminum Oxide,Al ₂ O ₃	5.50	3.56
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃	3.16	4.51
Calcium Oxide, CaO	64.97	66.70
Magnesium Oxide ,MgO	1.06	1.20
Sodium Oxide ,Na ₂ O	0.08	0.10
Potassium Oxide ,K ₂ O	0.55	0.24
Sulfur Trioxide ,SO ₃	2.96	2.11
Loss on Ignition ,LOI	2.89	1.74
Tricalcium Silicate ,C ₃ S	56.50	71.60
Dicalcium Silicate, C ₂ S	17.01	7.68
Tricalcium Aluminate, C ₃ A	9.23	1.80
Tetracalcium Aluminoferrite, C ₄ AF	9.62	13.72

1.2 เถ้าลอย (Fly ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แสดงในภาพที่ 3.1

1.3 ผงหินปูน (Limestone powder) ใช้ผงหินปูนยี่ห้อ CALCRETE#1 ของบริษัท Surint Omya Chemicals (Thailand) ผลิตในประเทศไทย แสดงในภาพที่ 3.2

1.4 สารขยายตัว (Expansive additives) ใช้สารขยายตัวยี่ห้อ EXPANE ของบริษัท Taiheiyo Materials Corporation นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น แสดงในภาพที่ 3.3

1.5 น้ำ (Water) ใช้น้ำประปาจากห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว แสดงในตารางที่ 3.2



ภาพที่ 3-1 เถ้าลอย (Fly ash)



ภาพที่ 3-2 ผงหินปูน (Limestone powder)



ภาพที่ 3-3 สารขยายตัว (Expansive additives)

ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว

Chemical component	Fly ash (%)	Limestone powder (%)	Expansive additives (%)
SiO ₂	36.10	0.06	9.60
Al ₂ O ₃	19.40	0.09	2.50
Fe ₂ O ₃	15.10	0.04	1.30
CaO	17.40	54.80	67.30
MgO	2.97	0.57	0.40
SO ₃	0.77	-	18.00
Na ₂ O	0.55	-	-
K ₂ O	2.17	-	-
LOI	2.81	43.80	0.40
Specific gravity	2.27	2.70	3.04
Blaine fineness (cm ² /g)	2,460	9,260	3,500

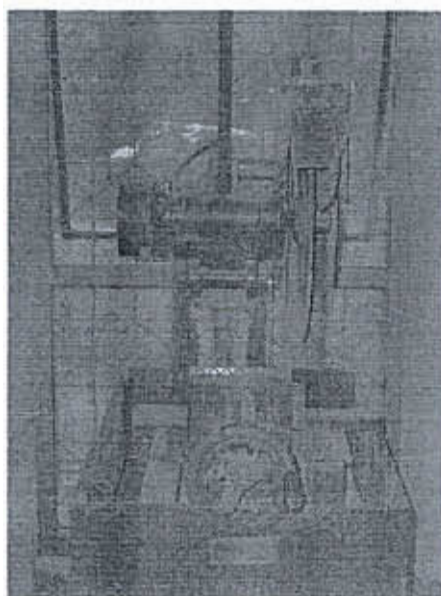
2. อุปกรณ์ สารเคมีและวิธีที่ใช้ในการทดลอง

2.1 การทดสอบการแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test)

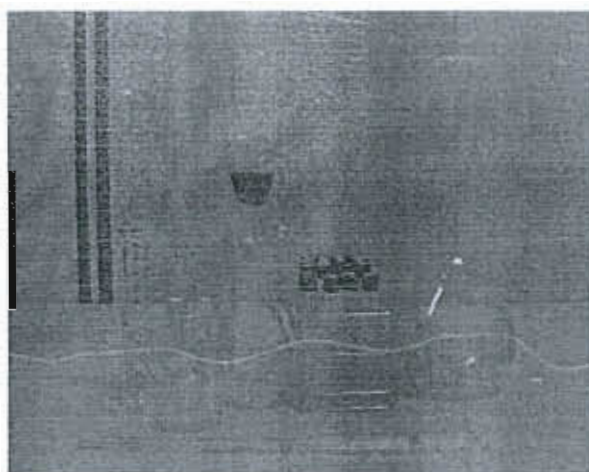
ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบหล่อขึ้นตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. และสูง 10 ซม.
2. เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ (Cement paste mixer)
3. เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ ดังภาพที่ 3-4
4. ถังพลาสติกบรรจุขึ้นตัวอย่างทดสอบ
5. ครกหินบดตัวอย่างทดสอบ
6. บีกเกอร์ ขนาด 100 และ 250 ml ดังภาพที่ 3-5
7. กระบอกตวง ขนาด 100 ml ดังภาพที่ 3-5

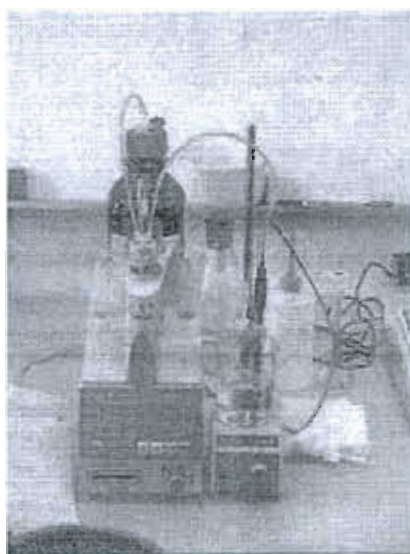
8. ปิเปต (Pipet) ขนาด 25 ml ดังภาพที่ 3-5
9. ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 ml ดังภาพที่ 3-5
10. ขวดรูปชมพู่ ดังภาพที่ 3-5
11. แท่งแก้วคน ดังภาพที่ 3-5
12. แผ่นกระจก ดังภาพที่ 3-5
13. กรวย (Büchner funnel) ดังภาพที่ 3-5
14. ขวดกรองแก้วกัน โปรง (filtration flask) ดังภาพที่ 3-5
15. ซ้อนตักสาร ดังรูปที่ 3-5
16. TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ดังภาพที่ 3-6
17. เครื่อง Auto titration รุ่น 721 NET titrino metrolm ดังภาพที่ 3-6
18. เครื่องกวนแม่เหล็ก ดังภาพที่ 3-6
19. เครื่องดูด (suction apparatus) ดังภาพที่ 3-7
20. เครื่องต้ม (hot plate) ดังภาพที่ 3-8
21. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance) ดังภาพที่ 3-9
22. แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 ซม ดังภาพที่ 3-10
23. ตะแกรงร่อนขนาดเบอร์ 20 (850 μm)



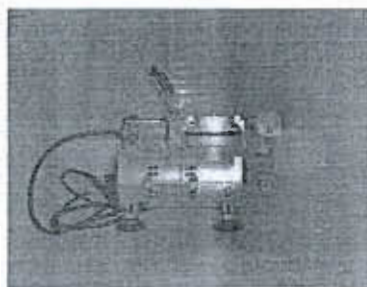
ภาพที่ 3-4 เครื่องตัดตัวอย่าง



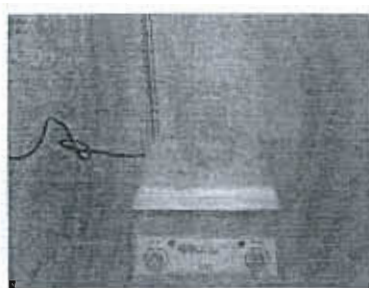
ภาพที่ 3-5 ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้ว



ภาพที่ 3-6 เครื่อง Potentiometric titration



ภาพที่ 3-7 เครื่องดูด (Suction apparatus)



ภาพที่ 3-8 เครื่องต้ม (hot plate)



ภาพที่ 3-9 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล



ภาพที่ 3-10 แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 ซม

ข) สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดไนตริก (Nitric Acid) เข้มข้น 100%
2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้น 30%
3. methyl orange indicator
4. สารละลายคลอไรด์ไอออน ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก
5. สารละลายมาตรฐาน 0.1M ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3)

6. น้ำกลั่น

7. สารกันซึมเคลือบขึ้นตัวอย่างทดสอบ Monoflex

ค) วิธีการทำการทดลอง

1. เตรียมแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ (Mortar) หล่อแท่งมอร์ตาร์ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 10 ซม. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 ใช้เถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัวแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-3 ถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชม. หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในน้ำอีก 27 วัน ขึ้นตัวอย่างทั้งหมดจะถูกเคลือบด้วยอีพ็อกซี ยกเว้นที่ปลายด้านหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 3-11 แล้วจึงนำตัวอย่างไปแช่สารละลายคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนัก (ใช้ NaCl 82.39 กรัมต่อน้ำ 1000 กรัม) เป็นเวลา 35 วัน 91 วัน และ 182 วัน เพื่อให้เกิดการแพร่ของคลอไรด์จากสารละลายเข้าสู่ตัวอย่าง (ภาพที่ 3-12)



ภาพที่ 3-11 ขึ้นตัวอย่างที่เคลือบผิวด้านข้างด้วยสารกันซึม



ภาพที่ 3-12 การแช่ตัวอย่างในสารละลายเกลือเข้มข้น 5.0%

ตารางที่ 3-3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์

Designation	Binder (B)				Water (W) (kg)	SSD sand (kg)	W/B
	Cement (kg)	Additive (kg)					
		F	E	L			
C1W40	1.00	-	-	-	0.40	2.75	0.40
C1W50	1.00	-	-	-	0.50	2.75	0.50
C5W40	1.00	-	-	-	0.40	2.75	0.40
C5W50	1.00	-	-	-	0.50	2.75	0.50
C1E10W40	0.90	-	0.10	-	0.40	2.75	0.40
C1E10W50	0.90	-	0.10	-	0.50	2.75	0.50
C5E10W40	0.90	-	0.10	-	0.40	2.75	0.40
C5E10W50	0.90	-	0.10	-	0.50	2.75	0.50
C1F30W40	0.70	0.30	-	-	0.40	2.75	0.40
C1F30W50	0.70	0.30	-	-	0.50	2.75	0.50
C1E10F30W40	0.60	0.30	0.10	-	0.40	2.75	0.40
C1E10F30W50	0.60	0.30	0.10	-	0.50	2.75	0.50
C1L5W40	0.95	-	-	0.05	0.40	2.75	0.40
C1L5W50	0.95	-	-	0.05	0.50	2.75	0.50
C1L15W40	0.85	-	-	0.15	0.40	2.75	0.40
C1L15W50	0.85	-	-	0.15	0.50	2.75	0.50
C1L25W40	0.75	-	-	0.25	0.40	2.75	0.40
C1L25W50	0.75	-	-	0.25	0.50	2.75	0.50
C1F5L25W40	0.70	0.05	-	0.25	0.40	2.75	0.40
C1F5L25W50	0.70	0.05	-	0.25	0.50	2.75	0.50
C1F15L15W40	0.70	0.15	-	0.15	0.40	2.75	0.40
C1F15L15W50	0.70	0.15	-	0.15	0.50	2.75	0.50
C1F25L5W40	0.70	0.25	-	0.05	0.40	2.75	0.40

ตารางที่ 3-3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ (ต่อ)

Designation	Binder (B)				Water (W) (kg)	SSD sand (kg)	W/B
	Cement (kg)	Additive (kg)					
		F	E	L			
C1F25L5W50	0.70	0.25	-	0.05	0.50	2.75	0.50

หมายเหตุ : ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

- “C1” หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน
- “C5” หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน
- “F, L, E” หมายถึง เถ้าลอย ผงหินปูน และ สารขยายตัว
- “5,10,...,30” หมายถึง ปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูนหรือสารขยายตัว
- “w40” หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

“C1F5L25W40” หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนที่ 5 และ 25% ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

2. นำแท่งมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายคลอไรด์ไอออนจนครบระยะเวลาที่กำหนด (35, 91, 182 วัน) มาตัดเป็นชิ้นความหนาประมาณ 1 ซม. จำนวน 5 ชิ้น ที่ระดับความลึก 1, 2, 3, 4 และ 5 ซม. จากผิวด้านนอก แล้วนำชิ้นมอร์ตาร์ที่ตัดแล้วมาบดเป็นผง แยกผงมอร์ตาร์ดังกล่าวตามระดับชั้นความลึกจากผิวตัวอย่าง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ชนิดของวัสดุที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ ระยะเวลาการแช่ในคลอไรด์ จากนั้นนำผงมอร์ตาร์มาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ภายในตัวอย่างคอนกรีตตามวิธี ASTM C1152 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) และทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ภายในตัวอย่างคอนกรีตตามวิธีการทดสอบของ ASTM C1218 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble chloride) ซึ่งการหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) และ ปริมาณสารคลอไรด์อิสระ (Free chloride) จะพิจารณาจุดยุติของปฏิกิริยาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกวิธีหาปริมาณคลอไรด์นี้ว่า Potentiometric titration หลังจากนั้นแสดงผลการทดสอบที่ได้เป็นกราฟปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ระยะ

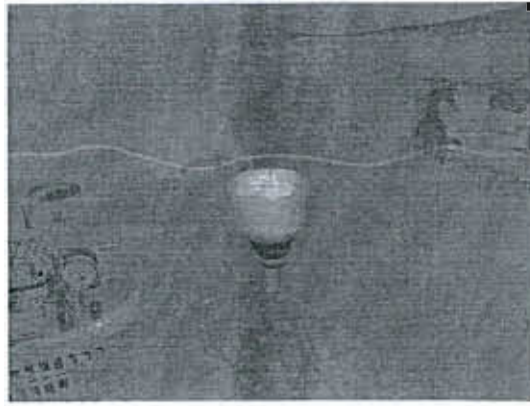
ความลึกเฉลี่ย 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 ซม. จากผิวด้านนอก โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดในระบบ

คลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ก็คือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดดังนี้ [ASTM C1152, ASTM C114]

- นำตัวอย่างคอนกรีตที่บดแล้วเก็บมาจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml
- เติมน้ำลงไป 75 ml แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 100% ที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 ml ตามลงไปทันที โดยค่อย ๆ เติมน้ำลงไป คอยคนก้อนซีเมนต์ที่จับตัวเป็นก้อน (lumps) ให้แยกออกจากกัน ถ้ามีกลิ่นของก๊าซไข่เน่า (hydrogen sulfide) ในระหว่างนี้ ให้เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 ml และหยด methyl orange indicator จำนวน 3 หยด ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระจกแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ถ้ามีสีเหลืองถึงสีเหลืองส้มปรากฏบนด้านบนของของแข็งที่ตกตะกอนอยู่ แสดงว่าสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดไม่พอ ให้หยดสารละลายกรดไนตริกที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไปแล้วคนไปพร้อม ๆ กันจนกระทั่งปรากฏเป็นสีชมพูหรือสีแดงอ่อน ๆ จากนั้นหยดสารละลายกรดไนตริกต่อไปอีก จำนวน 10 หยด
- ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาด้วยแผ่นกระจกด้วยการต้มให้เดือด อย่าให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (hot plate)
- ล้างแผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 cm ด้วยน้ำเพิ่มขึ้นครั้งละ 25 ml จำนวน 4 ครั้ง โดยใช้การกรองดูด (suction filtering) ด้วยกรวย (Büchner funnel) ขนาด 250 หรือ 500 ml และขวดกรองแก้วกันโป่ง (filtration flask) เล็กการล้างแล้วทำการล้างขวดแก้วกันโป่งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ประกอบเครื่องดูด (suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์และแผ่นกระดาษกรอง 2 ครั้งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ดังภาพที่ 3.13 ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกันโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วกันโป่งทันทีด้วยน้ำบีกเกอร์ อันแรกที่ใช้ อาจนำมาใช้ได้ทั้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml
- สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ว วางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แะ electrode และบิวเรตสำหรับปล่อย

สารละลาย 0.1 N ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode เริ่มการกวนช้า ๆ



ภาพที่ 3-13 การกรองสารละลายตัวอย่าง

6. เครื่อง Potentiometric titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Potentiometric titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้และประจุ

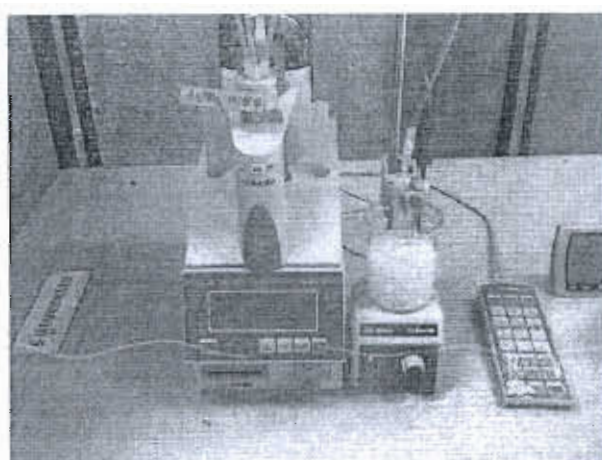
7. จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration

8. แสดงผลการทดสอบที่ได้เป็นกราฟปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ ที่ระยะความลึกเฉลี่ย 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 ซม. จากผิวด้านนอก

การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระในระบบ

คลอไรด์ที่ละลายน้ำ (Water-soluble chloride) ในระบบของคอนกรีตก็คือ คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระดังนี้ [ASTM C1218, ASTM C114]

1. นำสารคอนกรีตตัวอย่างที่เก็บมาจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียด ถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml



ภาพที่ 3-14 การไตเตรทโดยเครื่อง Potentiometric titration

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

3. เติมน้ำสารละลายกรดไนตริกที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 ml และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 ml ลงในสารละลายที่ผ่านการกรอง ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระดาษกรองแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือด อย่าให้เดือดนานเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (hot plate)

ทำการทดสอบเหมือนวิธีการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ตั้งแต่ข้อ 4 เป็นต้นไป

2.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid Chloride Penetration Test-RCPT)

ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบหล่อขึ้นตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. และสูง 10 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 3-15

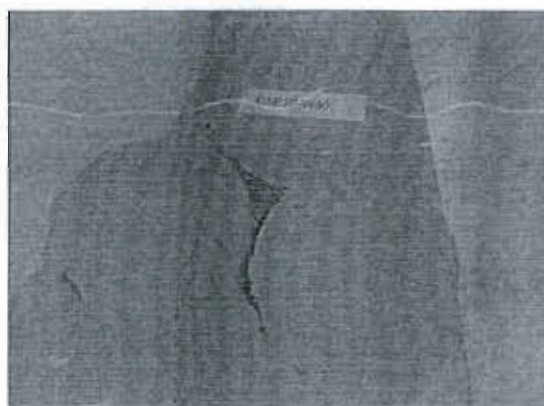
2. เซลล์อะคริลิก (Acrylic Cell) ดังแสดงในภาพที่ 3-16

3. ซีลีโคน รุ่น Sikalex-11FC

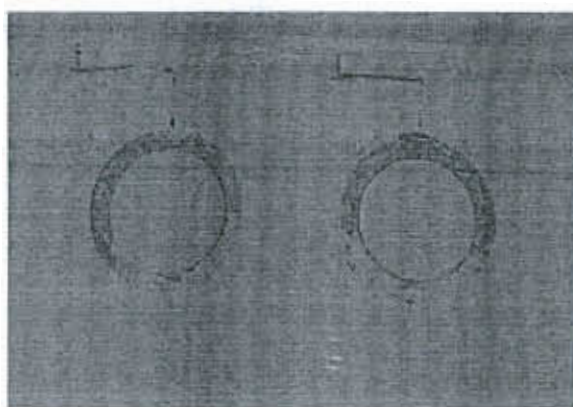
4. เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 3-17

ข) สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

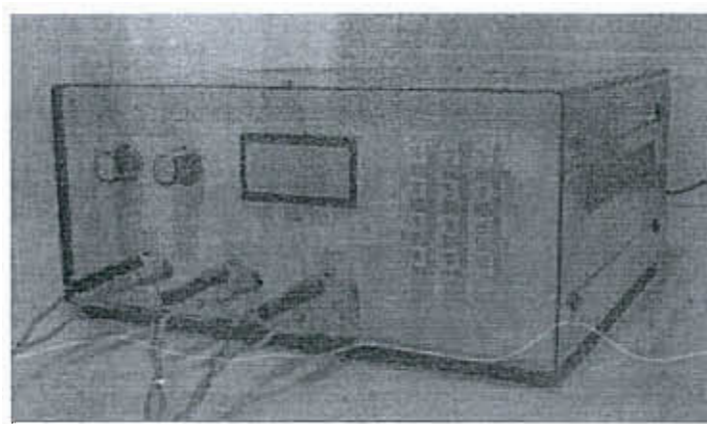
1. สารละลาย NaCl เข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก
2. สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.3M



ภาพที่ 3-15 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบ RCPT



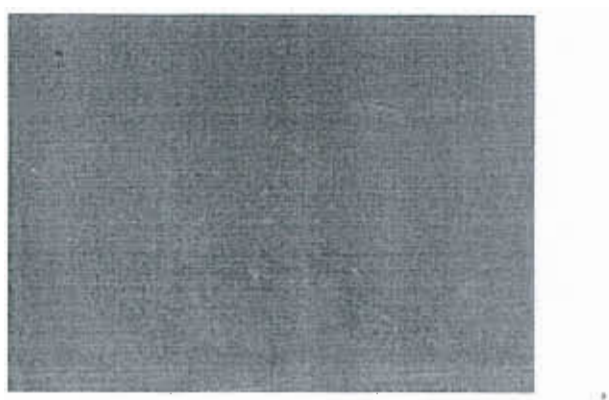
ภาพที่ 3-16 เซลล์ทดสอบ RCPT



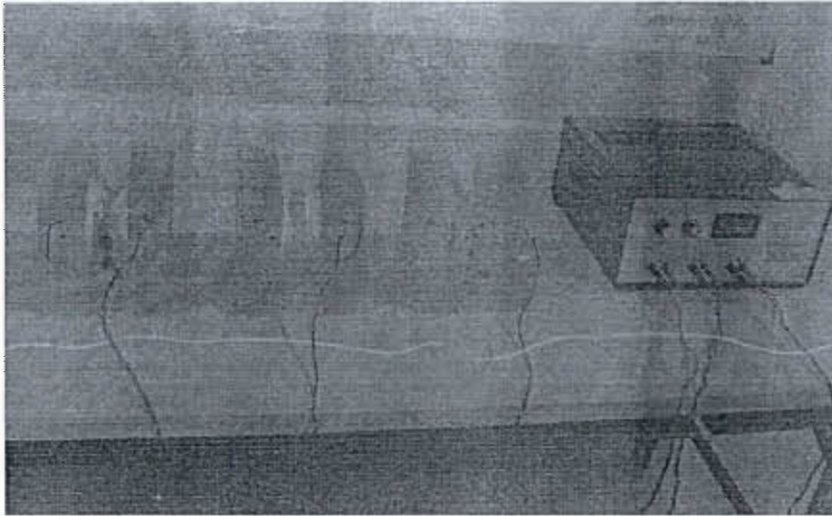
ภาพที่ 3-17 เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ค) วิธีการทำการทดลอง

เตรียมแท่งมอร์ตาร์ (Mortar) หลอมมอร์ตาร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 5 ซม. ใช้สัดส่วนการผสมดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-3 ถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชม. บ่มตัวอย่างในน้ำอีก 27 วัน (ภาพที่ 3-18) โดยด้านหนึ่งของเซลล์ทดสอบ (ด้านแคโทด) ใส่สารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก อีกด้านหนึ่ง (ด้านแอโนด) ใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.3M จัดอุปกรณ์ทดสอบดังภาพที่ 3-19 นำตัวอย่างทดสอบมาทดสอบโดยใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 60 V เป็นเวลา 6 ชม. บันทึกผลการทดสอบเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต่อเวลา แล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาพื้นที่ใต้กราฟ รายงานเป็นค่า Charge passed ในหน่วย Coulomb



ภาพที่ 3-18 การบ่มตัวอย่างในน้ำ



ภาพที่ 3-19 การทดสอบ RCPT

2.3 การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid Migration Test-RMT)

ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. และสูง 20 ซม.

2. เซลล์อะคริลิก (Acrylic Cell) ดังแสดงในภาพที่ 3-20

3. ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. และสูง 20 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 3-21

4. Cathode (Stainless steel) ดังแสดงในภาพที่ 3-22

5. Anode (Stainless steel) ดังแสดงในภาพที่ 3-23

6. Plastic support ดังแสดงในภาพที่ 3-24

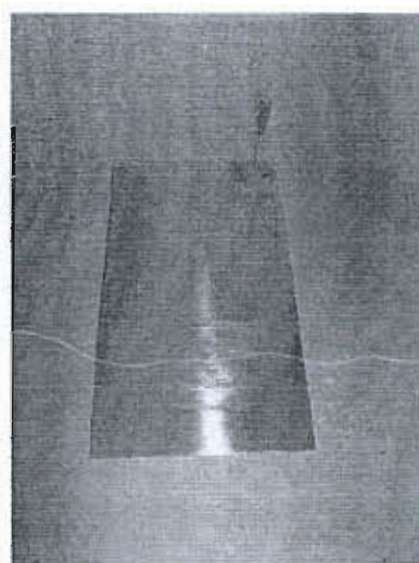
7. เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า



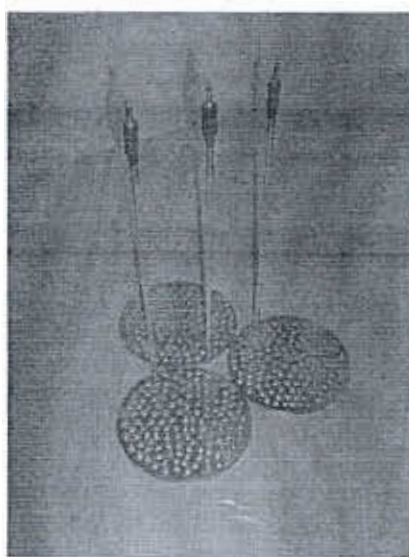
ภาพที่ 3-20 เซลล์ตัวอย่างทดสอบ RMT



ภาพที่ 3-21 ตัวอย่างทดสอบ RMT



ภาพที่ 3-22 Cathode (Stainless steel)



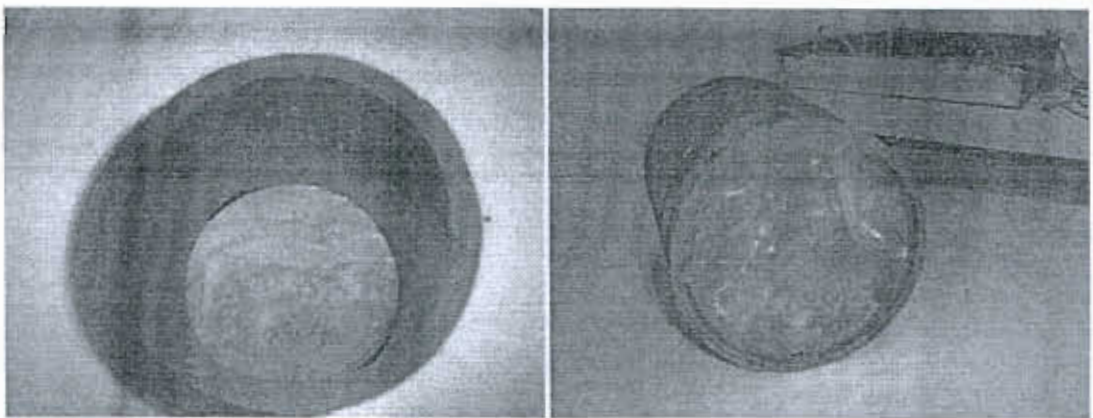
ภาพที่ 3-23 Anode (Stainless steel)

ข) สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

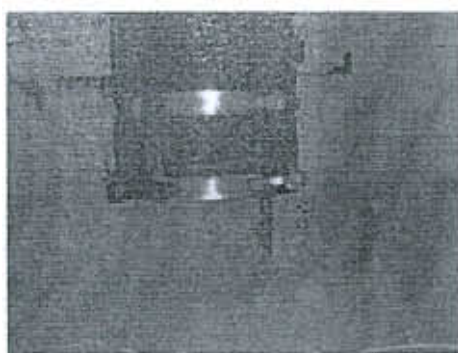
1. สารละลาย NaCl เข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก
2. สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.3M

ค) วิธีการทำการทดลอง

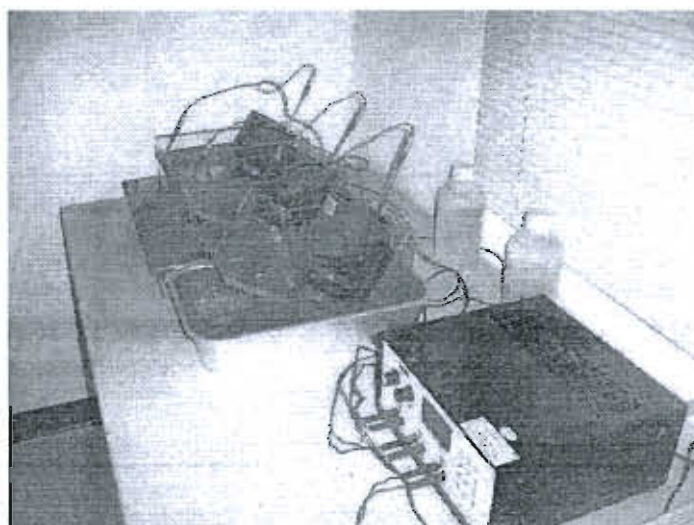
เตรียมแท่งมอร์ตาร์ (Mortar) หลอมมอร์ตาร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ใช้สัปดาห์การผสมดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 3-3 ถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปตัดด้วยเครื่องตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 5 ซม. นำตัวอย่างบ่มขึ้นในน้ำอีก 27 วัน ทำการทดสอบคล้ายกับการทดสอบ RCPT ขึ้นตัวอย่างทดสอบจะถูกใส่ลงในท่ออย่าง (ภาพที่ 3-24) แล้วรัดด้วยเข็มขัดแอสแตนเลสให้แน่น จากนั้นตรวจสอบการรั่วซึม (ภาพที่ 3-25) ด้านหนึ่งของเซลล์ทดสอบ (ด้านแคโทด) ใส่สารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 3% อีกด้านหนึ่ง (ด้านแอโนด) ใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.3M จัดอุปกรณ์ทดสอบดังภาพที่ 3-26 แต่ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 30 V และทดสอบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาผ่าแยกตามภาพที่ 3-27 แล้วใช้ซีกหนึ่งของตัวอย่างมาพันด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทความเข้มข้น 0.1M แล้ววัดค่าความลึกจากบริเวณที่เปลี่ยนเป็นสีออกขาว ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างคลอไรด์และซิลเวอร์ ทำการวัดค่าทั้งสิ้น 7 ค่า โดยเริ่มตำแหน่งแรกที่กึ่งกลางตัวอย่าง แล้วเขยิบออกไปครั้งละ 10 มม. ดังภาพที่ 3-28 ใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความลึกที่วัดทั้งหมดเป็นผลการทดสอบ



ภาพที่ 3-24 การใส่ชิ้นทดสอบในท่ออย่าง



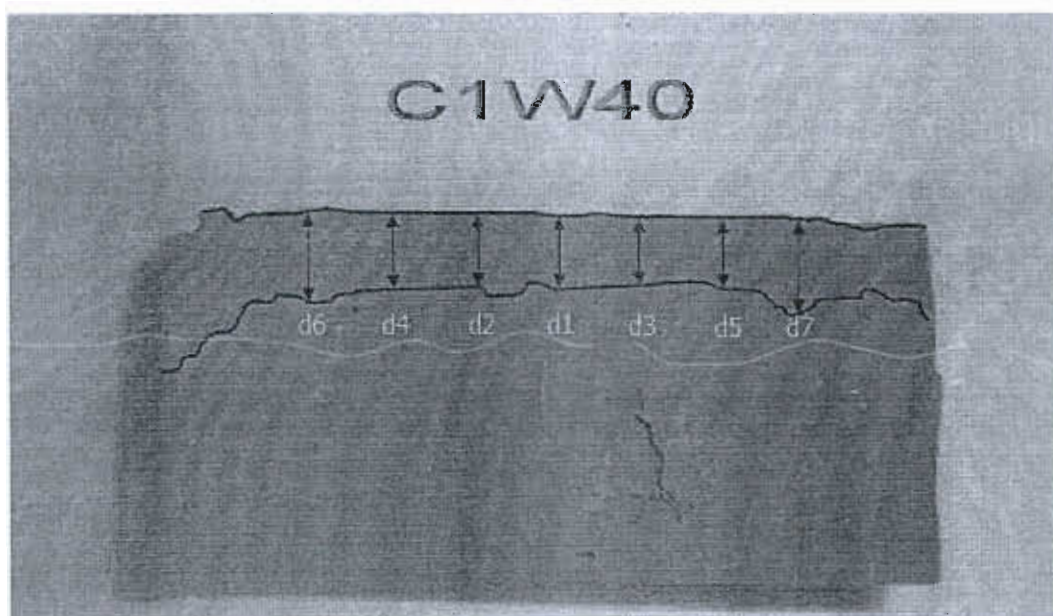
ภาพที่ 3-25 การตรวจสอบการรั่วซึม



ภาพที่ 3-26 การทดสอบ RMT



ภาพที่ 3-27 การผ่าแยกตัวอย่าง



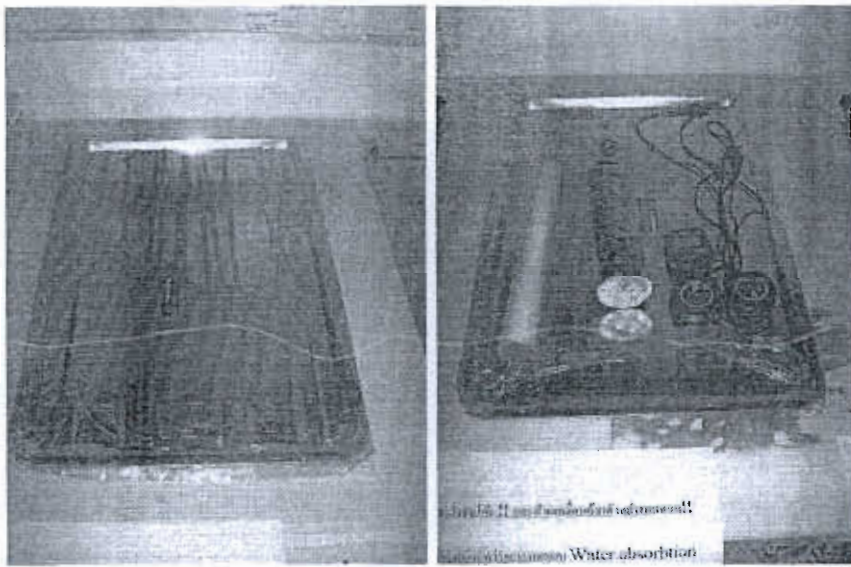
ภาพที่ 3-28 แสดงตำแหน่งการวัดความลึก

2.4 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption Test)

ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. และสูง 20 ซม.

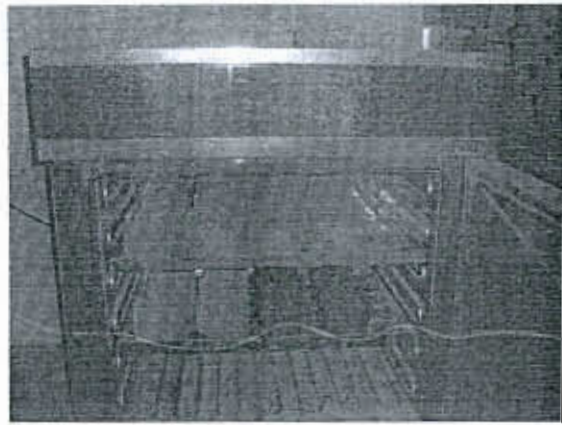
2. ถาดสแตนเลส ดังแสดงในภาพที่ 3-29
3. เทปพันสายไฟ ดังแสดงในภาพที่ 3-29
4. เหล็กเส้นขนาด 6 มม. ดังแสดงในภาพที่ 3-29
5. Plastic Sheet ดังแสดงในภาพที่ 3-29
6. ขางวง ดังแสดงในภาพที่ 3-29
7. นาฬิกาจับเวลา วัดได้ถึง 0.1 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 3-29
8. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลขนาดความละเอียด 0.01 กรัม



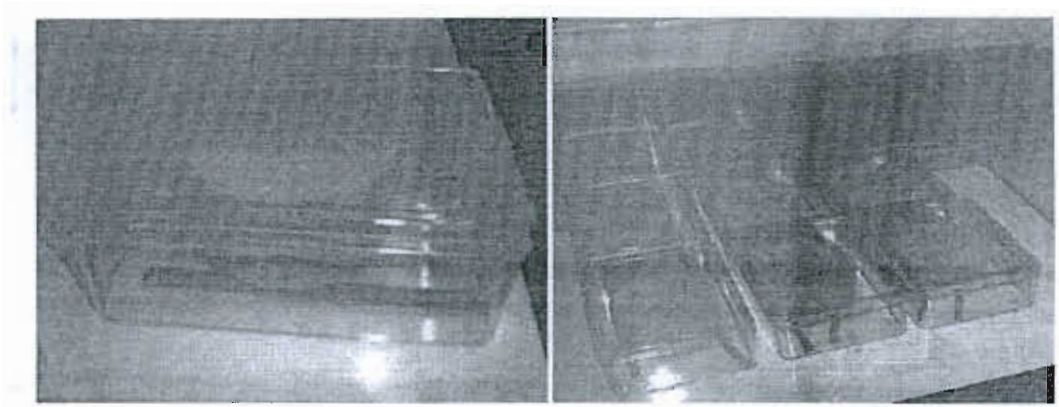
ภาพที่ 3-29 อุปกรณ์การทดสอบ Water absorption

ข) วิธีการทำการทดลอง

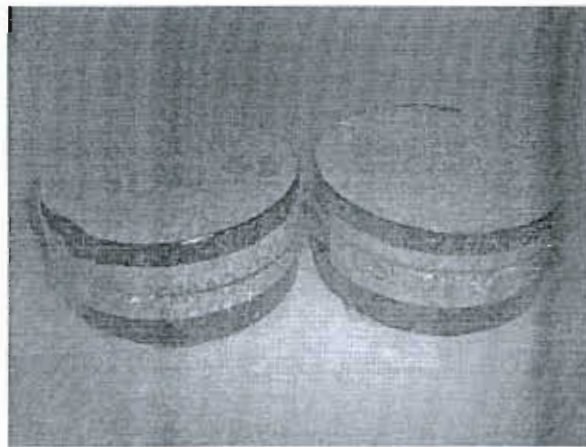
เตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์ (Mortar) โดยหล่อตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ใช้สัดส่วนการผสม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-3 ถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชม. นำตัวอย่างไปตัดด้วยเครื่องตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 5 ซม. นำตัวอย่างบ่มขึ้นในน้ำอีก 27 วัน หลังจากนั้นนำไปเก็บในตู้อบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 3 วัน (ดังภาพ 3-30) แล้วนำตัวอย่างเก็บแยกในภาชนะที่มีฝาปิด โดยต้องให้อากาศสามารถไหลผ่านตัวอย่างได้ทุกด้าน (ดังภาพที่ 3-31) ที่อุณหภูมิ $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลาอีกอย่างน้อย 15 วัน ทำการหุ้มผิวตัวอย่างด้านข้างด้วยเทปพันสายไฟ และคลุมปิดผิวด้านบนของตัวอย่างด้วย Plastic sheet (ดังภาพที่ 3-32) นำตัวอย่างไปทดสอบตามภาพที่ 3-33 โดยให้น้ำท่วมผิวตัวอย่างประมาณ 2 ± 1 มม. แล้วเริ่มชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำได้ถูกดูดซับขึ้นมากอยู่ในก้อนตัวอย่าง โดยทำการชั่งน้ำหนักตามช่วงเวลาตั้งแต่ 60 วินาที, 5 นาที, 10, 20, 30, 60 นาที และชั่งต่อไปทุก ๆ ชั่วโมงจนครบ 6 ชั่วโมง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อีกไปคำนวณหาค่า Absorption [Hall, (1989)] แล้วนำไปเขียนกราฟระหว่างค่า Absorption และค่ารากที่สองของเวลา (ดังรูป 3-34) ความชันของกราฟที่ได้จากการประเมินโดยใช้โปรแกรม ไมโครซอฟท์ Excel 2003 คือค่า Rate of Water absorption โดยที่ค่า Regression ของความสัมพันธ์ ต้องไม่น้อยกว่า 0.98



ภาพที่ 3-30 การเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50° ซ



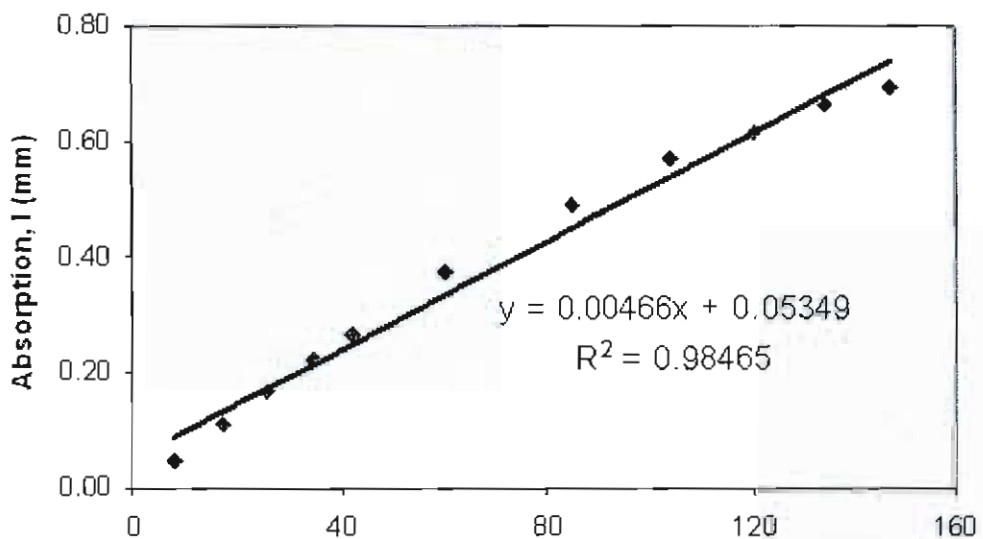
ภาพที่ 3-31 การเก็บตัวอย่างในภาชนะ



ภาพที่ 3-32 การหุ้มปิดตัวอย่าง



ภาพที่ 3-33 การทดสอบ Water absorption test



ภาพที่ 3-34 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบ Water absorption test

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์

ในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบแนวโน้มผลการทดลอง หาความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ โดยในส่วนของ การทดสอบ Bulk density test จะนำข้อมูลความเข้มข้นของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าเนื้อมอร์ตาร์ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ มาเขียนกราฟ Chloride profile เพื่อนำไปหาสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้สมการกฎข้อที่ 2 ของ ฟิคส์

(Fick's second law of diffusion) ต่อไป ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์กับค่า Charge passed ของการทดสอบ Rapid chloride penetration test (RCPT), ค่าเฉลี่ยความลึกจากการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบ Rapid migration test (RMT), ค่า Rate of water absorption ของการทดสอบ Water absorption test เพื่อตรวจสอบหาแนวโน้มของผลการทดลองจากการทดสอบแต่ละวิธี ว่ามีผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของแต่ละการทดสอบ และใช้เป็นข้อมูลเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกใช้วิธีทดสอบที่เหมาะสม ดังแสดงตัวอย่างการหาความสัมพันธ์ของผลการทดสอบที่ได้รับจากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์จากแต่ละวิธีการทดสอบในบทที่ 2 หัวข้อ 2.13 เรื่องการเปรียบเทียบผลทดลองของการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์ด้วยวิธีต่าง ๆ

การวิเคราะห์และการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของมอร์ตาร์

การวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของมอร์ตาร์โดยการนำข้อมูลจากส่วนที่ 1 มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง

เนื่องจากการแพร่เป็นกลไกหลักของการเคลื่อนที่ ของคลอไรด์ภายในเนื้อของคอนกรีต และสมมติฐานของการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ภายในเนื้อของคอนกรีตเป็นแบบ ทิศทางเดียว (One dimension movement) ซึ่งจะเป็นไปตามคำตอบของสมการกฏข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function) ซึ่งแสดงดังสมการ 3-1 ดังนี้

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{(D_a \cdot t)}} \right) \right] + C_i \quad (3-1)$$

โดยที่	$C_{(x,t)}$	คือ	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ความลึก x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา t (% โดยน้ำหนักของตัวอย่าง)
	C_s	คือ	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ (% โดยน้ำหนักของตัวอย่าง)
	C_i	คือ	ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นของมอร์ตาร์ (% โดยน้ำหนักของตัวอย่าง)
	x	คือ	ระยะความลึกจากผิวด้านนอก (ซม.)
	D_a	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ (ซม ² /ปี)
	t	คือ	ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของ คลอไรด์ของมอร์ตาร์

1. หาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ (Cs) โดยใช้วิธีลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายใน (ที่ได้รับจากการทดสอบการแพร่ทั้งหมดจากข้อมูลส่วนที่ 1) มาตัดที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ โดยใช้คำตอบของสมการกฎข้อที่ 2 ของ ฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) หลังจากนั้นนำข้อมูลนั้นมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์, ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยใช้โปรแกรม Statistica V.5 และ Microsoft Excel 2003 ช่วยในการพิจารณาหาความสัมพันธ์เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายค่า ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์

2. นำข้อมูลค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ได้จากสมการที่พัฒนาขึ้นมา แทนค่าคำตอบในสมการกฎข้อที่ 2 ของ ฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งใช้สมการที่เป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function) เพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ภายในเนื้อของมอร์ตาร์ (Da) จากนั้นนำสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ดังกล่าวมาสร้างสมการความสัมพันธ์ในการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ โดยใช้โปรแกรม Statistica V.5 และ Microsoft Excel 2003 ช่วยในการพิจารณาหาความสัมพันธ์ เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของมอร์ตาร์

บทที่ 4

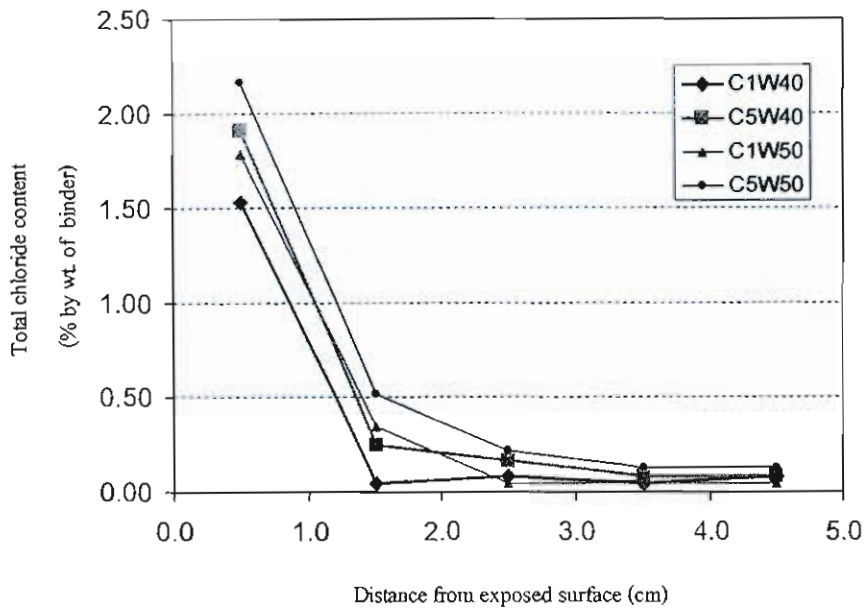
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ผลกระทบของประเภทปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์

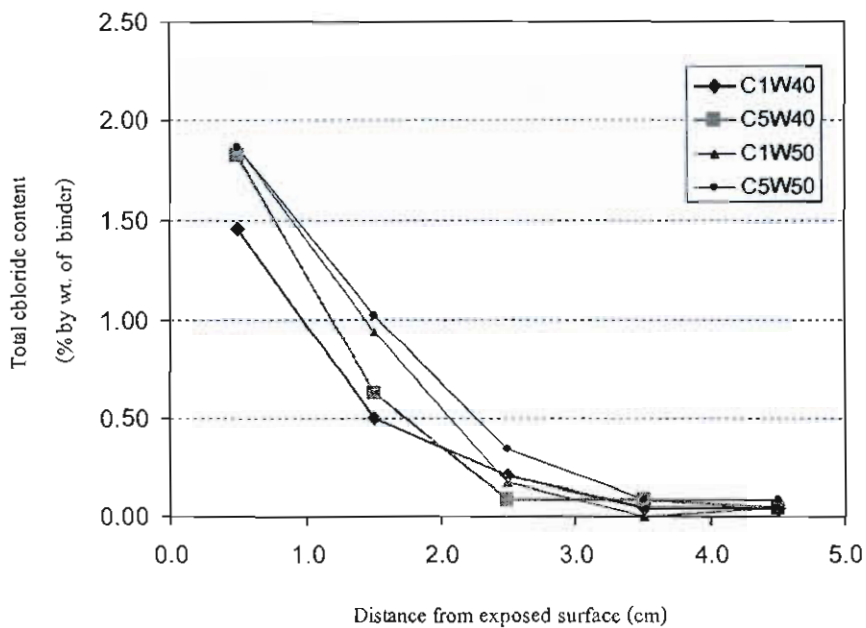
1. การแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test)

การทดสอบความต้านทานคลอไรด์ด้วยการทดสอบการแพร่ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1556 เป็นการทดสอบที่ใช้การแพร่เป็นกลไกหลักในการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่เนื้อมอร์ตาร์แต่คลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปได้นั้น ไม่ได้เกิดเนื่องจากกลไกการแพร่เพียงอย่างเดียว แต่มีกลไกคิงคูคิออนและกลไกแรงดันน้ำด้วย แต่มีผลกระทบน้อยสำหรับการทดสอบการแพร่นี้ ดังนั้นการแพร่เป็นกลไกหลักที่ทำให้คลอไรด์แทรกซึมในเนื้อคอนกรีตสำหรับการทดสอบการแพร่ทั้งหมด จากภาพที่ 4-1 ถึง 4-3 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนอกของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานมีแนวโน้มค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน กล่าวคือมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานมีความต้านทานคลอไรด์ที่สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน

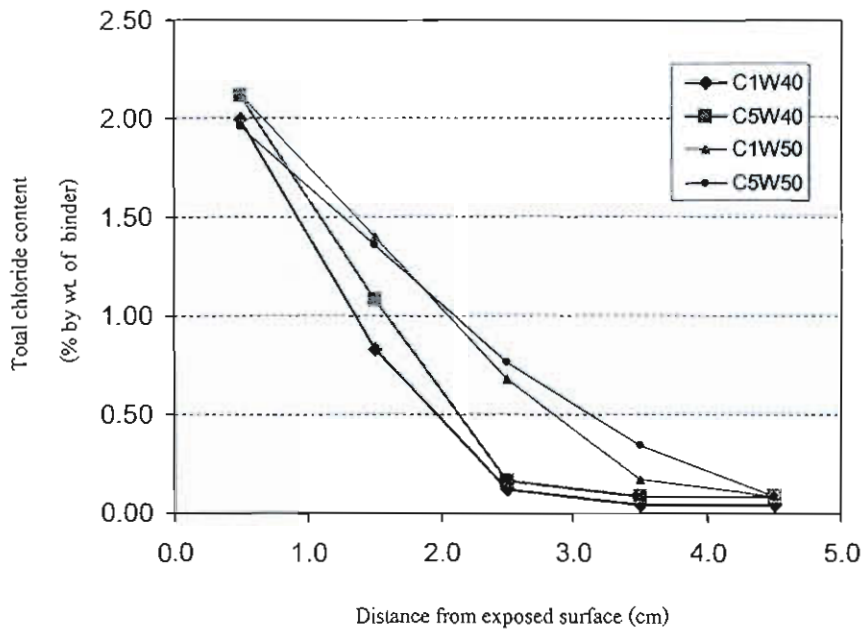
จากภาพที่ 4-3 เมื่อพิจารณามอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะความลึกจากผิวค้ำนอก 0.5 และ 1.5 ซม. พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน (C1W50) มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน (C5W50) เล็กน้อย ซึ่งแตกต่างจากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทางจากผิวค้ำนอกที่มากขึ้น และแตกต่างจากมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ทั้งนี้อาจเป็นผลจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้นทำให้ความพรุนของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ใกล้เคียงกัน จึงทำให้การแพร่ของคลอไรด์ใกล้เคียงกัน แต่มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ได้สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (Sumranwanich and Tangtermsirikul, 2004) จึงทำให้การแพร่ทั้งหมดที่ระยะทางจากผิวค้ำนอกมากขึ้นมีปริมาณคลอไรด์แพร่เข้าไปได้น้อยกว่า



ภาพที่ 4-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



ภาพที่ 4-2 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน

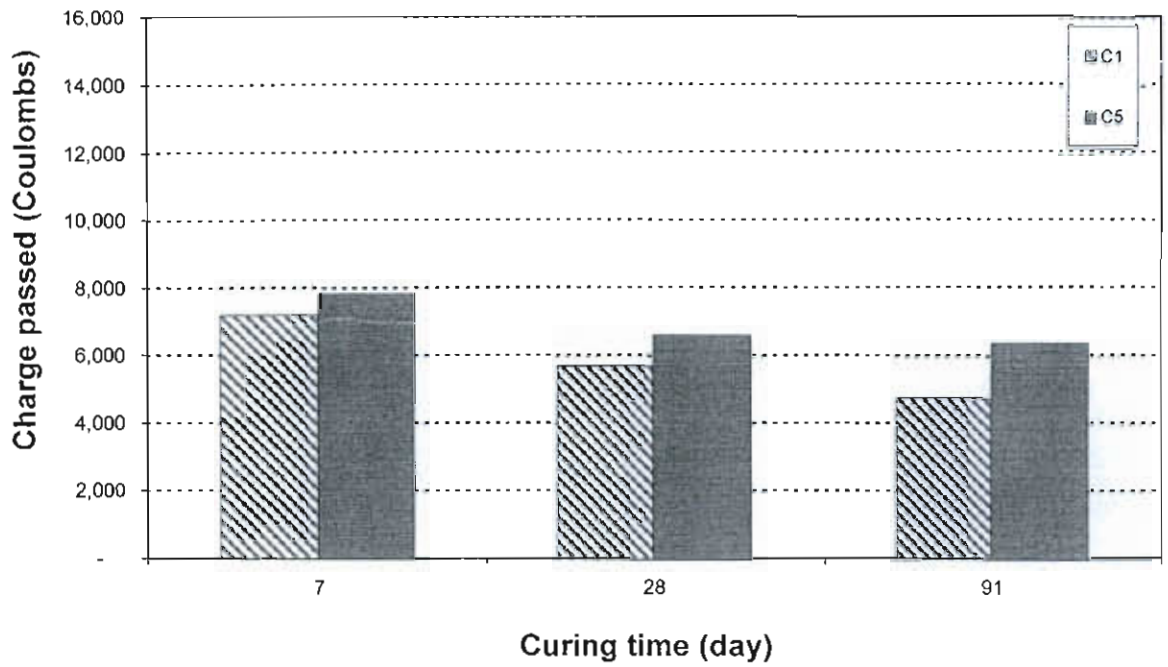


ภาพที่ 4-3 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน

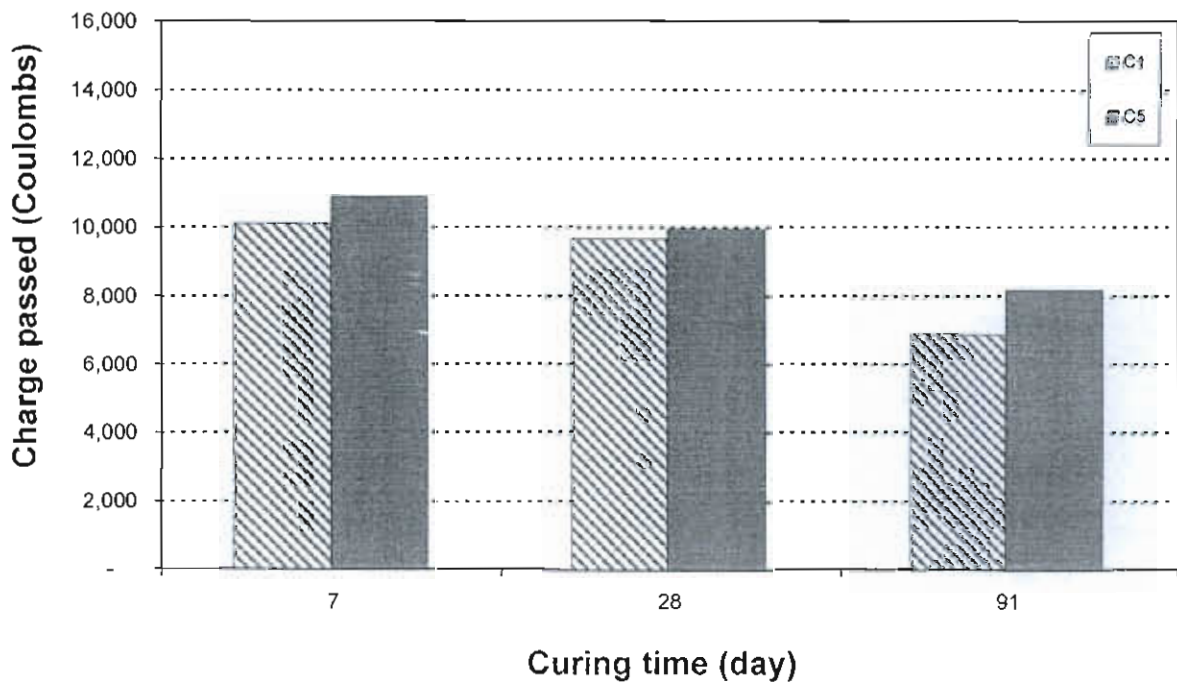
2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT)

จากภาพที่ 4-4 และ 4-5 แสดงผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT) ของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ตามลำดับ พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านเนื้อมอร์ตาร์น้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน กล่าวคือมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานมีความต้านทานคลอไรด์ที่สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน

และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านเนื้อมอร์ตาร์ กับตารางที่ 2-4 (เกณฑ์วัดคุณภาพความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต มาตรฐาน ASTM C1202) พบว่ามอร์ตาร์มีการแทรกซึมของคลอไรด์อินในปริมาณสูง (มากกว่า 4,000 คูลอมบ์) ทั้งนี้เนื่องจากมอร์ตาร์ไม่มีมอร์ตาร์ที่เป็นหิน ดังนั้นประจุไฟฟ้าจึงไหลผ่านมอร์ตาร์ได้มากกว่าคอนกรีต



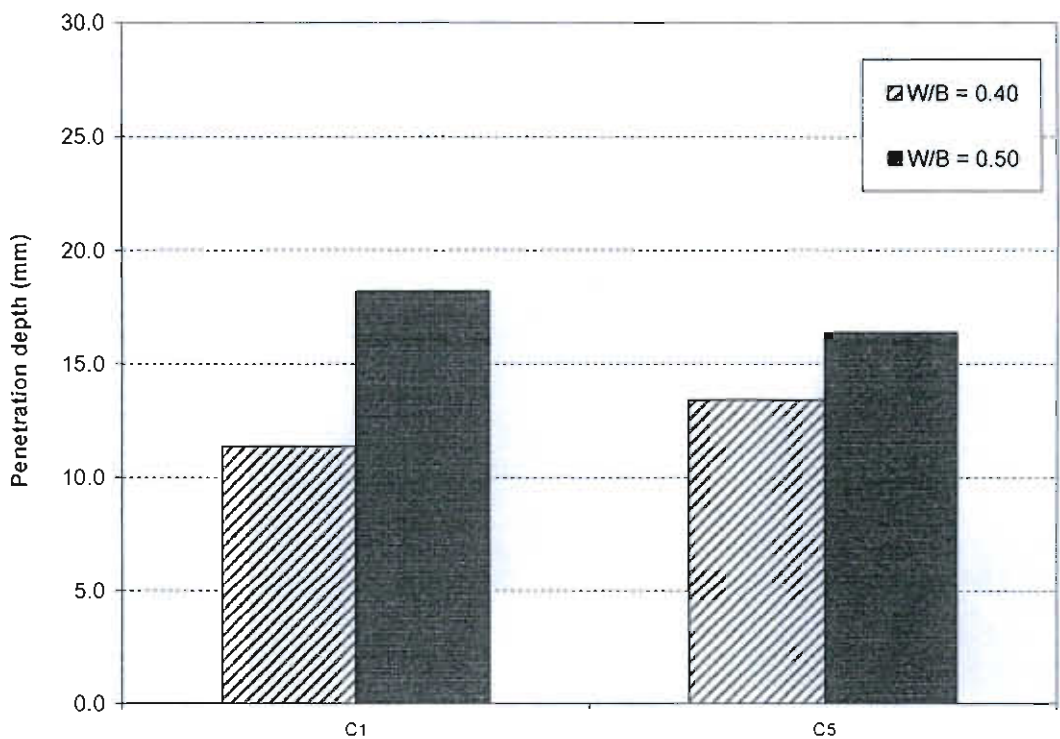
ภาพที่ 4-4 ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ต้าร์อายุ 7, 28 และ 91 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ภาพที่ 4-5 ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ต้าร์อายุ 7, 28 และ 91 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

3. การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (RMT)

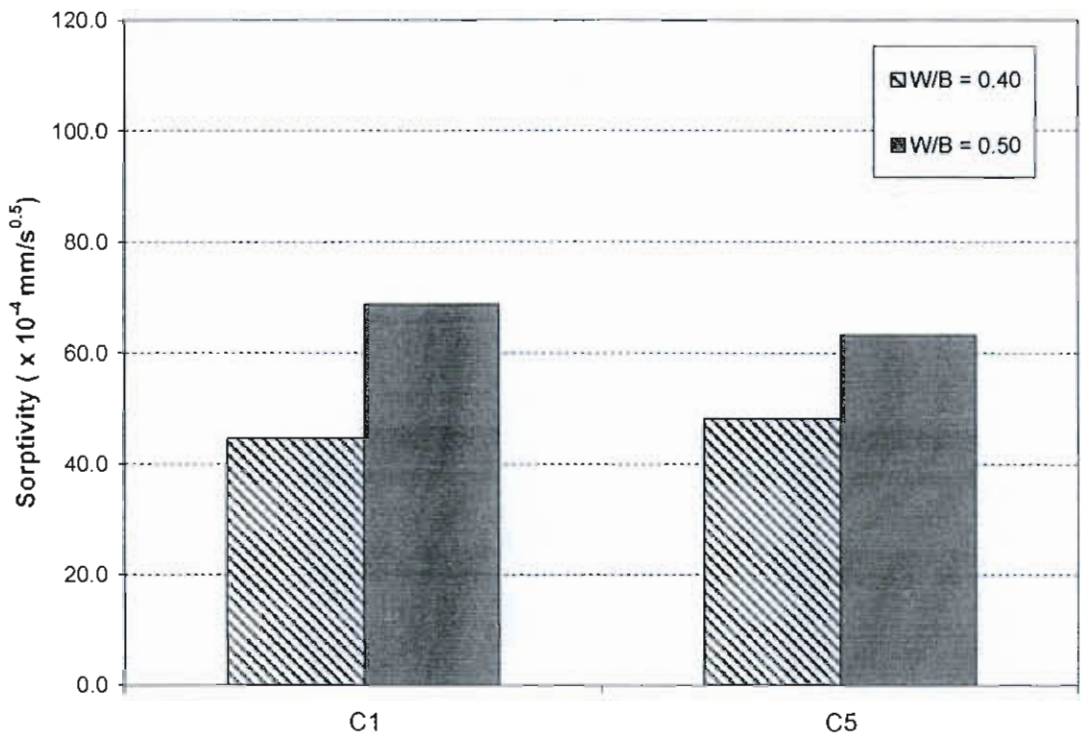
จากภาพที่ 4-6 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (RMT) ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ (Penetration depth) น้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน แต่มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีความลึกการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน ทั้งนี้ อาจเป็นผลจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้นทำให้ความพรุนของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4-6 ผลทดสอบ RMT ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

4. การดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

จากภาพที่ 4.7 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำ (Sorptivity) พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีการดูดซึมน้ำน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน แต่มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน



ภาพที่ 4-7 ผลทดสอบ Water absorption test ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

5. อภิปรายผลกระทบของประเภทปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์จากผลการทดสอบต่าง ๆ

จากผลการทดสอบ พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีแนวโน้มให้ความต้านทานคลอไรด์ที่สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน เนื่องจาก การจับยึดคลอไรด์

ทางเคมี (ภาพที่ 2-10) เนื่องจากสารประกอบ C3A ในปูนซีเมนต์ในรูปของ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Friedal's salt) ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เกิดขึ้นน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณของสารประกอบ C3A ต่ำมาก โดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 5 (ตารางที่ 3-1) ทำให้มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณคลอไรด์อิสระเหลือในคอนกรีตมากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้เกิดการแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มากกว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน [(ปริญา และชัย, 2552), (Farzet et al., 2009), (Rasheeduzzafar et al., 1992)] ดังนั้น การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงมีความเหมาะสมกว่าทั้งในเรื่องของความต้านทานคลอไรด์และราคาอีกด้วย ทั้งนี้ราคาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีราคาสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (<http://www.scgexperience.co.th>, มกราคม 2555)

จากผลการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ทั้ง 4 วิธี พบว่าการทดสอบการแพร่ทั้งหมดและการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการศึกษาผลกระทบของประเภทปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ เนื่องจากให้ผลการทดสอบที่สอดคล้องกับเหตุผลข้างต้นและงานวิจัยอื่น ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ผลกระทบของการใช้สารผสมเพิ่มแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์

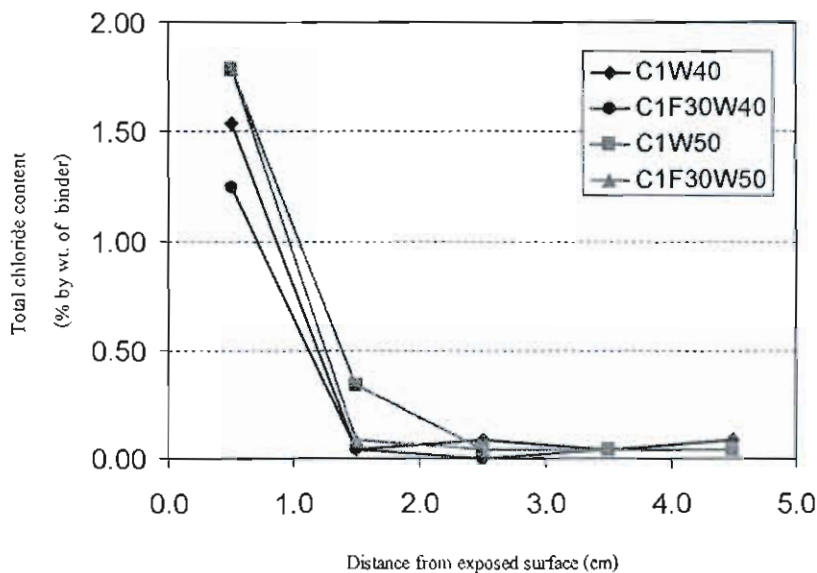
1. ผลกระทบการใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์

1.1 การแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test)

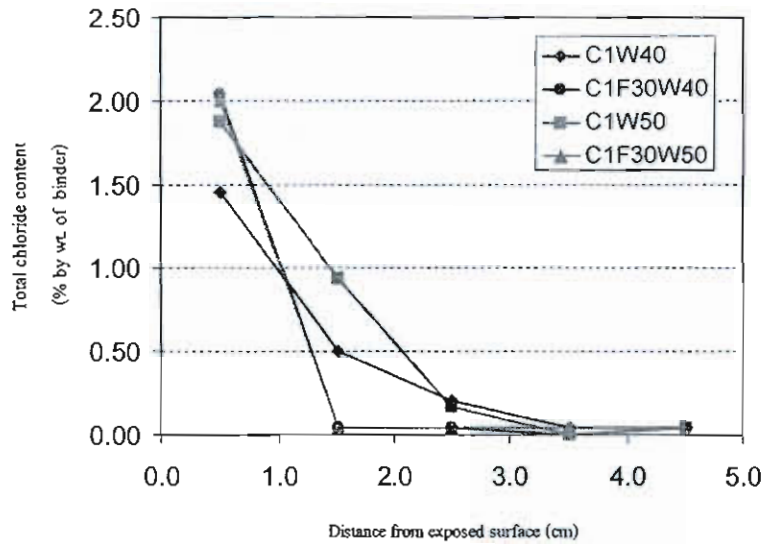
จากภาพ 4-8 ถึง 4-10 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะทางจากผิวหน้าออกมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ระยะความลึกที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการแพร่ของคลอไรด์ต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยสมบูรณ์มากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อมอร์ตาร์ที่ระยะ 1.5-4.5 ซม. แน่นมากขึ้น การแพร่ของคลอไรด์ที่ระยะ 1.5-4.5 ซม. ทำได้ยากขึ้น

และเมื่อพิจารณา mortars ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่ามีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดลดลงอย่างชัดเจน เมื่อระยะทางจากผิวหน้ามากขึ้น ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก mortars มีความพรุนเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ทำให้เกิดการแพร่ของคลอไรด์ได้ง่าย และเมื่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกสมบูรณ์มากขึ้น (เมื่อ mortars แน่นขึ้น) ส่งผลให้เกิดความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างการแพร่ของคลอไรด์ที่ระยะทาง 0.5 ซม. กับที่ระยะทาง 1.5-4.5 ซม. จากผิวหน้า

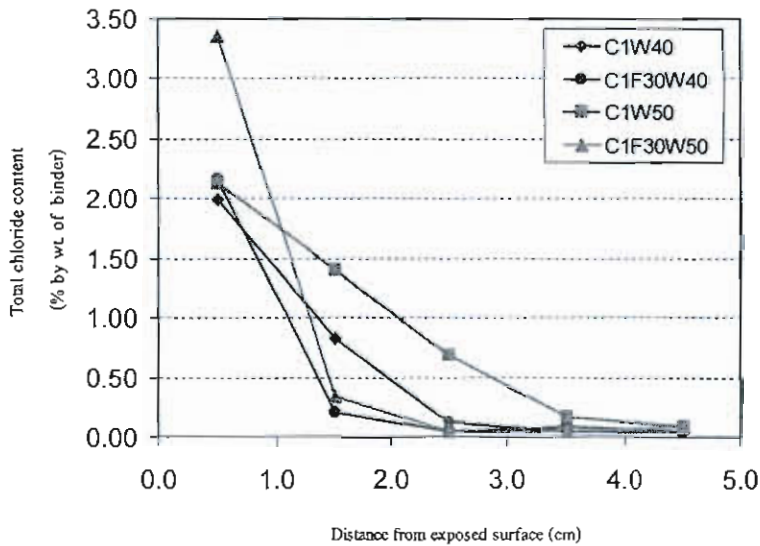
สำหรับที่ระยะความลึก 0.5 ซม. ภาพที่ 4-9 และ 4-10 mortars ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมากกว่า mortars ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก น่าจะเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ยังไม่สมบูรณ์ของ mortars ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ทำให้เกิดการแพร่ของคลอไรด์ในเนื้อ mortars ได้ง่ายกว่า การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ mortars ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก



ภาพที่ 4-8 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดใน mortars ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และ mortars ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวหน้า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



ภาพที่ 4-9 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วน of วัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวหน้า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 91 วัน

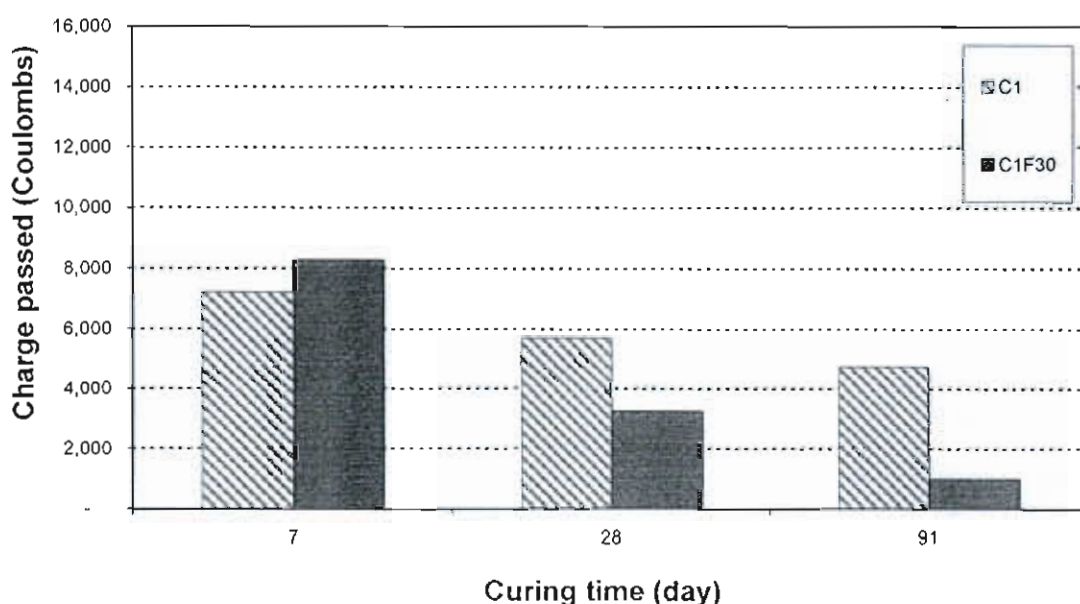


ภาพที่ 4-10 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วน of วัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวหน้า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 182 วัน

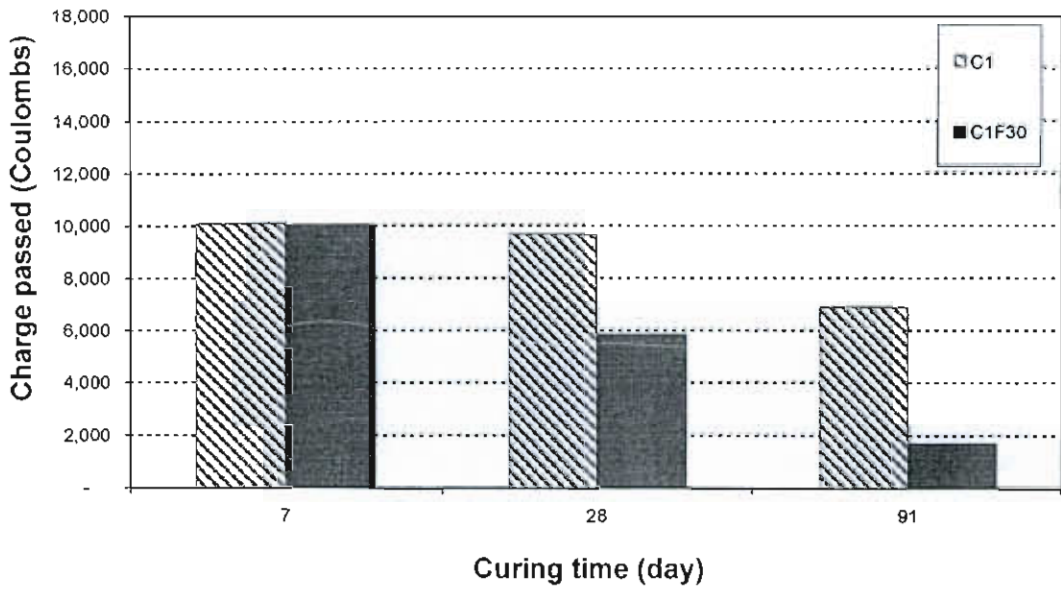
1.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT)

จากภาพที่ 4-11 และ 4-12 แสดงผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT) ของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ตามลำดับ พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีแนวโน้มค่าปริมาณประจุไหลผ่านภายในมอร์ตาร์มากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน 0.30 กล่าวคือมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน 0.30 ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

สำหรับมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน 0.30 ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่น้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน เนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงแรกเริ่มต้นขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้เนื้อของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยยังไม่แน่น ส่งผลให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าเนื้อมอร์ตาร์ได้ง่าย



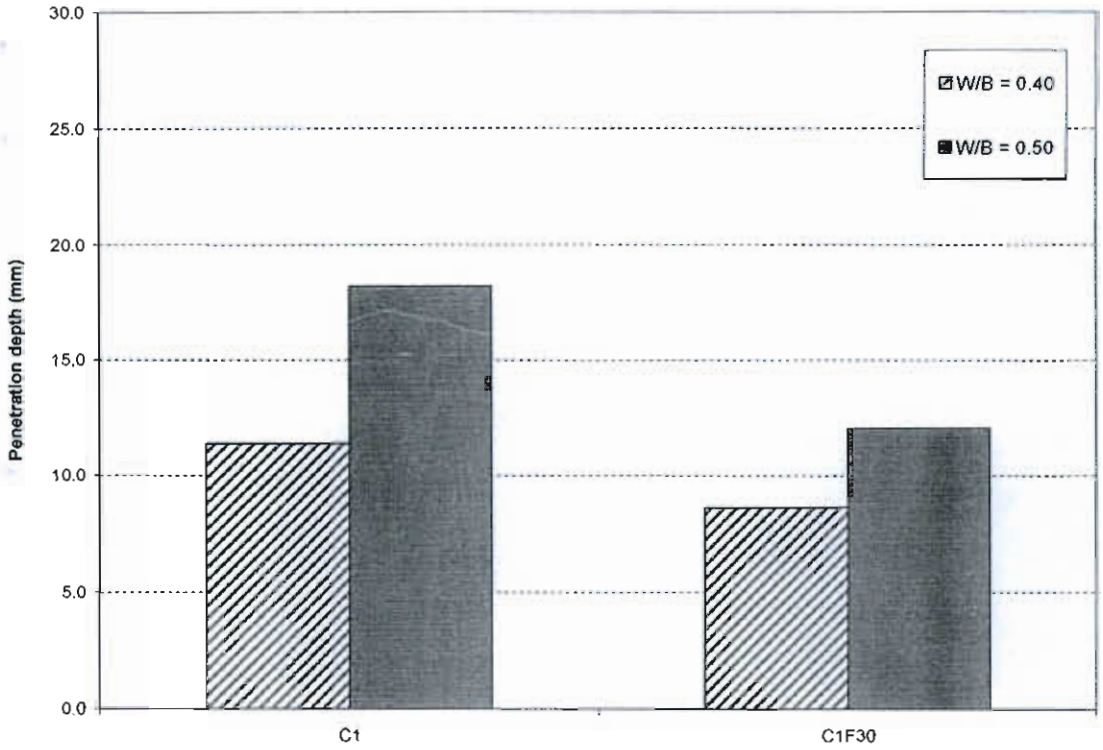
ภาพที่ 4-11 ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์อายุ 7, 28 และ 91 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน กับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ภาพที่ 4-12 ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ต้าร์อายุ 7, 28 และ 91 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน กับมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

1.3 การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (RMT)

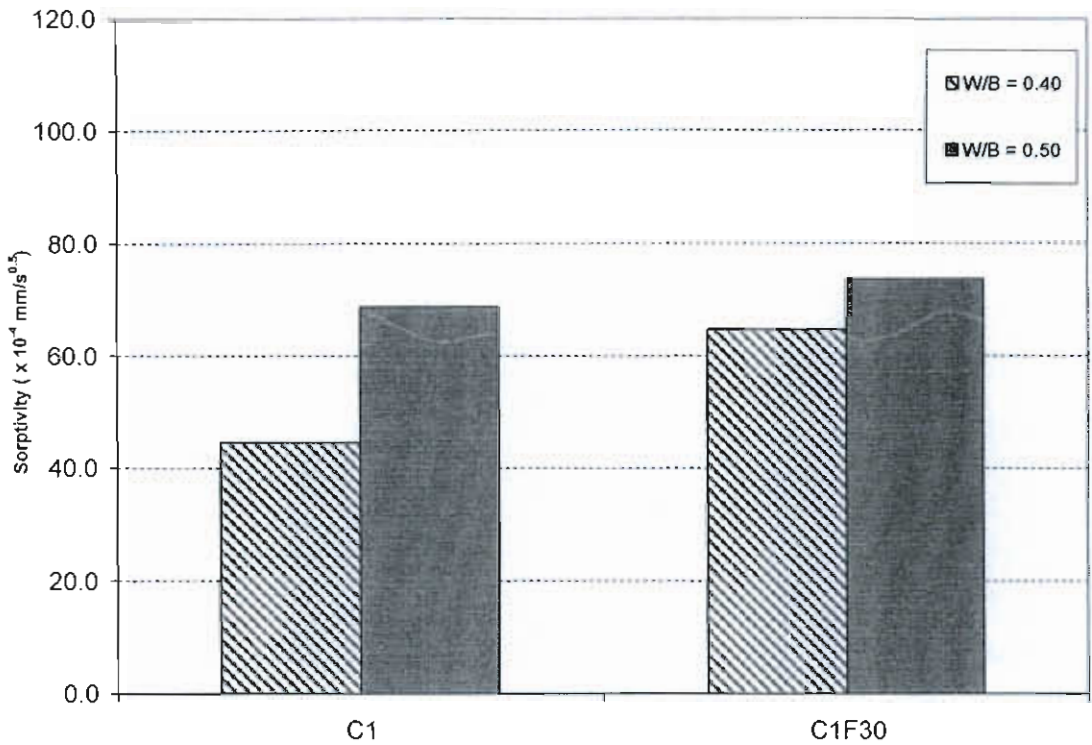
จากภาพที่ 4-13 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (RMT) ของมอร์ต้าร์ที่ใช้ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 พบว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก มีความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ มากกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.30 กล่าวคือมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน 0.30 ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน



ภาพที่ 4-13 ผลทดสอบ RMT ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน กับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

1.4 การดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

จากภาพที่ 4-14 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำ (Sorptivity) พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีค่าการดูดซึมน้ำน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.30



ภาพที่ 4-14 ผลทดสอบ Water absorption test ของมอร์ต้าร์อายุ 28 วัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน กับมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

1.5 อภิปรายผลกระทบของเถ้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ต้าร์จากผลการทดสอบต่าง ๆ

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 1.1-1.4 พบว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอย (C1F30) ที่อัตราส่วน 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่าอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลม เมื่อผสมในคอนกรีต เถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น (ปริญาและชัย, 2552) ทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อมอร์ต้าร์ได้ยากขึ้น นอกจากนี้ผลผลิตของปฏิกิริยาปอซโซลาน C-S-H และ CAH ยังช่วยดักจับคลอไรด์ทางกายภาพด้วย ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับหลาย ๆ งานวิจัย [(Metha, 1981), (Massazza, 1993)] ก่อนหน้านี้ที่ได้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการผสมเถ้าลอยที่ช่วยทำให้เกิด

ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ดี แต่แก้าลอยมีข้อเสีย คือ ปฏิกริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแก้าลอยจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วันและมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ (ปริญาและชัย, 2552) ทำให้ช่วงอายุเริ่มต้น อาจทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมในเนื้อมอร์ตาร์ได้ง่าย จากภาพที่ 4-11 ถึง 4-12 พบว่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้าลอยที่มอร์ตาร์อายุ 28 และ 91 วัน แสดงค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้นอย่างชัดเจนกว่ามอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน

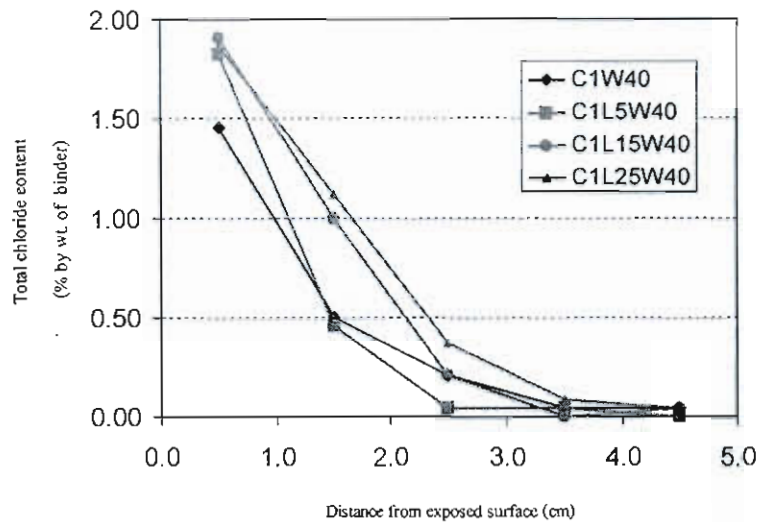
และเมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้รับจากการทดสอบทั้ง 4 วิธี พบว่าการทดสอบการแพร่ทั้งหมด และการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการศึกษาผลกระทบของแก้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ สำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งที่มอร์ตาร์อายุตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป พบว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาผลกระทบของแก้าลอยต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์เช่นกัน

2. ผลกระทบการใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานต่อความต้านทานคลอไรด์มอร์ตาร์

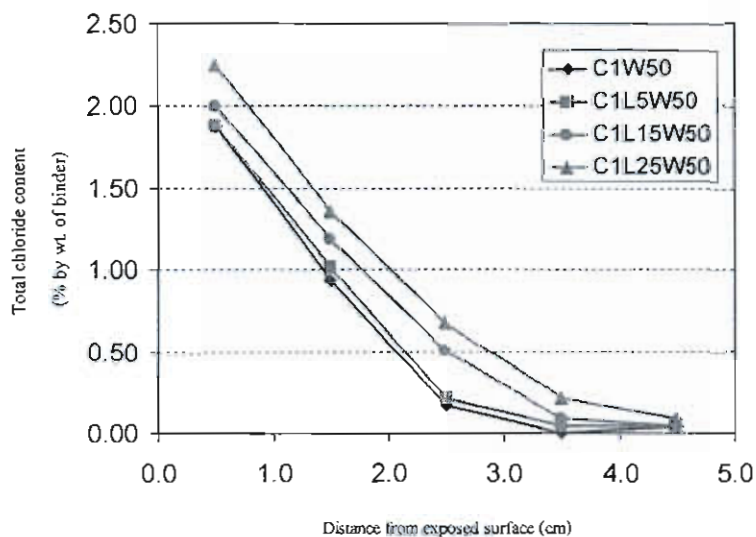
2.1 การแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test)

จากภาพที่ 4-15 ถึง 4-20 พบว่าที่ระยะความลึก 1.5-4.5 ซม. แนวโน้มของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน กล่าวคือ เมื่อผสมผงหินปูนเพิ่มมากขึ้น ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดก็เพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน ส่งผลให้มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูนมีค่าลดลง

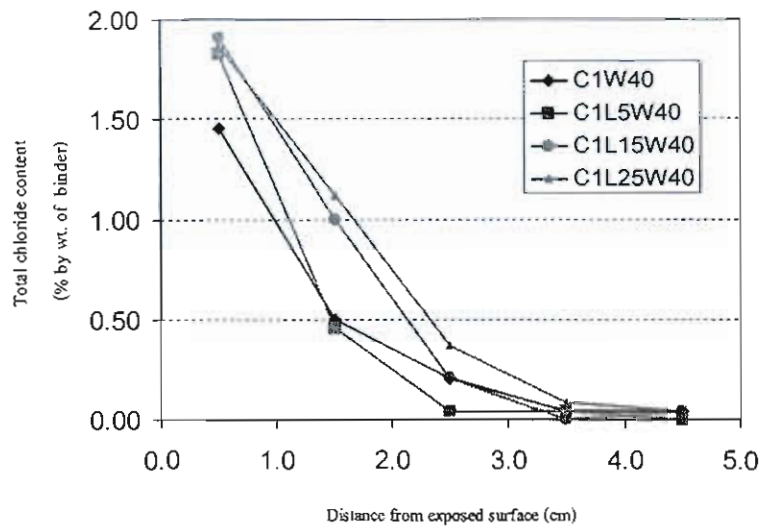
สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมแก้าลอยและผงหินปูน จากภาพที่ 4-21 ถึง 4-26 พบว่าที่ระยะความลึก 1.5-4.5 ซม. มอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูน เมื่อผสมแก้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่มอีกหนึ่งชนิดจะช่วยพัฒนาความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ให้ดีขึ้น คือทำให้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการผสมแก้าลอย กล่าวคือ ค่าความต้านทานคลอไรด์จะมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนการผสมแก้าลอยที่สูงขึ้น จากการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยแก้าลอยร่วมกับผงหินปูน 15% และ 15% โดยน้ำหนัก (C1F15L15) และมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยแก้าลอยร่วมกับผงหินปูน 25% และ 5% โดยน้ำหนัก (C1F25L5) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน



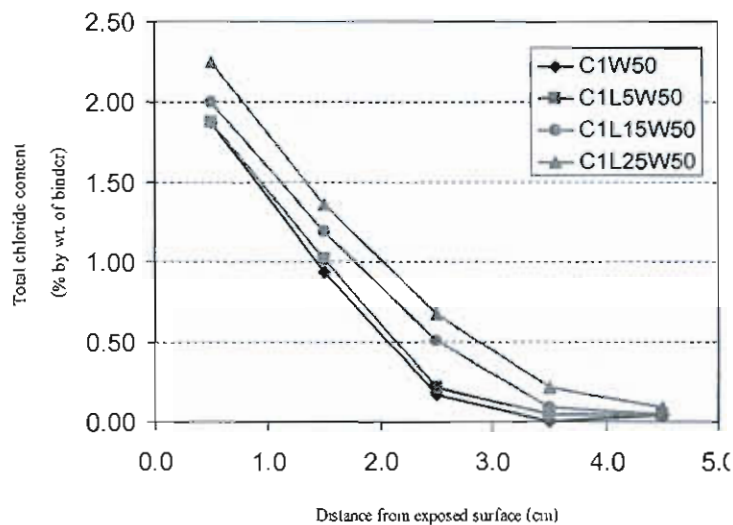
ภาพที่ 4-15 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าออกที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



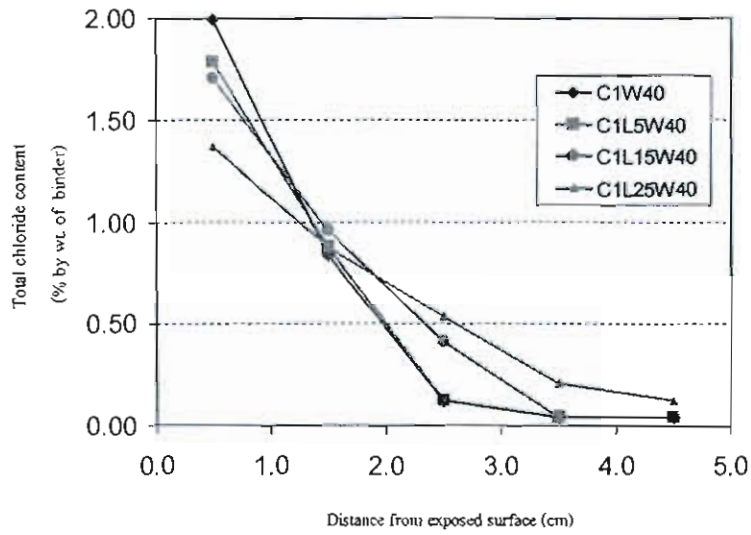
ภาพที่ 4-16 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าออกที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



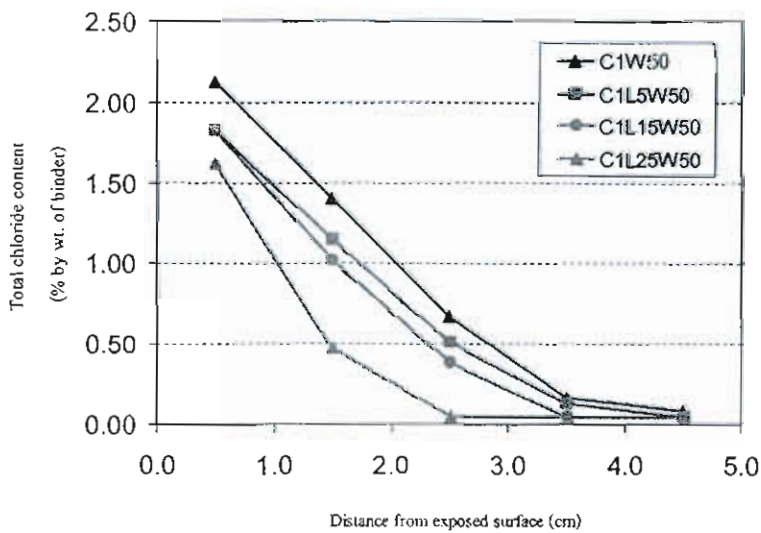
ภาพที่ 4-17 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



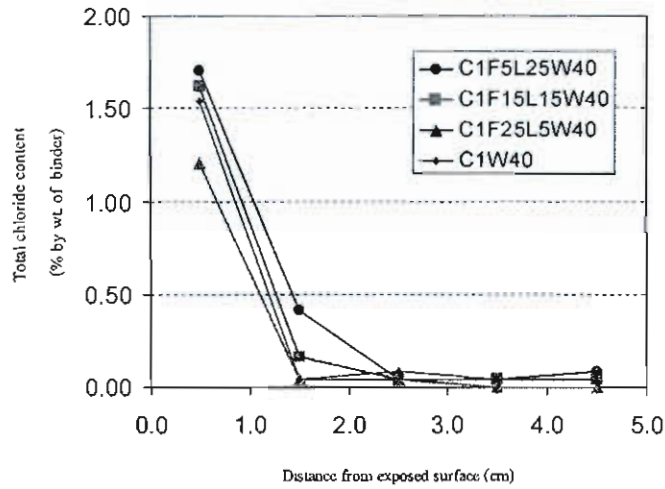
ภาพที่ 4-18 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



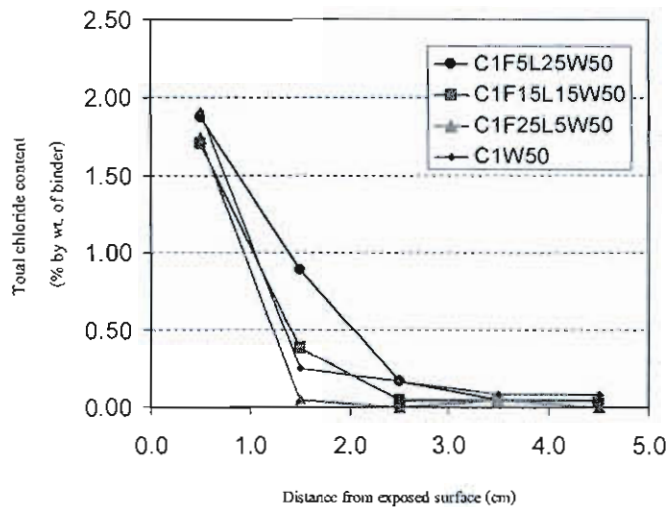
ภาพที่ 4-19 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



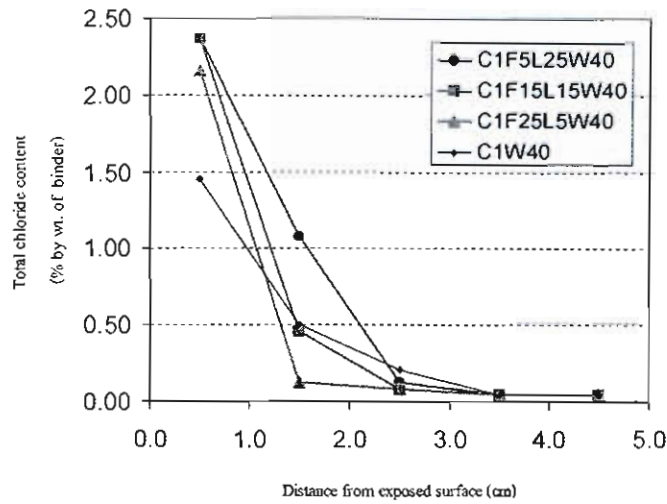
ภาพที่ 4-20 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวหน้าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



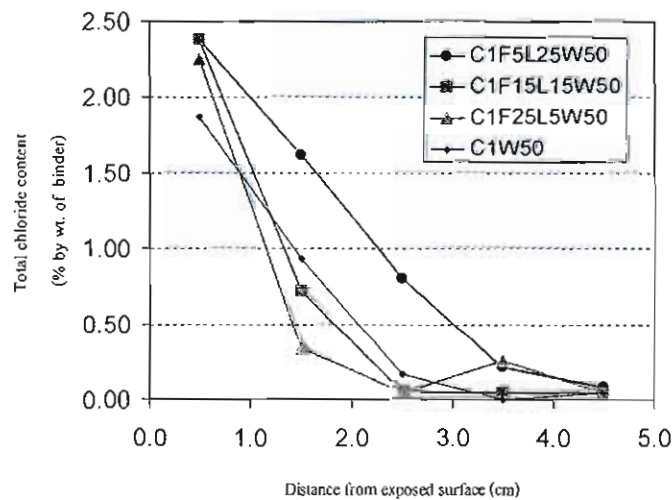
ภาพที่ 4-21 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



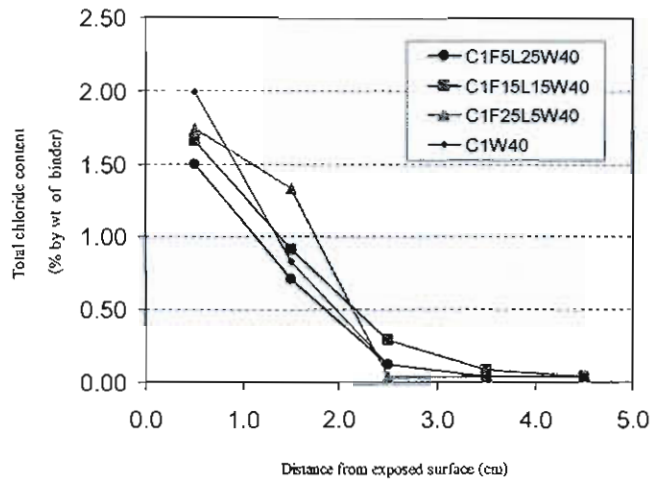
ภาพที่ 4-22 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



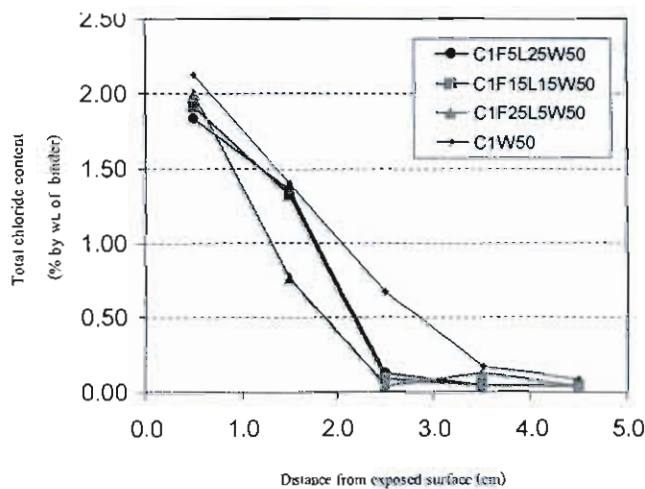
ภาพที่ 4-23 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



ภาพที่ 4-24 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวค้ำนอกที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



ภาพที่ 4-25 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน

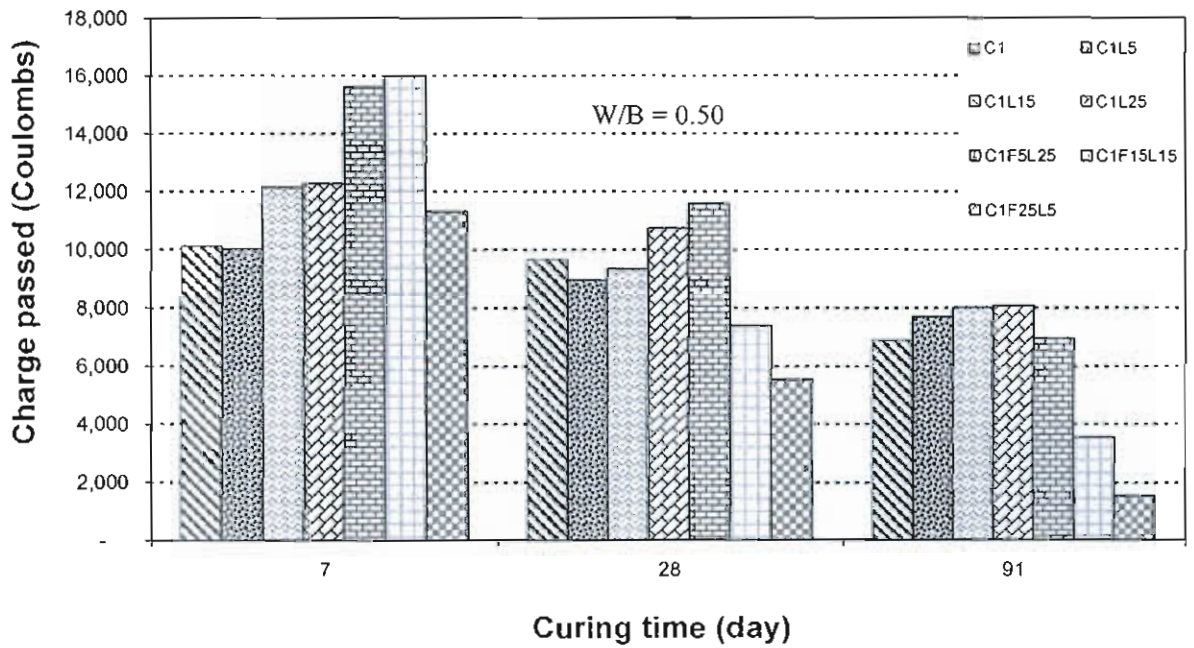
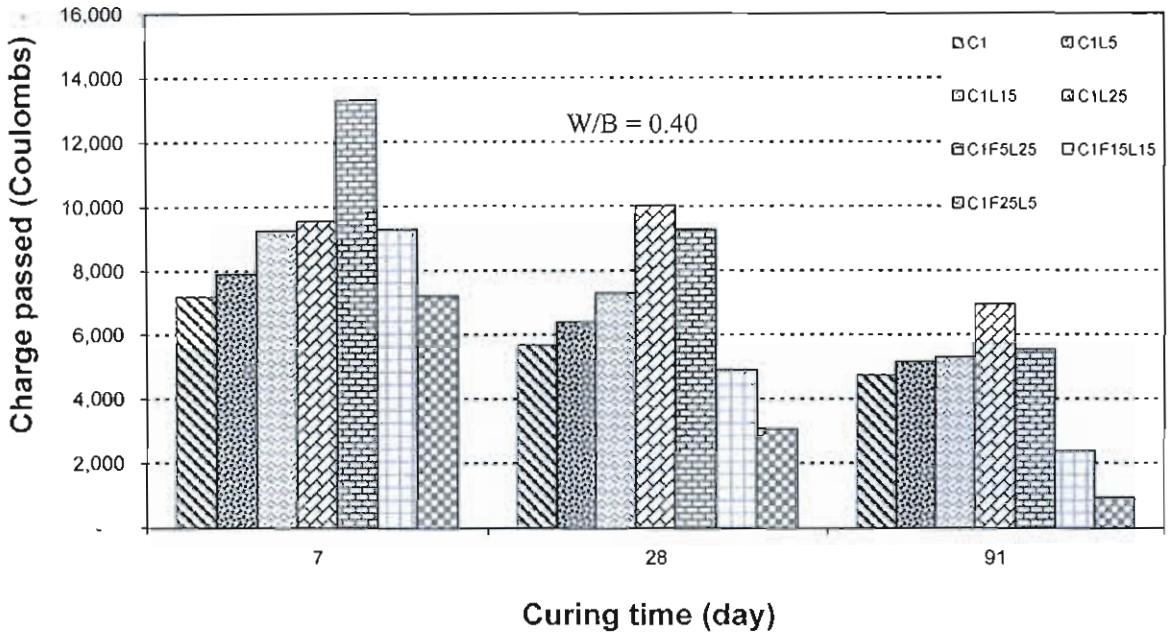


ภาพที่ 4-26 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน

2.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT)

จากภาพที่ 4-27 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณประจุที่ไหลผ่านระหว่าง มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก กับมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน 5% (CIL5) พบว่า เมื่อผสมผงหินปูนเพิ่มมีแนวโน้มทำให้ปริมาณค่าปริมาณประจุที่ไหลผ่านเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ มอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน 15% (CIL15) และมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน 25% (CIL25) พบว่า เมื่อผสมผงหินปูนด้วยปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ปริมาณประจุที่ไหลผ่านเพิ่มมากขึ้นอีกตามอัตราส่วนการผสมผงหินปูนที่สูงขึ้น กล่าวคือ ค่าความต้านทานคลอไรด์มีค่าลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนในปริมาณที่สูงขึ้น

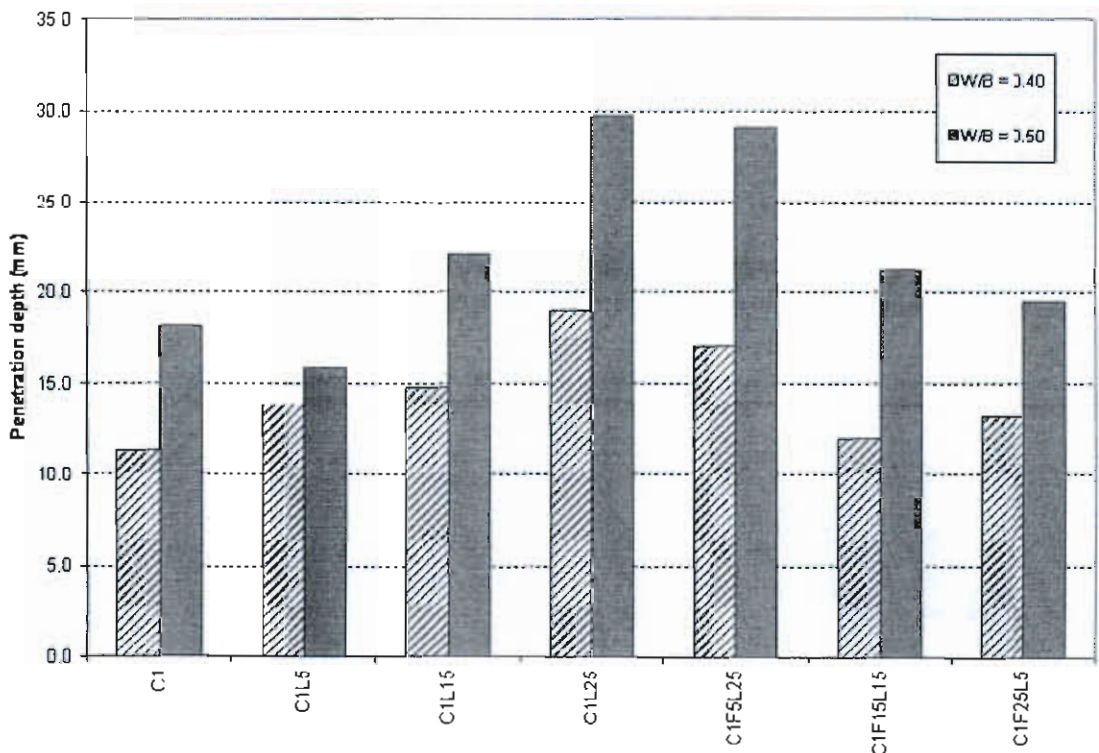
มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน จากภาพที่ 4-27 พบว่า มอร์ตาร์ที่มีมอร์ตาร์ของผงหินปูนเมื่อผสมเถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มอีกหนึ่งชนิดจะช่วยพัฒนาความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ให้ดีขึ้น คือทำให้ค่าปริมาณประจุไหลผ่านมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการผสมเถ้าลอย กล่าวคือ ค่าความต้านทานคลอไรด์จะมีค่าดีขึ้นตามอัตราส่วนการผสมเถ้าลอยที่สูงขึ้น จากการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่อายุ 28 และ 91 วัน มอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน 15% และ 15% (CIF15L15) และ มอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน 25% และ 5% (CIF25L5) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน



ภาพที่ 4-27 ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุ
 ประสานหลัก และมอร์ต้าร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วน
 ผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05, 0.15 และ 0.25 และมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูน
 แทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อผงหินปูน 0.05 : 0.25,
 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

2.3 การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (RMT)

จากภาพที่ 4-28 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบความลึกคลอไรด์แทรกซึมที่มอร์ตาร์ดาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก กับมอร์ตาร์ดาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน 5% (C1L5) พบว่า เมื่อผสมผงหินปูนเพิ่มมีแนวโน้มทำให้ค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ดาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน 15% (C1L15), มอร์ตาร์ดาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน 25% (C1L25) พบว่าเมื่อผสมผงหินปูนด้วยปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนการผสมผงหินปูนที่สูงขึ้น กล่าวคือ ค่าความต้านทานคลอไรด์มีค่าลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนในปริมาณที่สูงขึ้น



ภาพที่ 4-28 ผลทดสอบ RMT ของมอร์ตาร์ดาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ดาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมผงหินปูน ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน 0.05, 0.15 และ 0.25 ตามลำดับ และมอร์ตาร์ดาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมผงหินปูนและเถ้าลอยที่อัตราส่วน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

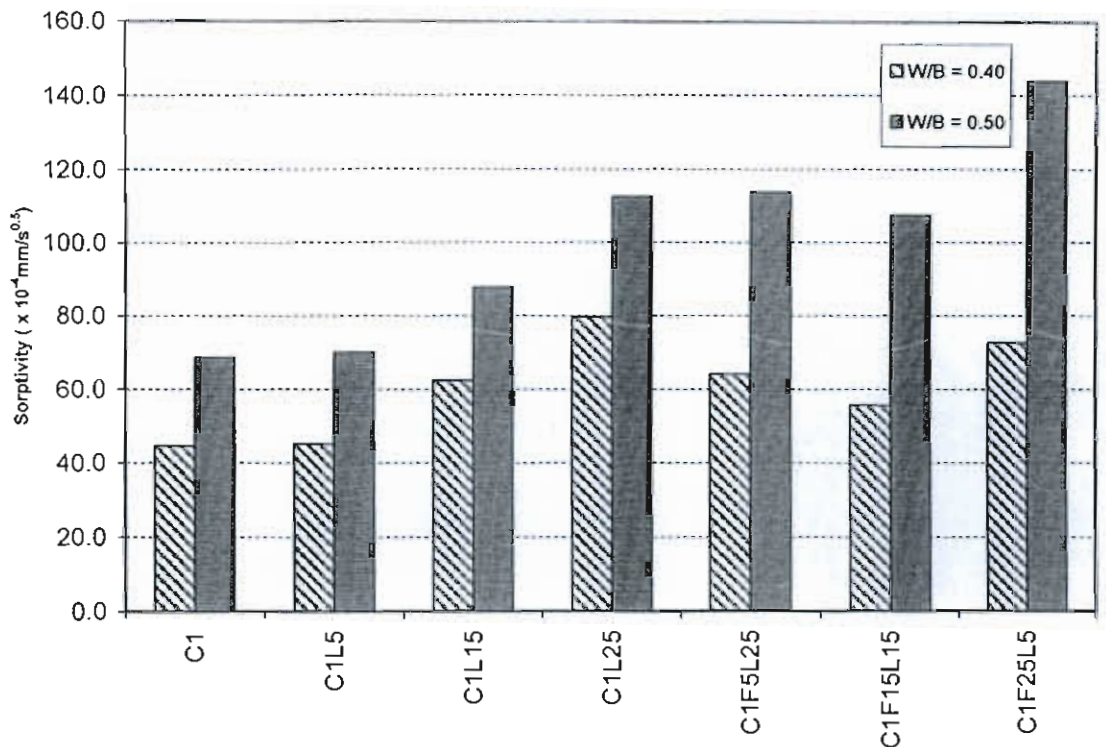
มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย และผงหินปูน จากภาพที่ 4-28 พบว่า มอร์ตาร์ที่มีมอร์ตาร์ของผงหินปูนเมื่อผสมเถ้าลอยเป็น สารผสมเพิ่มอีกหนึ่งชนิดจะช่วยพัฒนาความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ให้ดีขึ้น คือทำให้ค่า ความสึกคลอไรด์แทรกซึมมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการผสมเถ้าลอย กล่าวคือ ค่าความต้านทาน คลอไรด์จะมีค่าดีขึ้นตามอัตราส่วนการผสมเถ้าลอยที่สูงขึ้น จากการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร่วมกับร่วมกับผงหินปูน 15% และ 15% (C1F15L15) และมอร์ตาร์ที่ แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร่วมกับร่วมกับผงหินปูน 25% และ 5% (C1F25L5) ที่อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ ล้วน

2.4 การดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

จากภาพที่ 4-29 พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุ ประสานหลัก ผสมผงหินปูน ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน 0.05, 0.15 และ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีปริมาณที่เพิ่ม มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสาน สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุ ประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อัตราส่วน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีค่าการดูด ซึมน้ำมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสาน เช่นกัน

2.5 อภิปรายผลกระทบของผงหินปูนต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์จาก ผลการทดสอบต่าง ๆ

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 2.1-2.4 พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมผงหินปูน ที่อัตราส่วน 0.05, 0.15 และ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีแนวโน้มค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ลดลงตามสัดส่วนการผสม ผงหินปูนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจาก ผงหินปูนมิใช่สารผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติของการเป็น วัสดุประสาน แต่ใช้เพื่อเป็นวัสดุอุดรูพรุน(Filler Material) เพื่อให้เนื้อมอร์ตาร์แน่นขึ้น แต่ไม่ สามารถจับยึด (ทางเคมี) คลอไรด์ที่แทรกซึมเข้ามา และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่วัสดุประสาน ด้วยผงหินปูนมากขึ้น มีผลทำให้เนื้อมอร์ตาร์ไม่แน่น (Filler effect) เนื่องจากปริมาณผงหินปูนมี มากเกินไป ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านเนื้อมอร์ตาร์ได้ง่าย ซึ่งผลการทดสอบมีแนวโน้ม เดียวกับงานวิจัยของ Tsivili et al. (2003)



ภาพที่ 4-29 ผลทดสอบ Water absorption test ของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ต้าร์ที่ใช้ผงหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานที่อัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน 0.05, 0.15 และ 0.25 ตามลำดับ และมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมผงหินปูนและเถ้าลอยที่อัตราส่วน 0.05 : 0.25, 0.15 : 0.15 และ 0.25 : 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

สำหรับมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) สำหรับมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน พบว่า มอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน 15% และ 15% (C1F15L15) และมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน 25% และ 5% (C1F25L5) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ซีเมนต์ล้วน

และเมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้รับจากการทดสอบทั้ง 4 วิธี พบว่าการทดสอบการแพร่ทั้งหมด การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง และการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบแรง เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการศึกษาผลกระทบของผงหินปูนต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ต้าร์

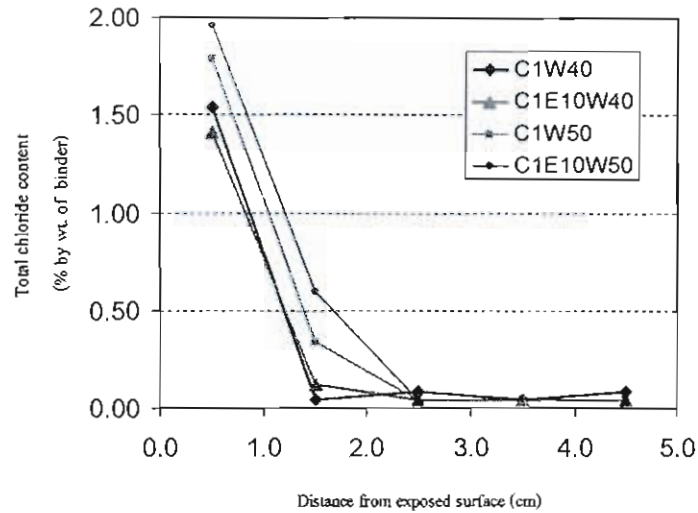
3. ผลกระทบการใช้สารขยายตัวแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานต่อความต้านทานคลอไรด์มอร์ตาร์

3.1 การแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test)

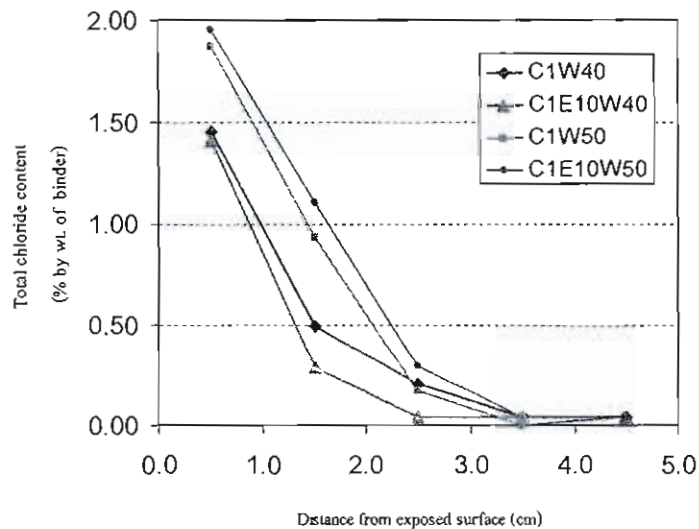
จากภาพที่ 4-30 ถึง 4-32 พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัว ที่อัตราส่วน 0.10 (C1E10) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะความลึก 1.5-4.5 ซม. มีแนวโน้มค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน แต่ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัวที่อัตราส่วน 0.10 มีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

จากภาพที่ 4-33 ถึง 4-35 พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัวที่อัตราส่วน 0.10 (C5E10) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะความลึก 1.5-4.5 ซม. มีแนวโน้มค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน

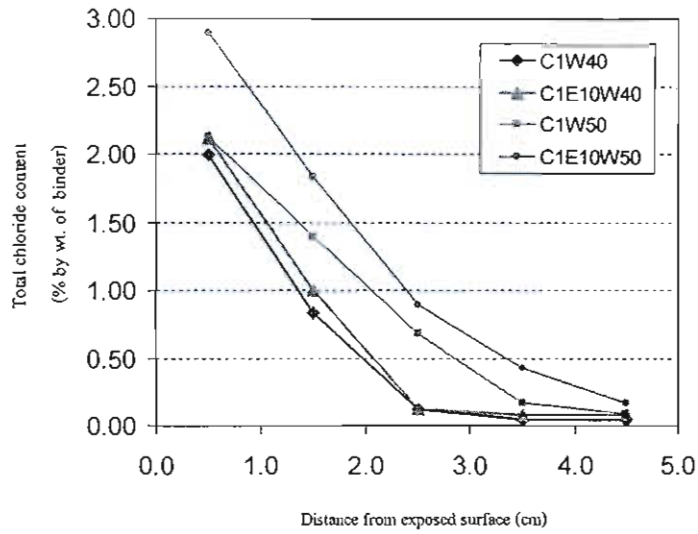
จากภาพที่ 4-36 ถึง 4-38 มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.10 และ 0.30 (C1E10F30) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 พบว่ามีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน กล่าวคือ มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัวและเถ้าลอยที่อัตราส่วน 0.10 และ 0.30 (C1E10F30) ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน



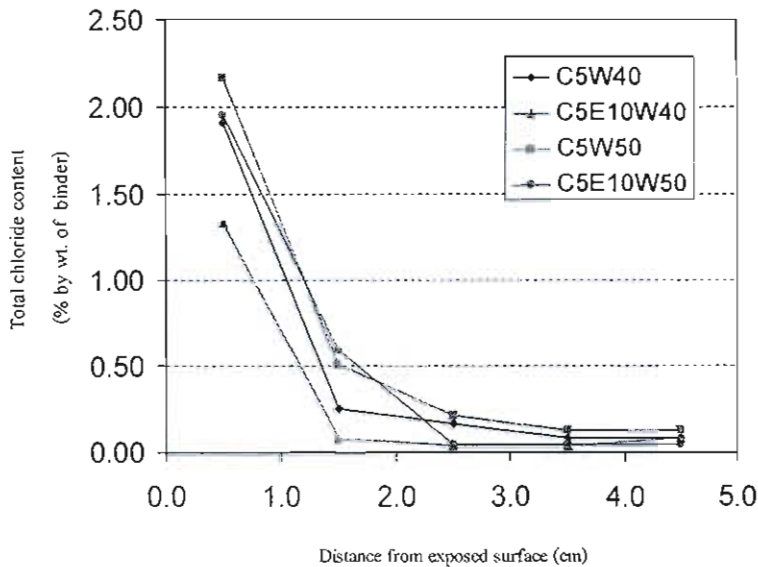
ภาพที่ 4-30 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กันที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



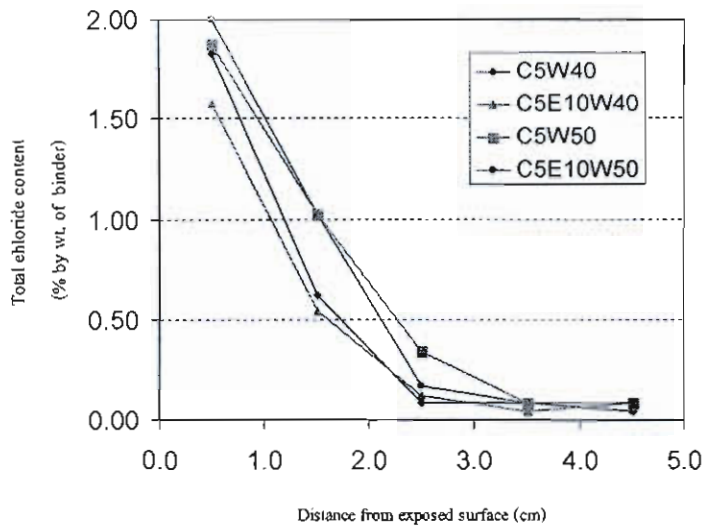
ภาพที่ 4-31 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กันที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



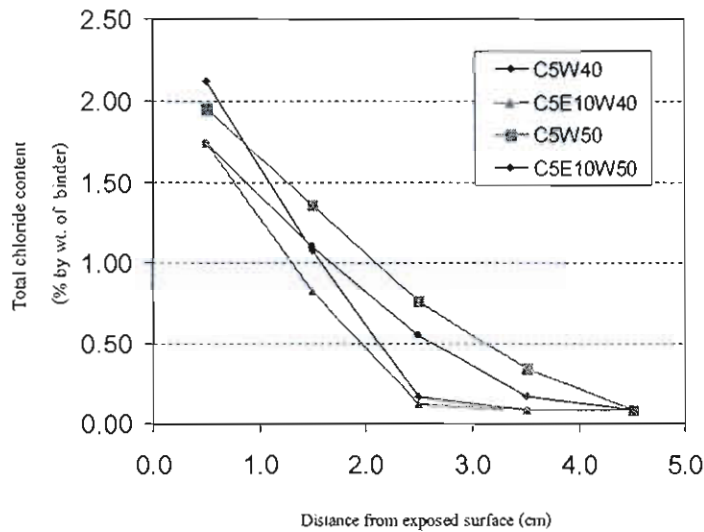
ภาพที่ 4-32 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กันที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



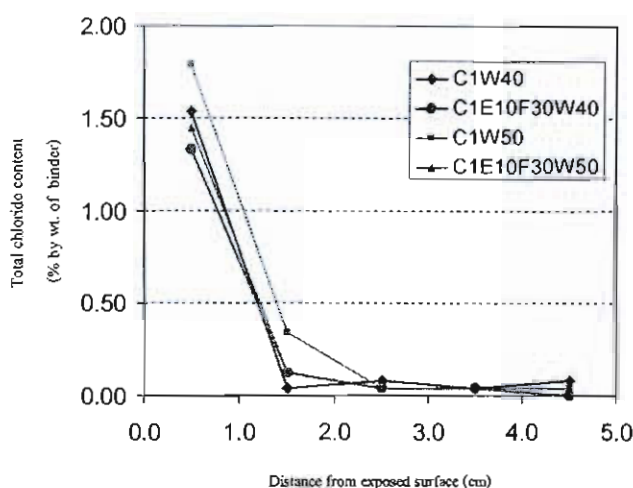
ภาพที่ 4-33 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กันที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



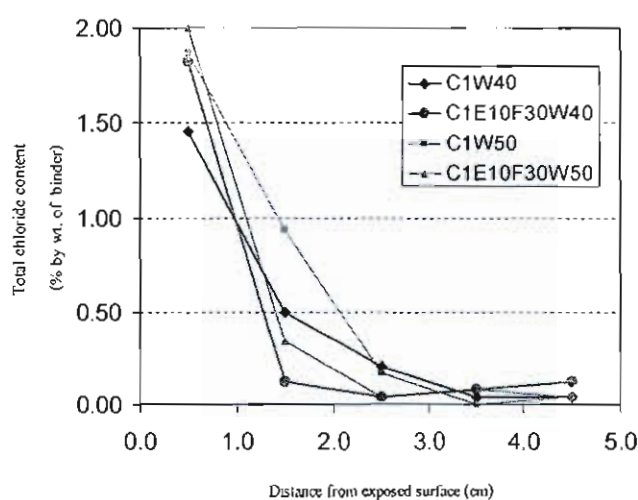
ภาพที่ 4-34 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กันที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



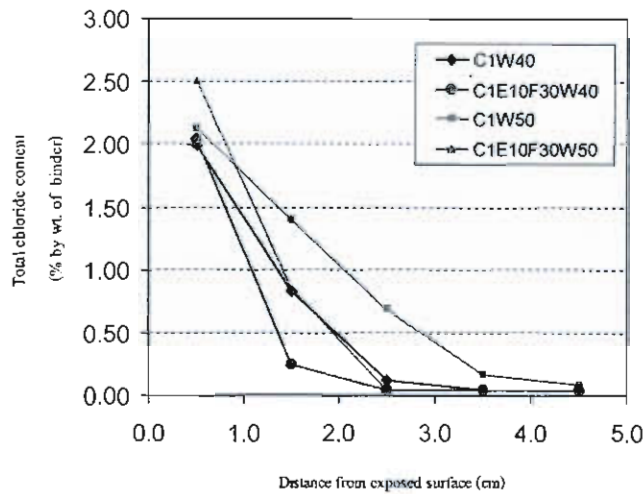
ภาพที่ 4-35 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กันที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



ภาพที่ 4-36 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กัน ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



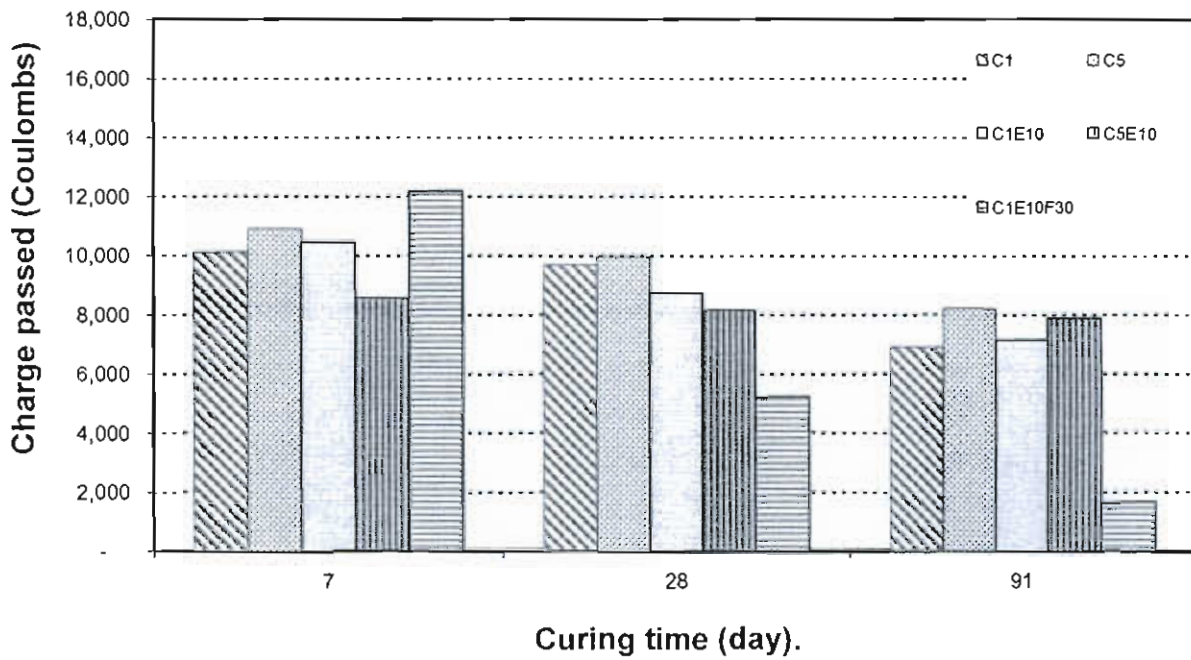
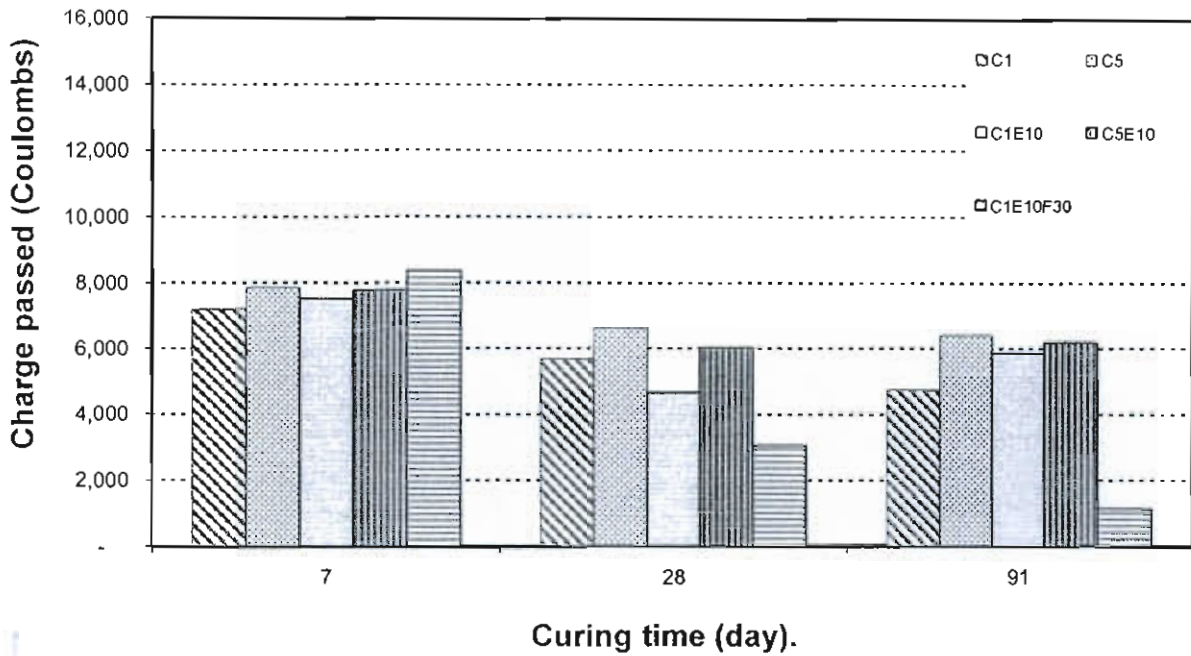
ภาพที่ 4-37 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กัน ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



ภาพที่ 4-38 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและเกลือลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเกลือลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ กัน ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน

3.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT)

จากภาพที่ 4-39 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบปริมาณประจุที่ไหลผ่านระหว่างมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก กับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัว ที่อัตราส่วน 0.10 (C1E10) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีแนวโน้มปริมาณประจุที่ไหลผ่านมอร์ตาร์ใกล้เคียงกัน สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัวที่อัตราส่วน 0.10 (C5E10) พบว่าปริมาณประจุที่ไหลผ่านมอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อแทนที่สารขยายตัวด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กล่าวคือ การแทนที่ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 ด้วยสารขยายตัวร้อยละ 10 ทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทานคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกันกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 5 ด้วยสารขยายตัวร้อยละ 10 ทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน



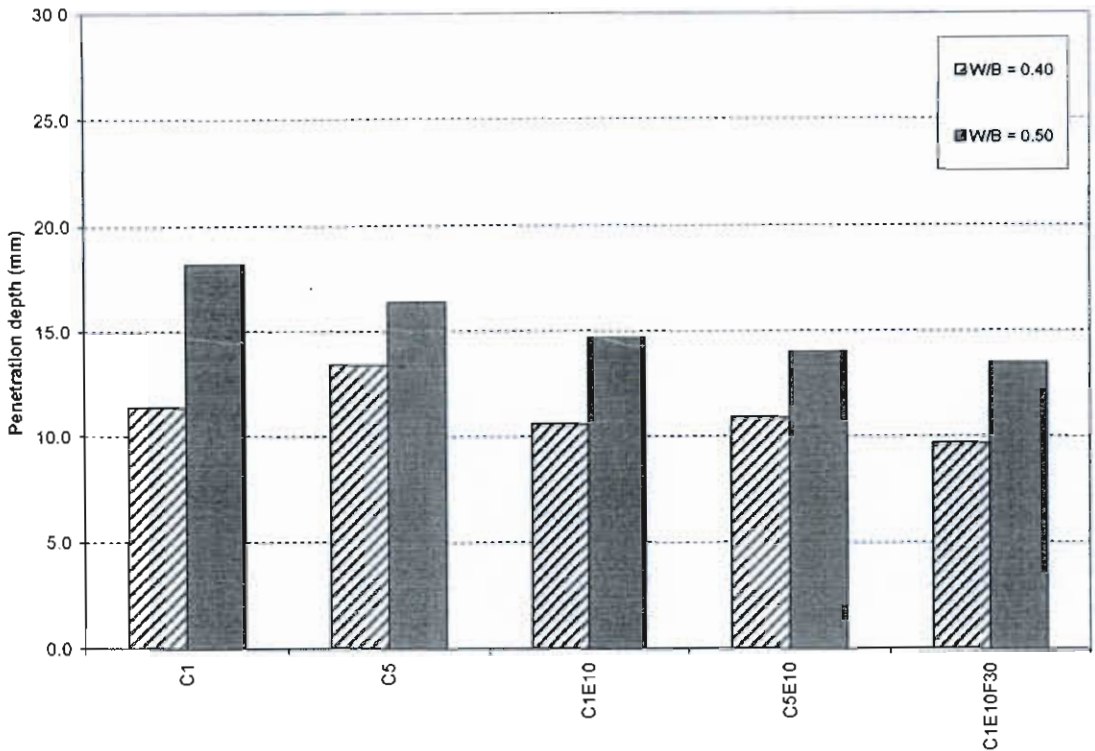
ภาพที่ 4-39 ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 และมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.10 : 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

จากภาพที่ 4-39 มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.10 และ 0.30 (C1E10F30) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 พบว่ามอร์ตาร์ที่อายุ 28 และ 91 วันมีปริมาณประจุที่ไหลผ่านต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานอย่างชัดเจน กล่าวคือ มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัวและเถ้าลอยที่อัตราส่วน 0.10 และ 0.30 (C1E10F30) ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน

3.3 การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (RMT)

จากภาพที่ 4-40 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบความลึกคลอไรด์แทรกซึมระหว่างมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก กับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัว ที่อัตราส่วน 0.10 (C1E10) และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก กับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัว ที่อัตราส่วน 0.10 (C5E10) พบว่าค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมมีค่าลดลงเมื่อแทนที่สารขยายตัวด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กล่าวคือ การแทนที่ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 และ 5 ด้วยสารขยายตัวร้อยละ 10 ทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้น

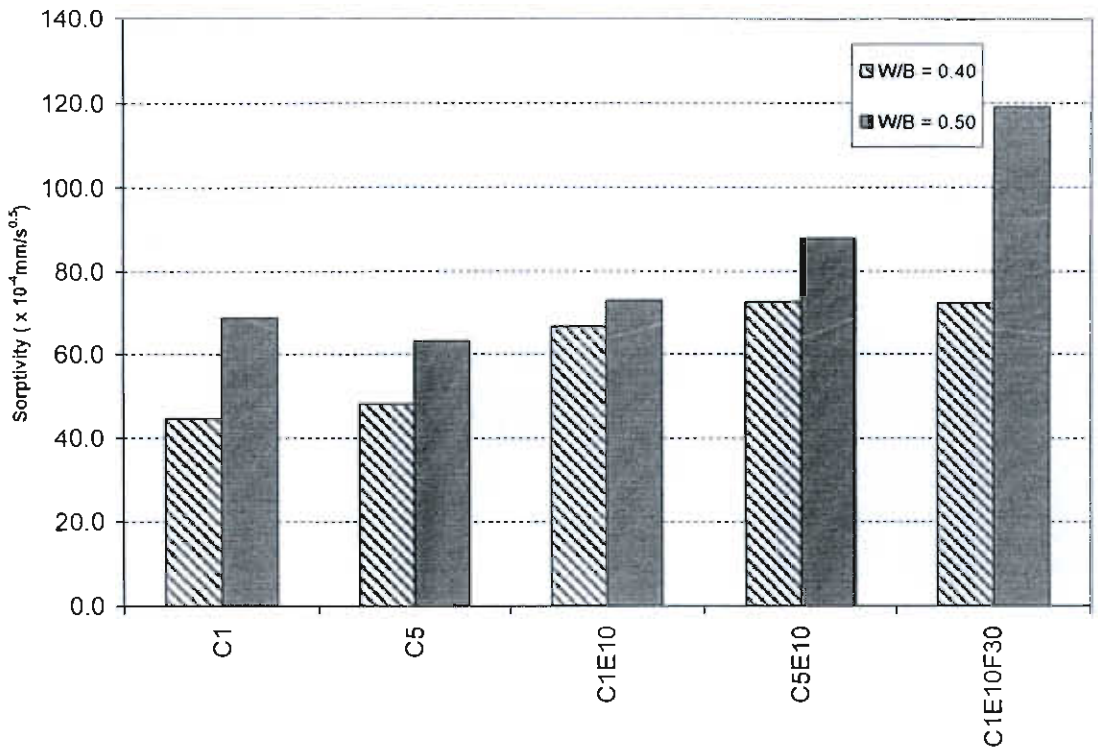
จากภาพที่ 4-40 มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอยที่อัตราส่วน 0.10 และ 0.30 (C1E10F30) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 พบว่าค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมลดลง กล่าวคือ มอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงสารขยายตัว ที่อัตราส่วน 0.10 และ 0.30 (C1E10F30) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน



ภาพที่ 4-40 ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.10 : 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

3.4 การดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

จากภาพที่ 4-41 พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัว ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.10 และ 0.30 (C1E10F30) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีค่าการดูดซึมน้ำมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสานเช่นกัน



ภาพที่ 4-41 ผลทดสอบ Water absorption test ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.10 : 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

3.5 อภิปรายผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์จากผลการทดสอบต่าง ๆ

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 3.1-3.4 พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัว ที่อัตราส่วน 0.10 (C1E10 และ C5E10) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีแนวโน้มค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้น เช่นเดียวกับมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder) มอร์ตาร์ที่ผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วน 0.10 และ 0.30 (C1E10F30) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสานเช่นกัน

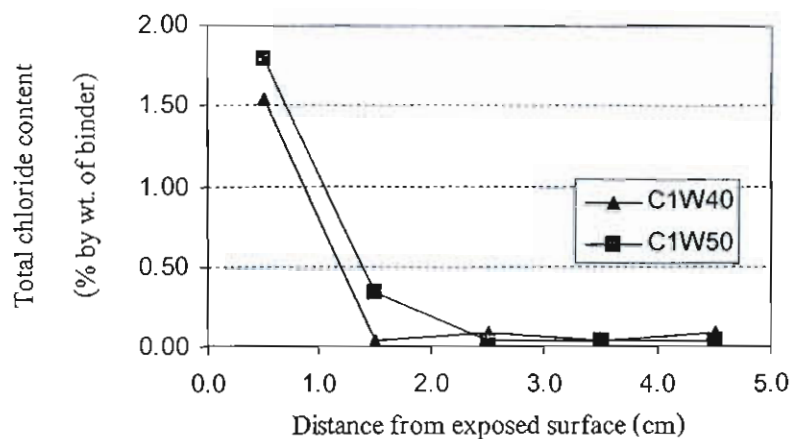
ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ปริมาณสารขยายตัวที่เหมาะสมทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมากขึ้น การแทรกซึมของคลอไรด์ทำได้ยากมากขึ้น เนื่องจากกลไกของการขยายตัวนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานด้วยการเพิ่มการก่อตัวของ Etringite หรือการสร้างผลึกของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในซีเมนต์เพสต์ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยานี้จะก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้งานวิจัยของ Lam et al. (2008) พบว่าเมื่อเติมสารขยายตัวควบคุมให้ไม่เกิน 30 kg/m^3 (ประมาณ 10% ของวัสดุประสาน) พบว่าคอนกรีตมีแนวโน้มที่จะลดค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ และเมื่อผสมแล้วลดยแทนที่วัสดุประสานร่วมกับสารขยายตัวช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ให้ดีขึ้น โดยค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการผสมแล้วลย

และเมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้รับจากการทดสอบทั้ง 4 วิธี พบว่าการทดสอบการแพร่ทั้งหมด และการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการศึกษาผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์

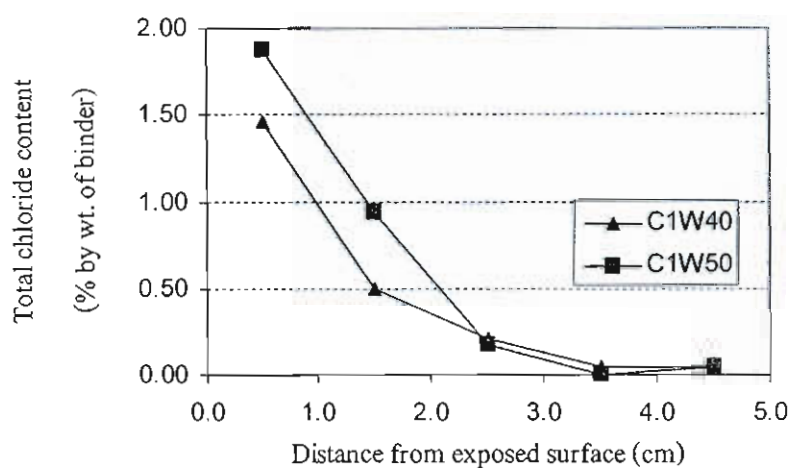
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความต้านทานคลอไรด์มอร์ตาร์

1. การแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test)

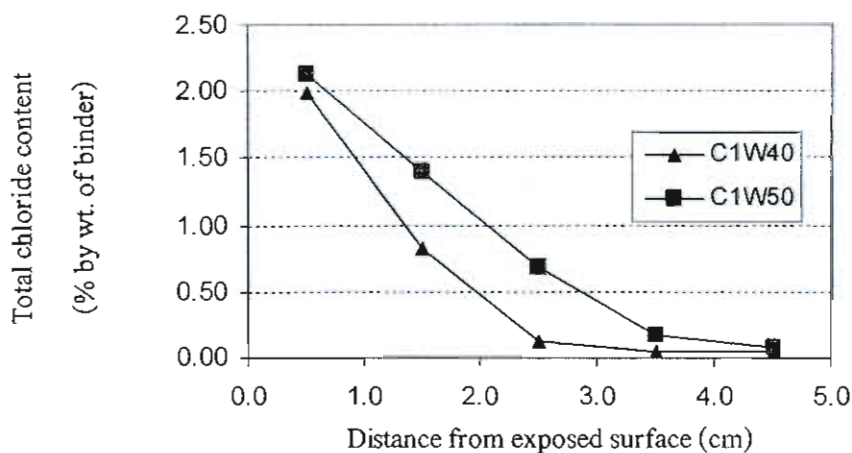
จากภาพที่ 4-42 ถึง 4-77 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของมอร์ตาร์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 พบว่า ที่ระยะความลึก 1.5-4.5 ซม. มอร์ตาร์ที่ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จะให้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ในทุกระยะทางจากผิวด้านนอก ซึ่งหมายความว่า มอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่า (0.40) มีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากกว่า (0.50) ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจาก มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีความพรุนมากกว่ามอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ทำให้การแพร่ของคลอไรด์ทำได้ง่ายกว่า



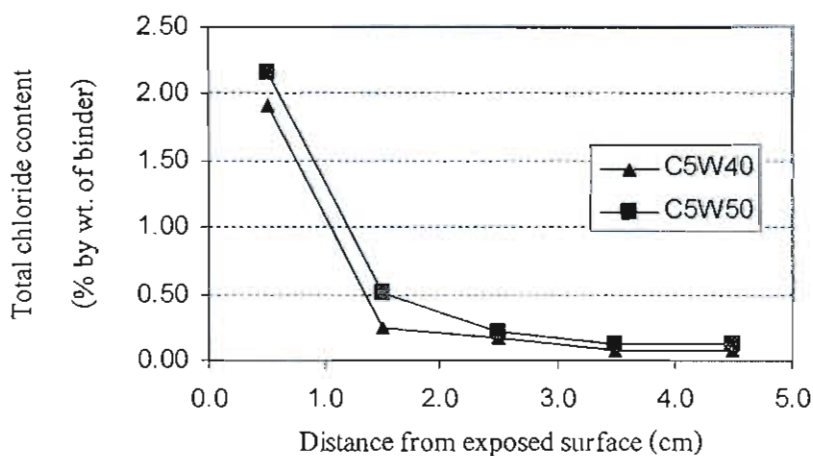
ภาพที่ 4-42 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน



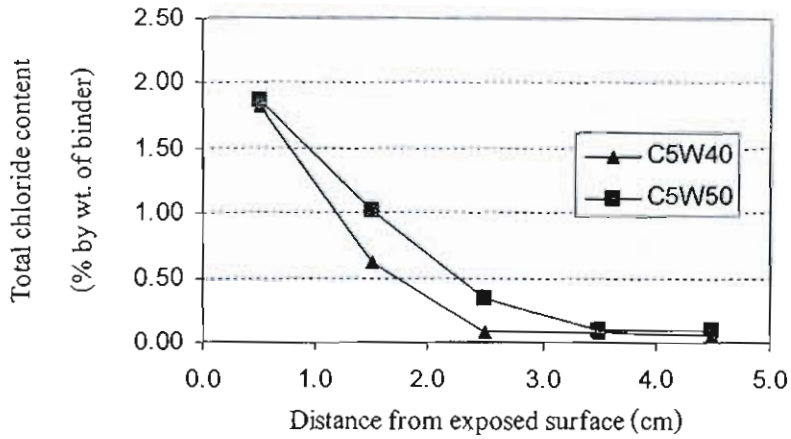
ภาพที่ 4-43 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน



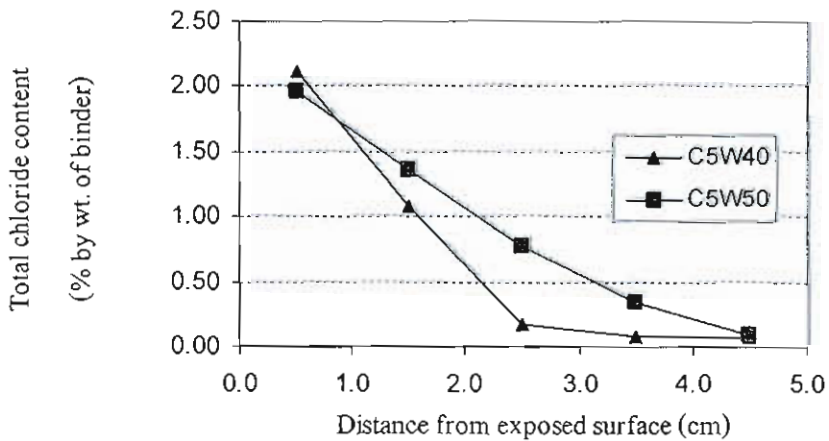
ภาพที่ 4-44 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวหน้า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วัน



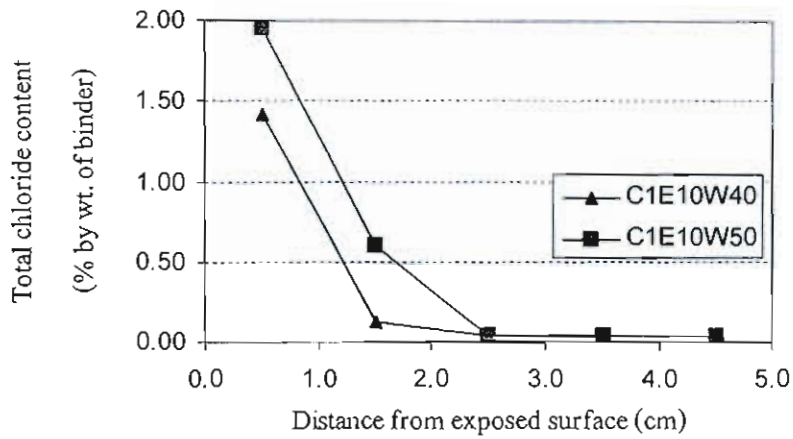
ภาพที่ 4-45 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวหน้า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



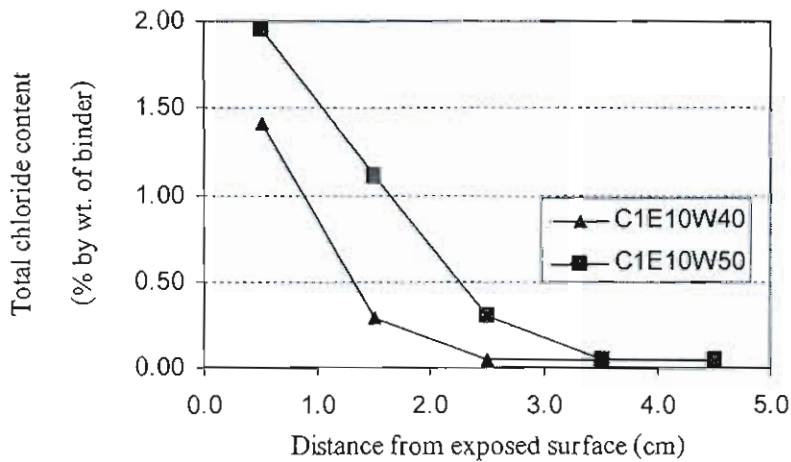
ภาพที่ 4-46 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักเทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



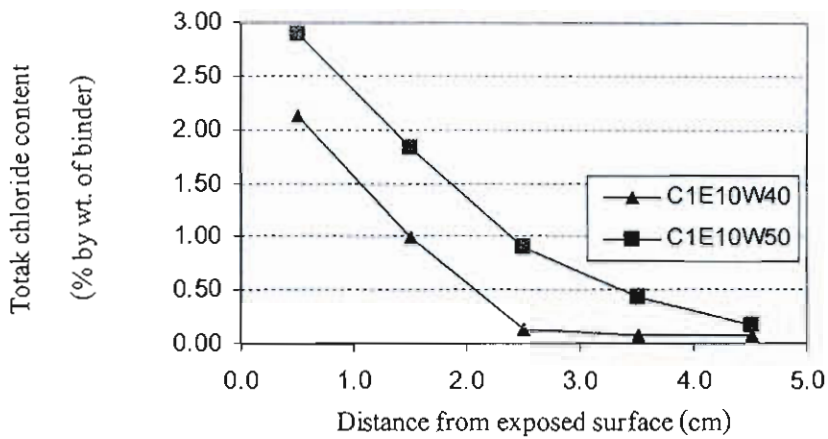
ภาพที่ 4-47 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักเทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



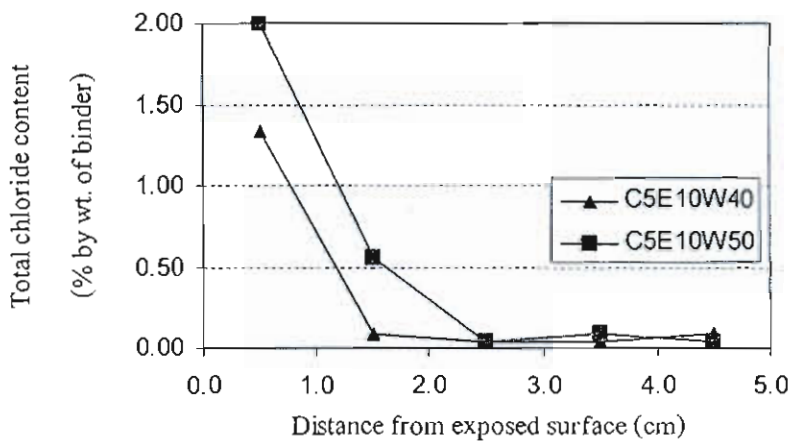
ภาพที่ 4-48 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้วยนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



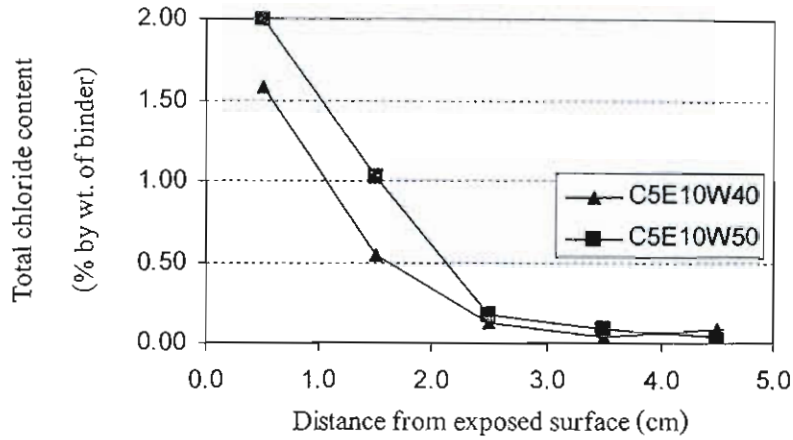
ภาพที่ 4-49 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้วยนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



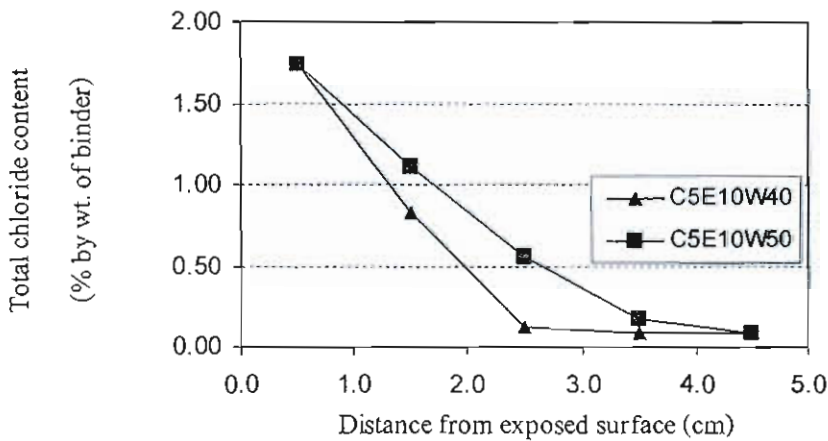
ภาพที่ 4-50 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้วยนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



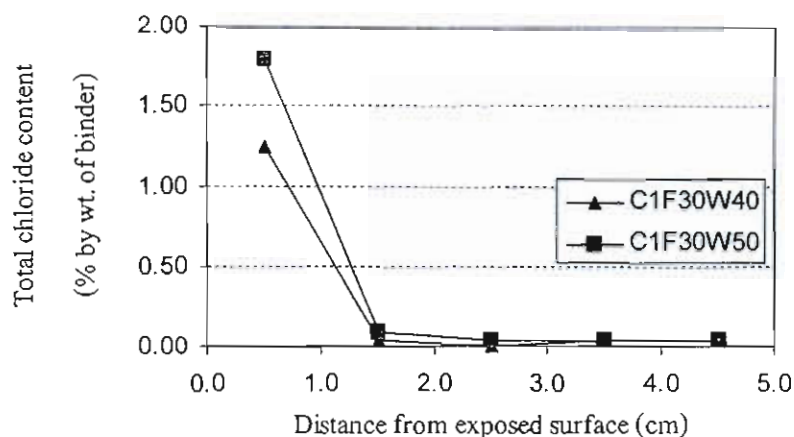
ภาพที่ 4-51 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้วยนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



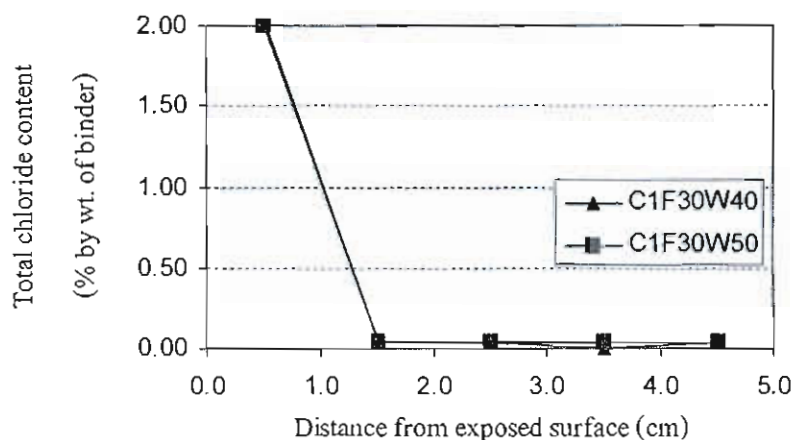
ภาพที่ 4-52 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้วยนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



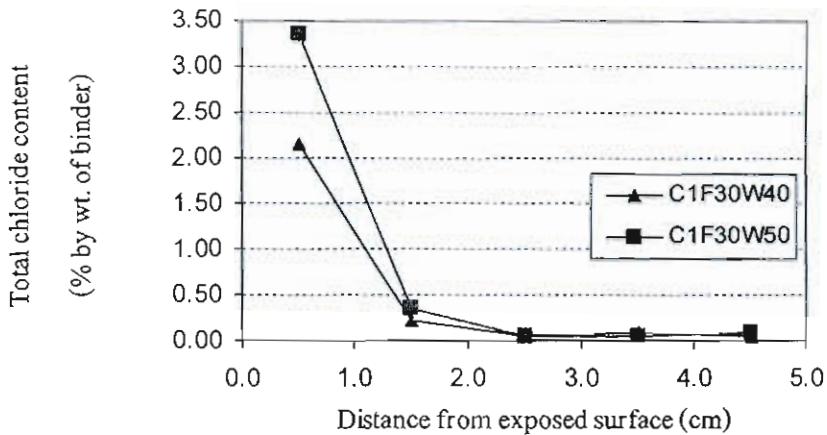
ภาพที่ 4-53 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้วยนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



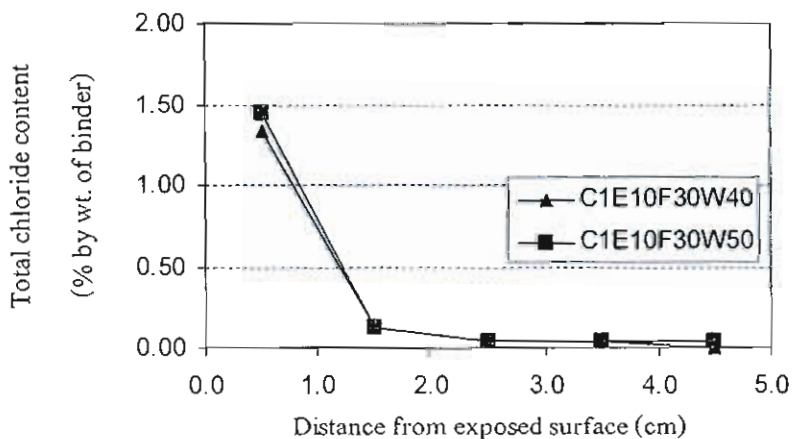
ภาพที่ 4-54 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



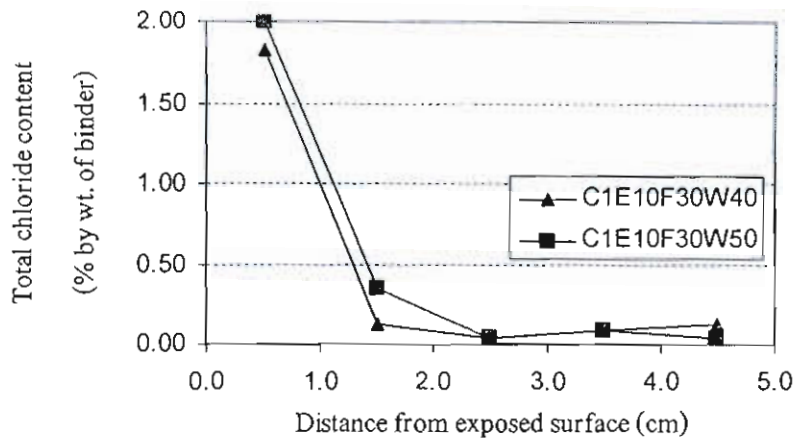
ภาพที่ 4-55 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



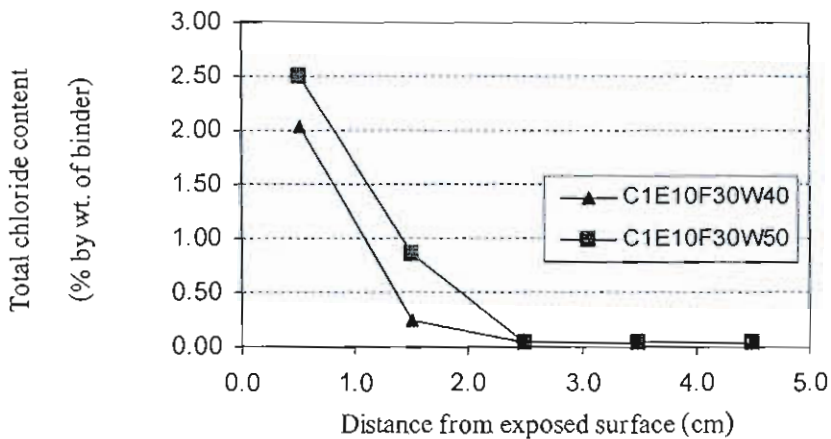
ภาพที่ 4-56 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



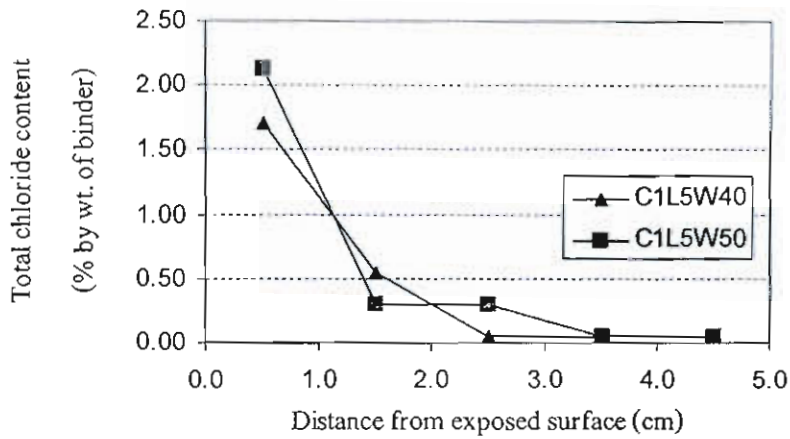
ภาพที่ 4-57 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



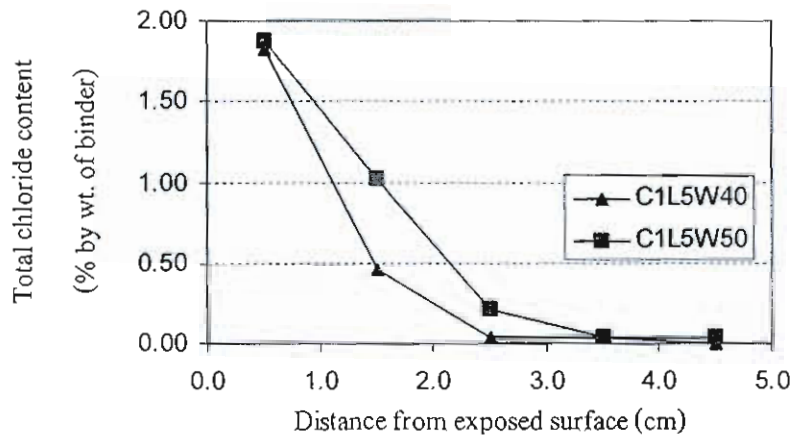
ภาพที่ 4-58 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



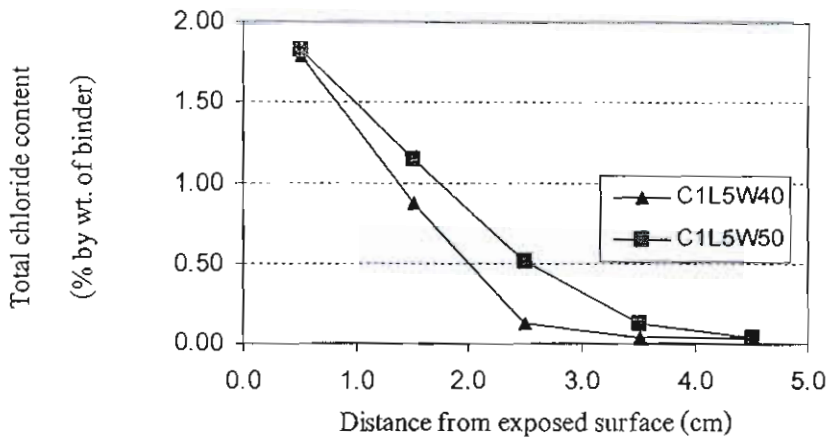
ภาพที่ 4-59 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



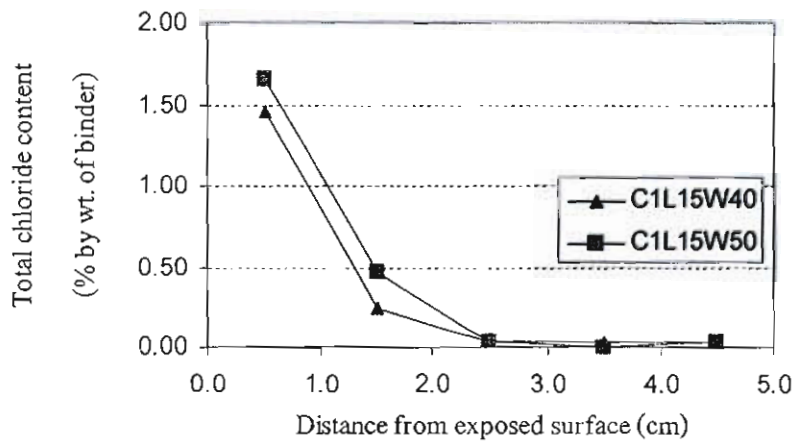
ภาพที่ 4-60 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



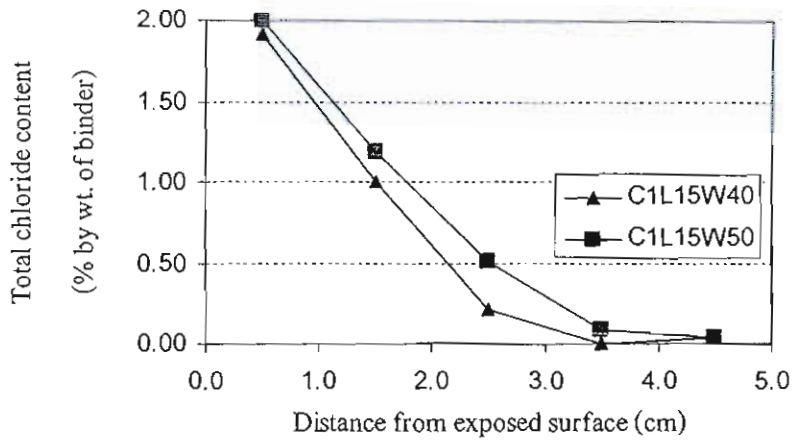
ภาพที่ 4-61 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



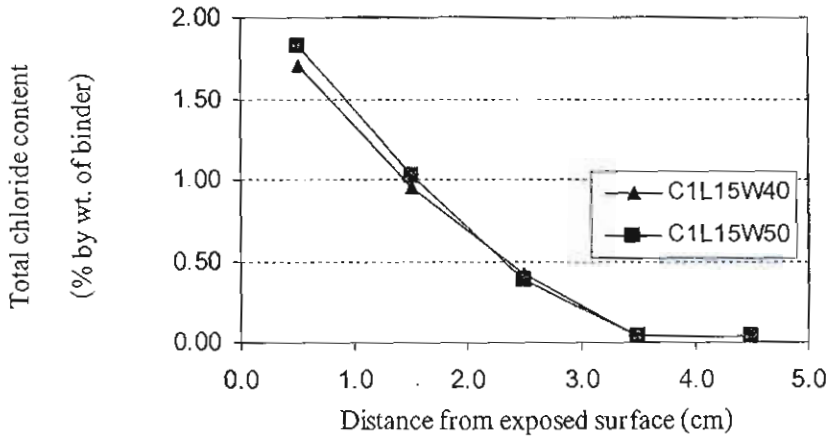
ภาพที่ 4-62 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.05 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



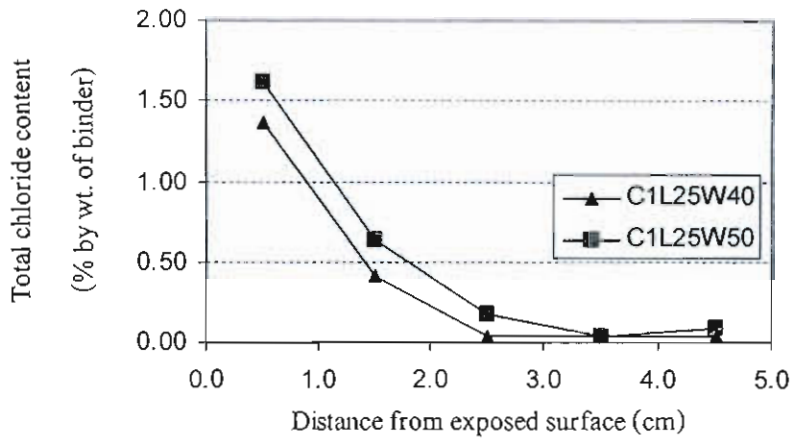
ภาพที่ 4-63 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.15 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



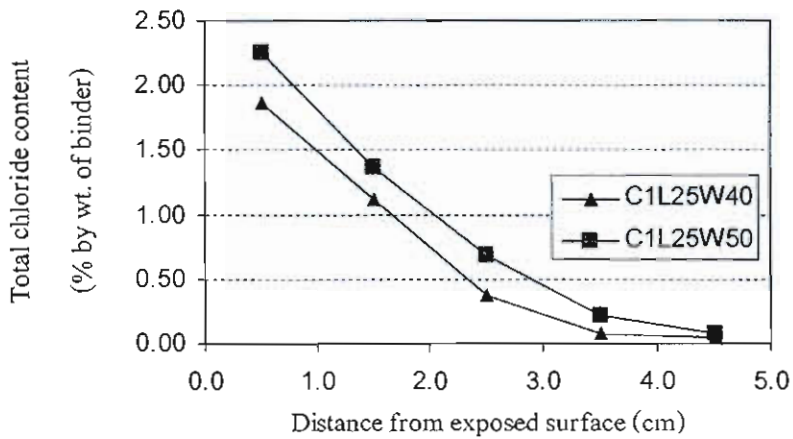
ภาพที่ 4-64 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.15 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



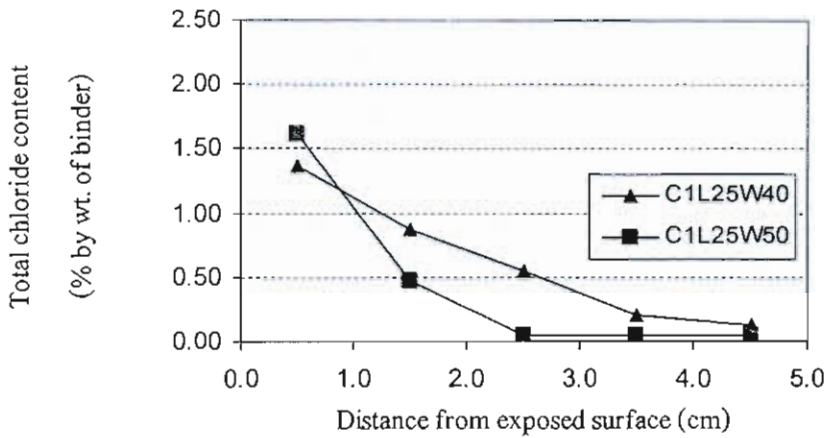
ภาพที่ 4-65 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.15 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



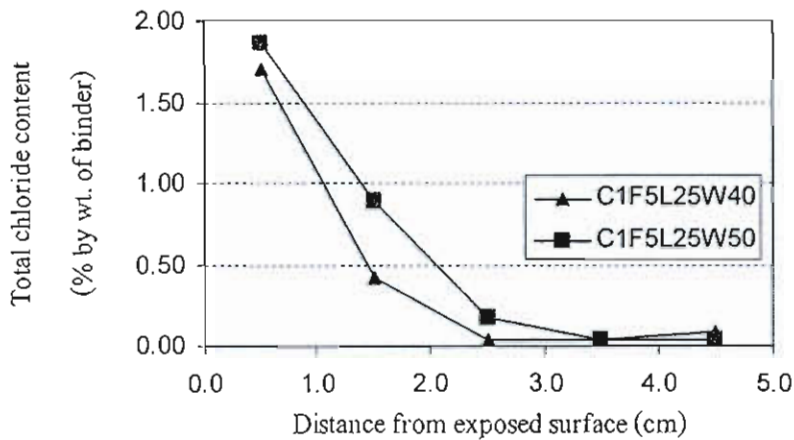
ภาพที่ 4-66 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



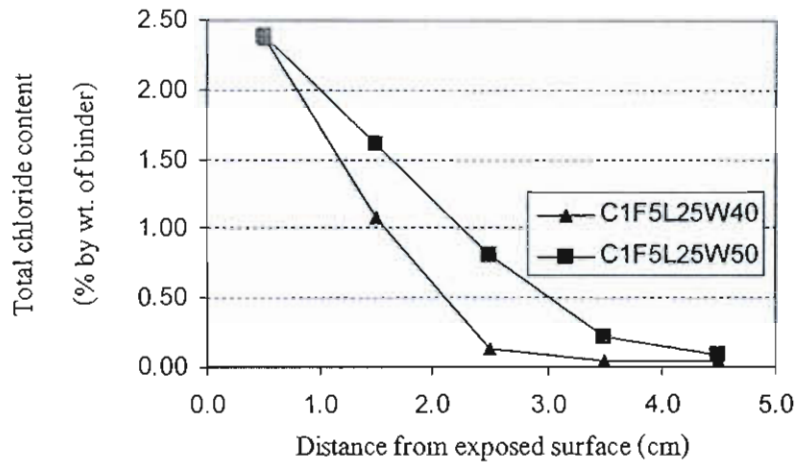
ภาพที่ 4-67 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



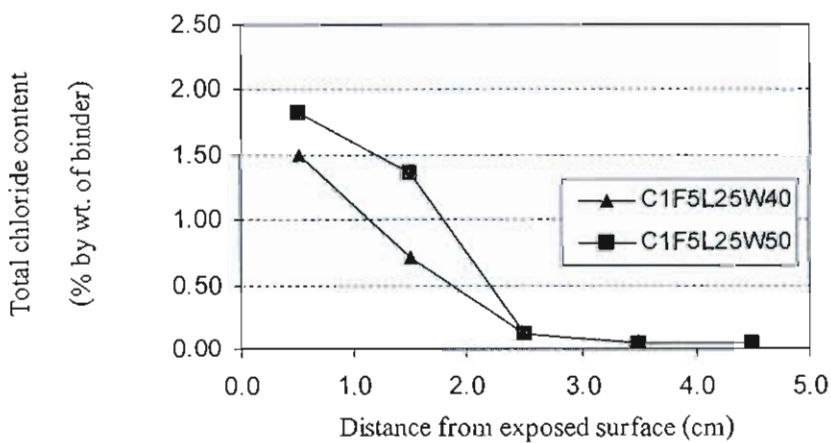
ภาพที่ 4-68 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.25 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



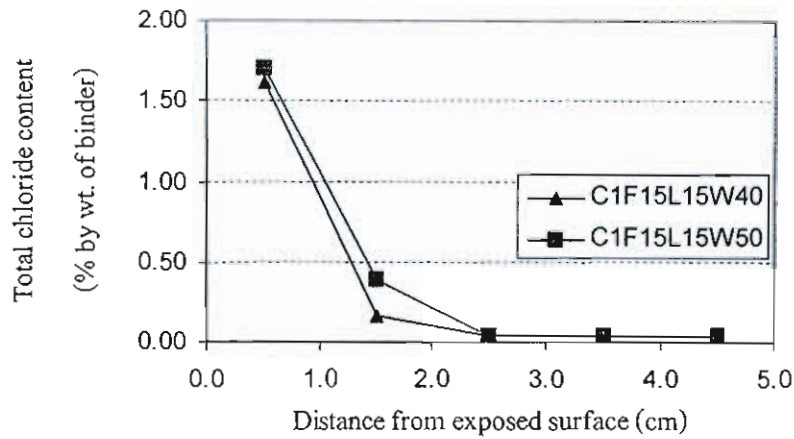
ภาพที่ 4-69 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



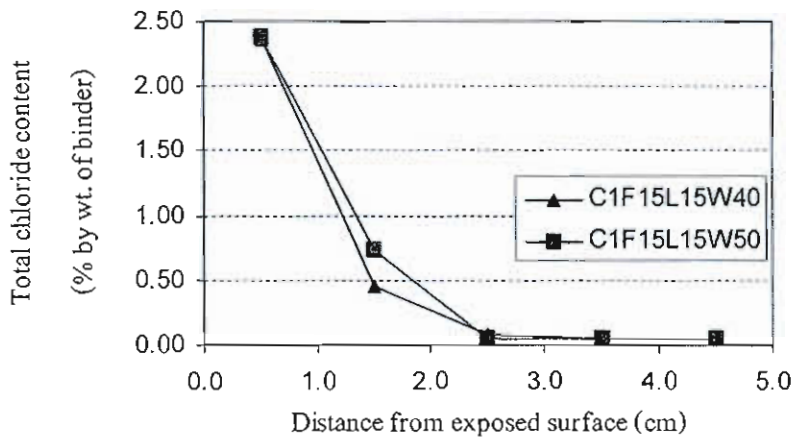
ภาพที่ 4-70 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



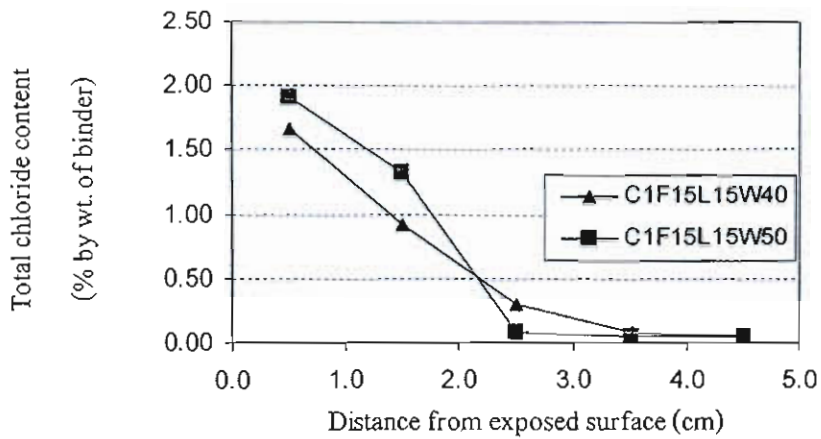
ภาพที่ 4-71 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



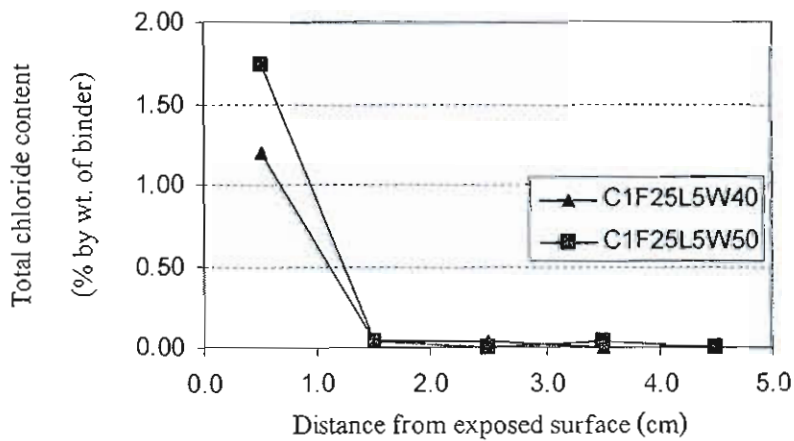
ภาพที่ 4-72 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



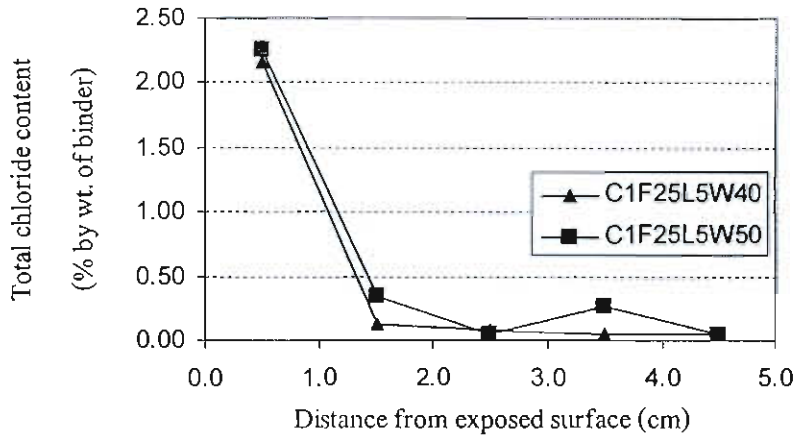
ภาพที่ 4-73 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



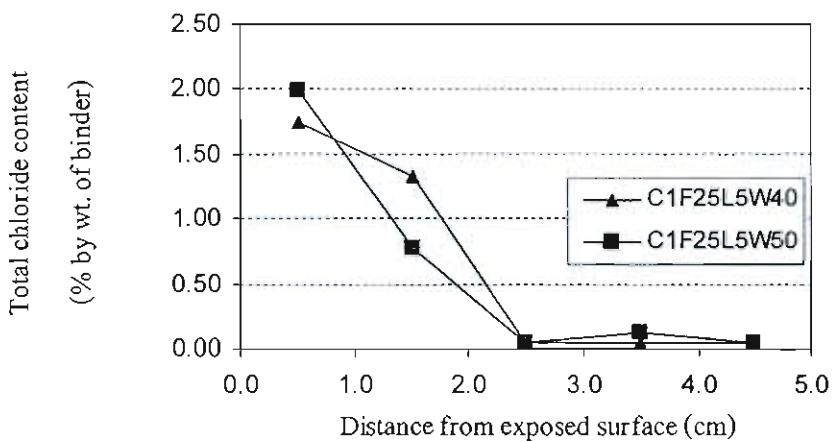
ภาพที่ 4-74 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน



ภาพที่ 4-75 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอกที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35 วัน



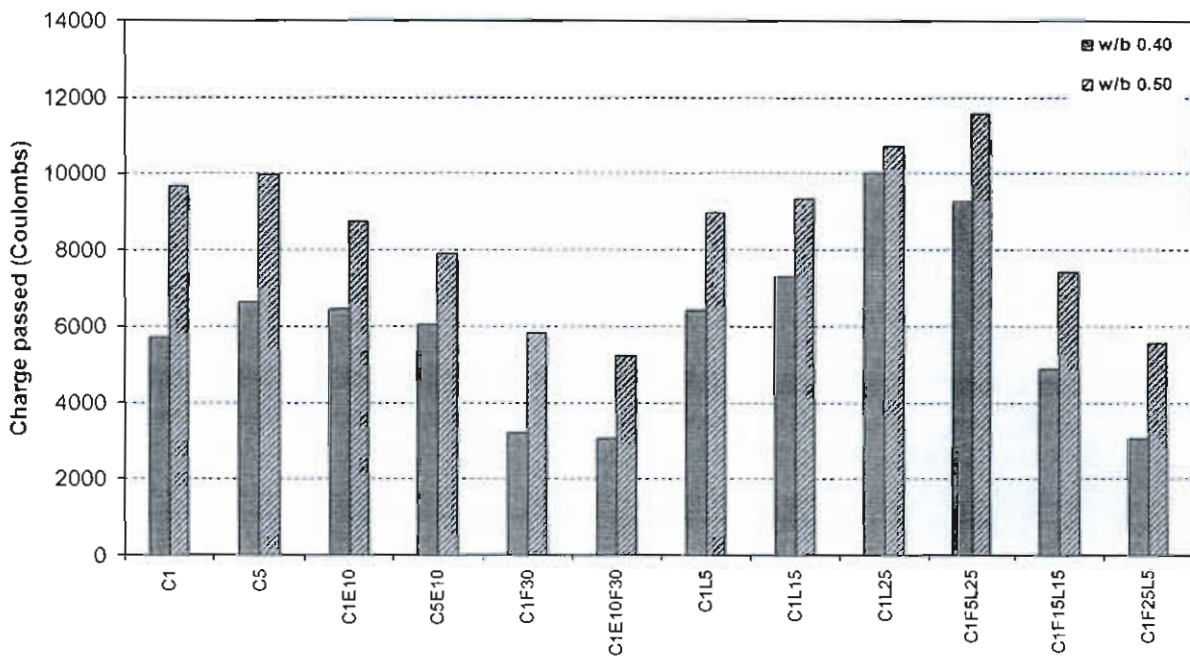
ภาพที่ 4-76 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน



ภาพที่ 4-77 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 182 วัน

2. การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT)

พิจารณาจากภาพที่ 4-78 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ให้ปริมาณค่าปริมาณประจุที่ไหลผ่านมากกว่ามอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 กล่าวคือให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ลดลงเมื่อใช้ปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากใช้น้ำปริมาณสูงทำให้มีปริมาณน้ำส่วนเกินมากและทำให้เนื้อตัวอย่างมีความพรุนมากกว่า ดังนั้น ปริมาณประจุจึงสามารถวิ่งผ่านสารละลายในโพรงช่องว่างได้ง่ายกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เนื่องจากมีปริมาณโพรงช่องว่างที่มากกว่า

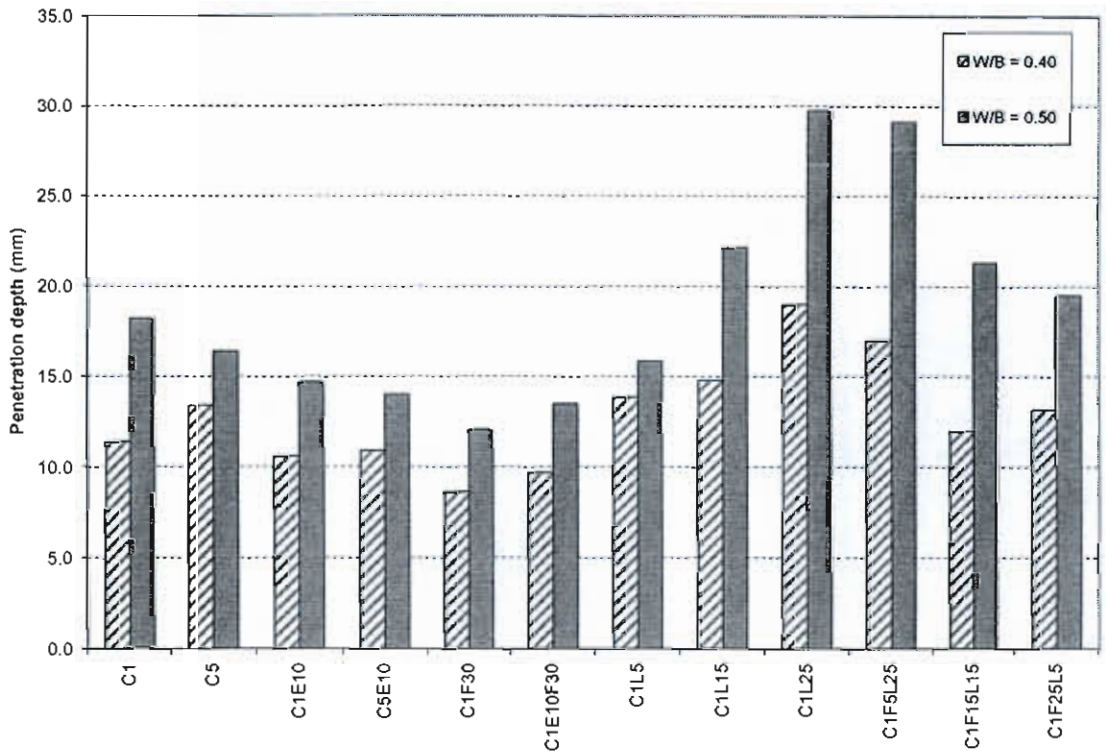


ภาพที่ 4-78 ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

3. การเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (RMT)

พิจารณาจากภาพที่ 4-79 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ให้ค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมที่มากกว่ามอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 กล่าวคือให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ลดลงเมื่อใช้ปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากใช้น้ำปริมาณสูงทำให้มีปริมาณน้ำส่วนเกินมากและทำให้เนื้อตัวอย่างมีความพรุนมากกว่า ดังนั้นคลอไรด์จึงสามารถ

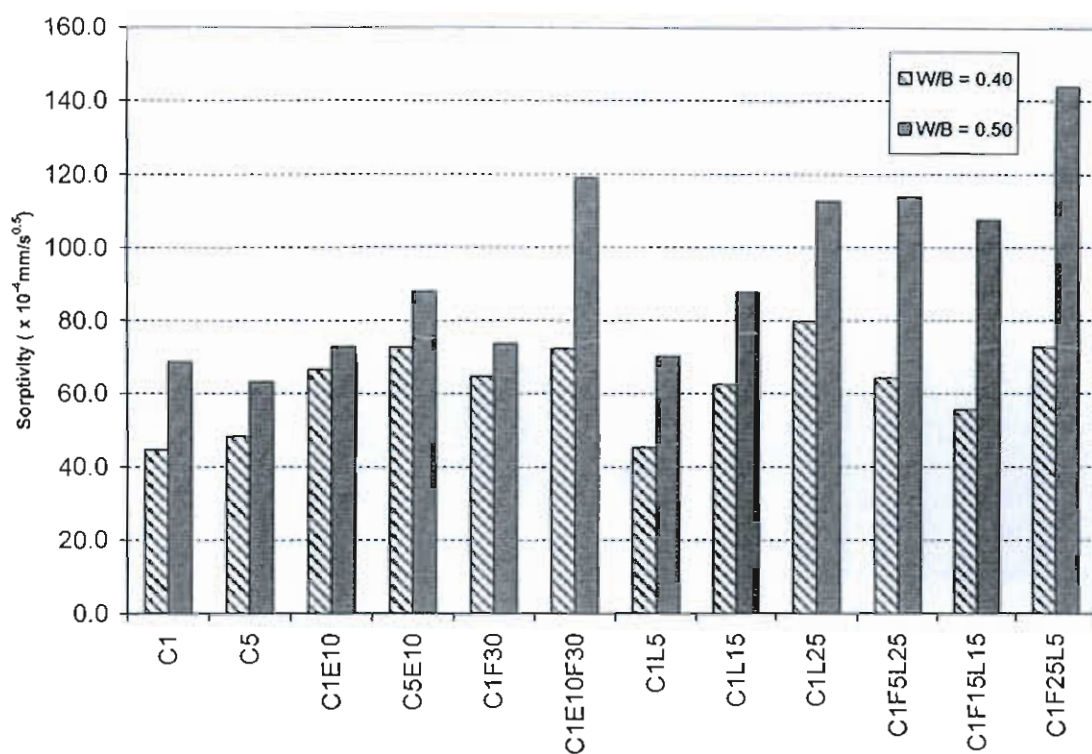
แทรกซึมได้ง่ายกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่มีเนื้อแน่นและมีโพรงช่องว่างน้อยกว่า



ภาพที่ 4-79 ผลทดสอบ RMT ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

4. การดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

พิจารณาจากภาพที่ 4-80 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ให้ค่าการดูดซึมน้ำที่มากกว่ามอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากใช้น้ำปริมาณสูงทำให้มีปริมาณน้ำส่วนเกินมากและทำให้เนื้อตัวอย่างมีความพรุนมากกว่า ประกอบด้วยโพรงช่องว่างที่มากกว่า ดังนั้นน้ำจึงสามารถถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อมอร์ตาร์ได้ง่ายกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่มีเนื้อแน่นและมีโพรงช่องว่างน้อยกว่า



ภาพที่ 4-80 ผลการทดสอบ Water absorption test ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

5. อภิปรายผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์จากผลการทดสอบต่าง ๆ

จากผลการทดลองที่ได้รับจาก 4.1-4.4 พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จะให้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ในทุกระยะความลึกจากผิวด้านนอก ซึ่งหมายความว่า มอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่า (0.40) มีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากกว่า (0.50) เนื่องจาก ดังนั้นการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง (0.50) ทำให้มีปริมาณน้ำส่วนเกินและอยู่ในสถานะของเหลวภายในมอร์ตาร์ มีผลทำให้เนื้อมอร์ตาร์พรุน และส่งผลให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านมอร์ตาร์ได้ง่ายยิ่งขึ้น (Metha, 2006) เพราะว่ามีค่าอุณหภูมิของการระเหยกลายเป็นไอที่ค่อนข้างสูง (100 C) เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิปกติของมอร์ตาร์ (อุณหภูมิขณะใช้งาน)

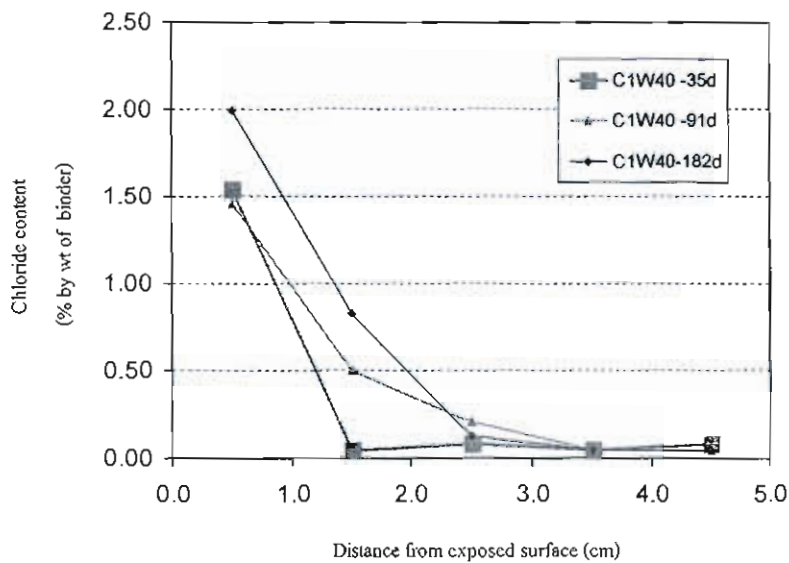
และเมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้รับจากการทดสอบทั้ง 4 วิธี พบว่าการทดสอบการแพร่ทั้งหมด การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง การทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง

และการดูดซึมน้ำเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์

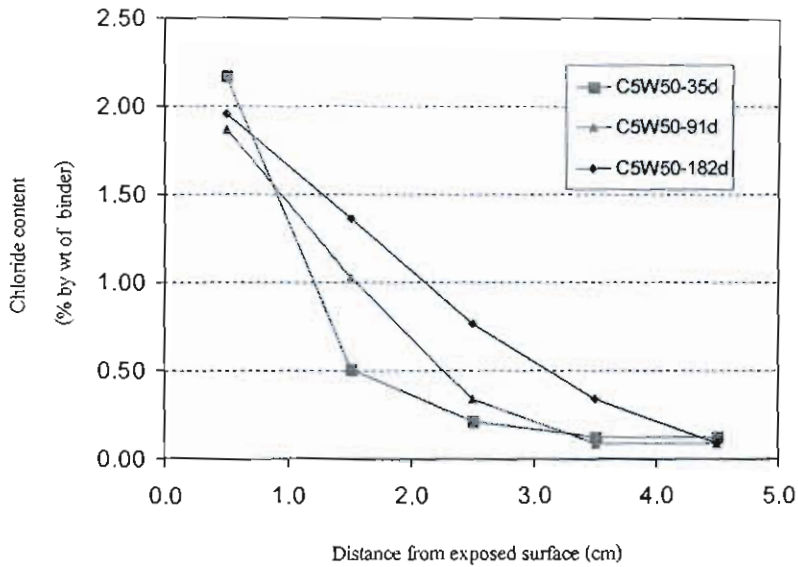
ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่อความต้านทานคลอไรด์มอร์ตาร์

การแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test)

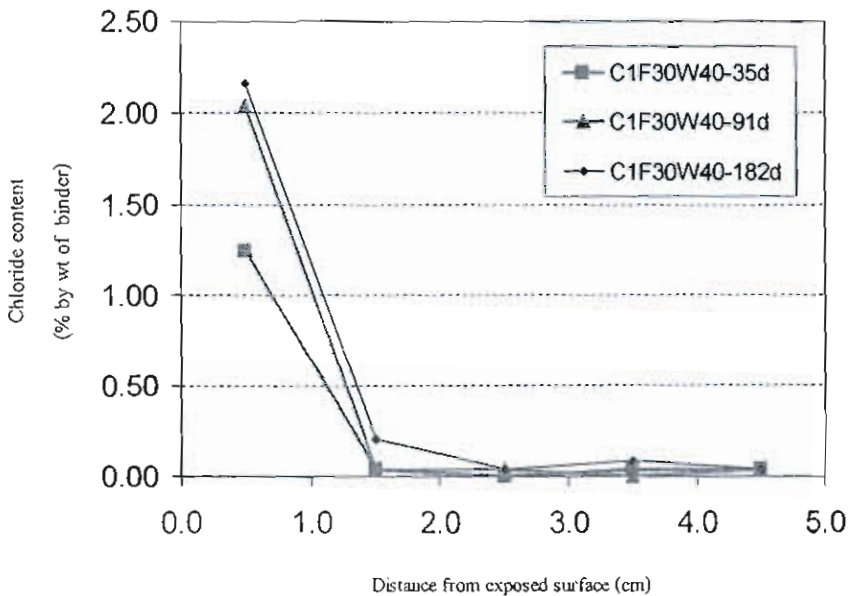
จากภาพที่ 4-81 ถึง 4-85 พบว่า ที่ระยะความลึก 1.5-4.5 ซม. ที่อัตรามอร์ตาร์แบบเดียวกัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือที่แตกต่างกัน พบว่ามีแนวโน้มค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแช่ตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการเผชิญคลอไรด์ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้คลอไรด์มีเวลาเพิ่มขึ้น สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อมอร์ตาร์ได้มากขึ้น ตามกฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion)



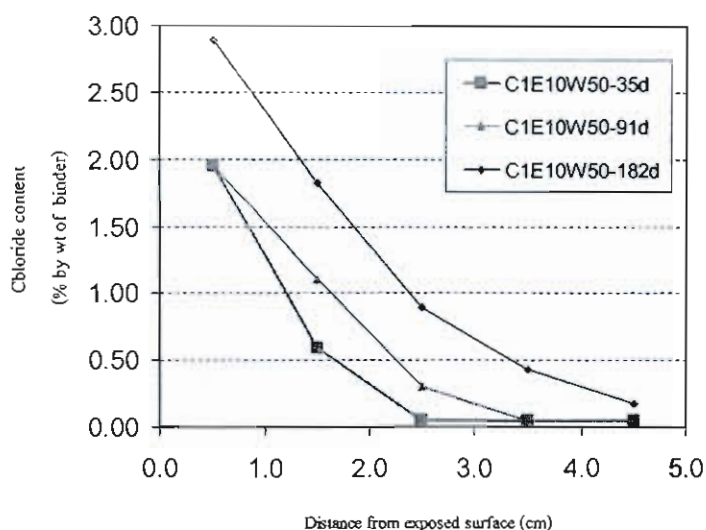
ภาพที่ 4-81 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35, 91 และ 182 วัน



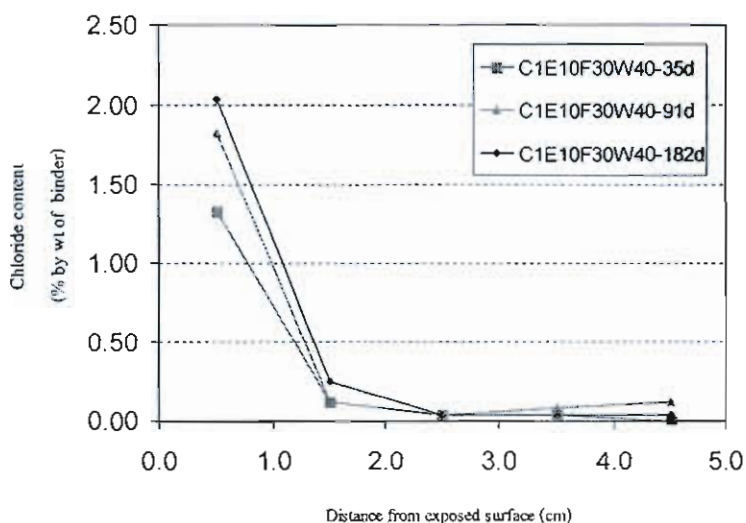
ภาพที่ 4-82 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35, 91 และ 182 วัน



ภาพที่ 4-83 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมแฉ่ำลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแฉ่ำลอย 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35, 91 และ 182 วัน



ภาพที่ 4-84 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้วยนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35, 91 และ 182 วัน

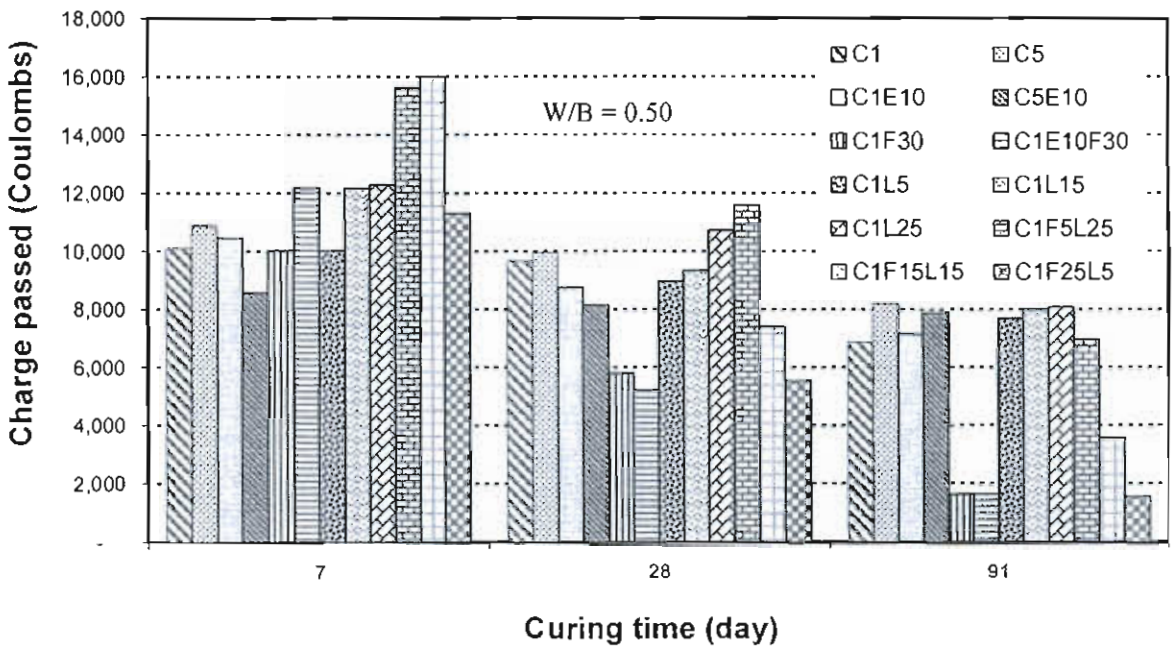
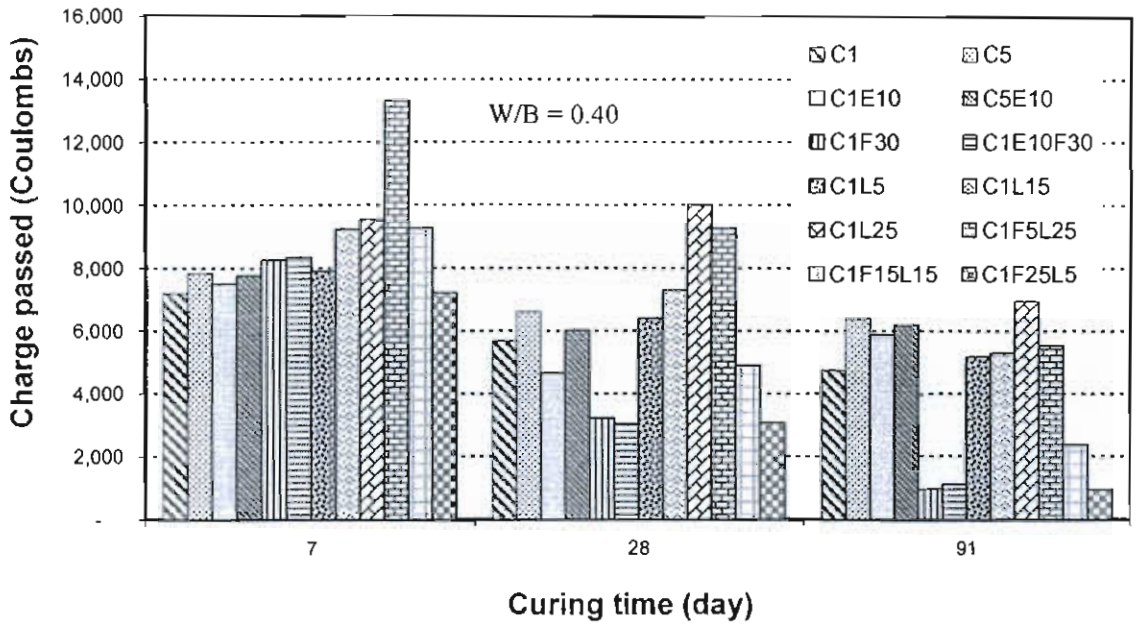


ภาพที่ 4-85 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอยในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 35, 91 และ 182 วัน

ผลกระทบบของอายุการบ่มที่ต่างกันต่อความต้านทานคลอไรด์มอร์ตาร์

การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT)

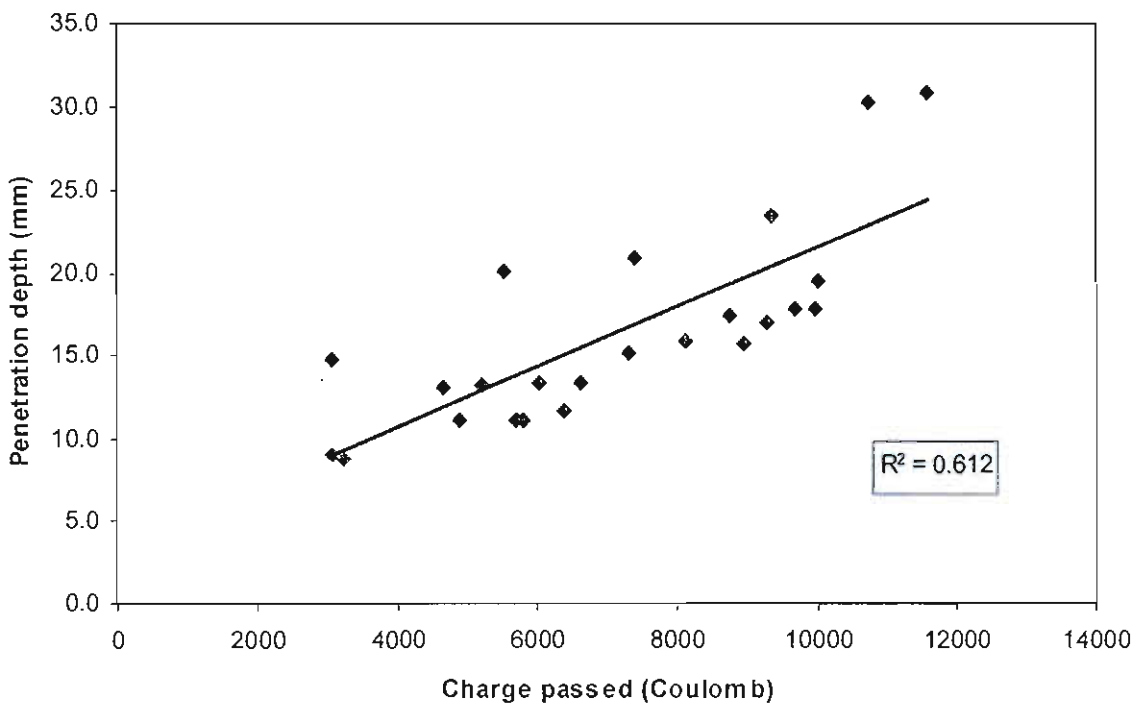
จากภาพที่ 4-86 การทดสอบ RCPT เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างมอร์ตาร์อายุ 7, 28 และ 91 วัน พบว่า ปริมาณประจุที่ไหลผ่านตัวอย่างในแต่ละมอร์ตาร์มีค่าลดลง เมื่อมอร์ตาร์มีอายุเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ มอร์ตาร์มีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้นเมื่อมีอายุเพิ่มมากขึ้น ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์มากขึ้น ทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่งผลให้มอร์ตาร์มีเนื้อแน่นมากขึ้น โพรงช่องว่างในเนื้อมอร์ตาร์ก็ลดลง ทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์ทำได้ยากยิ่งขึ้น



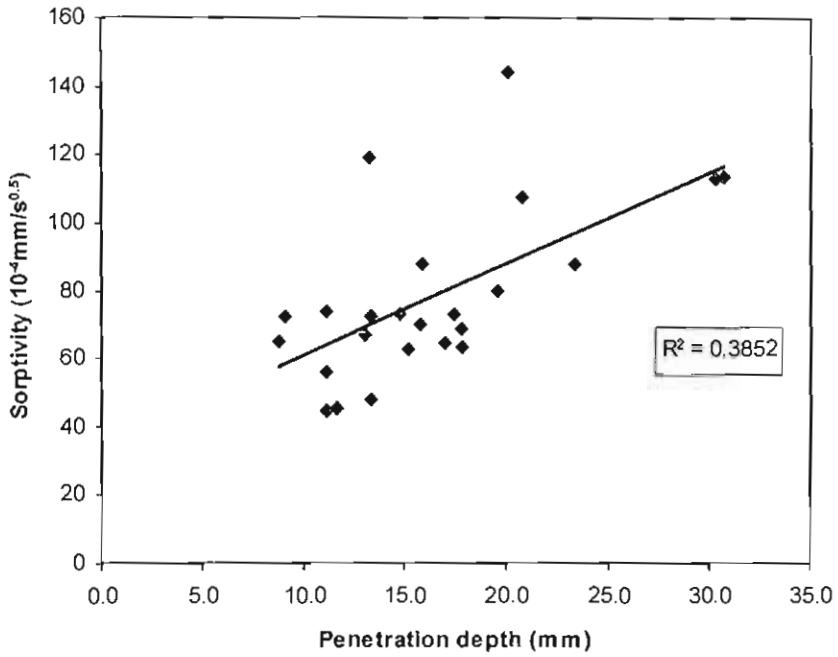
ภาพที่ 4-86 ผลทดสอบ RCPT ของมอร์ต้าร์อายุ 7, 28 และ 91 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์

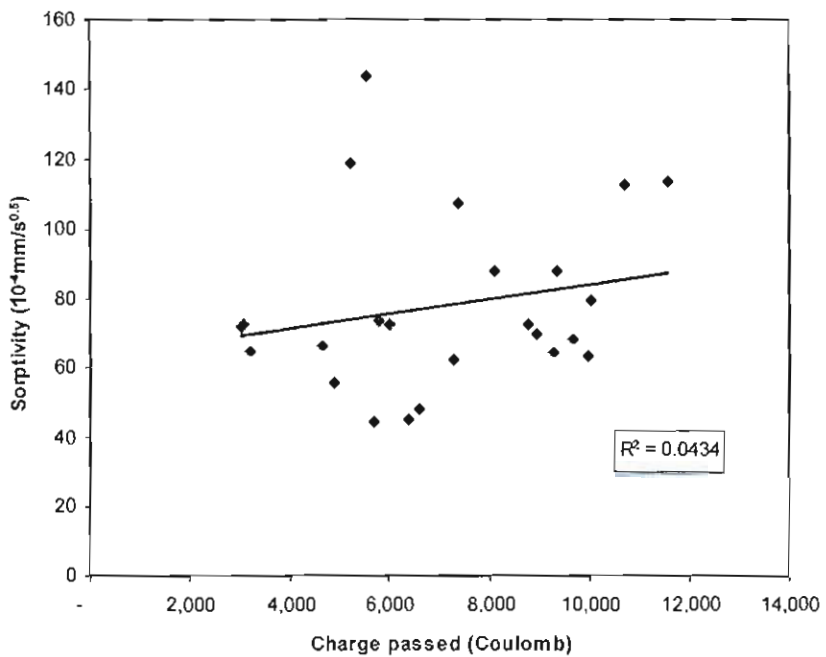
จากผลการทดลอง พบว่า การทดสอบ Bulk diffusion test, RCPT และ RMT ให้แนวโน้มผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน หรือ ชนิดของวัสดุแทนที่ หรืออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิด ขณะเดียวกันเมื่อนำผลการทดสอบระหว่าง RCPT และ RMT มาหาความสัมพันธ์ พบว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตามภาพที่ 4.87 สำหรับการทดสอบ Water absorption test ไม่ได้ให้ผลการทดสอบที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมดกับการทดสอบอื่น ๆ และเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์กับการทดสอบ RCPT และ RMT ตามภาพที่ 4.88-4.89 พบว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นที่ไม่แน่นอน อาจเกิดเนื่องจากเงื่อนไขในการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบจริงที่แตกต่างกัน เนื่องจากสถานะของตัวอย่างทดสอบที่แห้งแตกต่างจากการทดสอบ RCPT และ RMT ที่ตัวอย่างทดสอบอยู่ในสถานะอิ่มตัว หรือเนื่องจากอายุตัวอย่างทดสอบที่เมื่อรวมระยะเวลาที่ต้องใช้ในการเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบ Water absorption test มีอายุมากกว่า 28 วัน



ภาพที่ 4-87 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการทดสอบ RMT-RCPT ของมอร์ตาร์อายุ 28 วัน



ภาพที่ 4-88 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการทดสอบ RMT-Water absorption test ของ มอร์ต้ารอายุ 28 วัน



ภาพที่ 4-89 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการทดสอบ RCPT- Water absorption test ของ มอร์ต้ารอายุ 28 วัน

แนวทางการเลือกวิธีทดสอบความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์

จากผลการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์และความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ทั้ง 4 วิธี ได้แก่ การทดสอบแบบระยะยาว (Long-term test) ใช้วิธีการทดสอบการแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test) การทดสอบระยะสั้น (Short-term test) ใช้วิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test : RCPT) และการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid migration test : RMT) การทดสอบทางอ้อม (Indirect test) ใช้วิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test) พบว่า สำหรับการทดสอบที่ต้องการทราบว่าคอนกรีตของโครงสร้างหรือคอนกรีตที่เกิดจากการเทคอนกรีตในงานก่อสร้างมีความต้านทานคลอไรด์ตามเกณฑ์ข้อกำหนดคุณสมบัติหรือไม่ การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT) เป็นวิธีการที่เหมาะสม เนื่องจากใช้เวลาทดสอบเพียงแค่ 6 ชม. และใช้ผลทดสอบเปรียบเทียบกับตารางตามมาตรฐาน ASTM C1202 สำหรับการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (RMT) เป็นวิธีทดสอบที่ให้ผลการทดสอบแนวโน้มเดียวกับผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT) แต่เป็นวิธีทดสอบที่ยังไม่แพร่หลายในประเทศไทย และยังไม่มีการจัดทำผลทดสอบที่เป็นมาตรฐาน แต่เนื่องจากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ที่ใช้เวลาเพียง 8 ชม. จึงนิยมนำมาเป็นวิธีทดสอบในงานวิจัยเพื่อใช้ตรวจสอบผลทดสอบความต้านทานคลอไรด์ด้วยวิธีอื่น ๆ

สำหรับการทดสอบการแพร่ทั้งหมด (Bulk Diffusion test) มักนิยมใช้ทดสอบในงานคอนกรีตที่ต้องการรายละเอียดการแทรกซึมคลอไรด์ อาทิเช่น สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) เป็นต้น เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์หาอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษา (Maintenance-free service life) ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ แต่เนื่องจากต้องใช้เวลาทดสอบนาน เช่น คอนกรีตกำลังอัดสูงต้องใช้เวลาทดสอบไม่น้อยกว่า 35 วัน จึงนิยมใช้ในงานวิจัยหรืองานก่อสร้างบางประเภทที่ต้องการรายละเอียดในระดับนี้ ส่วนการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test) ซึ่งเป็นการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ทางอ้อม ในงานวิจัยนี้พบว่า การทดสอบการดูดซึมน้ำให้แนวโน้มผลการทดสอบไม่เป็นไปในแนวทางเดียวกับการทดสอบความต้านทานคลอไรด์อื่น ๆ อีก 3 วิธี จึงต้องมีการศึกษาและเก็บข้อมูลต่าง ๆ ให้มากขึ้นต่อไปในอนาคต เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบด้วยวิธีการดูดซึมน้ำกับวิธีการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ด้วยวิธีอื่น ๆ ต่อไป

การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์

การวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้า (C_s) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (D_a) ของมอร์ตาร์ที่มอร์ตาร์ต่าง ๆ ในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการทดสอบด้วยวิธีการแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test) ทำโดยการนำข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบมาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ที่ได้กล่าวถึงรายละเอียดต่าง ๆ ไปแล้วในบทที่ 3 ซึ่งจะใช้ข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองต่อไป

เนื่องจากการแพร่เป็นกลไกหลักของการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ภายในเนื้อของมอร์ตาร์ หากตั้งสมมติฐานของการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ภายในเนื้อของมอร์ตาร์เป็นแบบทิศทางเดียว (One-dimension movement) ดังนั้นจากกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งแสดงดังสมการดังนี้

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial x^2} \quad (4-1)$$

โดยที่	$C_i(x,t)$	คือ	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)
	$C_f(x,t)$	คือ	ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)
	D_a	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ (ซม. ² /ปี)
	x	คือ	ระยะทางจากผิวด้านนอกของมอร์ตาร์ (ซม.)
	t	คือ	ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

หากกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการพิจารณา คือ

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

และเงื่อนไขเริ่มต้น คือ

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

จะได้คำตอบของสมการที่ (4-1) ซึ่งแสดงในสมการที่ (5-2) ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{(D_a \cdot t)}} \right) \right] + C_i \quad (4-2)$$

โดยที่	$C_{(x,t)}$	คือ	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ความลึก x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา t (% โดยน้ำหนักของมอร์ตาร์)
	C_s	คือ	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ (% โดยน้ำหนักของมอร์ตาร์)
	C_i	คือ	ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นของมอร์ตาร์ (% โดยน้ำหนักของมอร์ตาร์)
	x	คือ	ระยะทางเทียบจากผิวด้านนอก (ซม.)
	D_a	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ (ซม. ² /ปี)
	t	คือ	ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

1. การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อใช้คำนวณคลอไรด์ที่ผิวหน้า (C_s) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ (D_a)

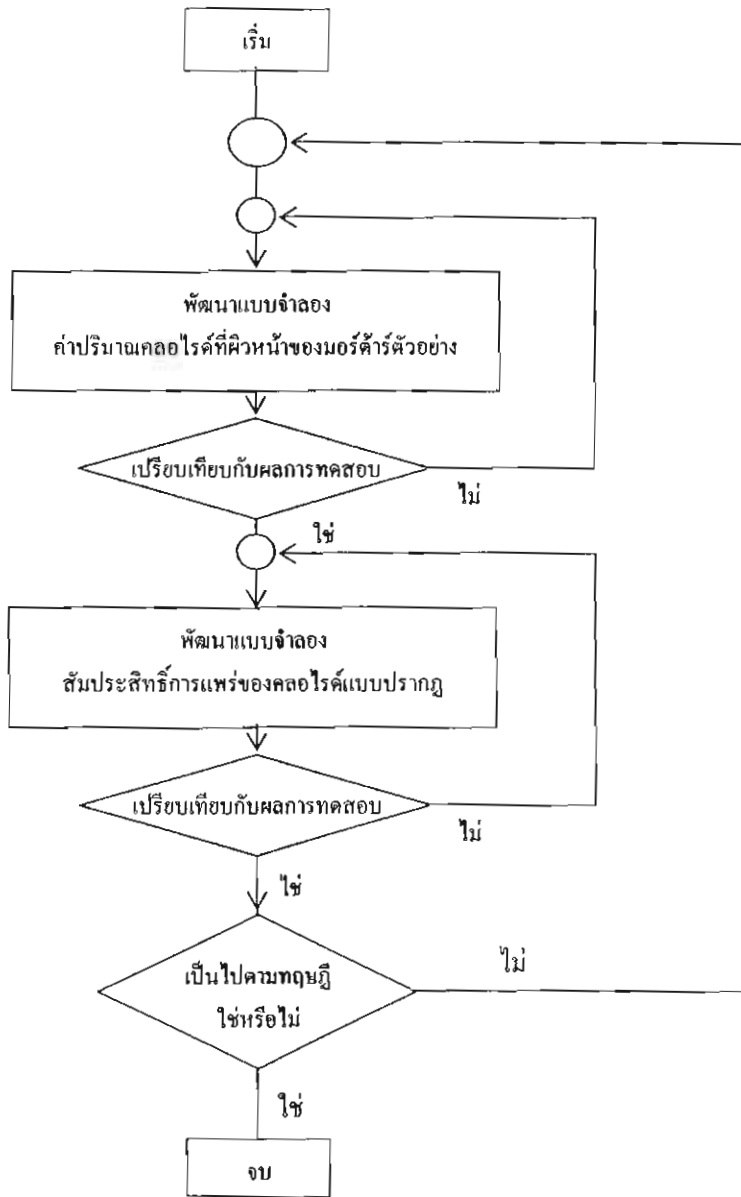
การทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้า (C_s) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (D_a) ของมอร์ตาร์ สามารถทำนายโดยใช้ค่าตอบของสมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ นั้น ซึ่งต้องทราบถึงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้ดังสมการที่ 4-2 ซึ่งตัวแปรที่สำคัญในการใช้คำตอบของสมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทางต่าง ๆ เทียบจากผิวด้านนอก

โดยจากงานวิจัยของ Song et al. (2008) พบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์นั้นมีค่าขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ การบ่มคอนกรีต สภาพแวดล้อมที่โครงสร้างเผชิญ ความสูงจากระดับน้ำทะเล และปริมาณโพรงช่องว่างในคอนกรีต ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ และปริมาณโพรงช่องว่างในคอนกรีต แต่ในความเป็นจริงแล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวของคอนกรีตอีก เช่น อายุของโครงสร้าง สถานที่ตั้งของโครงสร้าง (โครงสร้างที่ตั้งห่างออกจากชายฝั่งทะเลและโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนแผ่นดิน) ทิศทางลม ตำแหน่งความสูง ปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์ในทะเล และความสูงของคลื่น เป็นต้น (ปรัชญา จูเหล็ก และคณะ, 2551)

ผลการทดสอบที่ได้ พบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของมอร์ตาร์ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ชนิดของวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ (เถ้าลอย ผุ่นหินปูน สารขยายตัว) ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งการแทรกซึมของคลอไรด์ในมอร์ตาร์จะนำไปใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่อไป

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ จะพัฒนาโดยใช้ปัจจัยเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ เป็นปัจจัยหลักในการพัฒนาแบบจำลองเนื่องจากจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ยังมีไม่มากนัก ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาและเก็บข้อมูลต่าง ๆ ให้มากขึ้นต่อไปในอนาคต เพื่อพัฒนาสมการให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

ซึ่งปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนั้นจะต้องเป็นค่าที่สอดคล้องกัน โดยมีแผนภาพโดยรวมแสดงการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้า และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ ดังแสดงในภาพที่ 4-90

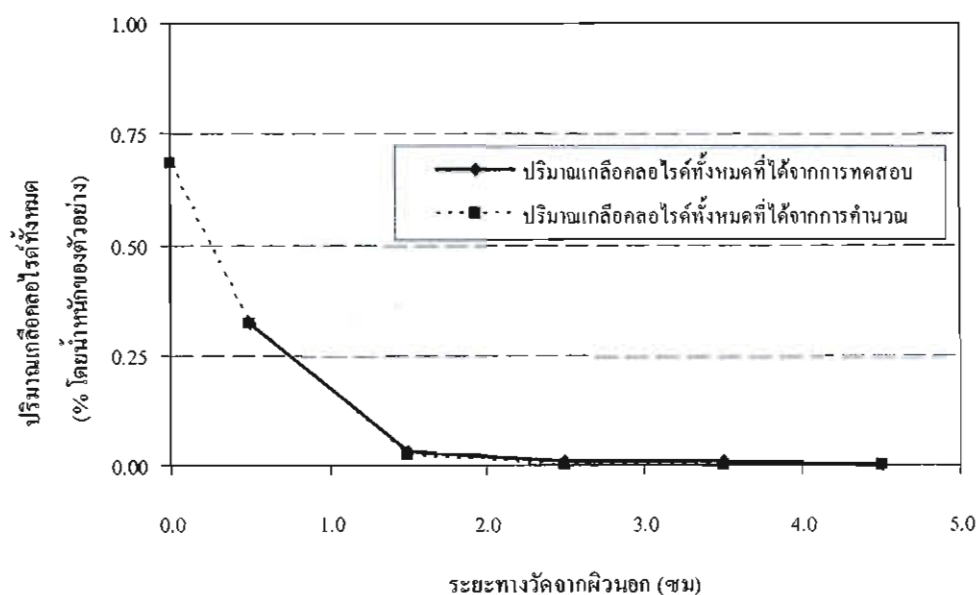


ภาพที่ 4-90 แผนภาพโดยรวมแสดงการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์

2. ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ (Cs)

ผลการทดลองจากการทดสอบการแพร่ทั้งหมดในห้องปฏิบัติการ จะได้รับค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะความลึก 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 ซม. หลังจากนั้นผู้วิจัยจะใช้สมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์มาคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ด้วยการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ ดังแสดงในภาพที่ 4-91

โดยใช้วิธีแทนค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ในคำตอบของสมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ ซึ่งจะใช้วิธีผลรวมของผลต่างกำลังสองน้อยสุดในการเปรียบเทียบ โดยในการพิจารณานั้นจะไม่นำผลการทดสอบของค่าปริมาณคลอไรด์ภายในเนื้อของมอร์ตาร์ในชั้นถัดไปที่ไม่เหมาะสมมาพิจารณา ซึ่งแสดงการหาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ในภาคผนวก จ และจะได้ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ ดังแสดงในตารางที่ 4-1



ภาพที่ 4-91 ตัวอย่างการหาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์

ตารางที่ 4-1 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์และข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง

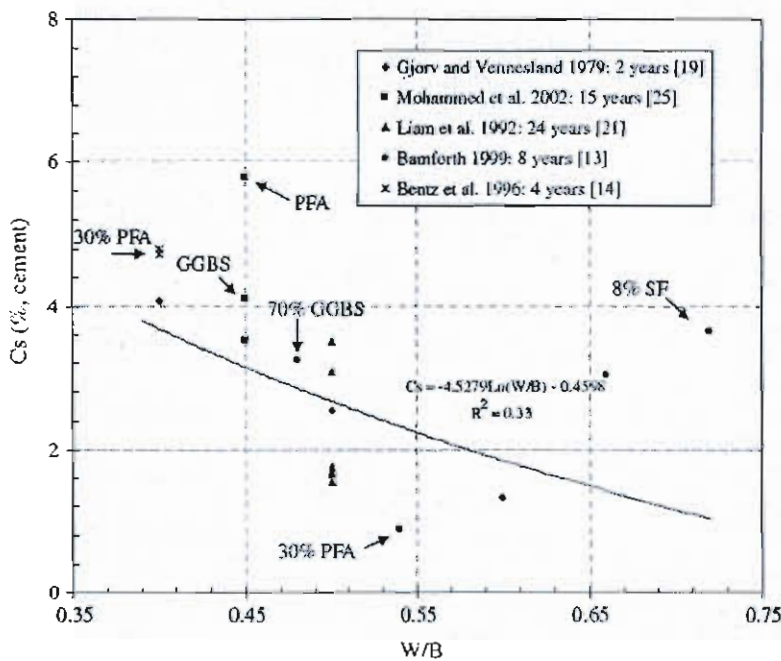
No	Mix designation	Cs (by weight of mortar)					
		35 day exposed		91 day exposed		182 day exposed	
		w/b=0.40	w/b=0.50	w/b=0.40	w/b=0.50	w/b=0.40	w/b=0.50
1	C1	0.723	0.670	0.750	0.717	0.812	0.791
2	C5	0.758	0.730	0.772	0.746	0.814	0.776
3	C1E10	0.760	0.726	0.780	0.760	0.861	0.831
4	C5E10	0.770	0.750	0.790	0.771	0.831	0.794
5	C1F30	0.902	0.879	1.310	1.246	1.554	1.523
6	C1E10F30	0.811	0.756	0.923	0.804	0.963	0.870
7	C1L5	0.679	0.643	0.695	0.668	0.723	0.693
8	C1L15	0.591	0.567	0.631	0.611	0.645	0.623
9	C1L25	0.520	0.486	0.593	0.578	0.617	0.595
10	C1F5L25	0.645	0.611	0.793	0.722	0.833	0.744
11	C1F15L15	0.748	0.641	0.944	0.844	0.978	0.888
12	C1F25L5	0.891	0.857	1.128	0.932	1.236	0.975

จากตาราง 4-1 ข้อมูลปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้ม พบว่า มีค่าที่แตกต่างกันไปตาม ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานชนิดของวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้ามอร์ตาร์มีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์มากขึ้น ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยหรือสารขยายตัว ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น โดยในส่วนของเถ้าลอยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น เมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์มีแนวโน้มที่จะลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณฝุ่นหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์

จากงานวิจัยของ Song et al. (2008) พบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นแล้วปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าโครงสร้างมีค่าลดลง ซึ่งมีสมการของปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ขึ้นอยู่กับ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต แสดงดังภาพที่ 4-92 ขึ้นอยู่กับระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต โดยเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์มากขึ้นปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้น และขึ้นอยู่กับความสูงจากระดับน้ำทะเล โดยเมื่อความสูงจากระดับน้ำทะเลมากขึ้น ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตมีค่าลดลง

และจากแนวโน้มต่าง ๆ ดังกล่าวจึงนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองของปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ โดยในการพิจารณาจะคำนึงถึงผลของปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้เป็นที่ไปตามแนวโน้มเช่นเดียวกับข้อมูลและการศึกษาของนักวิจัยท่านอื่น ๆ เป็นสำคัญ โดยสมการที่พัฒนาขึ้นนี้จะพัฒนาโดยใช้ปัจจัยเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ เป็นปัจจัยหลักในการพัฒนาแบบจำลอง

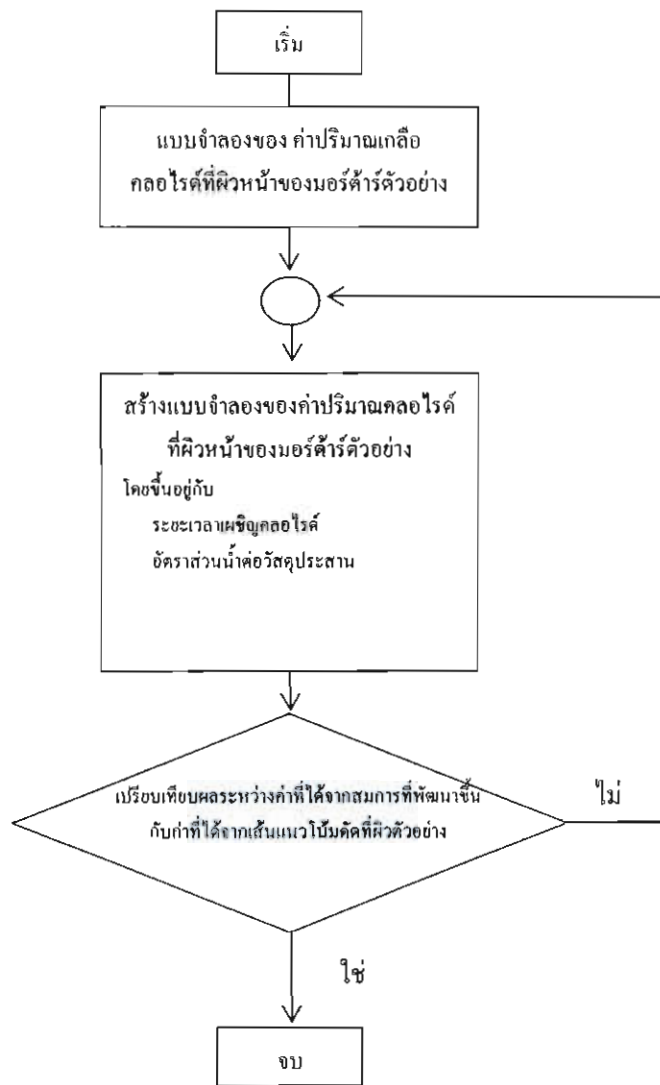


ภาพที่ 4-92 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตและแนวโน้มของปริมาณเกลือคลอไรด์ จากงานวิจัยของ Song et al. (2008)

ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์นั้น จะพิจารณาข้อมูลโดยการแทนค่าข้อมูลของปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ รวมถึงการแทนค่าข้อมูลของปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นไปตามแนวโน้มของการทดสอบ เป็นไปตามแนวโน้มเช่นเดียวกับข้อมูลและ

การศึกษาของนักวิจัยท่านอื่น ๆ ในสมการทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่าง ๆ ให้มีปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่คำนวณได้จากสมการนั้น ๆ ใกล้เคียงกับปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์มากที่สุด โดยแบ่งมอร์ตาร์ ตามลักษณะของวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีรายละเอียดของการพัฒนาแบบจำลองดังนี้

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้สมการที่เสนอโดย Song et al. (2008) ดังแสดงในภาพที่ 4-92 และใช้สมการของปรัชญา จูเหล็ง และคณะ (2551) ซึ่งเป็นสมการของปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต มาร่วมในการพิจารณา และหารูปแบบของสมการที่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของมอร์ตาร์ ซึ่งพบว่าแนวโน้มของปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ไม่เป็นไปตามทฤษฎี จึงจำเป็นต้องปรับรูปแบบของสมการใหม่จนกระทั่งได้สมการที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ได้ ซึ่งจะแสดงสมการต่อไป สามารถสรุปเป็นแผนภาพขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองของปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ ดังภาพที่ 4-93



ภาพที่ 4-93 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ดีอาร์

จากการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ดีอาร์นั้น ผู้วิจัยได้เสนอสมการเบื้องต้นเพื่อใช้ประมาณปริมาณคลอไรด์ที่ผิวของมอร์ดีอาร์ในห้องปฏิบัติการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบการแพร่ทั้งหมด (Bulk Diffusion Test) โดยแบ่งตามลักษณะตามลักษณะของวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์เป็น 12 ลักษณะ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4-3 ถึงสมการ 4-14 ดังนี้

สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

$$C_s = [-2.15t^{-0.42} \times (W/B)] + 0.95t^{-0.012} \quad (4-3)$$

สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

$$C_s = [-0.1t^{0.3} \times (W/B)] + 0.66t^{0.08} \quad (4-4)$$

สำหรับมอร์ตาร์ C1E10

$$C_s = [-0.4t^{-0.07} \times (W/B)] + 0.72t^{0.055} \quad (4-5)$$

สำหรับมอร์ตาร์ C5E10

$$C_s = [-0.16t^{0.15} \times (W/B)] + 0.71t^{0.06} \quad (4-6)$$

สำหรับมอร์ตาร์ C1F30

$$C_s = [-0.1t^{0.38} \times (W/B)] + 0.32t^{0.34} \quad (4-7)$$

สำหรับมอร์ตาร์ C1E10F30

$$C_s = [-0.09t^{0.51} \times (W/B)] + 0.43t^{0.24} \quad (4-8)$$

สำหรับมอร์ตาร์ C1L5

$$C_s = [-0.47t^{-0.1} \times (W/B)] + 0.75t^{0.02} \quad (4-9)$$

สำหรับมอร์ตาร์ C1L15

$$C_s = [-0.26t^{-0.03} \times (W/B)] + 0.6t^{0.04} \quad (4-10)$$

สำหรับมอร์ตาร์ C1L25

$$C_s = [-0.76t^{-0.27} \times (W/B)] + 0.54t^{0.05} \quad (4-11)$$

สำหรับมอร์ตาร์ C1F5L25

$$C_s = [-0.07t^{0.47} \times (W/B)] + 0.35t^{0.23} \quad (4-12)$$

สำหรับมอร์ตาร์ C1F15L15

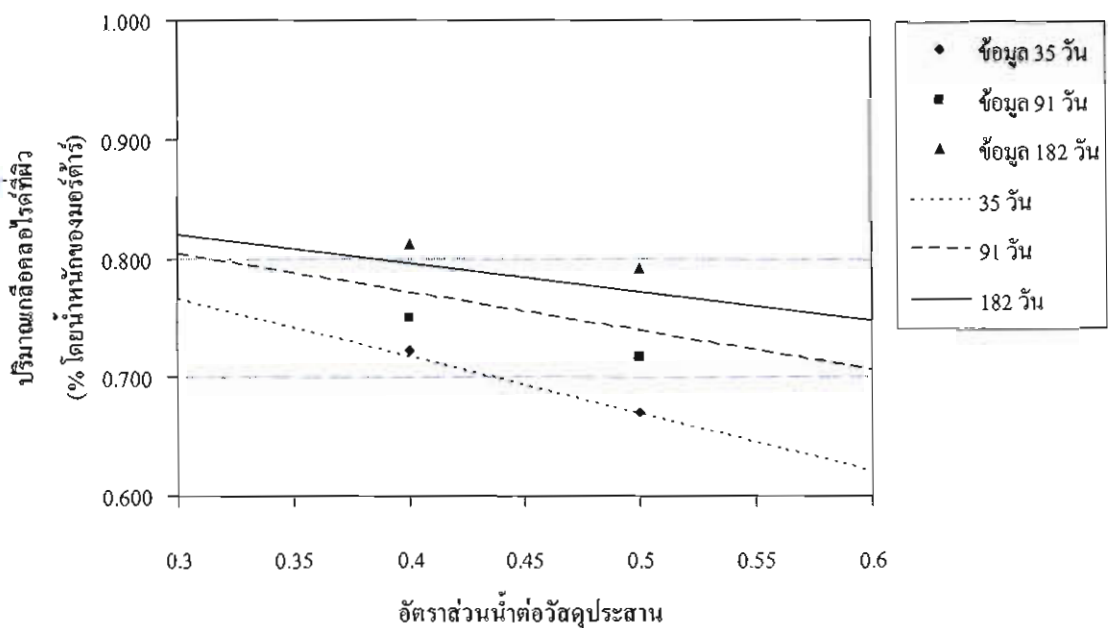
$$C_s = [-1.2t^{-0.08} \times (W/B)] + 0.82t^{0.09} \quad (4-13)$$

สำหรับมอร์ตาร์ C1F25L5

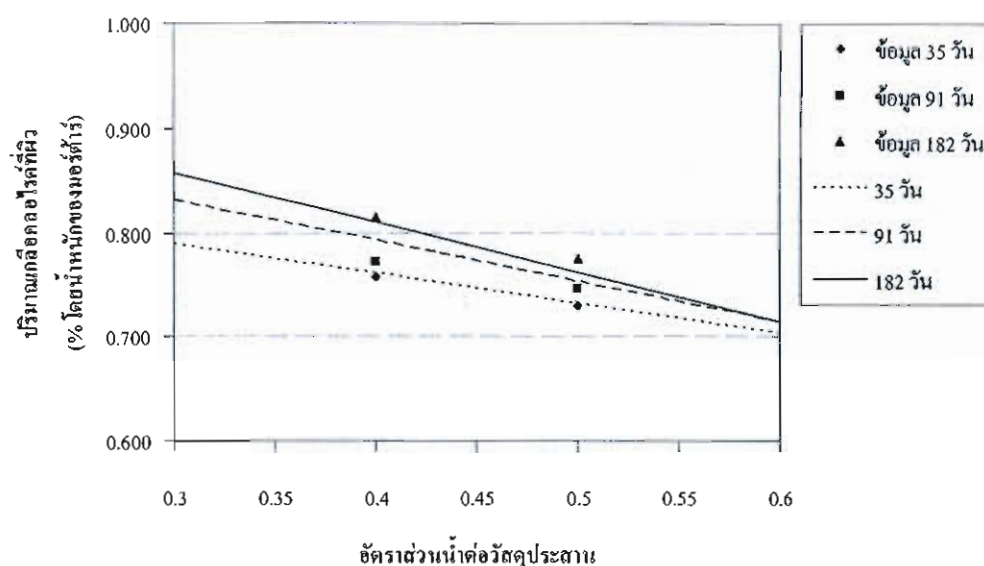
$$C_s = [-0.04t^{0.78} \times (W/B)] + 0.28t^{0.4} \quad (4-14)$$

โดยที่ C_s คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ (% โดยน้ำหนักของมอร์ตาร์)
 W/B คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
 t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)

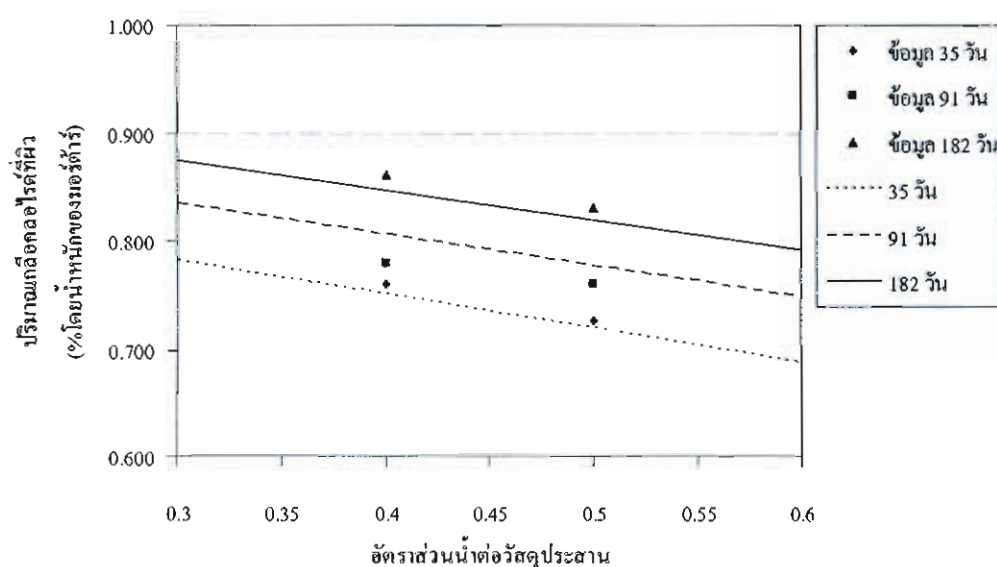
จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวของปริมาณคลอไรด์จากภายในมาดัดที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์มอร์ตาร์ดังภาพที่ 4-94 ถึง 4-105 พบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวของมอร์ตาร์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาดัดที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์



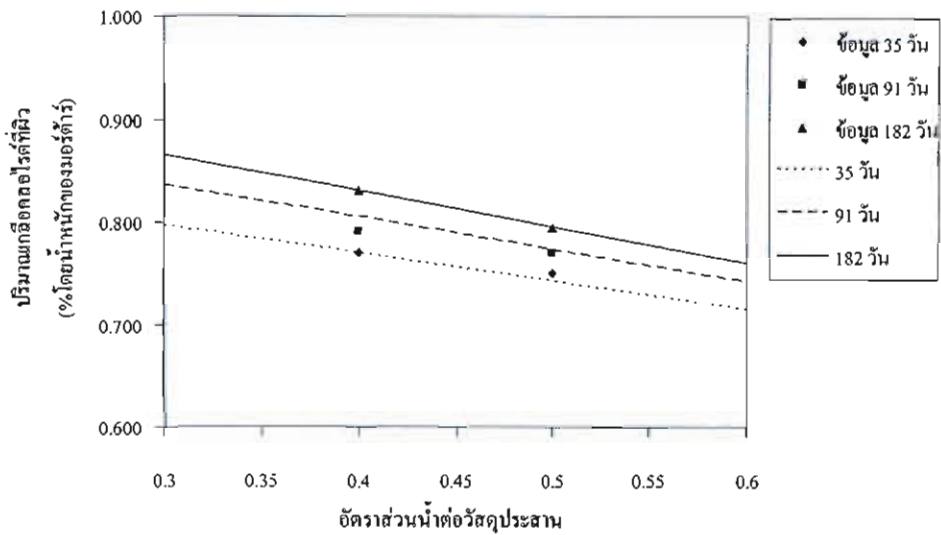
ภาพที่ 4-94 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักจากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาดัดที่ผิวหน้า



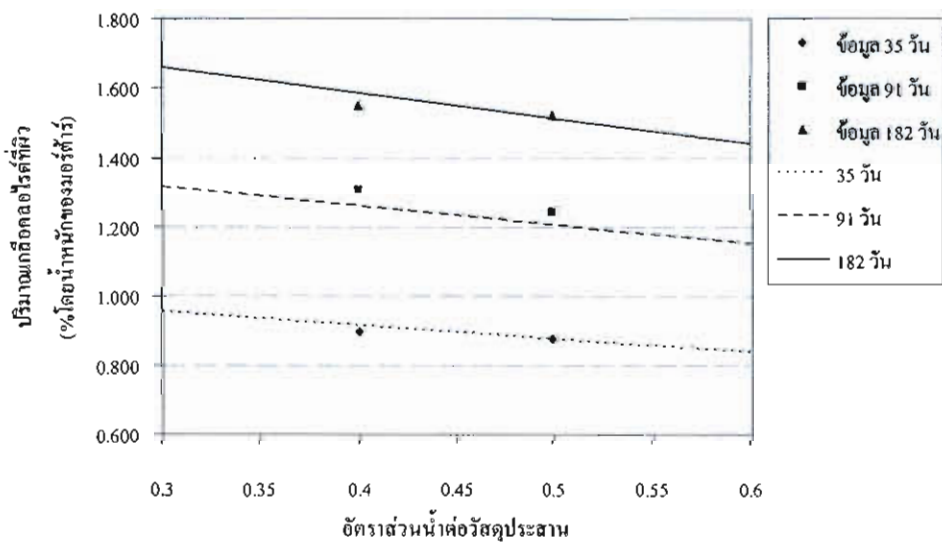
ภาพที่ 4-95 ปริมาณคลอรีนที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักจากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอรีนที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอรีนจากภายในมาดัดที่ผิวหน้า



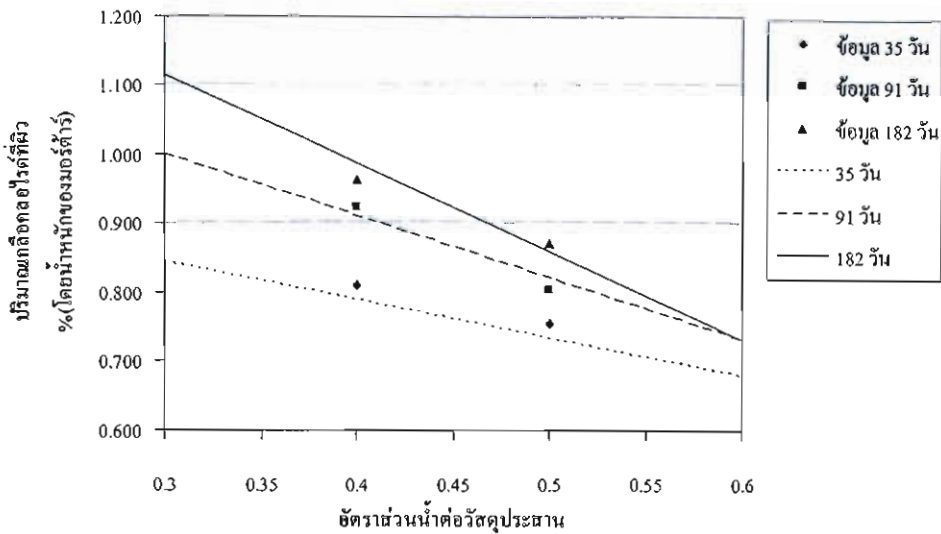
ภาพที่ 4-96 ปริมาณคลอรีนที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอรีนที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอรีนจากภายในมาดัดที่ผิวหน้า



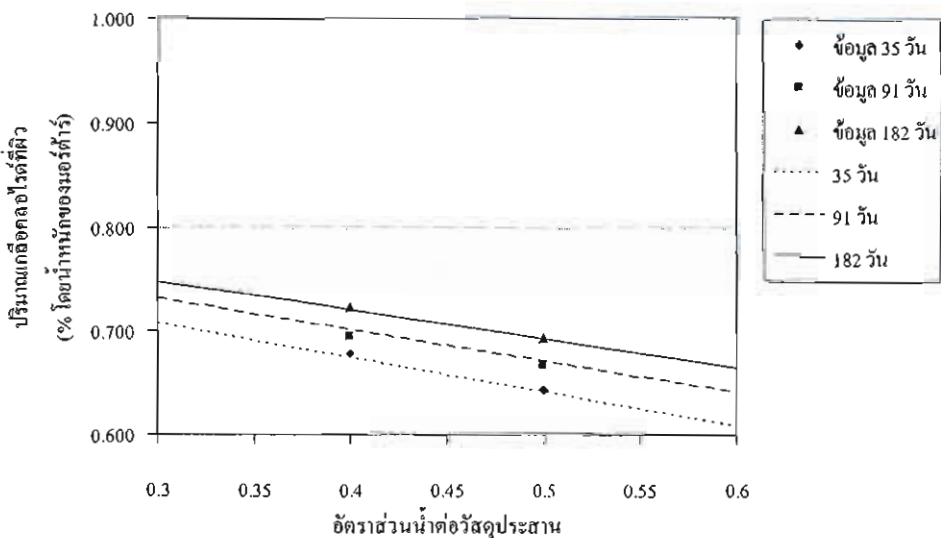
ภาพที่ 4-97 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาัดที่ผิวหน้า



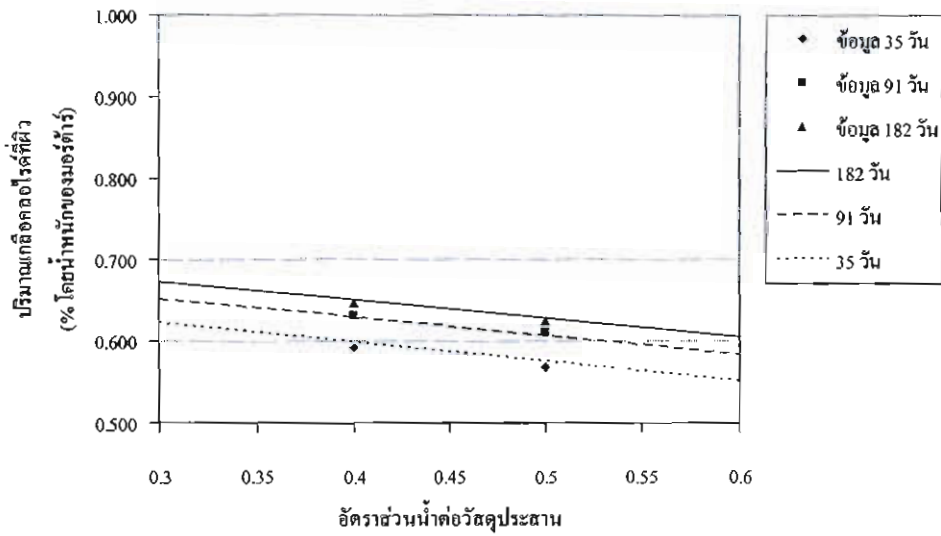
ภาพที่ 4-98 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาัดที่ผิวหน้า



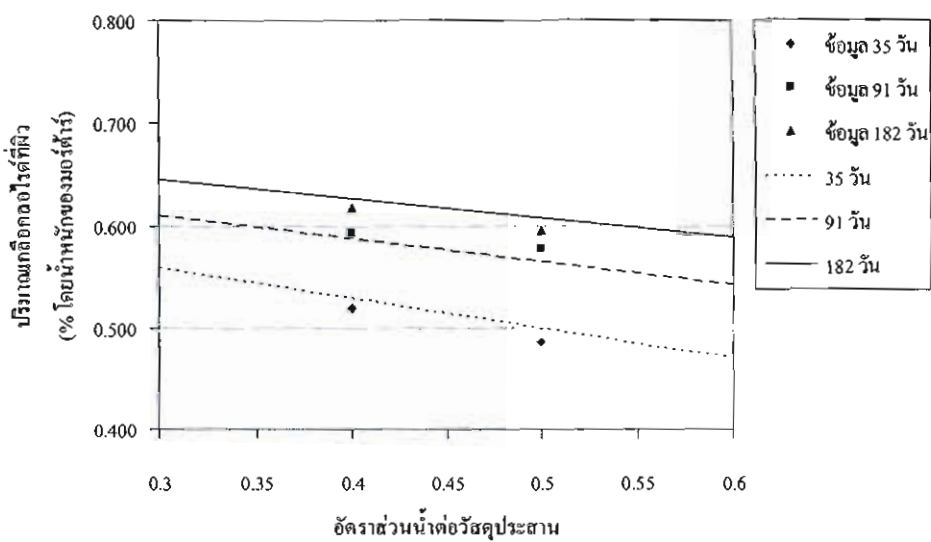
ภาพที่ 4-99 ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ดที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอโรฟิลล์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า



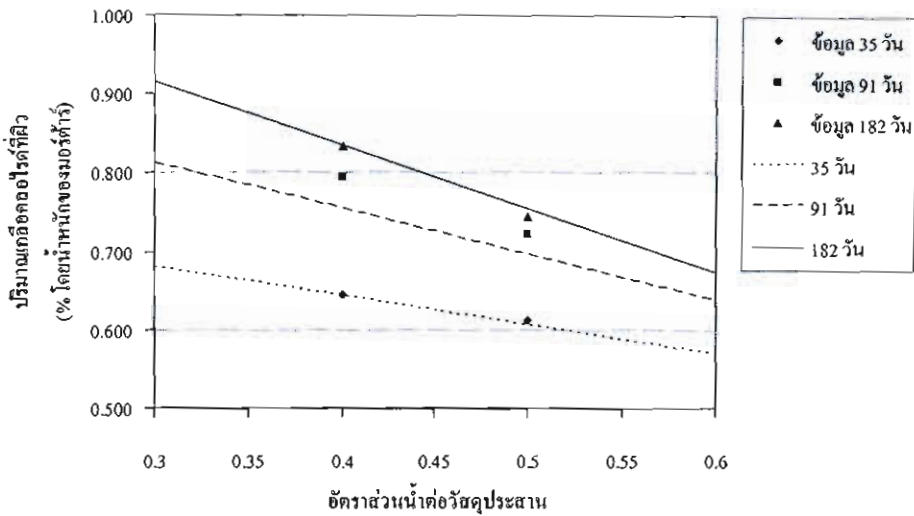
ภาพที่ 4-100 ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ดที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอโรฟิลล์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า



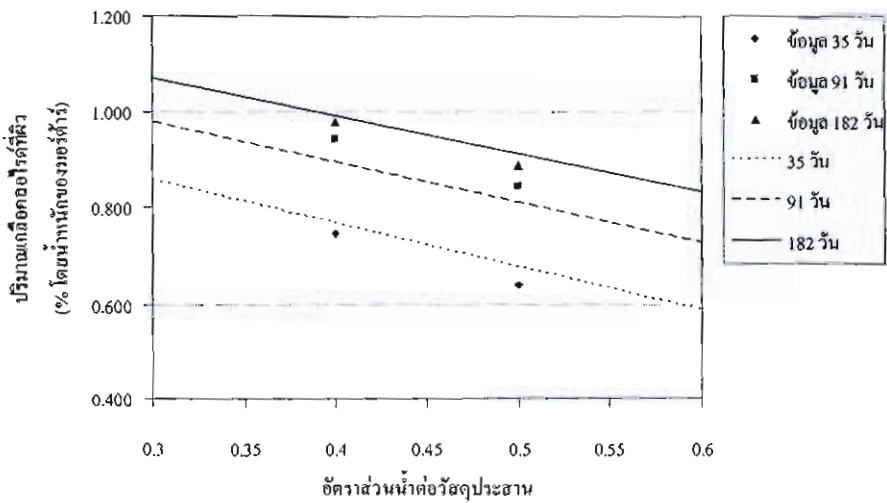
ภาพที่ 4-101 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วย ฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการ ลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาดัดที่ผิวหน้า



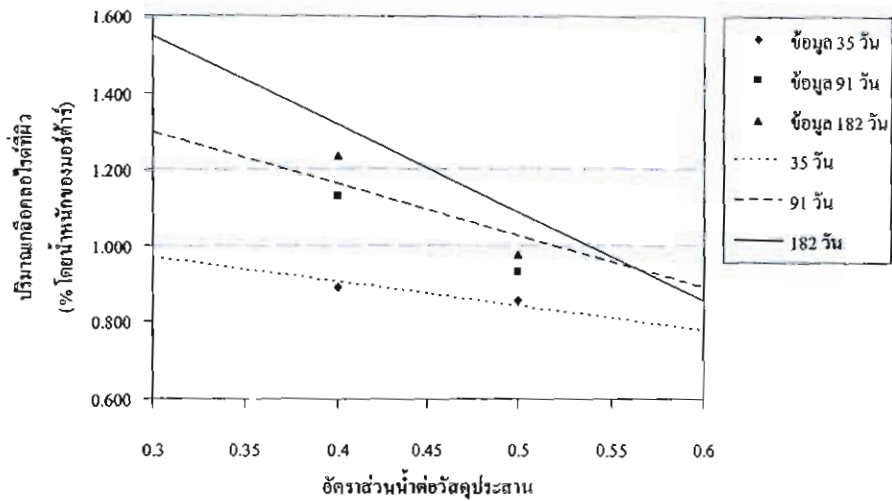
ภาพที่ 4-102 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วย ฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการ ลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาดัดที่ผิวหน้า



ภาพที่ 4-103 ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ดาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอโรฟิลล์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า



ภาพที่ 4-104 ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ดาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับจากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอโรฟิลล์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า



ภาพที่ 4-105 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเกล็ดลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเกล็ดลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ จากการคำนวณเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการลากเส้นแนวโน้มของการกระจายตัวปริมาณคลอไรด์จากภายในมาตัดที่ผิวหน้า

ทั้งนี้ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์นั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีกดังที่กล่าวข้างต้น เช่น ความสูงจากระดับน้ำทะเล ระยะทางจากชายฝั่งทะเล ชนิดของวัสดุประสาน ลักษณะสภาพแวดล้อม เป็นต้น (Song et al., 2008) ซึ่งต้องมีการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ในเชิงลึกอีกต่อไปในอนาคต

3. สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ (D_a)

ในการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ภายในเนื้อของมอร์ตาร์นั้นสามารถหาได้จากสมการกฎข้อที่ 2 ของฟิคส์ ซึ่งเป็นการคำนวณหาค่าปริมาณคลอไรด์ตามระดับความลึกต่าง ๆ ในมอร์ตาร์ (Chloride penetration profile) โดยนำปริมาณคลอไรด์ที่คำนวณได้ในแต่ละระดับความลึกมาเปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่วัดได้จริงจากห้องปฏิบัติการทดสอบ ในการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏในมอร์ตาร์นั้น ทำโดยเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏ (Apparent chloride diffusion coefficient, D_a) ที่ใช้ในการคำนวณจนกระทั่งปริมาณคลอไรด์ตามระดับความลึกในมอร์ตาร์ที่คำนวณได้ มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณคลอไรด์ในเนื้อมอร์ตาร์ที่วัดได้จริงจากห้องปฏิบัติการทดสอบ โดยในการคำนวณนั้นจะใช้ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของมอร์ตาร์จากสมการที่พัฒนาขึ้นซึ่งได้กล่าวไป ซึ่งได้แสดงข้อมูลการ

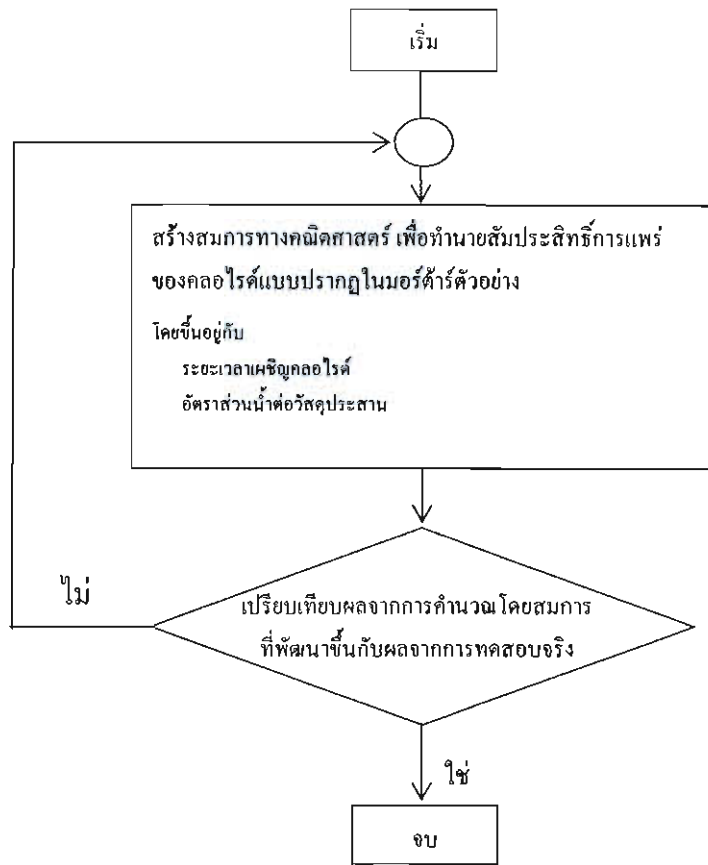
คำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในภาคผนวก ค และได้สรุปสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏในมอร์ตาร์ (D_a) ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองในตำแหน่งต่าง ๆ ดังตารางที่ 4-2 ทั้งนี้ D_a เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏในมอร์ตาร์ กล่าวคือการแพร่ของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของมอร์ตาร์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ผ่านไป (Time-dependent)

จากตาราง 4-2 ข้อมูลสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ภายในเนื้อของมอร์ตาร์ พบว่ามีค่าที่แตกต่างกันไปตาม ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ชนิดของวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์มากขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มีค่าลดลง และเมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยหรือสารขยายตัว สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มีแนวโน้มที่จะลดลง โดยในส่วนของเถ้าลอยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ลดลงมากขึ้น และเมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณฝุ่นหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4-2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ (D_a) และข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์

No	Mix designation	D_a (cm ² /Year)					
		35 day exposed		91 day exposed		182 day exposed	
		w/b=0.40	w/b=0.50	w/b=0.40	w/b=0.50	w/b=0.40	w/b=0.50
1	C1	2.940	5.350	1.674	3.440	1.330	2.590
2	C5	3.783	5.961	2.130	3.111	1.790	2.530
3	C1E10	2.550	4.996	1.408	3.245	1.250	2.450
4	C5E10	2.482	5.664	1.811	2.913	1.290	2.020
5	C1F30	1.644	2.211	0.622	0.681	0.286	0.602
6	C1E10F30	2.030	2.927	0.991	1.675	0.674	1.478
7	C1L5	4.520	6.056	2.271	4.930	1.774	2.810
8	C1L15	5.330	8.313	5.056	7.581	2.366	3.134
9	C1L25	7.089	12.511	6.580	8.925	2.757	3.330
10	C1F5L25	5.792	10.857	4.127	8.120	1.553	2.775
11	C1F15L15	3.168	5.417	1.859	2.677	1.460	2.172
12	C1F25L5	1.526	2.258	0.923	1.540	0.771	1.007

ในการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏในมอร์ตาร์นั้นจะพัฒนาโดยใช้ปัจจัยเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ เป็นปัจจัยหลักในการพัฒนาแบบจำลอง โดยการแทนค่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสมการทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่าง ๆ ให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่คำนวณได้มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ในเนื้อมอร์ตาร์ที่ใกล้เคียงกับ ค่าการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบในแต่ละตำแหน่งมากที่สุด และคำตอบที่คำนวณได้จากสมการที่พัฒนาขึ้นนั้นต้องมีแนวโน้มเช่นเดียวกับคำตอบที่ได้จากการทดสอบการแพร่ของคลอไรด์ และต้องมีแนวโน้มที่เป็นไปตามทฤษฎี ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นต้องทำการปรับแก้สมการ ไปจนกระทั่งได้สมการคำตอบของสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม ที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ได้ ซึ่งสามารถสรุปเป็นแผนภาพขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ ดังแสดงในภาพที่ 4-106



ภาพที่ 4-106 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์

จากข้อมูลทั้งหมดสามารถหาสมการความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏในมอร์ตาร์โดยแบ่งตามลักษณะชนิดของวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ เป็น 12 ลักษณะ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4-15 ถึงสมการ 4-26 ดังนี้

สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

$$D_a = 71.95t^{-0.31} \times (W/B)^{1.78^{0.06}} \quad (4-15)$$

สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

$$D_a = 103.91t^{-0.55} \times (W/B)^{1.35t^{-0.004}} \quad (4-16)$$

สำหรับมอร์ตาร์ด C1E10

$$D_a = 86.65t^{-0.34} \times (W/B)^{2.32t^{0.02}} \quad (4-17)$$

สำหรับมอร์ตาร์ด C5E10

$$D_a = 752337t^{-1.43} \times (W/B)^{15.1t^{-0.45}} \quad (4-18)$$

สำหรับมอร์ตาร์ด C1F30

$$D_a = 928088t^{-1.94} \times (W/B)^{5.3 \times 10^9 t^{-5.16}} + 0.009t \quad (4-19)$$

สำหรับมอร์ตาร์ด C1E10F30

$$D_a = 752337t^{-1.43} \times (W/B)^{15.1t^{-0.45}} \quad (4-20)$$

สำหรับมอร์ตาร์ด C1L5

$$D_a = 12.3t^{0.09} \times (W/B)^{0.39t^{0.37}} \quad (4-21)$$

สำหรับมอร์ตาร์ด C1L15

$$D_a = 30.9t^{-0.04} \times (W/B)^{0.58t^{0.3}} \quad (4-22)$$

สำหรับมอร์ตาร์ด C1L25

$$D_a = 75.98t^{-0.23} \times (W/B)^{0.44t^{0.31}} \quad (4-23)$$

สำหรับมอร์ตาร์ CIF5L25

$$D_a = 391.66t^{-0.57} \times (W/B)^{2.54t^{-0.03}} \quad (4-24)$$

สำหรับมอร์ตาร์ CIF15L15

$$D_o = 46292t^{-0.88} \times (W/B)^{3.88t^{-0.21}} \quad (4-25)$$

สำหรับมอร์ตาร์ CIF25L5

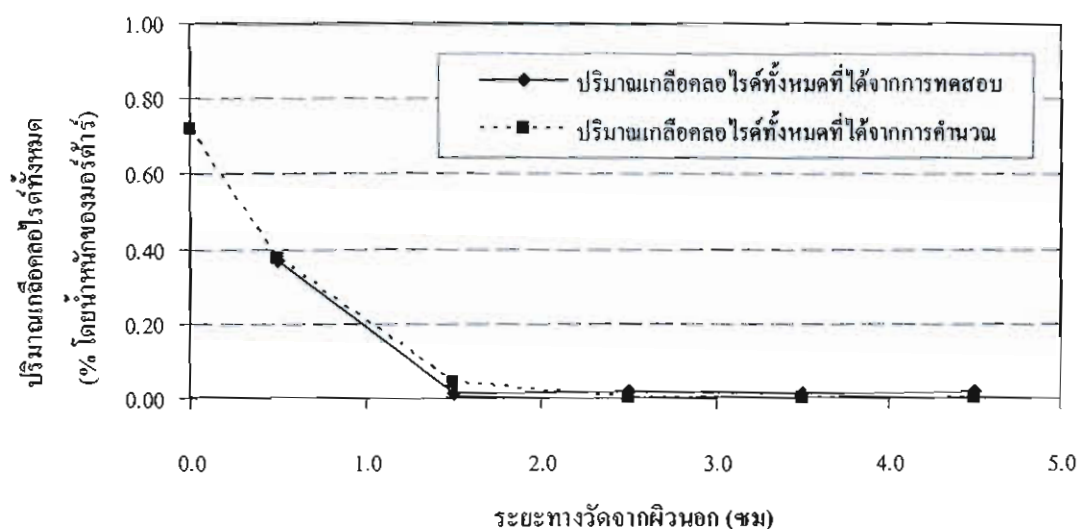
$$D_a = 409.54t^{-1.02} \times (W/B)^{7.24t^{-0.35}} \quad (4-26)$$

โดยที่	D_a	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ (ซม ² /ปี)
	W/B	คือ	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
	t	คือ	ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)

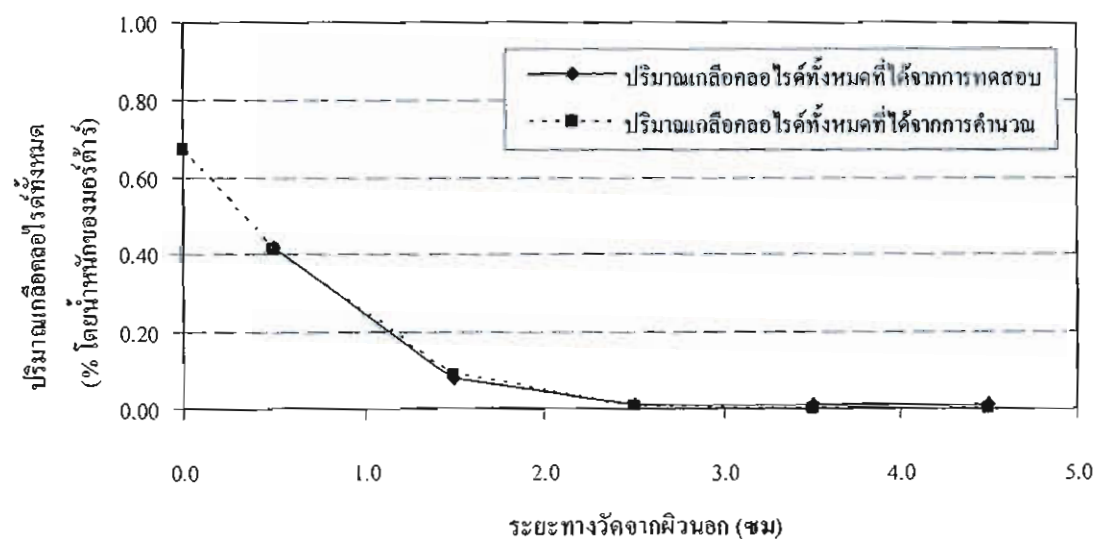
4. การตรวจสอบแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดสอบจาก

ห้องปฏิบัติการ

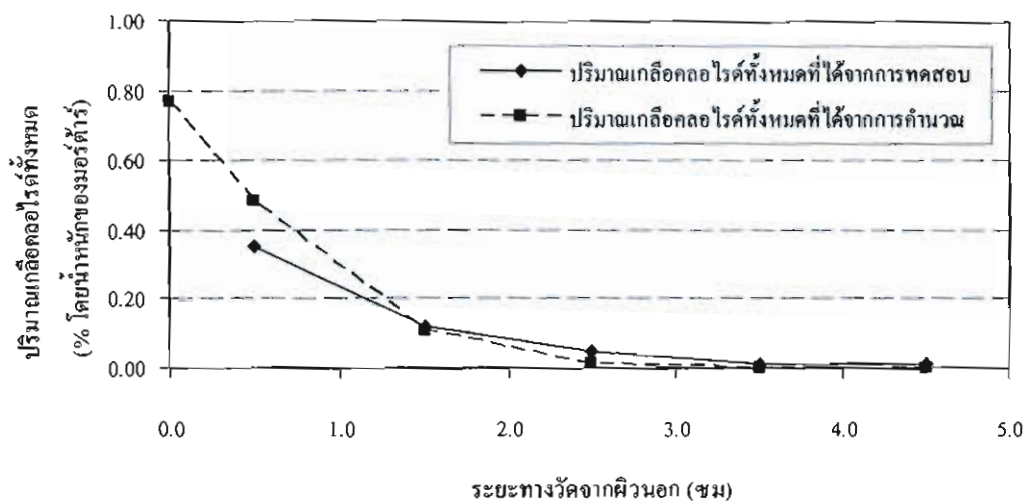
จากภาพที่ 4-107 ถึง ภาพที่ 4-178 เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์โดยแบ่งตามลักษณะชนิดของวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์จากสมการที่พัฒนาขึ้น กับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ จนกระทั่งปริมาณคลอไรด์ตามระดับความลึกในมอร์ตาร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าปริมาณคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่วัดได้จริงในการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในชั้นต้น ดังแสดงในภาพที่ 4-107 ถึง ภาพที่ 4-178 พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบบปรากฏของคลอไรด์ทั้ง 12 ลักษณะ บางมอร์ตาร์มีความแตกต่างกันอยู่พอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ยังมีไม่มากนัก ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาและเก็บข้อมูลต่าง ๆ ให้มากขึ้นต่อไปในอนาคต เพื่อพัฒนาสมการให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกัน จึงสามารถนำสมการนี้ไปใช้ประเมินเบื้องต้นเพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์แบบปรากฏที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและระยะเวลาการทดสอบต่าง ๆ ได้



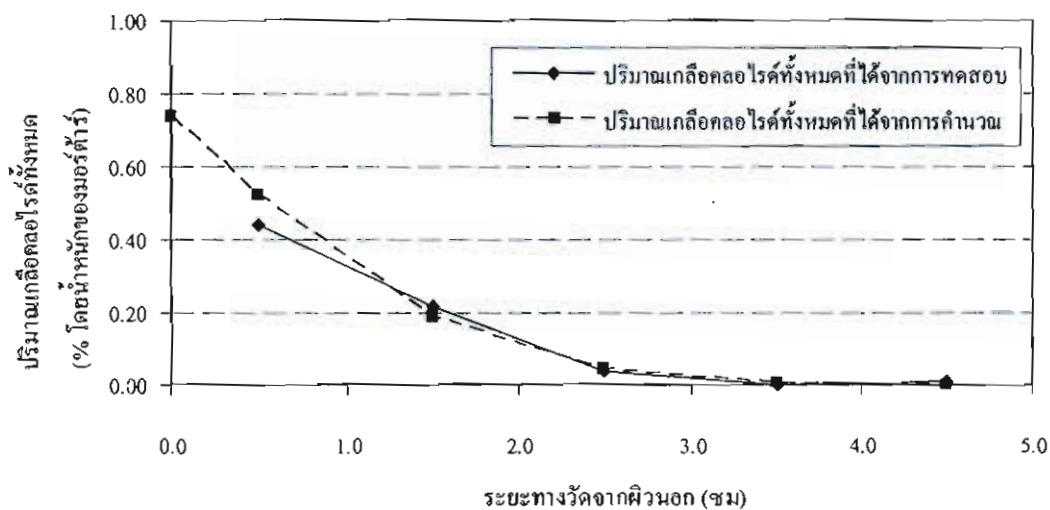
ภาพที่ 4-107 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนจากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



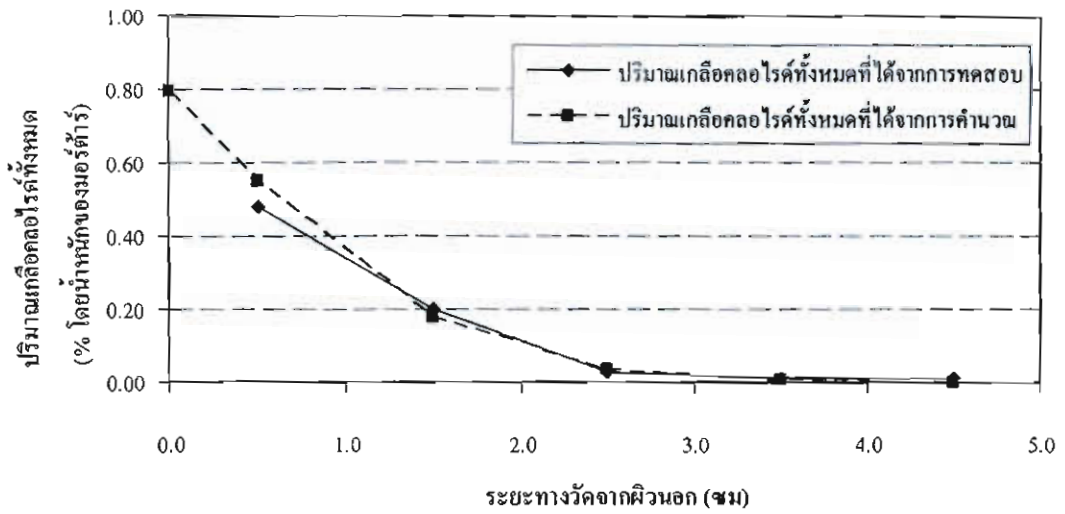
ภาพที่ 4-108 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนจากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



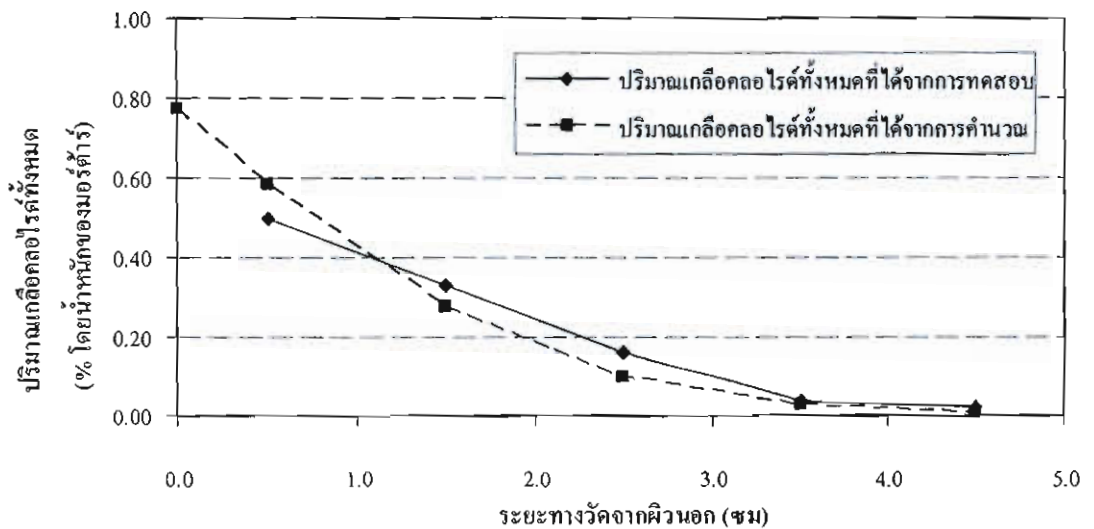
ภาพที่ 4-109 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการจากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



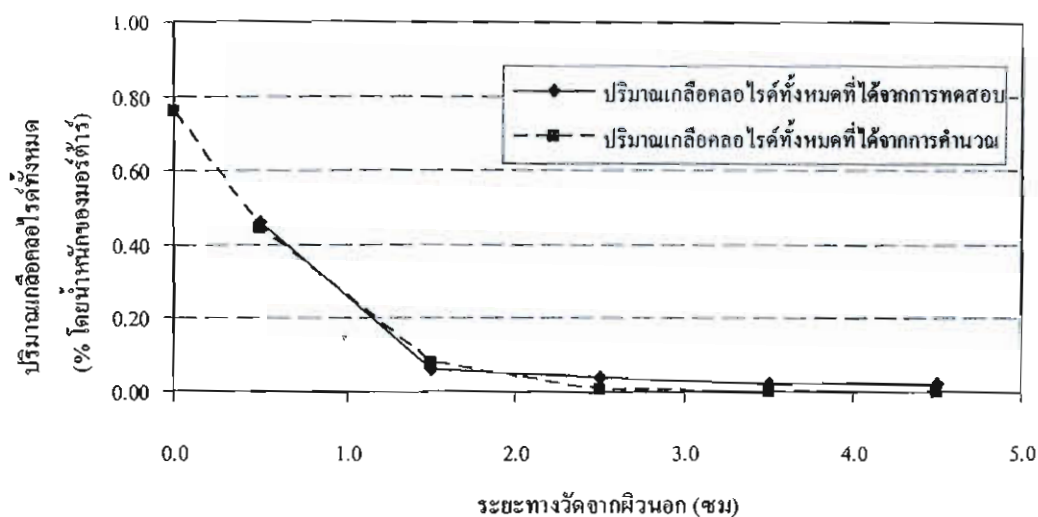
ภาพที่ 4-110 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการจากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



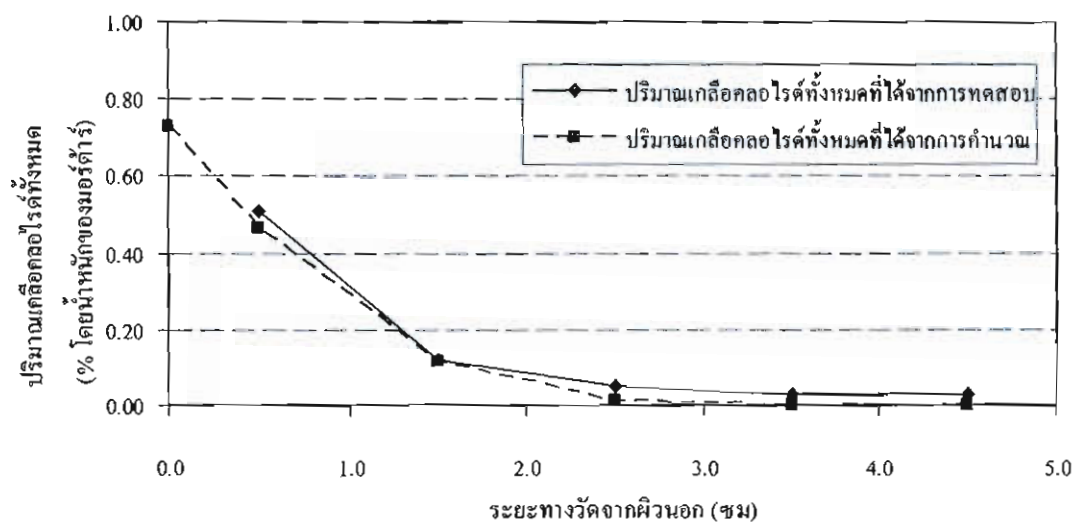
ภาพที่ 4-111 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการจากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



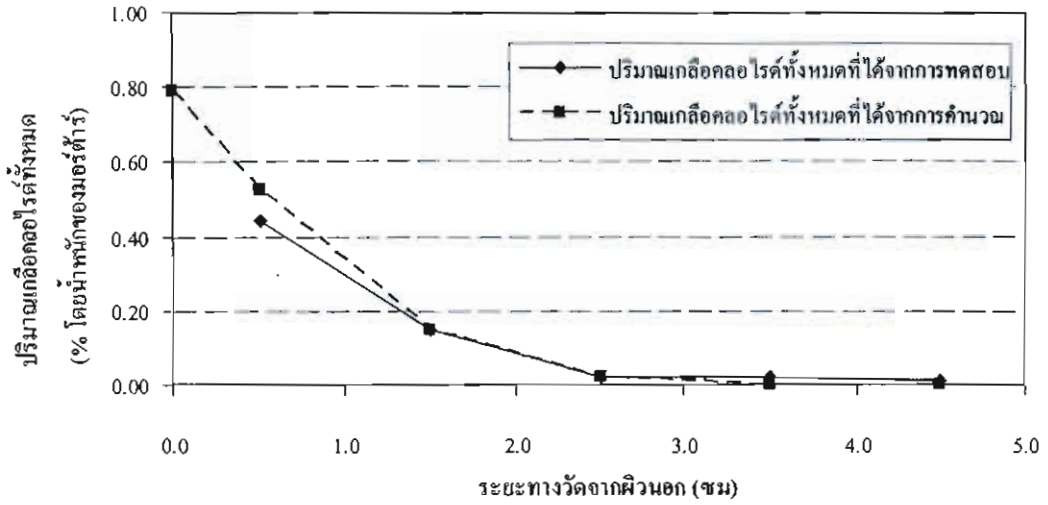
ภาพที่ 4-112 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการจากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



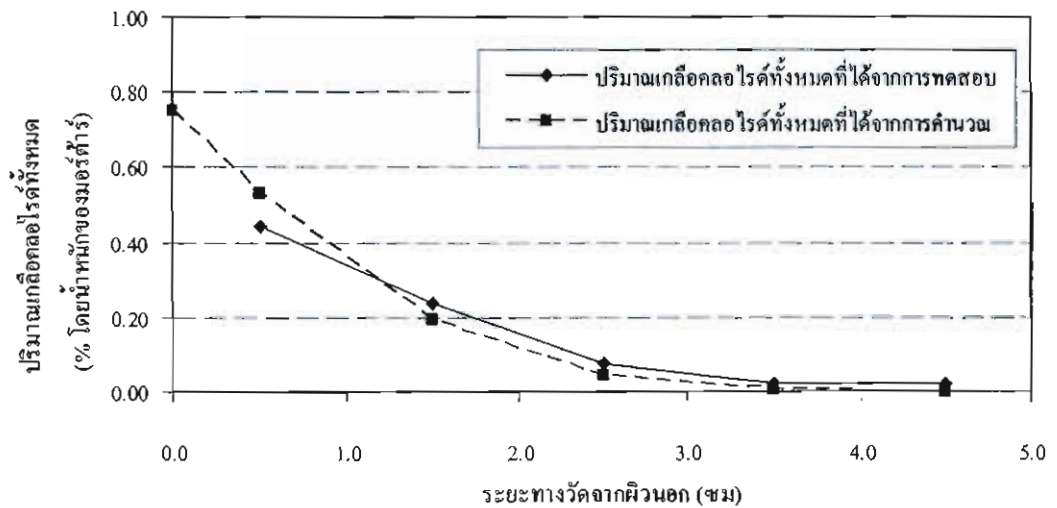
ภาพที่ 4-113 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการจากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



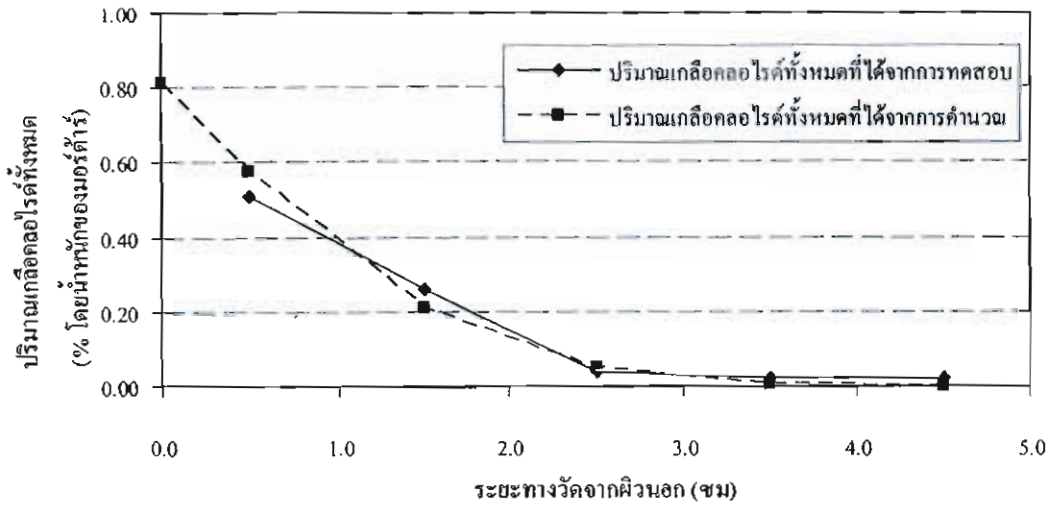
ภาพที่ 4-114 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการจากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนา



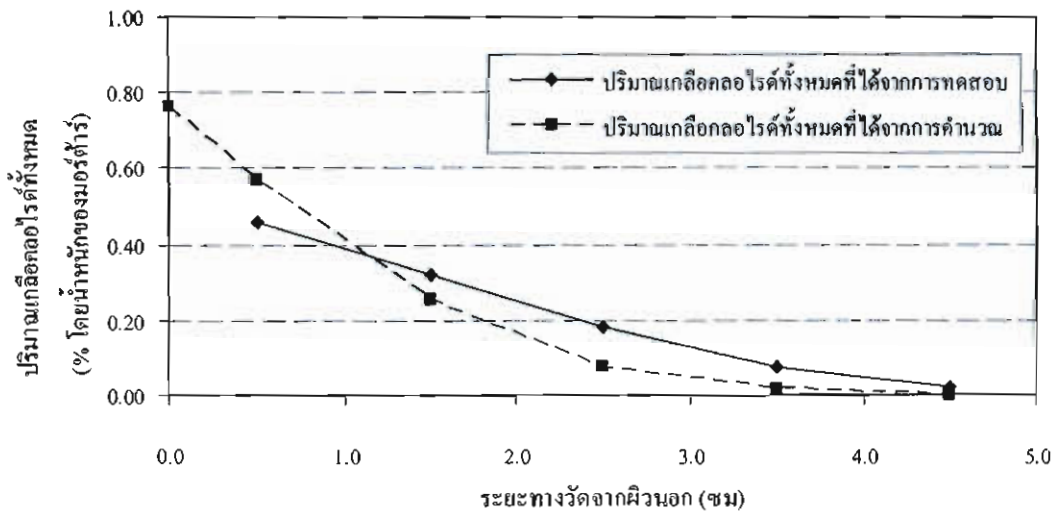
ภาพที่ 4-115 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการจากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



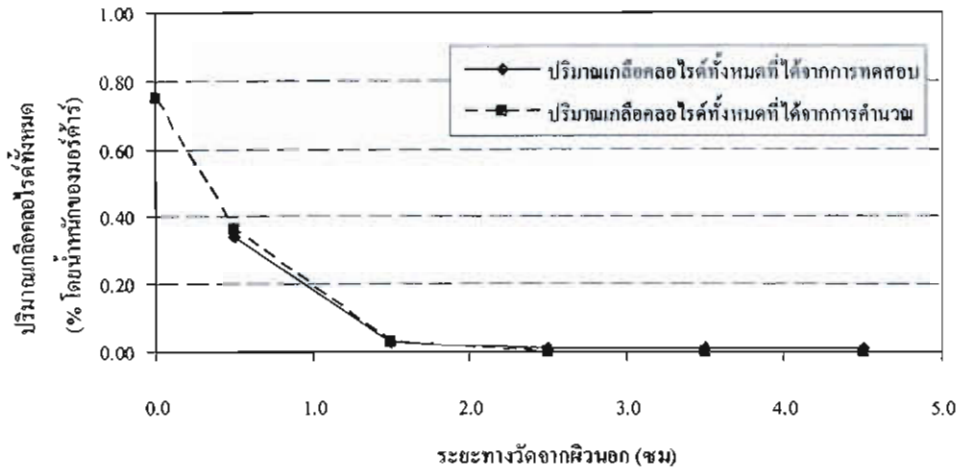
ภาพที่ 4-116 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการจากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



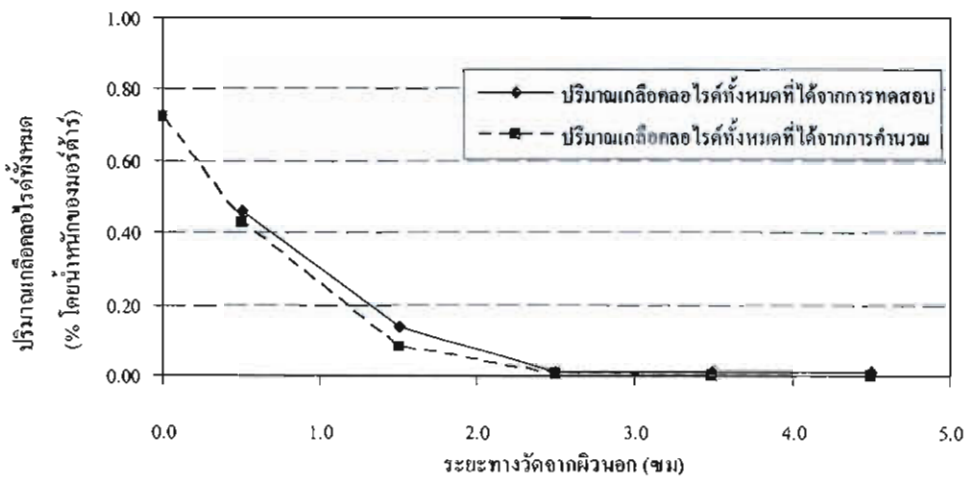
ภาพที่ 4-117 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรไฟด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการจากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรไฟด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



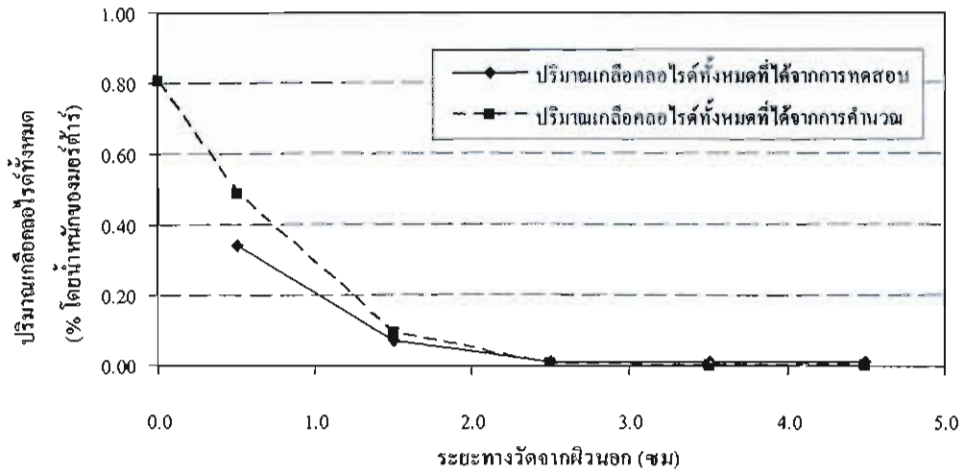
ภาพที่ 4-118 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรไฟด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักที่ได้จากการจากการทดสอบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรไฟด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



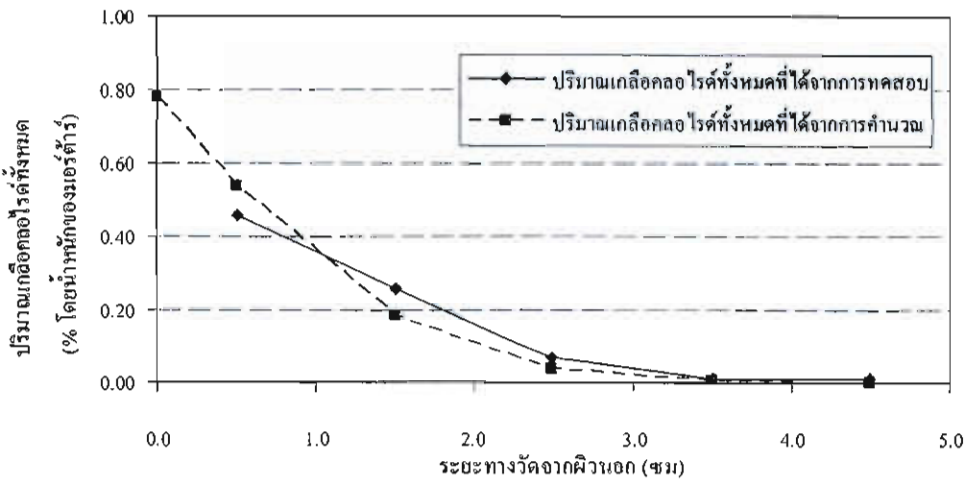
ภาพที่ 4-119 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ดีนาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



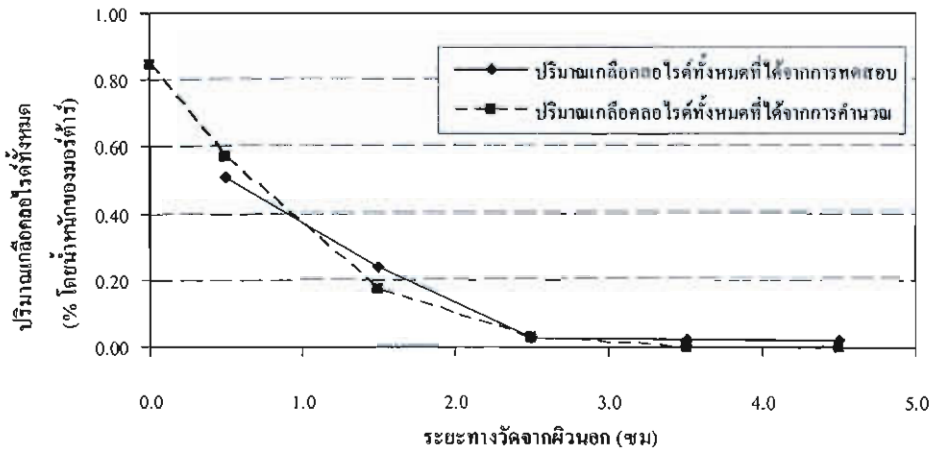
ภาพที่ 4-120 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ดีนาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



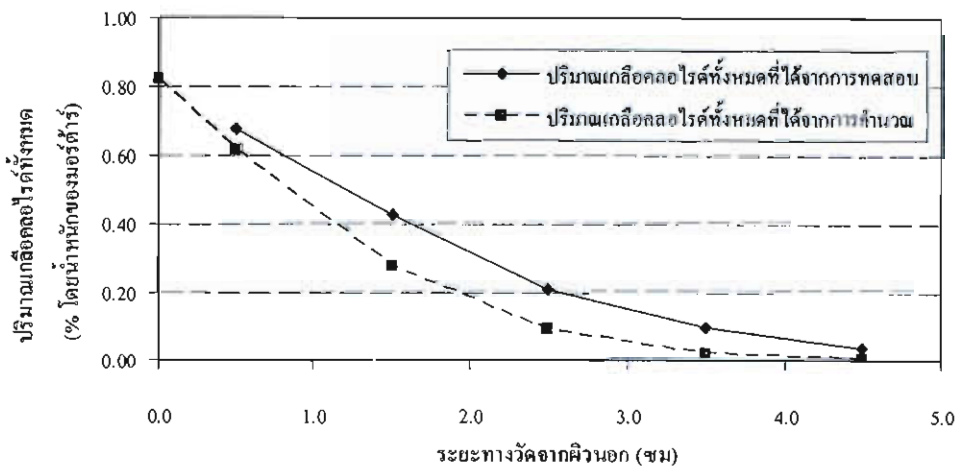
ภาพที่ 4-121 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



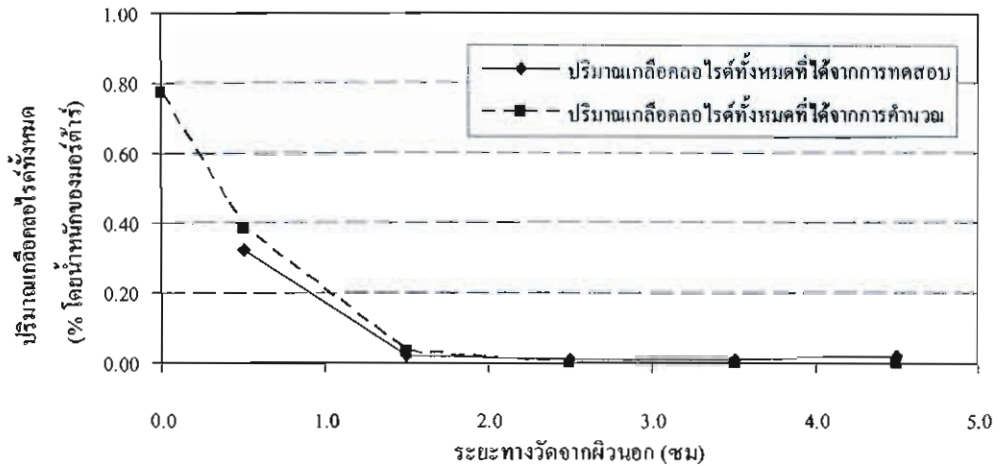
ภาพที่ 4-122 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



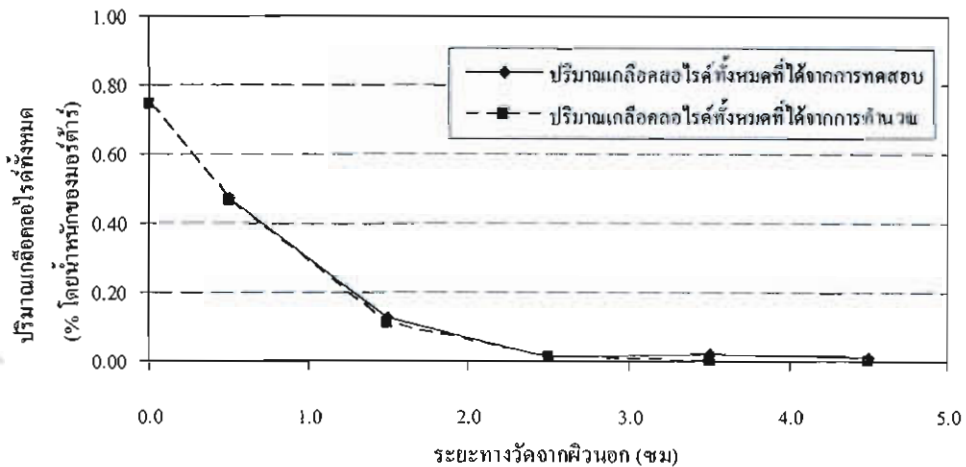
ภาพที่ 4-123 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



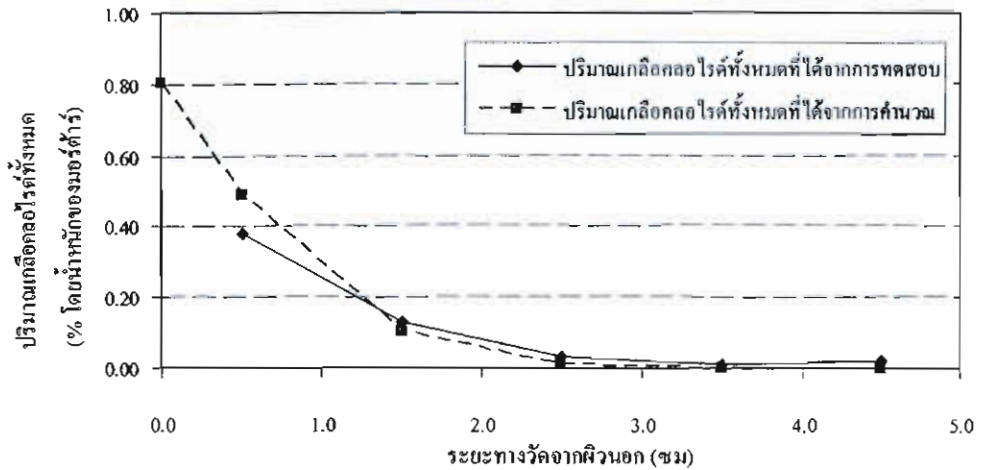
ภาพที่ 4-124 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



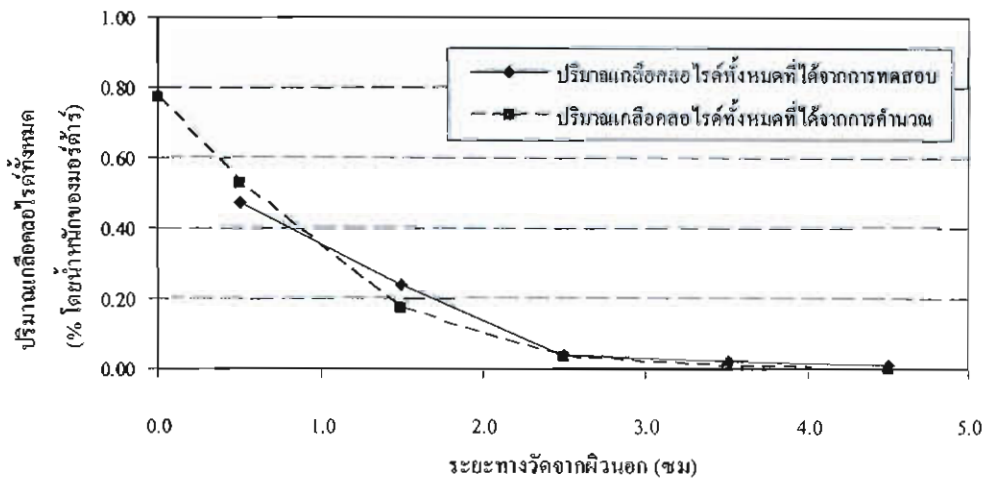
ภาพที่ 4-125 สัมประสิทธิ์การแพร่ของไวรัสในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของไวรัสที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



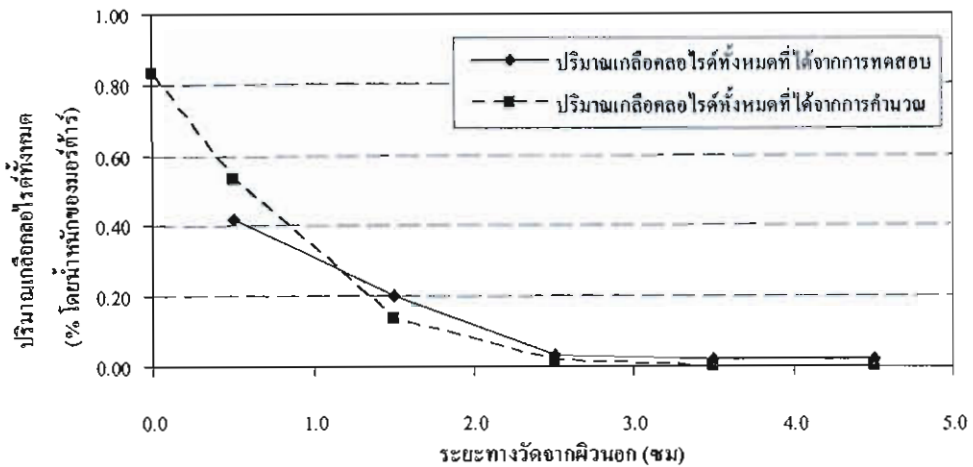
ภาพที่ 4-126 สัมประสิทธิ์การแพร่ของไวรัสในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของไวรัสที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



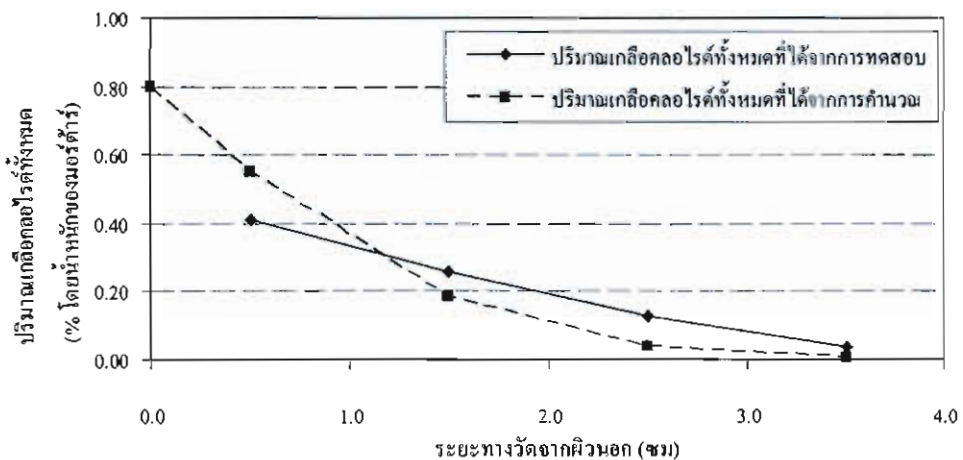
ภาพที่ 4-127 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



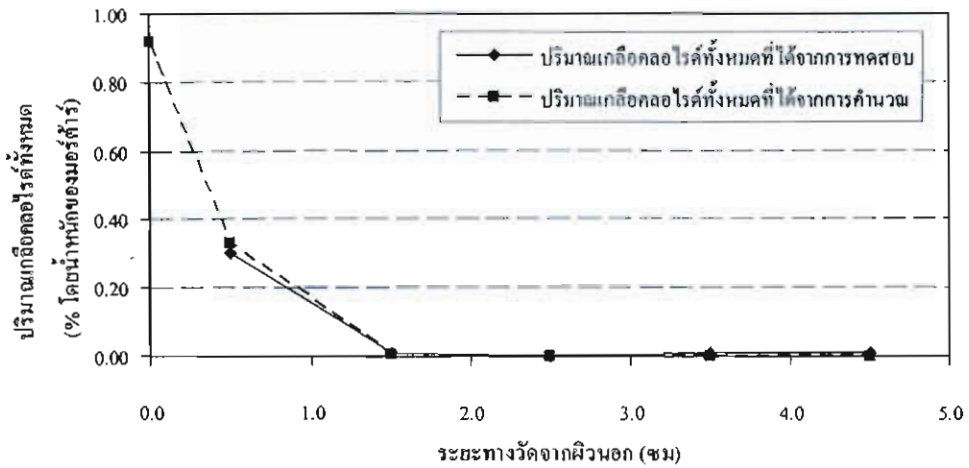
ภาพที่ 4-128 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



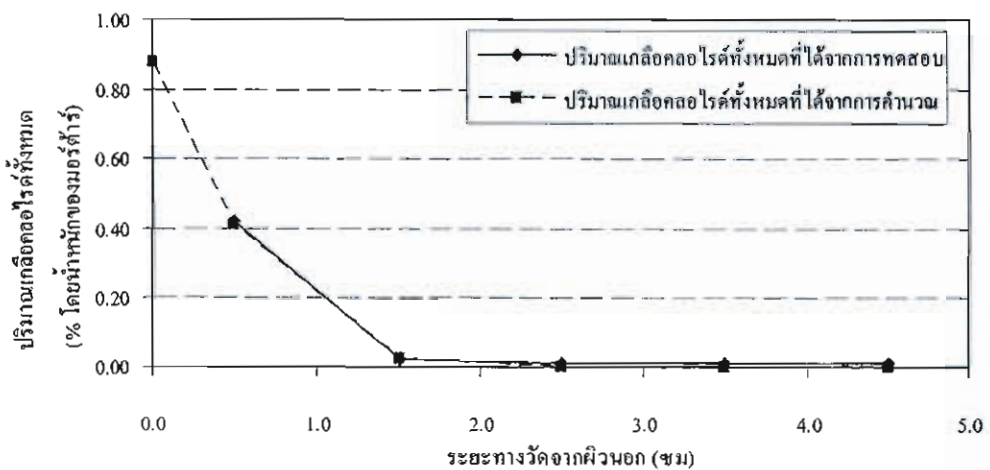
ภาพที่ 4-129 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



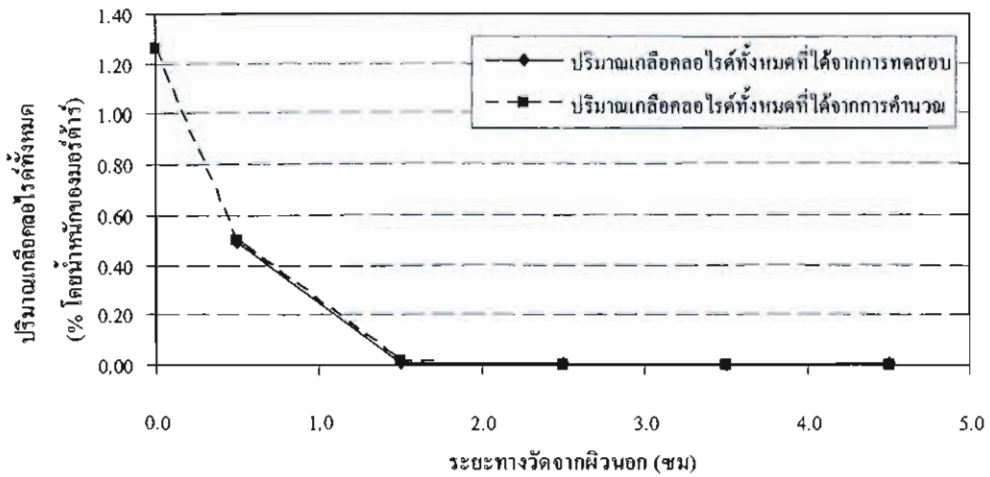
ภาพที่ 4-130 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



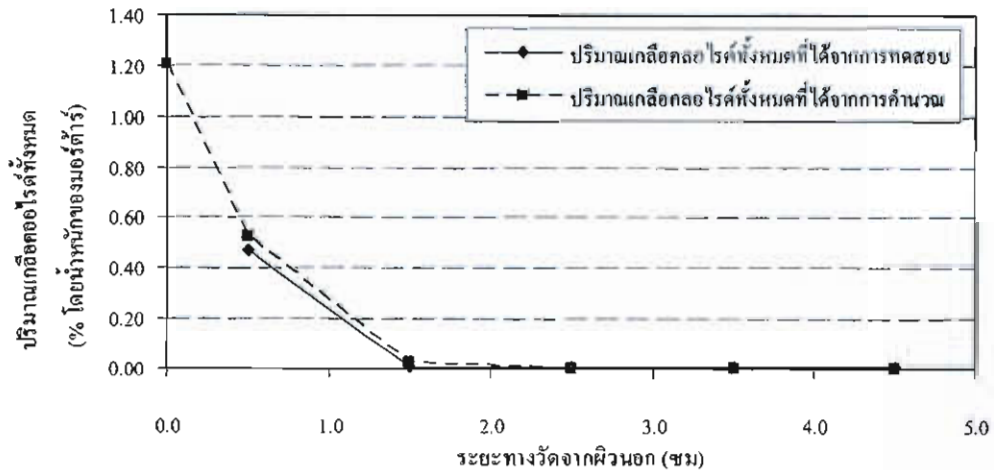
ภาพที่ 4-131 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย เท่ากับ 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



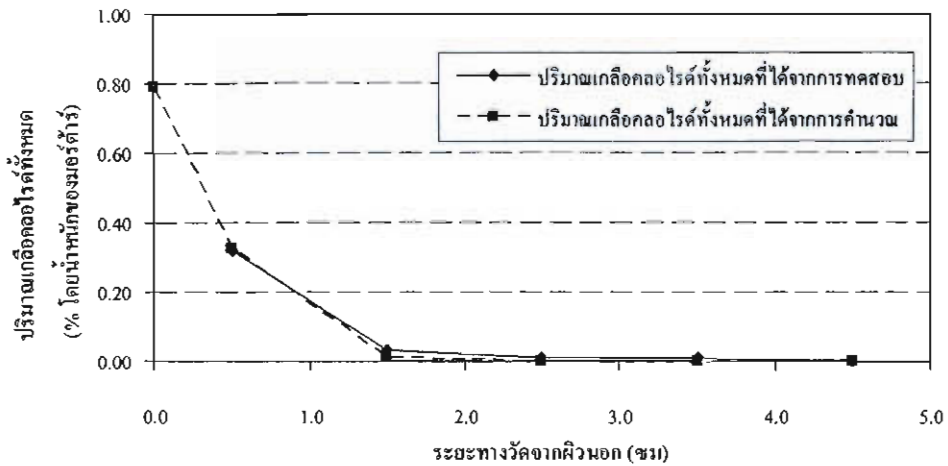
ภาพที่ 4-132 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย เท่ากับ 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



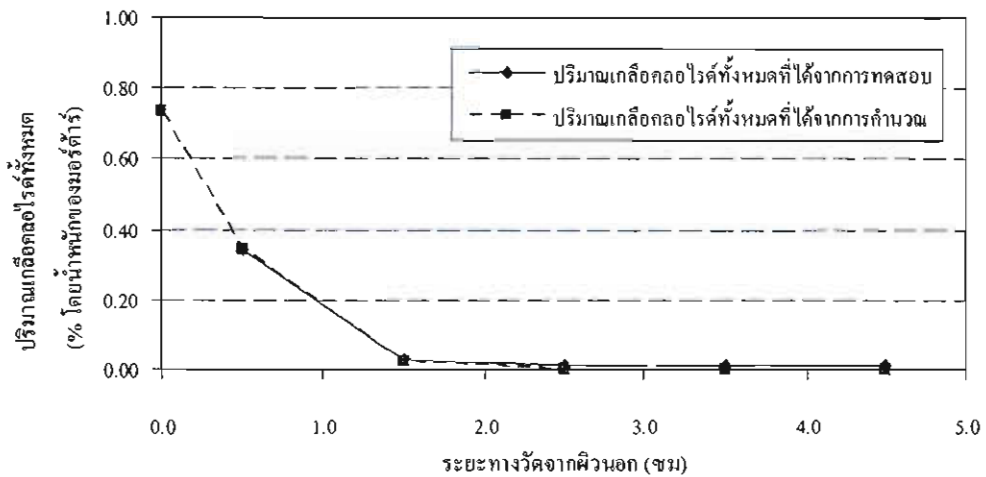
ภาพที่ 4-133 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย เท่ากับ 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



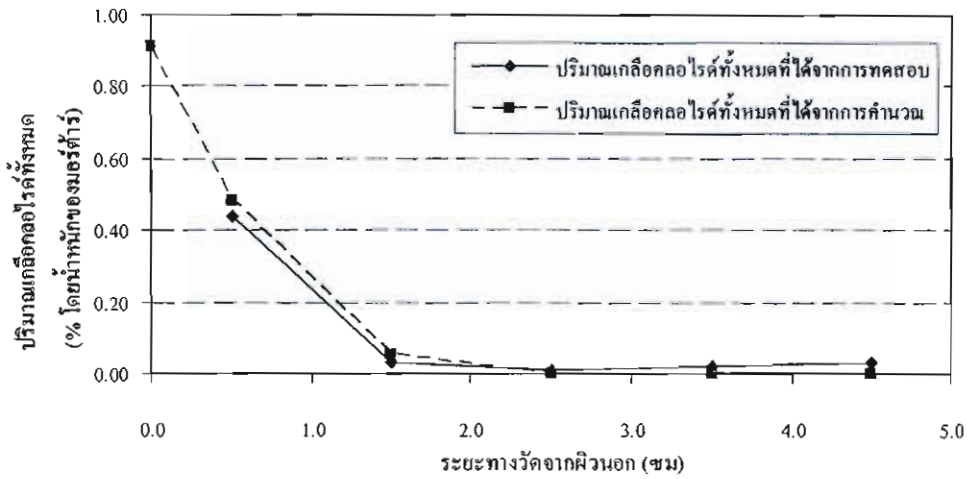
ภาพที่ 4-134 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย เท่ากับ 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



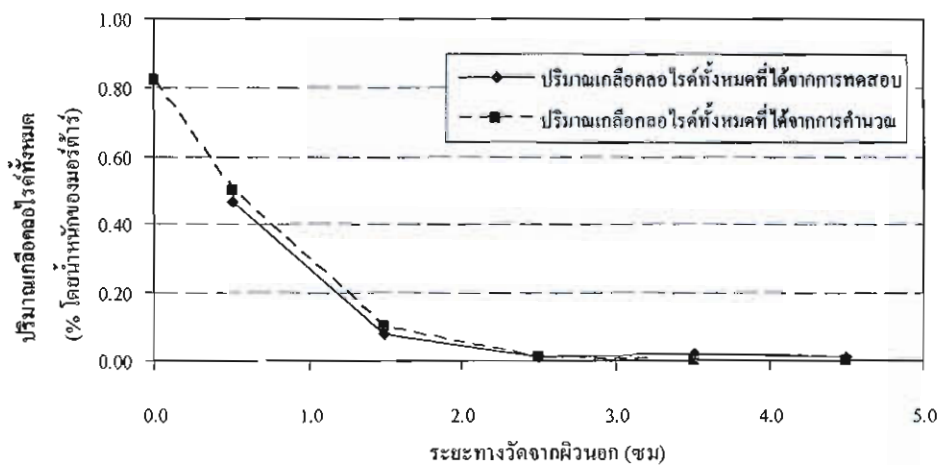
ภาพที่ 4-137 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ดาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



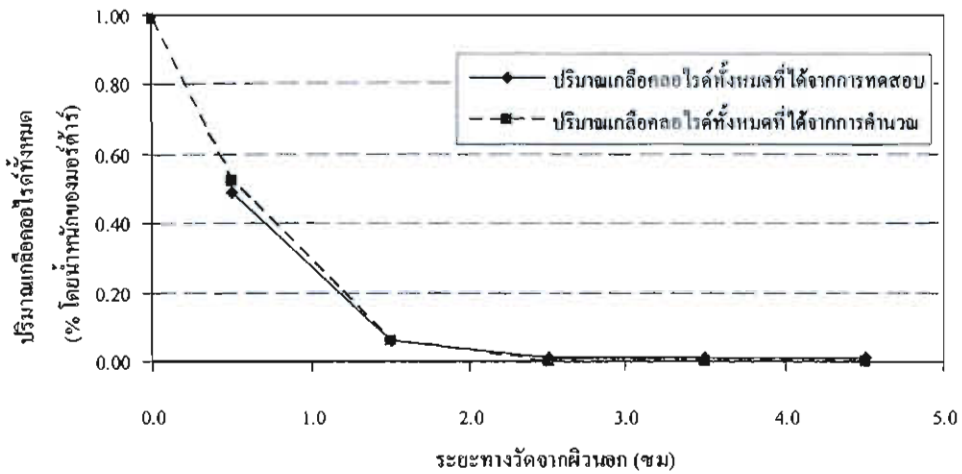
ภาพที่ 4-138 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ดาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



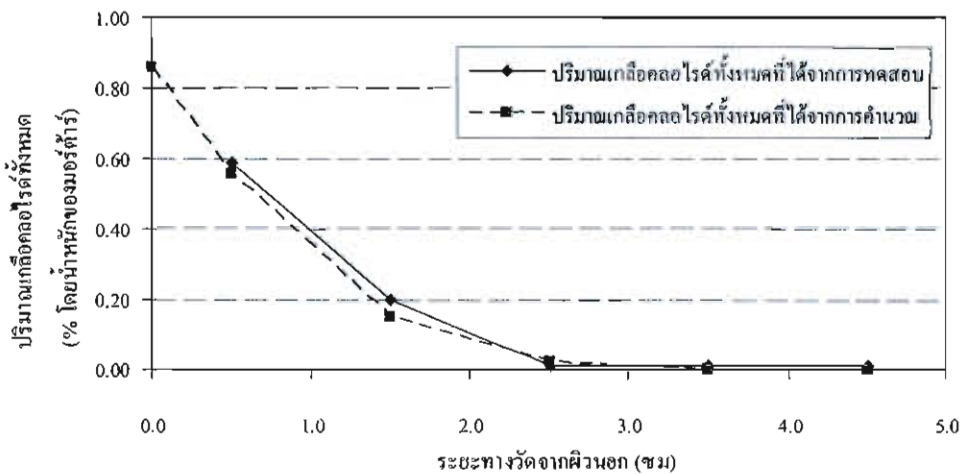
ภาพที่ 4-139 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



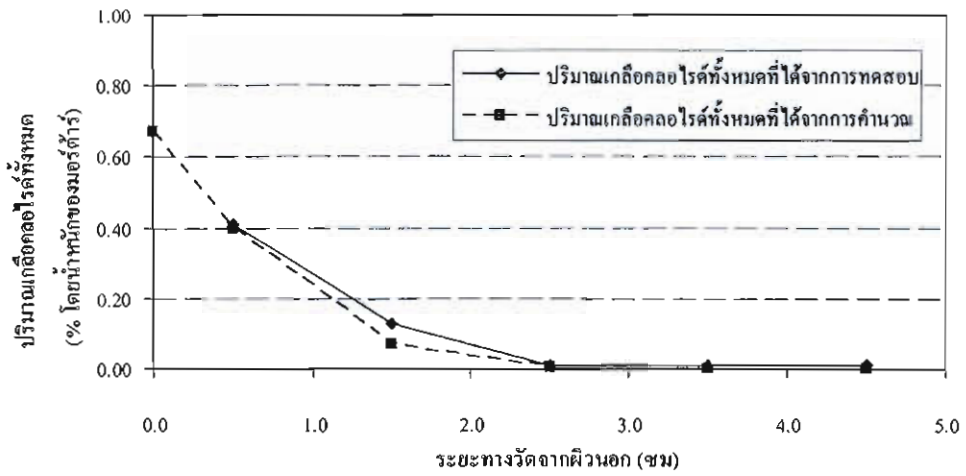
ภาพที่ 4-140 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



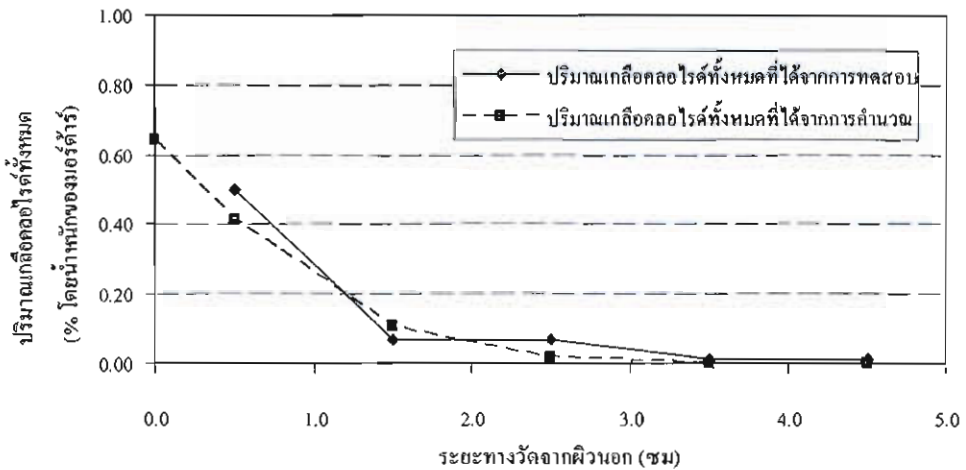
ภาพที่ 4-141 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



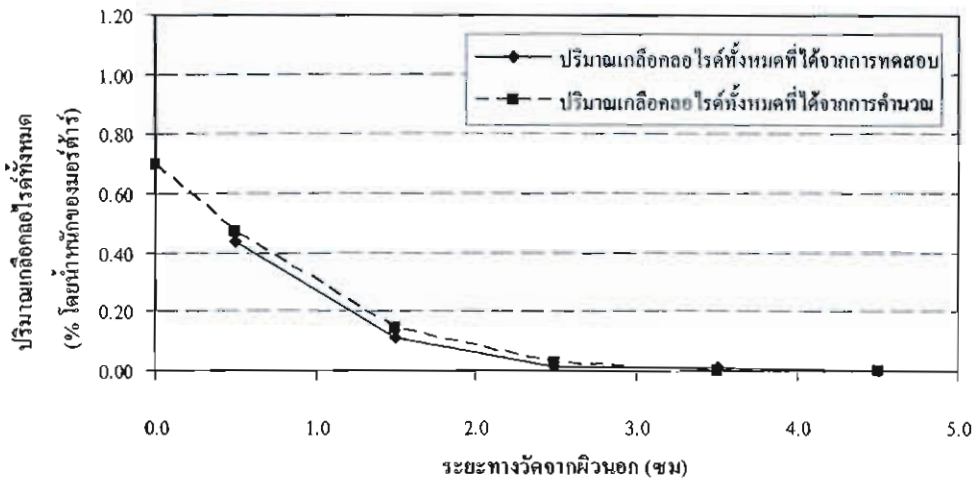
ภาพที่ 4-142 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



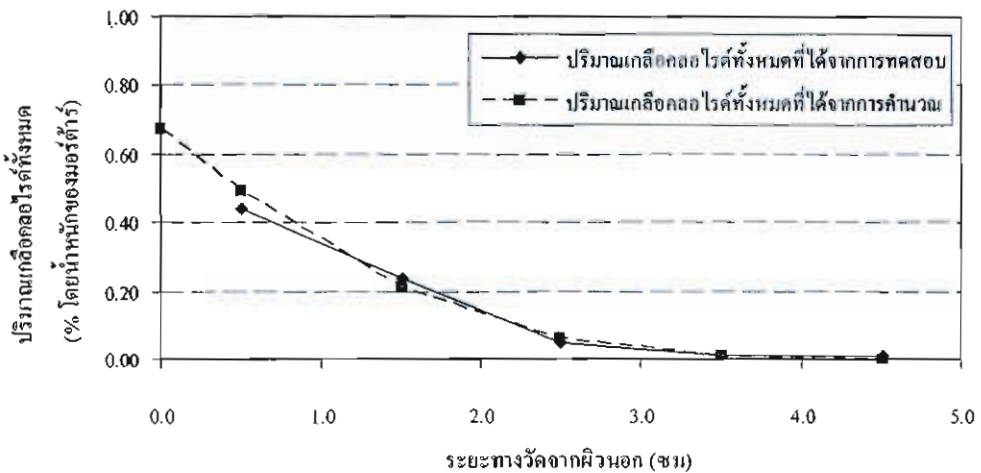
ภาพที่ 4-143 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



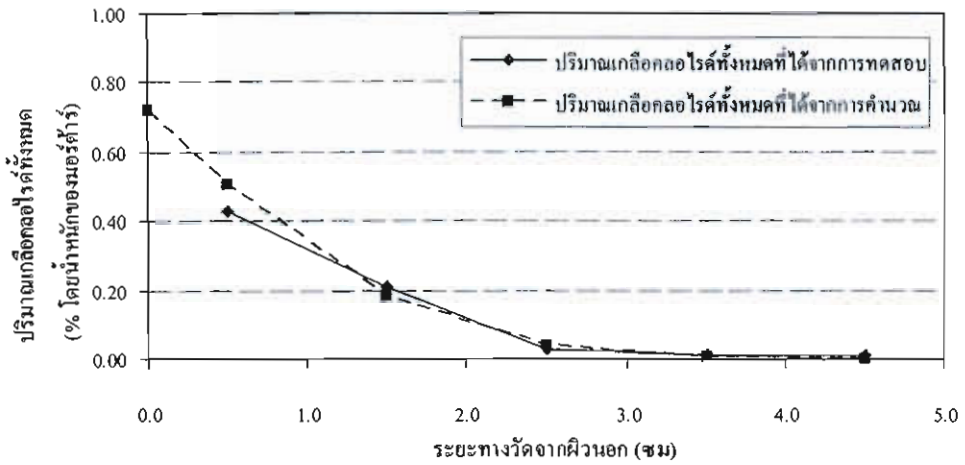
ภาพที่ 4-144 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



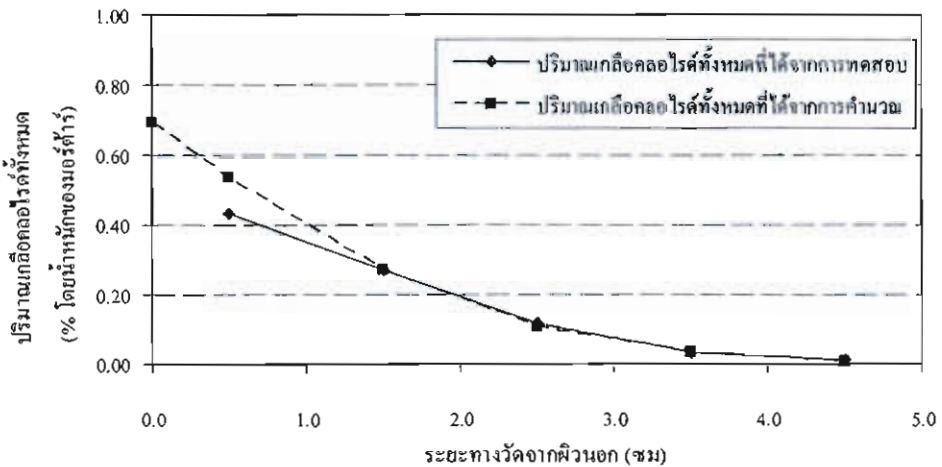
ภาพที่ 4-145 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



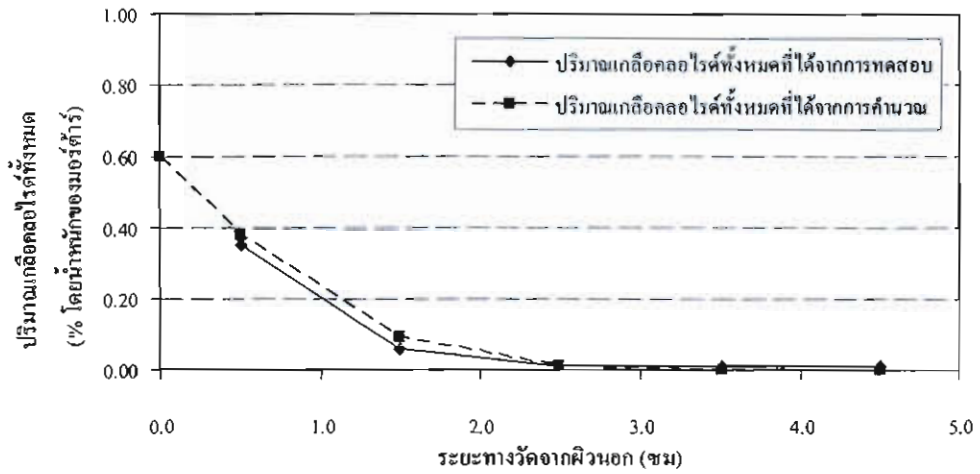
ภาพที่ 4-146 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



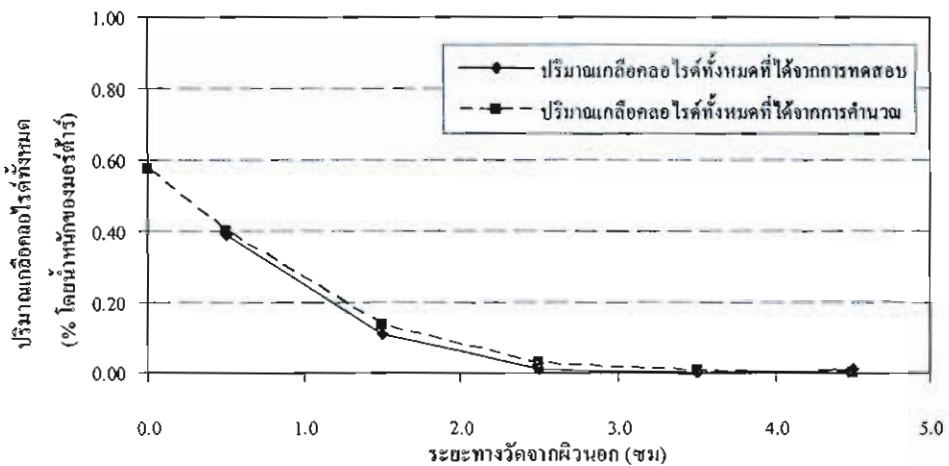
ภาพที่ 4-147 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



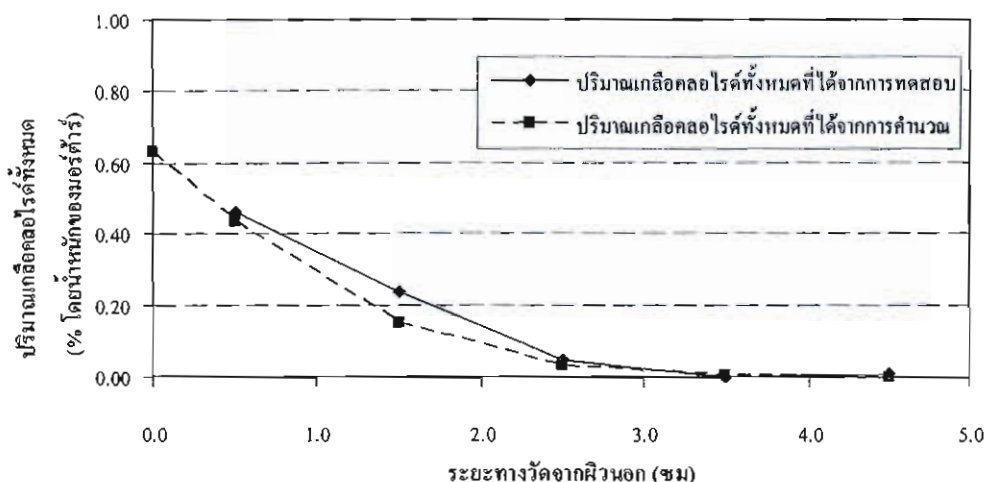
ภาพที่ 4-148 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



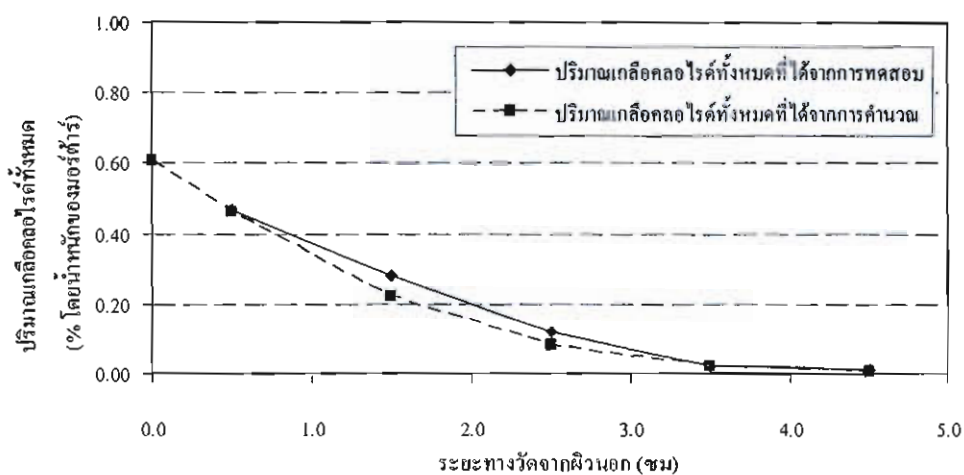
ภาพที่ 4-149 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



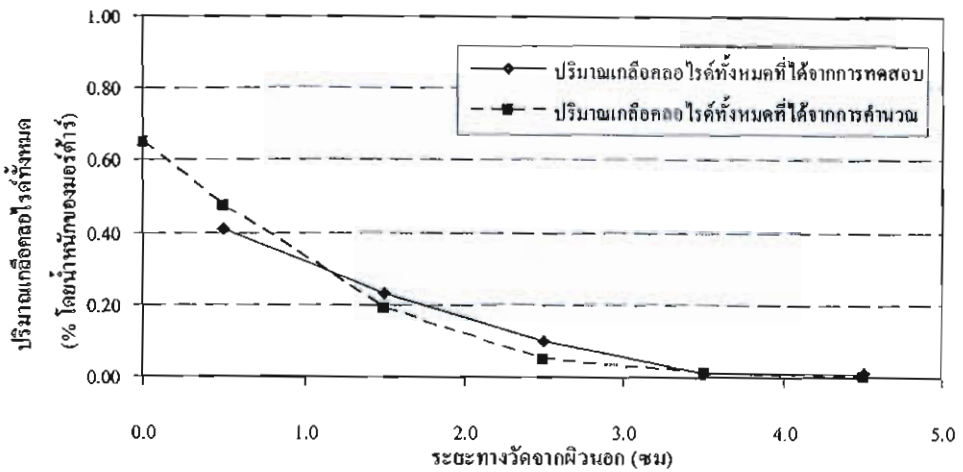
ภาพที่ 4-150 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



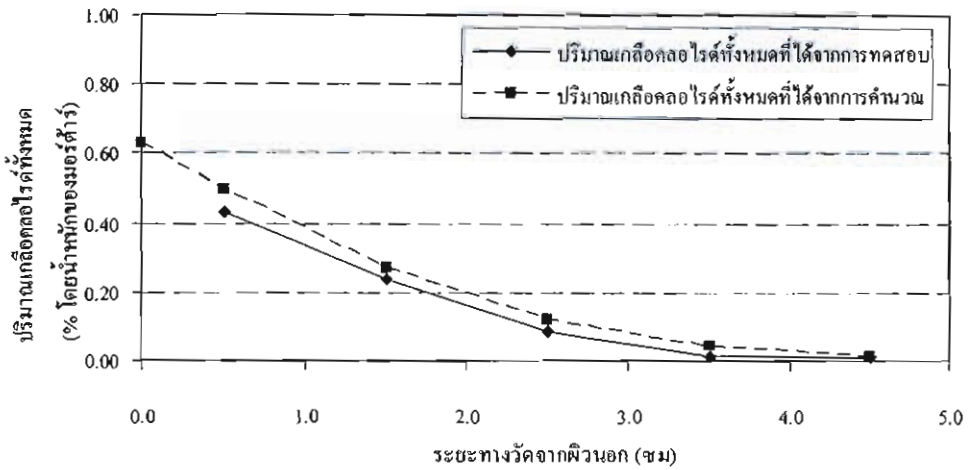
ภาพที่ 4-151 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



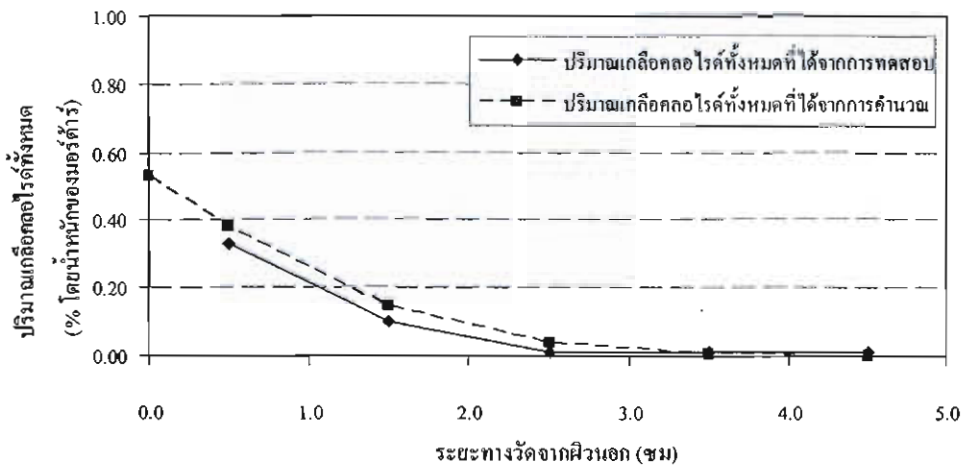
ภาพที่ 4-152 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



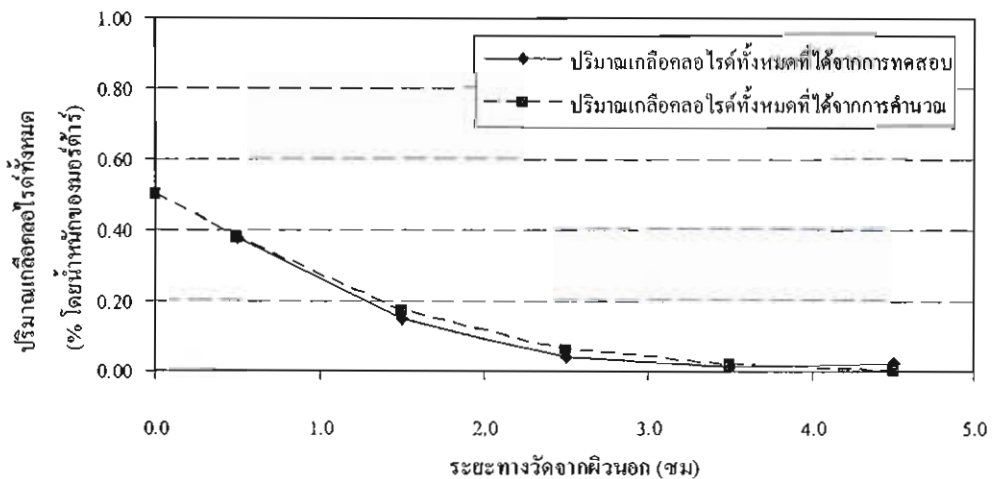
ภาพที่ 4-153 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



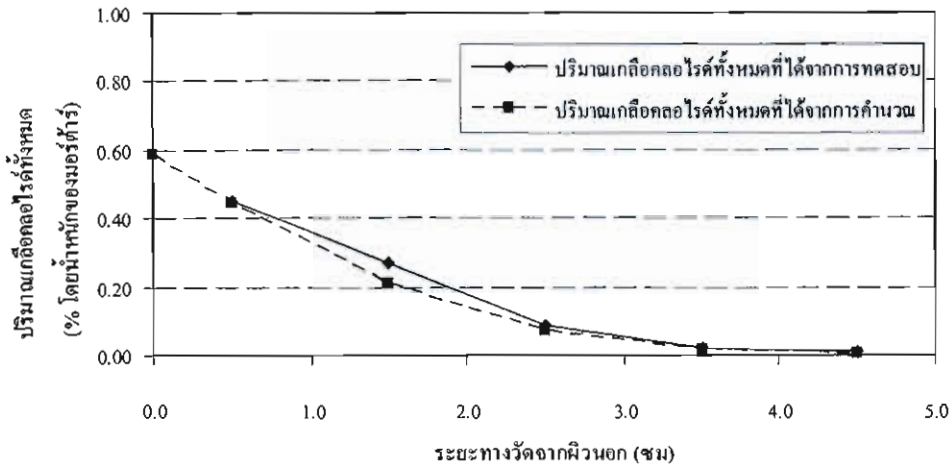
ภาพที่ 4-154 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



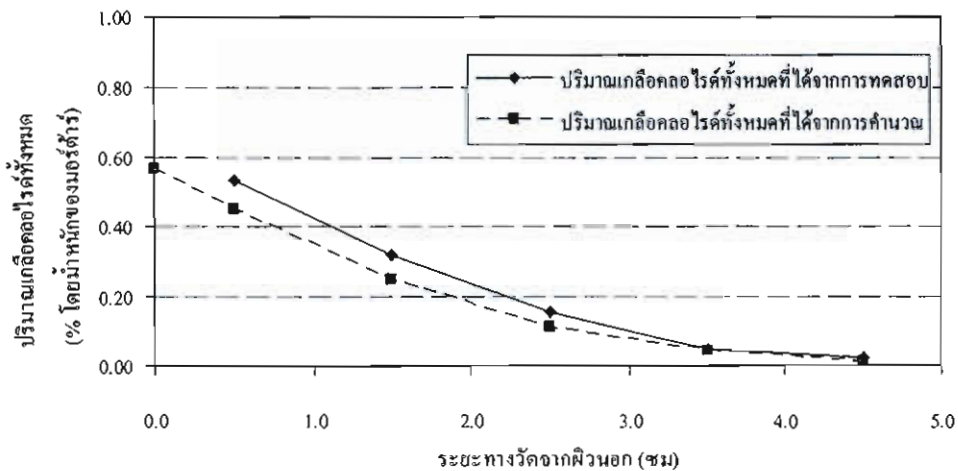
ภาพที่ 4-155 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



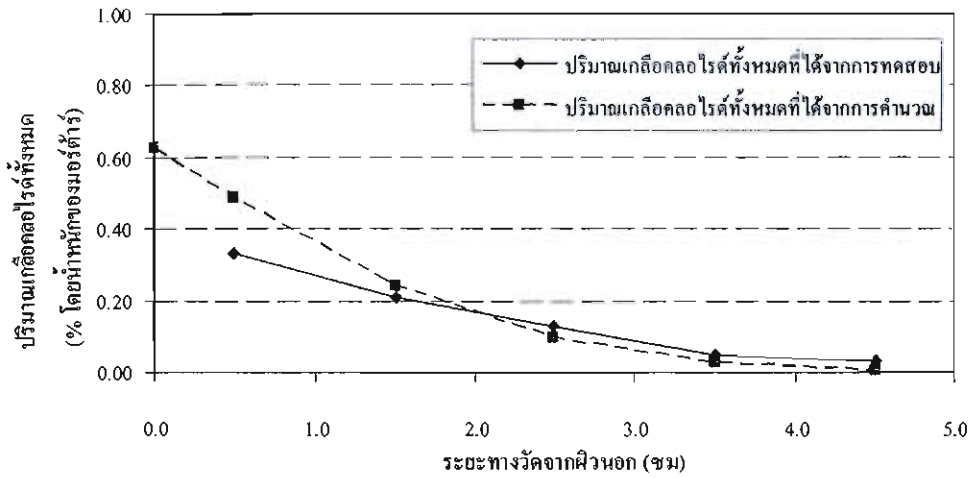
ภาพที่ 4-156 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



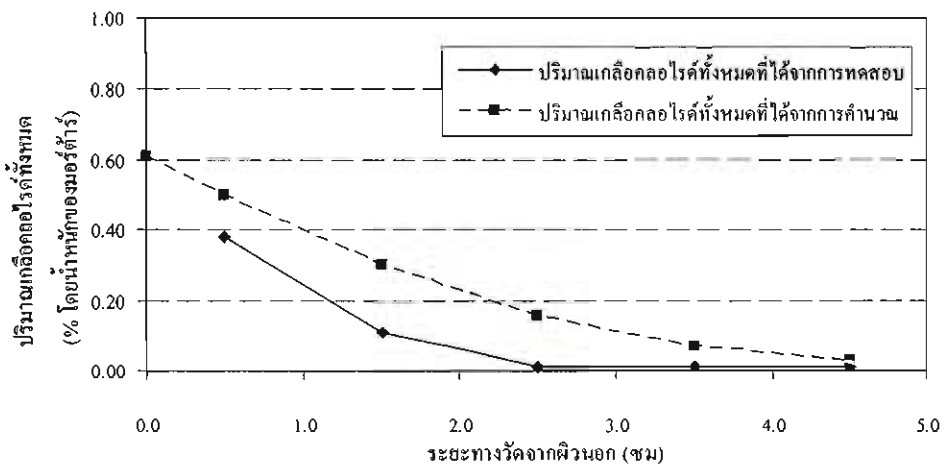
ภาพที่ 4-157 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วย ฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการ ที่พัฒนาขึ้น



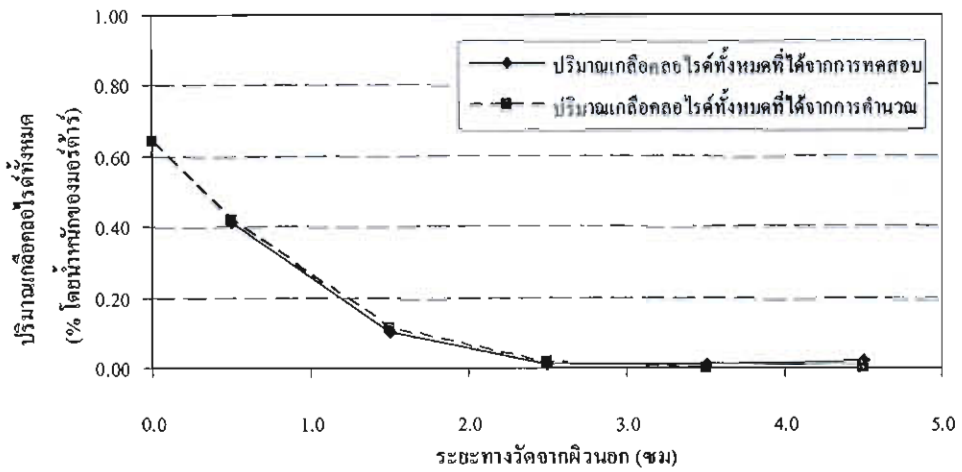
ภาพที่ 4-158 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วย ฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการ ที่พัฒนาขึ้น



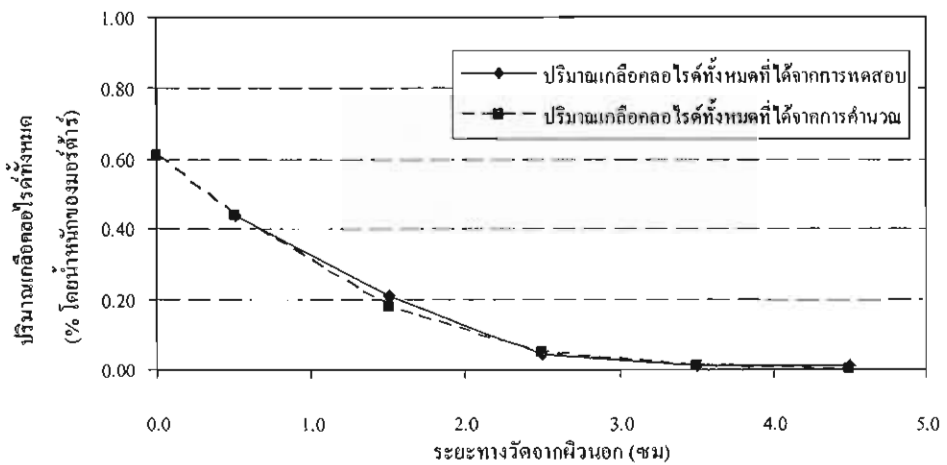
ภาพที่ 4-159 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



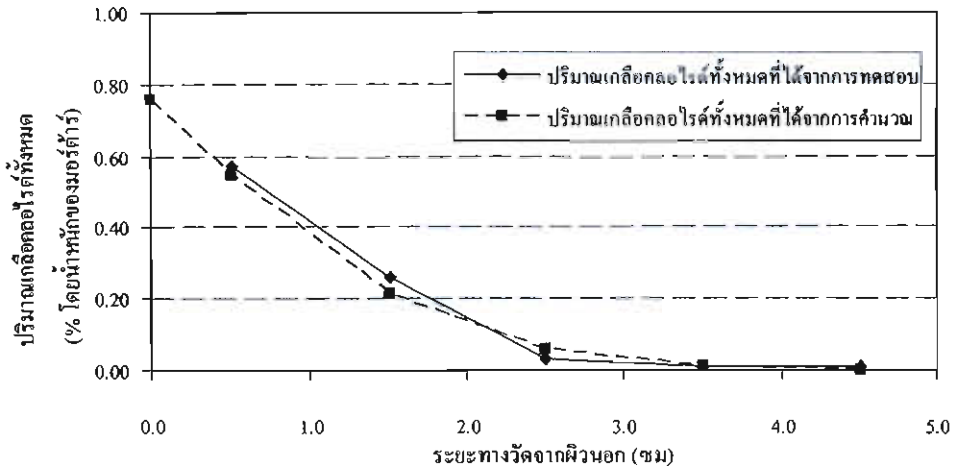
ภาพที่ 4-160 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



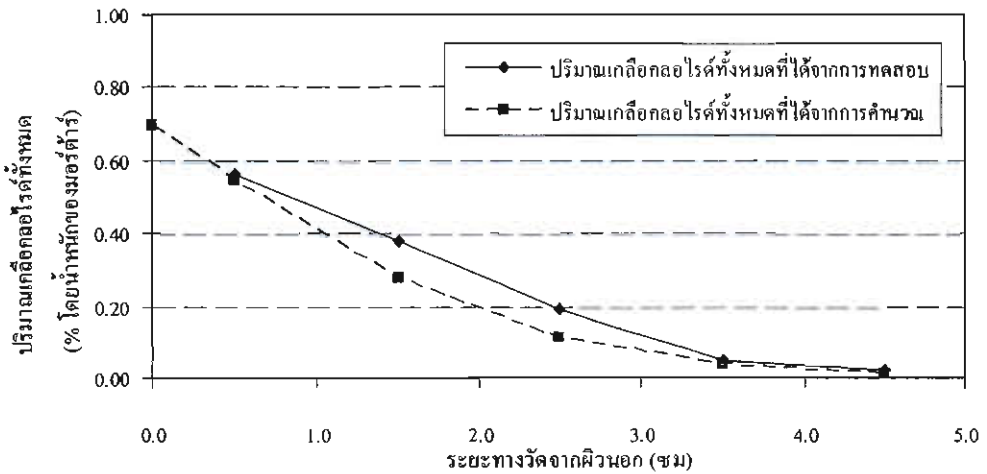
ภาพที่ 4-161 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



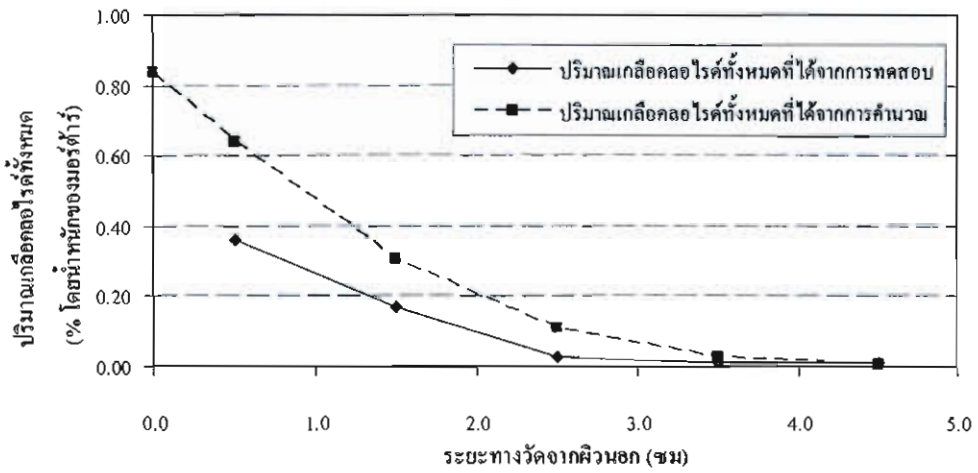
ภาพที่ 4-162 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



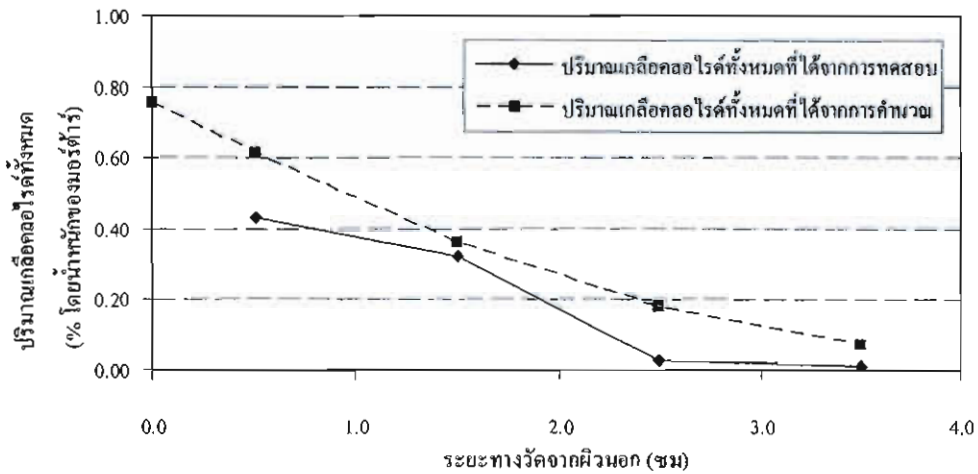
ภาพที่ 4-163 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



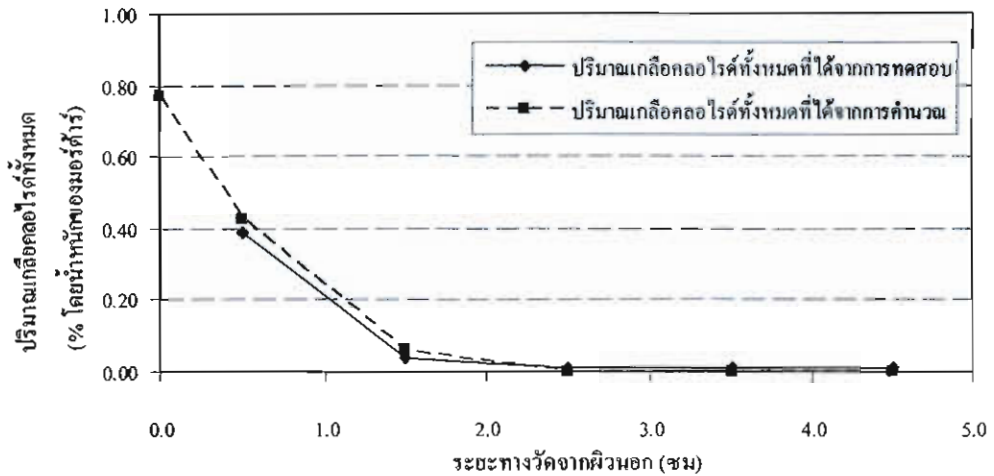
ภาพที่ 4-164 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



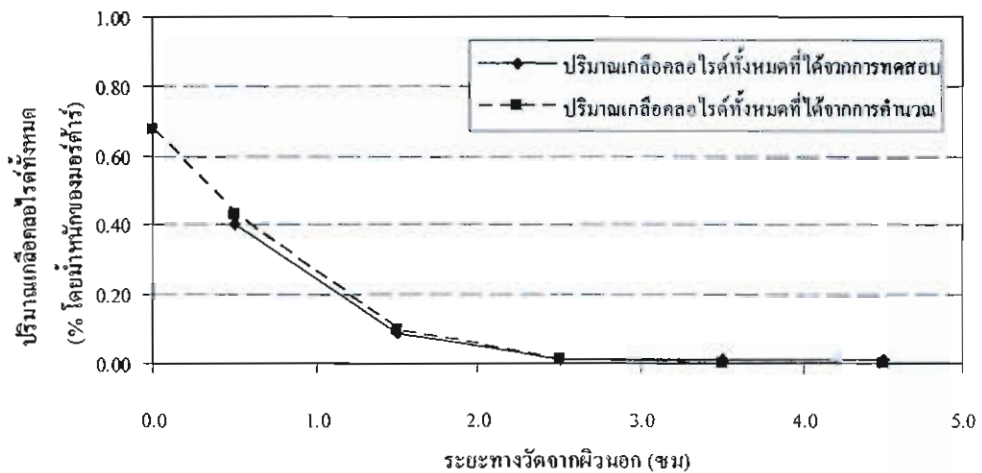
ภาพที่ 4-165 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ตาร์ดที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



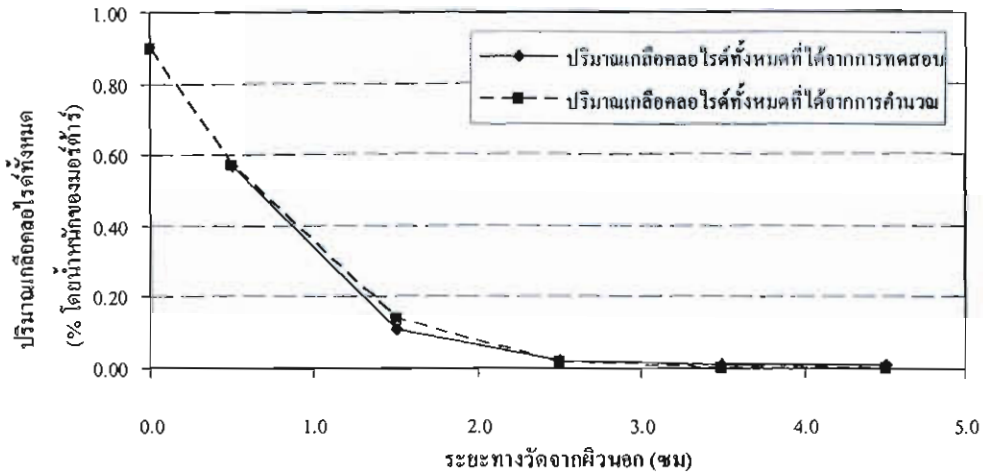
ภาพที่ 4-166 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ตาร์ดที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



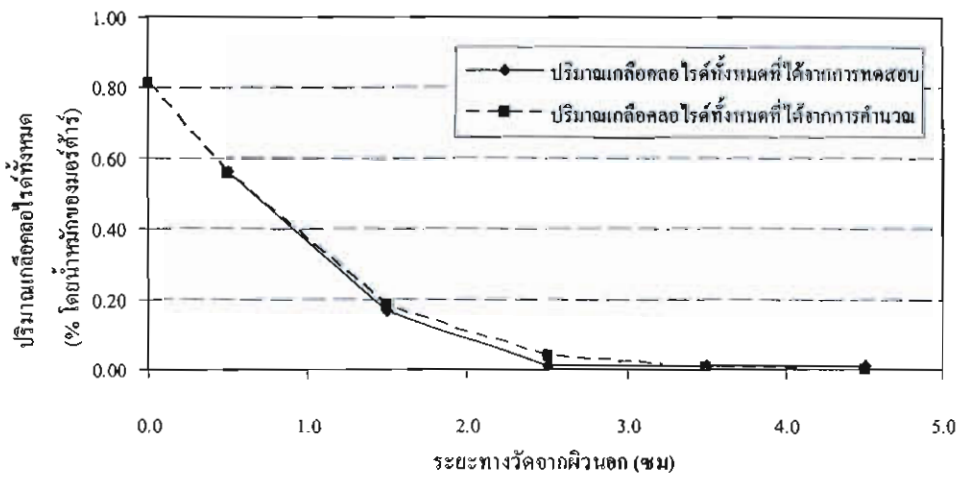
ภาพที่ 4-167 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



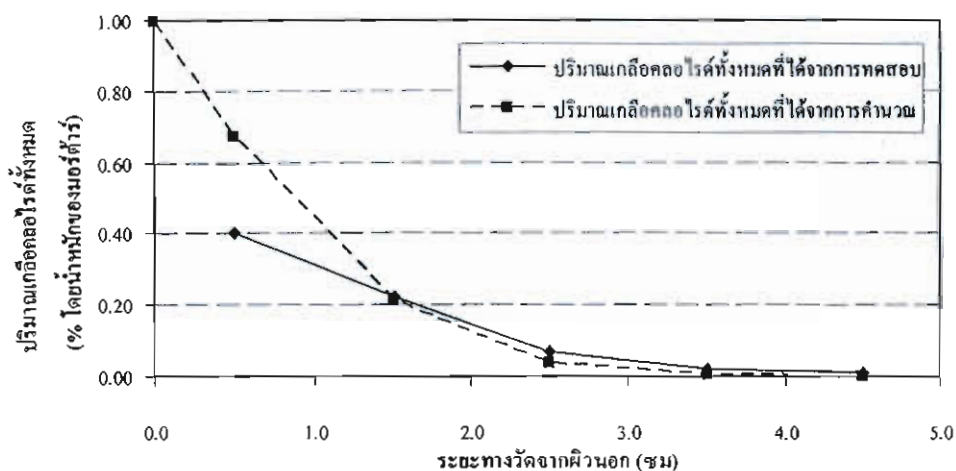
ภาพที่ 4-168 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



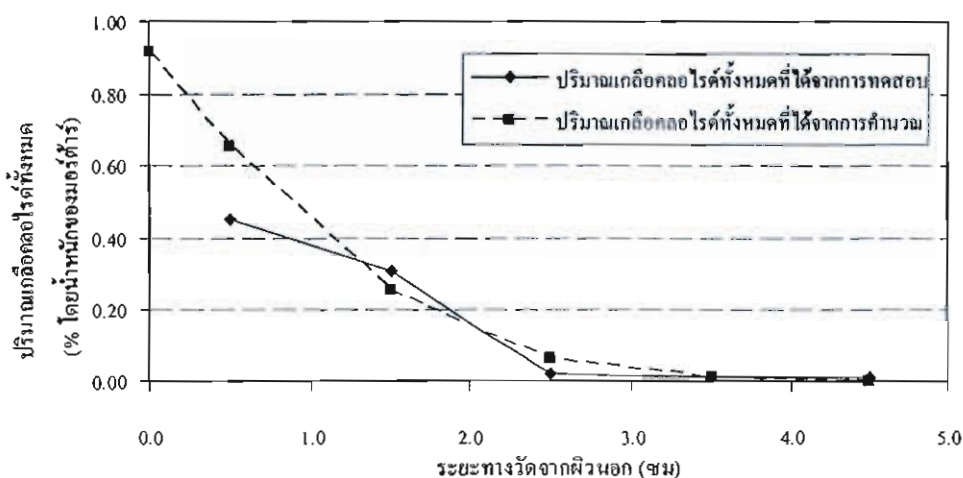
ภาพที่ 4-169 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



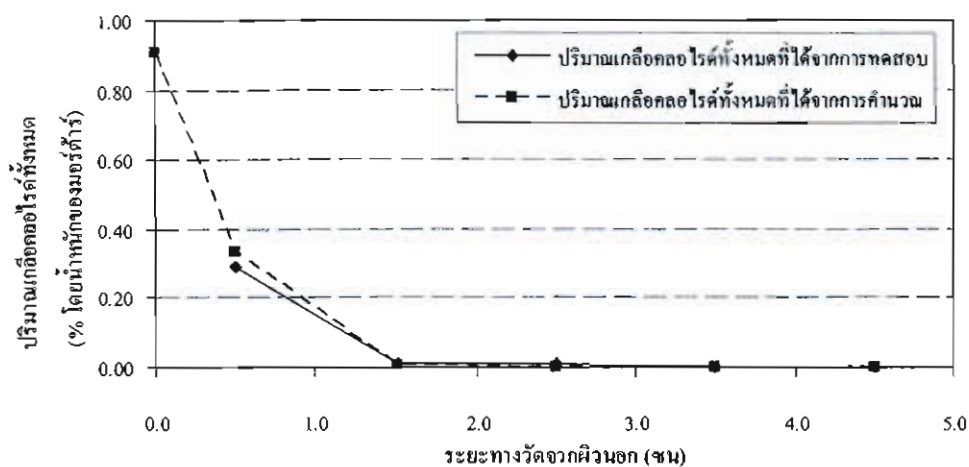
ภาพที่ 4-170 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



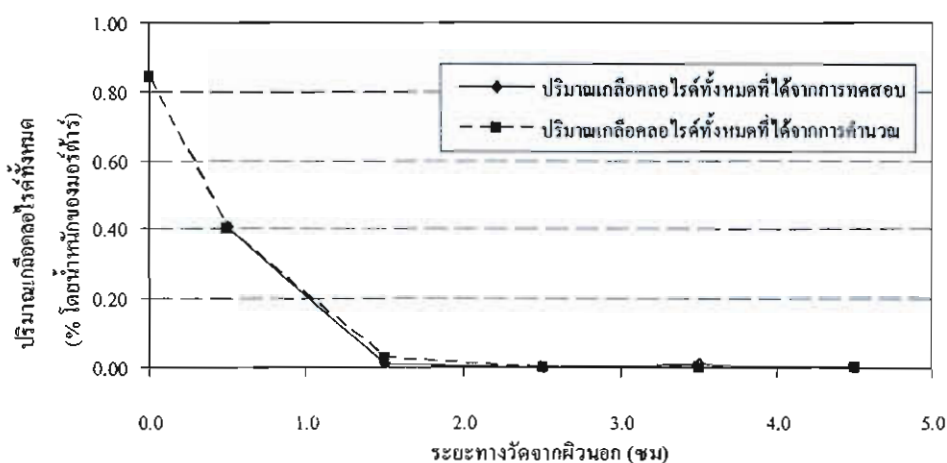
ภาพที่ 4-171 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์งาดำที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมแฉ่ำลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแฉ่ำลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



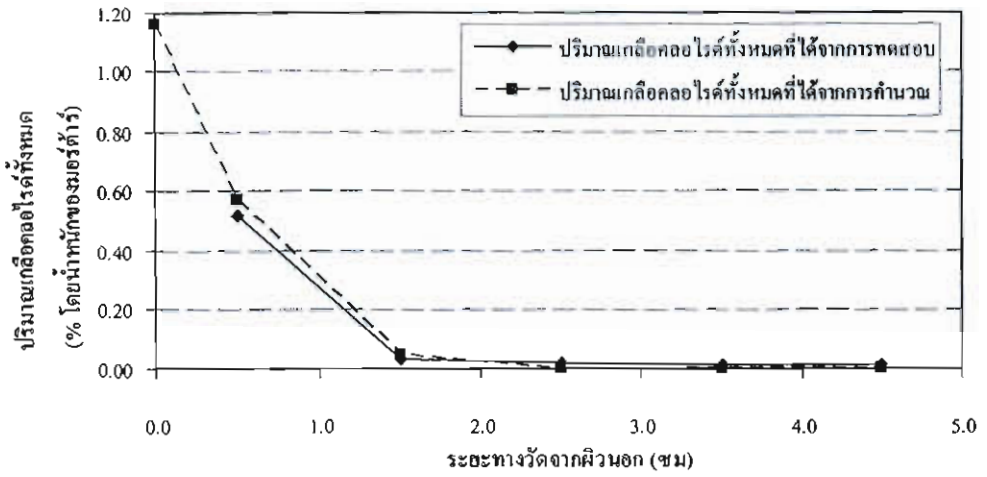
ภาพที่ 4-172 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์งาดำที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมแฉ่ำลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแฉ่ำลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.15 และ 0.15 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



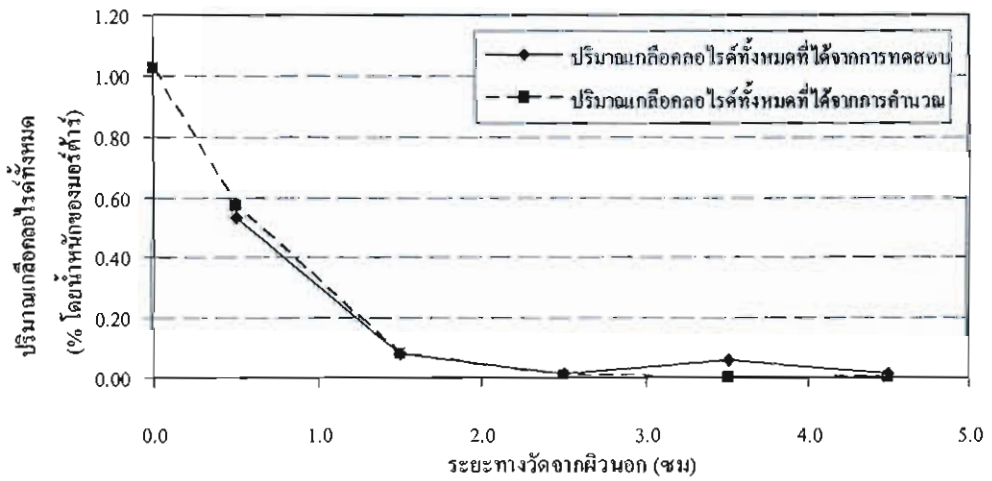
ภาพที่ 4-173 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



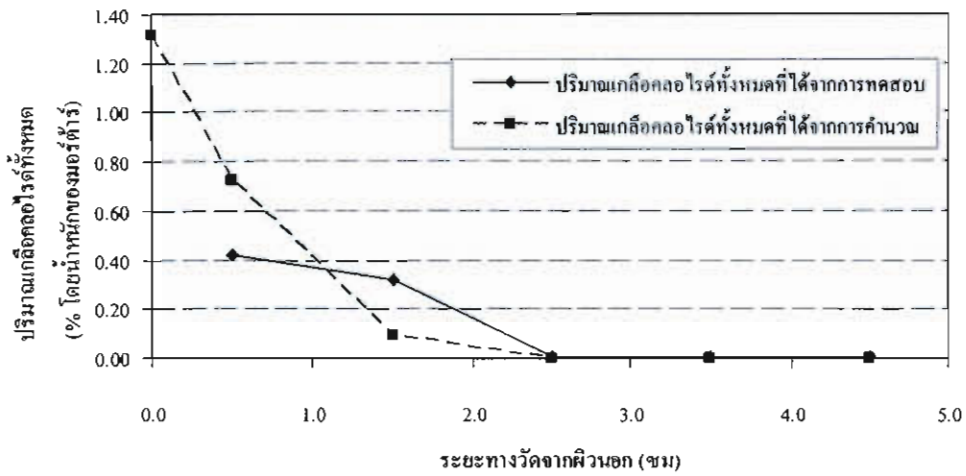
ภาพที่ 4-174 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



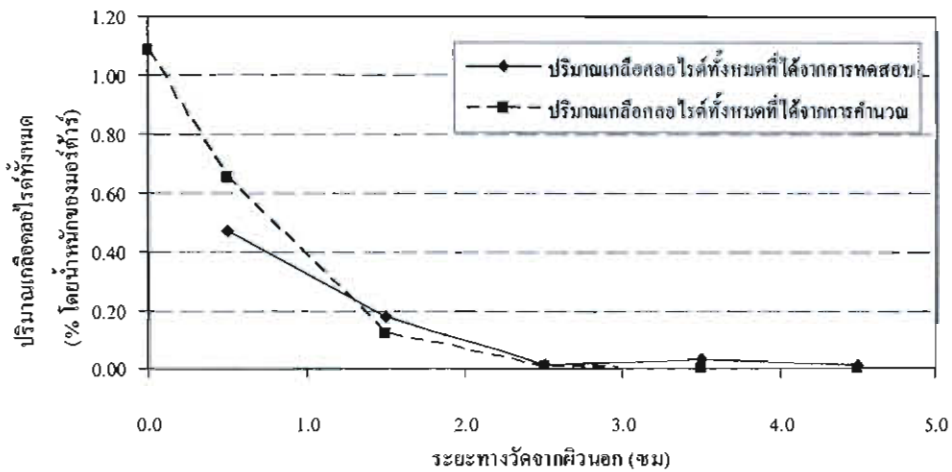
ภาพที่ 4-175 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ง่าที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 4-176 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ในมอร์ง่าที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 91 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 4-177 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยสมการที่พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 4-178 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 182 วันเทียบกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์ที่ผสม
เถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด (Binary binder) พบว่า ส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอย
แทนที่วัสดุประสานด้วยอัตราส่วน 0.30 ทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้น ส่วนผสมที่
ใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานด้วยอัตราส่วน 0.05, 0.15 และ 0.25 ทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทาน
คลอไรด์น้อยลงตามอัตราส่วนผงหินปูนที่เพิ่มขึ้น และส่วนผสมที่ใช้สารขยายตัวแทนที่วัสดุ
ประสานด้วยอัตราส่วน 0.10 ทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้น

2. มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานสามชนิด (Ternary binder) พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานด้วย
อัตราส่วน 0.15 : 0.15 (C1F15L15) มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุ
ประสานหลัก ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานด้วยอัตราส่วน 0.25 : 0.05 (C1F25L5)
และมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมสารขยายตัวและ
เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานด้วยอัตราส่วน 0.10 : 0.30 (C1E10F30) มีความต้านทานคลอไรด์
มากกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน

3. มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ผสมเถ้าลอย
แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.30 (C1F30) เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานคอนกรีต
ที่ต้องการความต้านทานคลอไรด์

4. มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน มีความต้านทาน
คลอไรด์ที่ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน สำหรับมอร์ตาร์
ที่ใช้น้ำต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.40 มีความต้านทานคลอไรด์ที่สูงกว่า มอร์ตาร์ที่ใช้น้ำต่อวัสดุ
ประสานที่อัตราส่วน 0.50 และเมื่อระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์เพิ่มขึ้น การแทรกซึมของคลอไรด์ก็
เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้น ทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทานคลอไรด์
ดีขึ้น การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่มอร์ตาร์ทำได้ยากมากขึ้น

5. วิธีการทดสอบการแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test) วิธีการแทรกซึมคลอไรด์แบบ
เร่ง (RCPT) และวิธีการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (RMT) ให้ผลทดสอบที่สอดคล้องไปในทิศทาง
เดียวกัน แต่การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) เป็นวิธีทดสอบที่ไม่เหมาะสมสำหรับงาน
ทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ เนื่องจากให้ผลทดสอบไม่สอดคล้องกับวิธีอื่น ๆ

6. การทดสอบการแพร่ทั้งหมด (Bulk diffusion test) เป็นวิธีการทดสอบแบบระยะยาวที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการรายละเอียดการแทรกซึมคลอไรด์ เช่น สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์หาอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ แต่มีข้อเสียคือ ใช้เวลาการทดสอบนาน สำหรับวิธีทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT) เป็นวิธีการทดสอบแบบระยะสั้นที่มีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบที่ต้องการทราบว่าคอนกรีตมีความต้านทานคลอไรด์ตามเกณฑ์ข้อกำหนดคุณสมบัติหรือไม่ เนื่องจากใช้เวลาทดสอบเพียงแค่ 6 ชม. และใช้ผลทดสอบเปรียบเทียบกับตารางตามมาตรฐาน ASTM C1202 สำหรับการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (RMT) เป็นวิธีทดสอบที่ให้ผลการทดสอบแนวโน้มน่าเชื่อถือกับผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT) แต่เป็นวิธีทดสอบที่ยังไม่แพร่หลายในประเทศไทย และยังไม่มีการกำหนดผลทดสอบที่เป็นมาตรฐาน แต่เนื่องจากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ที่ใช้เวลาเพียง 8 ชม. จึงนิยมนำมาเป็นวิธีทดสอบในงานวิจัยเพื่อใช้ตรวจสอบผลทดสอบความต้านทานคลอไรด์ด้วยวิธีอื่น ๆ

7. เมื่อมอร์ตาร์เผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์เป็นระยะเวลานานขึ้นพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและการแทรกซึมของคลอไรด์ภายในมอร์ตาร์มีปริมาณมากขึ้น แต่สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์มีค่าลดลง โดยปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายปัจจัย ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เสนอสมการเบื้องต้นสำหรับคำนวณเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ

8. แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้า และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์สามารถใช้ทำนายการกระจายตัวของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในมอร์ตาร์ได้

บรรณานุกรม

- เครื่องซีเมนต์ไทย. (2548). *ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน*. ม.ป.ท.
- ทวีชัย สำราญวานิช. (2550). *เอกสารประกอบการสอนวิชาคอนกรีต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา*.
- ปิติ เสรมธากุล, บรรณิศร ฉัตรวิระ, และสมนึก ตั้งเต็มศิริกุล (2543). การใช้ประโยชน์จากผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอชโซลาน. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6*, 10-12 พฤษภาคม 2543, MAT41-46.
- ปรีชญา จูเหล็ก, ทวีชัย สำราญวานิช, เฉลิมชัย วัฒนล้ำเลิศ, และสมนึก ตั้งเต็มศิริกุล (2551). ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้า และการแทรกซึมคลอไรด์ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลไทย. *การประชุมเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9*, มหาวิทยาลัยบูรพา, 14-15 มีนาคม 2551.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2548). *ถั่วลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง)*.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2552). *ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีตวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์*. (2543). ความคงทนของคอนกรีต. กรุงเทพฯ: บริษัท จุดทองจำกัด.
- เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต, ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บวร, วสุ วิทยาเขตปภา และทวีชัย สำราญวานิช (2551). ความสามารถกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหินปูน. *9th National Grad Research Conference*, 14-15 มีนาคม 2551, มหาวิทยาลัยบูรพา, บางแสน, ชลบุรี.
- AASHTO T259-80, Standard Method for Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration, *AASHTO Standard*.
- AASHTO T260-94, Standard Method for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete Raw Materials, *AASHTO Standard*.
- AASHTO T277-93, Electrical Indication of Concrete's Ability to resist Chloride, *AASHTO Standard*.
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., & Castro, P. (2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. In *Cement and Concrete Research*, 30, 1047-1055.

- Andrade, C. (1993). Calculation of chloride diffusion coefficient in concrete from ionic migration Measurements. In *Cement and Concrete Research*, 23, 724-742.
- Andrade, C., Alonso, C., & Goni, S. (1993). Possibilities for the electrical resistivity to universally characterize mass transport in concrete. In *Concrete2000: Economic and Durable Construction Through Excellence*, (eds. R.K. Dhir and M.R.Jones), 2, E & FN Spon, Cambridge, 1639-1652.
- Annaghani, J. M., & Bloomquist, D. G. (1993). Durability Specification and Rating For Concrete. In *Concrete2000: Economic and Durable Construction Through Excellence*, (eds. R.K. Dhir and M.R.Jones), 2, E & FN Spon, Cambridge, 1639-1652.
- ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards 2000 Volume 04.02*, 627-629.
- ASTM C 1202-97, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, *ASTM Standards, Vol. 04.02*.
- ASTM C1556, Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. *Annual Book of ASTM Standard, 04.02*.
- ASTM C 1585-04, Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concrete. *ASTM Standard, Vol. 04.02*.
- Bakker, R.F.M. (1988). *Corrosion of steel in concrete*. New York: Chapman and Hall.
- Bamforth, P.B. (1994). Specifying and Testing Impermeability. In *Presentation at BCA Course: Advances in Concrete Technology and Construction Practice*, Walsall, England, 6-7 December.
- Chia, K. S., and Zhang, MH. (2001). Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete. In *Cement and Concrete Research*, 32, 639-645.
- Chiang, C. T., and Yang, C. C. (2007). Relation between the diffusion characteristic of concrete from salt ponding test and accelerated chloride migration test. In *Materials Chemistry and Physics*, 106, 240-246.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., & Sirivivatnanon, V. (2008). Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. In *Construction and Building Materials*, 22, 932-938.

- Colleparidi, M., Marcialis, A., & Turriziani, R. (1970). Kinetics of Penetration of Chloride Ions into the Concrete. In *Il Cemento*, 4, 157-164.
- DeSouza, S. J. (1996). Test method for the evaluation for the Covercrete. In *M.A.Sc. Thesis*, Department of Civil Engineering, University of Toronto.
- Dhir, R. K., Jones, M. R., and Ng, S.L.D. (1998). Prediction of total chloride content profile and concentration time-dependent diffusion coefficients for concrete. In *Magazine of Concrete Research*, 50, 37-48.
- Farzet, B., Merzuk, C., Mirsada, R., & Petar P. (2009). Influence of content tricalcium aluminate in the cement on corrosion steel reinforcement in concrete. In *13th International Research Expert Conference, TMT 2009, Hammamet, Tunisia, 16-21 October, 2009*.
- Feldman, R.F. (1987). Diffusion Measurements in Cement paste By Water Replacement Using Propan-2-ol. In *Cement and Concrete Research*, 17, 602-612.
- Freeze, R. A., and Cherry, J. A. (1979), In *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey
- Funahashi, M. (1990). Predicting corrosion free service life of a concrete structure in chloride environment. In *ACI Materials Journal*, 87(6), 584-587.
- Ghrici, M., Kenai, S., & Said-Mansour, M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. In *Cement & Concrete Composites*, 29, 542-549.
- Gjørv, O. E., and Vennesland (1979). Diffusion of chloride ions from seawater into concrete. In *Cement and Concrete Research*, 9, 229-238.
- Hall, C. (1989). Water Sorptivity of Mortars and Concretes: A Review. In *Magazine of Concrete Research*, 41, 51-61.
- Hooton, R. D. (2006). Testing and standards related to fluid and chemical transport.
<http://www.rmc-foundation.org>
- Homain, H., Marchand, J., Duhot, V., & Moranville-Regourd, M. (1995). Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars. In *Cement and Concrete Research*, 25, 8, 1667-1678.
- Jooss, M. & Reinhardt, H. W. (2002). Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature. In *Cement and Concrete Research*, 32, 1497-1504.

- Kayyali, O. A. & Haque, M. N. (1988). Effect of carbonation on the chloride concentration in pore solution of mortars with and without flyash. In *Cement and Concrete Research*, 18, 636-648.
- Khatib, J. M. & Mangat, P. S. (2002). Influence of high-temperature and low-humidity curing on chloride penetration in blended cement concrete. In *Cement and Concrete Research*, 32, 1743-1753.
- Kyi, A. A. & Batchelor, B. (1994). An Electrical Conductivity Method for Measuring the Effects of Additives on Effective Diffusivities in Portland Cement Pastes. In *Cement and Concrete Research*, 24, 4, 752-764.
- Lam, N.T., Sahamitmongkol, R., & Tangtermsirikul, S. (2008). Expansion and compressive strength of concrete with expansive additive. In *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand*, 19.
- Lawrence, P., Cyr, M., & Ringot, E. (2003). Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short term hydration. In *Cement and Concrete Composite* 33(12), 1939-1947.
- Massazza, F. (1993). Pozzolanic cements. In *Cement and Concrete Composite*, 15(4), 185-214.
- McGrath, P. (1996). Development of Test Methods for Predicting Chloride Penetration into HighPerformance Concrete. *Ph.D. Thesis*, Department of Civil Engineering, University of Toronto.
- Metha, P. K. (1981). Studies on blended Portland cements containing Santorin earth. In *Cement and Concrete Research*, 11(4), 507-18.
- Metha, P. K., & Monterio, P. J. M. (2006). In *Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 3th Edition*, The McGraw-Hill companies.
- Mindess, S., & Young, J. F. (1981). *Concrete*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Mobasher, B., & Mitchell, T. M. (1988). Laboratory Experience with the Rapid Chloride Permeability Test. In *ACI SP-108: Permeability of Concrete*, (ed. D. Whiting, A. Walitt), American Concrete Institute.
- Monfore, G. E. (1968). The Electrical Resistivity of Concrete. In *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, 35-48, May.

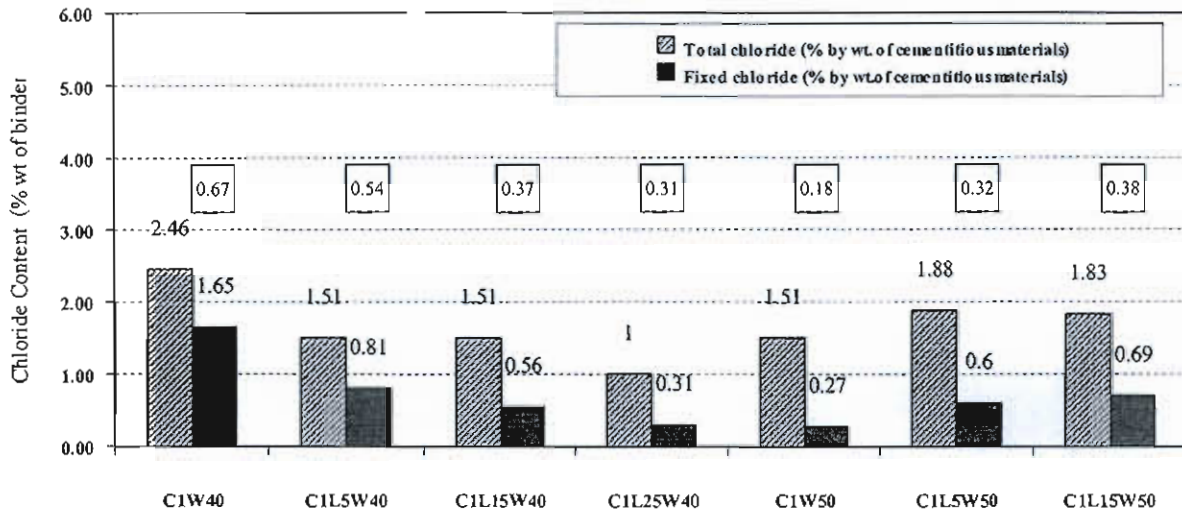
- Morris, W., Moreno, E. I., & Sagues, A. A. (1996). Practical Evaluation of Resistivity of Concrete in TestCylinders using a Wenner Array Probe. In *Cement and Concrete Research*, 26, 12, 1779-1787.
- NT BUILD 443 (1995). Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration. *Nordtest*, Esbo, Finland.
- Otsuki, N., Nagataki, S. & Nakashita, K. (1992). Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials. In *ACI Materials Journal*, 89, 6, 587-592.
- Rasheeduzzafar, S., Hussain, E., & S. S. Al-Saadoun (1992). Effect of Tricalcium Aluminate Content of Cement on Chloride Binding and Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete. In *ACI Materials Journal*, January-February.
- Shamsad, A. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structure its monitoring and service life prediction. In *Cement & concrete composites*, 25, 459-471.
- Sharif, A., Loughlin, K. F., Azad, A. K., & Navaz, C. M. (1997). Determination of the Effective Chloride Diffusion Coefficient in Concrete via a Gas Diffusion Technique. In *ACI Materials Journal*, 94, 3, 227-233.
- Song, H. W., Lee, C., & Ann, K.Y. (2008). Factor influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. In *Cement & Concrete Composites*, 30, 113-121.
- Soroka. (1993). *Concrete in hot environments*. Great Britain: Alden Press.
- Stanish, K. D., Hooton, R. D., & Thomas, M. D. A. (2000). Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: In *A Literature Review*. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada.
- Streicher, P. E. & Alexander, M. G. (1995). A Chloride Conduction Test for Concrete. In *Cement and Concrete Research*, 25, 6, 1284-1294.
- Sumranwanich, T., & Tangtermsirikul, S. (2004). Time-Dependent Chloride Binding Capacity of Various Types of Cement Pastes. In *ScienceAsia*, 30, 127-134.
- Tang, L., & Nilsson, L. O. (1991). Chloride Diffusivity in High Strength Concrete. In *Nordic Concrete Research*, 11, 162-170

- Tang, L., & Sørensen, H.E. (2001). Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion migration coefficients of concrete. In *Materials and Structures*, 34, October, 479-485.
- Thomas, M. D. A. & Bamforth, P. B. (1999). Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag. In *Cement and Concrete Research*, 29, 487-495.
- Thomas, M. D. A. (1996). Chloride thresholds in marine concrete. *Cement and Concrete Research*, 26, 513-519.
- Tong, L., & Gjorv, O.E. (2001). Chloride diffusivity based on migration testing. *Cem Concr Res*, 31, 973-982.
- Tsivilis, S., Batis, G., Chaiotakis, E., Grigoriadis, Gr. & Theodossis, D. (2000). Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. In *Cement and Concrete Research*, 30, 1679-1683.
- Tsivilis, S., Tsalilas, J., Kakali, G., Chaiotakis, E., & Sakellariou, A. (2003). The permeability of Portland limestone cement concrete. In *Cement and Concrete Research*, 33, 1465-1471.
- Tumidajski, P. J., & Chan, G.W. (1996). Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity. In *Cement and Concrete Research*, 26, 551-556.
- Valenta, O. (1996). Kinetics of Water Penetration into Concrete as an Important Factor of its Deterioration and of Reinforcement Corrosion. In *RILEM International Symposium: Durability of Concrete -1969*, Part 1, Prague, A177-A189
- Wee, T. H., Wong, S. F., Swaddiwudhipong, S., & Lee, S. L. (1997). A Prediction method for long-term chloride concentration profiles in hardened cement matrix materials. In *ACI Materials Journal*, 94, 565-576.
- Whiting, D. (1981). Rapid measurement of the chloride permeability of concrete. In *Public Roads*, 45, 3, 101-112.
- Yang, C. C., & Wang, L. C. (2004). The diffusion characteristic of concrete with mineral admixtures between salt ponding test and accelerated chloride migration test. In *Materials Chemistry and Physics*, 85, 266-272.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบความสามารถกักเก็บคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน



ภาพที่ ก-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน

จากภาพที่ ก-1 ตัวเลขในกรอบสี่เหลี่ยมเหนือกราฟแท่งคือ อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกจับยึด (Fixed chloride ratio)

หมายเหตุ

- C1 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- W/B คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
- L/B คือ อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบการแพร่ทั้งหมด (Bulk Diffusion Test)

Chloride Titration (35 days)										
No	Desingnation	Depth (cm)	Total chloride				Free chloride			
			Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)	Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)
1	C1W40	0.5	2.11	0.37	2.20	154	2.44	0.36	2.521	84
		1.5	2.10	0.01	0.07	166	2.75	0.02	0.153	75
		2.5	2.09	0.02	0.09	144	2.14	0.00	-	-
		3.5	2.16	0.01	0.09	108	2.32	0.00	-	-
		4.5	2.34	0.02	0.10	115	2.59	0.00	-	-
2	C1W50	0.5	2.14	0.42	2.57	132	2.36	0.36	2.423	86
		1.5	2.05	0.08	0.45	148	2.61	0.07	0.511	76
		2.5	2.09	0.01	0.07	122	2.44	0.01	0.053	54
		3.5	2.14	0.01	0.69	120	2.38	0.01	0.088	37
		4.5	2.09	0.01	0.07	115	2.66	0.01	0.086	37
3	C5W40	0.5	1.00	0.46	1.32	141	2.96	0.38	3.197	76
		1.5	1.01	0.06	0.16	124	3.03	0.02	0.162	73
		2.5	1.09	0.04	0.14	118	3.13	0.01	0.081	85
		3.5	1.01	0.07	0.19	96	3.05	0.01	0.120	67
		4.5	1.02	0.17	0.50	69	3.01	0.02	0.141	63
4	C5W50	0.5	1.08	0.51	1.57	159	3.30	0.41	3.814	80
		1.5	1.02	0.12	0.34	127	3.35	0.07	0.662	105
		2.5	1.00	0.05	0.15	118	3.22	0.01	0.078	82
		3.5	1.06	0.03	0.10	121	3.39	0.01	0.097	53
		4.5	1.20	0.03	0.11	124	3.06	0.01	0.082	88
5	C1E10W40	0.5	2.12	0.34	2.07	131	2.04	0.26	1.534	95
		1.5	2.11	0.03	0.15	109	2.01	0.01	0.054	71
		2.5	2.17	0.01	0.08	111	2.07	0.01	0.058	48
		3.5	2.26	0.01	0.07	115	2.22	0.01	0.071	42
		4.5	2.07	0.01	0.09	106	2.43	0.00	-	-
6	C1E10W50	0.5	2.13	0.46	2.76	160	2.14	0.40	2.546	50
		1.5	2.70	0.14	1.11	112	2.11	0.11	0.688	76
		2.5	2.22	0.01	0.09	122	2.05	0.01	0.079	43
		3.5	2.06	0.01	0.08	117	2.27	0.01	0.072	42
		4.5	2.12	0.01	0.08	110	2.27	0.01	0.072	41
7	C5E10W40	0.5	2.07	0.32	1.87	154	2.25	0.30	1.92	61
		1.5	2.33	0.02	0.16	137	2.26	0.01	0.06	77
		2.5	2.07	0.01	0.07	126	2.08	0.01	0.05	57
		3.5	2.29	0.01	0.09	118	2.14	0.01	0.07	53
		4.5	2.01	0.02	0.09	124	2.08	0.02	0.10	35
8	C5E10W50	0.5	2.58	0.47	3.44	122	2.10	0.41	2.47	76
		1.5	2.47	0.13	0.92	134	2.20	0.11	0.67	92
		2.5	2.31	0.01	0.06	140	2.04	0.01	0.09	52
		3.5	2.56	0.02	0.11	112	2.16	0.01	0.09	42
		4.5	2.29	0.01	0.81	120	2.23	0.01	0.07	48
9	C1F30W40	0.5	2.32	0.30	2.01	172	2.62	0.27	2.00	91
		1.5	2.01	0.01	0.06	121	2.20	0.01	0.09	36
		2.5	2.43	0.00	-	-	2.59	0.01	0.09	32
		3.5	2.73	0.01	0.10	109	2.67	0.01	0.09	34
		4.5	2.07	0.01	0.06	121	2.55	0.01	0.06	48
10	C1F30W50	0.5	2.12	0.42	2.54	120	2.27	0.34	2.22	72
		1.5	2.07	0.02	0.11	115	2.23	0.01	0.09	49
		2.5	2.24	0.01	0.07	118	0.21	0.01	0.07	43
		3.5	2.31	0.01	0.06	118	2.42	0.01	0.09	36
		4.5	2.17	0.01	0.08	114	2.81	0.00	-	-
11	C1E10F30W40	0.5	2.51	0.32	2.27	138	2.56	0.12	0.89	120
		1.5	2.23	0.03	0.16	130	2.33	0.02	0.12	67
		2.5	2.26	0.01	0.07	119	2.84	0.01	0.08	35
		3.5	2.66	0.01	0.08	115	2.71	0.00	-	-
		4.5	2.34	0.00	-	-	2.16	0.01	0.07	51
12	C1E10F30W50	0.5	2.20	0.34	2.11	154	2.76	0.31	2.44	52
		1.5	2.48	0.03	0.18	128	2.28	0.02	0.12	69
		2.5	2.21	0.01	0.09	108	2.15	0.00	-	-
		3.5	2.23	0.01	0.07	117	2.04	0.01	0.05	52
		4.5	2.21	0.01	0.08	114	2.78	0.00	-	-

Chloride Titration (35 days)										
No	Designation	Depth (cm)	Total chloride				Free chloride			
			Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)	Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)
13	C1L5W40	0.5	2.61	0.41	3.06	132	2.25	0.33	2.10	66
		1.5	2.36	0.13	0.10	134	2.05	0.02	0.09	52
		2.5	2.35	0.01	0.08	111	2.24	0.01	0.08	38
		3.5	2.27	0.01	0.07	111	2.18	0.00	-	-
		4.5	2.29	0.01	0.10	100	2.13	0.00	-	-
14	C1L5W50	0.5	2.29	0.50	3.26	121	2.74	0.42	3.28	66
		1.5	2.44	0.07	0.49	127	2.50	0.06	0.41	72
		2.5	2.60	0.00	-	-	2.66	0.01	0.08	44
		3.5	2.43	0.01	0.05	127	2.37	0.01	0.05	47
		4.5	2.42	0.01	0.09	112	2.47	0.01	0.06	48
15	C1L15W40	0.5	2.30	0.35	2.29	151	2.62	0.32	2.40	61
		1.5	2.17	0.06	0.36	111	2.11	0.03	0.19	78
		2.5	2.47	0.01	0.06	120	2.26	0.01	0.08	43
		3.5	2.49	0.01	0.05	117	2.06	0.00	-	-
		4.5	2.33	0.01	0.09	100	2.26	0.01	0.09	41
16	C1L15W50	0.5	2.42	0.39	2.72	120	2.19	0.33	2.03	98
		1.5	2.23	0.11	0.71	143	2.14	0.09	0.56	86
		2.5	2.33	0.01	0.09	118	2.34	0.01	0.09	60
		3.5	2.20	0.00	-	-	2.42	0.01	0.08	40
		4.5	2.33	0.01	0.07	110	2.28	0.01	0.08	39
17	C1L25W40	0.5	2.21	0.33	2.08	161	2.21	0.45	3.30	87
		1.5	2.36	0.10	0.69	130	2.25	0.08	0.49	78
		2.5	2.09	0.01	0.09	109	2.33	0.01	0.08	47
		3.5	2.24	0.01	0.06	115	2.36	0.03	0.22	31
		4.5	2.27	0.01	0.06	116	2.33	0.00	-	-
18	C1L25W50	0.5	2.32	0.38	2.52	116	2.13	0.31	1.88	71
		1.5	2.25	0.15	0.98	162	2.31	0.12	0.77	93
		2.5	2.34	0.04	0.26	125	2.28	0.04	0.27	37
		3.5	2.28	0.01	0.07	120	2.74	0.00	-	-
		4.5	2.17	0.02	0.09	112	2.05	0.01	0.07	50
19	C1F5L25W40	0.5	2.21	0.41	2.59	131	2.52	0.29	2.13	113
		1.5	2.10	0.10	0.62	152	2.62	0.07	0.50	112
		2.5	2.77	0.01	0.08	114	2.24	0.01	0.05	57
		3.5	2.40	0.01	0.08	104	2.33	0.03	0.20	13
		4.5	2.20	0.02	0.10	97	2.07	0.03	0.17	18
20	C1F5L25W50	0.5	2.19	0.44	2.75	129	2.06	0.38	2.27	88
		1.5	2.71	0.21	1.63	176	2.78	0.13	1.05	111
		2.5	2.22	0.04	1.45	146	2.38	0.06	0.42	64
		3.5	2.35	0.01	0.06	133	2.12	0.01	0.07	60
		4.5	2.16	0.01	0.08	121	2.70	0.01	0.07	48
21	C1F15L15W40	0.5	2.67	0.39	2.94	160	2.43	0.33	2.28	62
		1.5	2.29	0.04	0.27	130	2.25	0.02	0.13	93
		2.5	2.27	0.01	0.05	124	2.51	0.01	0.08	41
		3.5	2.64	0.01	0.08	109	2.40	0.01	0.06	48
		4.5	2.63	0.01	0.06	115	2.73	0.01	0.05	55
22	C1F15L15W50	0.5	2.56	0.40	2.94	122	2.48	0.31	2.22	102
		1.5	2.19	0.09	0.55	135	2.27	0.02	0.11	68
		2.5	2.73	0.01	0.09	110	2.61	0.00	-	-
		3.5	2.29	0.01	0.08	103	2.36	0.01	0.06	50
		4.5	2.14	0.01	0.07	104	2.57	0.00	-	-
23	C1F25L5W40	0.5	2.60	0.29	2.19	129	2.44	0.23	1.58	66
		1.5	2.61	0.01	0.08	106	2.35	0.01	0.07	51
		2.5	2.84	0.01	0.09	98	2.26	0.01	0.06	46
		3.5	2.70	0.00	-	-	2.53	0.00	-	-
		4.5	2.52	0.00	-	-	2.84	0.01	0.07	48
24	C1F25L5W50	0.5	2.97	0.41	3.49	132	2.22	0.38	2.42	80
		1.5	2.90	0.01	0.06	162	2.38	0.07	0.49	66
		2.5	2.80	0.00	-	-	2.68	0.01	0.07	60
		3.5	2.65	0.01	0.08	98	2.41	0.01	0.08	45
		4.5	2.71	0.00	-	-	2.17	0.01	0.05	58

Chloride Titration (91 days)										
No	Designation	Depth (cm)	Total chloride				Free chloride			
			Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)	Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)
1	C1W40	0.5	5.02	0.35	5.011	110	5.00	0.29	4.105	62
		1.5	5.05	0.12	1.733	154	5.00	0.10	1.426	65
		2.5	5.01	0.05	0.702	72	5.01	0.01	0.150	63
		3.5	5.00	0.01	0.192	92	5.01	0.01	0.095	48
2	C1W50	4.5	5.04	0.01	0.144	103	5.00	0.01	0.084	56
		0.5	5.04	0.44	6.238	130	5.01	0.36	5.098	111
		1.5	5.00	0.22	3.057	129	5.01	0.17	2.355	58
		2.5	5.02	0.04	0.574	115	5.01	0.04	0.536	20
3	C5W40	3.5	5.05	0.00	0.066	152	5.01	0.01	0.136	58
		4.5	5.02	0.01	0.100	134	5.01	0.01	0.105	49
		0.5	5.03	0.44	6.278	127	5.00	0.34	4.829	54
		1.5	5.04	0.15	2.140	152	5.00	0.12	1.665	54
4	C5W50	2.5	5.00	0.02	0.294	113	5.01	0.00	0.061	89
		3.5	5.03	0.02	0.298	104	5.01	0.01	0.099	53
		4.5	5.03	0.01	0.282	105	5.00	0.01	0.112	67
		0.5	5.00	0.44	6.191	101	5.00	0.34	4.795	98
5	C1E10W40	1.5	5.01	0.24	3.423	123	5.01	0.18	2.519	59
		2.5	5.01	0.08	1.115	123	5.00	0.01	0.208	147
		3.5	5.01	0.02	0.269	160	5.01	0.01	0.213	50
		4.5	5.01	0.02	0.233	124	5.02	0.01	0.091	54
6	C1E10W50	0.5	5.01	0.34	4.879	128	5.00	0.26	3.647	62
		1.5	5.00	0.07	1.045	123	5.02	0.04	0.599	101
		2.5	5.00	0.01	0.156	117	5.00	0.01	0.088	51
		3.5	5.01	0.01	0.129	114	5.02	0.01	0.089	40
7	C5E10W40	4.5	5.01	0.01	0.090	130	5.00	0.01	0.078	40
		0.5	5.00	0.46	6.563	114	5.01	0.35	4.982	65
		1.5	5.01	0.26	3.668	104	5.00	0.18	2.564	93
		2.5	5.00	0.07	0.971	128	5.01	0.04	0.605	53
8	C5E10W50	3.5	5.01	0.01	0.122	145	5.00	0.01	0.080	74
		4.5	5.00	0.01	0.113	128	5.01	0.01	0.080	52
		0.5	5.00	0.38	4.534	118	5.01	0.33	4.013	95
		1.5	5.00	0.13	1.768	95	5.00	0.10	1.151	87
9	C1F30W40	2.5	5.00	0.03	0.346	70	5.00	0.01	0.093	38
		3.5	5.00	0.01	0.158	107	5.01	0.01	0.082	51
		4.5	5.00	0.02	0.216	97	5.01	0.01	0.085	52
		0.5	5.00	0.47	5.670	159	5.00	0.42	5.048	56
10	C1F30W50	1.5	5.00	0.24	2.928	112	5.01	0.17	2.109	90
		2.5	5.00	0.04	0.536	129	5.00	0.04	0.489	20
		3.5	5.00	0.02	0.222	111	5.00	0.01	0.094	48
		4.5	5.00	0.01	0.100	135	5.00	0.01	0.091	49
11	C1E10F30W40	0.5	5.00	0.49	5.864	134	5.00	0.37	4.479	83
		1.5	5.00	0.01	0.206	110	5.00	0.01	0.138	56
		2.5	5.00	0.01	0.076	131	5.00	0.00	0.049	65
		3.5	5.00	0.00	0.054	132	5.00	0.00	0.054	54
12	C1E10F30W50	4.5	5.00	0.01	0.075	114	5.00	0.01	0.064	46
		0.5	5.00	0.47	5.648	157	5.00	0.37	4.444	44
		1.5	5.00	0.01	0.140	166	5.00	0.01	0.070	124
		2.5	5.00	0.01	0.009	110	5.00	0.01	0.073	45
11	C1E10F30W50	3.5	5.00	0.01	0.112	100	5.00	0.01	0.147	14
		4.5	5.00	0.01	0.107	104	5.00	0.01	0.063	48
		0.5	5.00	0.44	5.347	110	5.00	0.36	4.296	76
		1.5	5.00	0.03	0.391	149	5.00	0.03	0.361	66
12	C1E10F30W50	2.5	5.00	0.01	0.110	109	5.00	0.01	0.080	46
		3.5	5.00	0.02	0.195	72	5.00	0.01	0.061	49
		4.5	5.00	0.03	0.310	62	5.00	0.01	0.072	48
		0.5	5.00	0.47	5.654	121	5.00	0.40	4.789	81
12	C1E10F30W50	1.5	5.00	0.08	0.967	142	5.00	0.09	1.117	2
		2.5	5.00	0.01	0.114	117	5.00	0.01	0.086	55
		3.5	5.00	0.02	0.231	75	5.00	0.01	0.076	53
		4.5	5.00	0.01	0.070	139	5.00	0.01	0.149	50

Chloride Titration (91 days)										
No	Designation	Depth (cm)	Total chloride				Free chloride			
			Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)	Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)
13	C1L5W40	0.5	5.00	0.44	5.299	133	5.00	0.35	4.238	58
		1.5	5.00	0.11	1.280	143	5.00	0.08	0.917	89
		2.5	5.00	0.01	0.069	135	5.00	0.01	0.082	43
		3.5	5.00	0.01	0.137	105	5.00	0.00	0.054	58
		4.5	5.00	0.00	0.049	131	5.00	0.01	0.118	52
14	C1L5W50	0.5	5.00	0.44	5.313	120	5.00	0.33	3.944	68
		1.5	5.00	0.24	2.946	117	5.00	0.16	0.197	78
		2.5	5.00	0.05	0.647	109	5.00	0.04	0.423	58
		3.5	5.00	0.01	0.098	132	5.00	0.01	0.097	47
		4.5	5.00	0.01	0.121	104	5.00	0.01	0.095	39
15	C1L15W40	0.5	5.00	0.46	5.531	134	5.00	0.32	3.829	104
		1.5	5.00	0.24	2.854	103	5.00	0.14	1.678	84
		2.5	5.00	0.05	0.581	110	5.00	0.03	0.380	56
		3.5	5.00	0.00	0.058	143	5.00	0.01	0.086	51
		4.5	5.00	0.01	0.105	109	5.00	0.01	0.074	41
16	C1L15W50	0.5	5.00	0.47	5.662	146	5.00	0.39	4.702	60
		1.5	5.00	0.28	3.356	150	5.00	0.21	2.551	66
		2.5	5.00	0.12	1.398	118	5.00	0.09	1.023	53
		3.5	5.00	0.02	0.185	140	5.00	0.01	0.100	78
		4.5	5.00	0.01	0.094	126	5.00	0.01	0.079	45
17	C1L25W40	0.5	5.00	0.45	5.444	121	5.00	0.35	4.167	87
		1.5	5.00	0.27	3.214	124	5.00	0.19	2.283	65
		2.5	5.00	0.09	1.066	130	5.00	0.06	0.751	89
		3.5	5.00	0.02	0.236	115	5.00	0.01	0.115	72
		4.5	5.00	0.01	0.125	110	5.00	0.01	0.080	44
18	C1L25W50	0.5	5.00	0.53	6.424	117	5.00	0.42	5.012	50
		1.5	5.00	0.32	3.904	110	5.00	0.24	2.875	41
		2.5	5.00	0.16	1.933	156	5.00	0.10	1.198	44
		3.5	5.00	0.05	0.577	125	5.00	0.03	0.418	71
		4.5	5.00	0.02	0.229	115	5.00	0.01	0.120	59
19	C1F5L25W40	0.5	5.00	0.57	6.854	150	5.00	0.41	4.925	97
		1.5	5.00	0.26	3.127	122	5.00	0.17	2.032	54
		2.5	5.00	0.03	0.391	144	5.00	0.03	0.314	53
		3.5	5.00	0.01	0.061	143	5.00	0.01	0.101	53
		4.5	5.00	0.01	0.132	121	5.00	0.01	0.116	32
20	C1F5L25W50	0.5	5.00	0.56	6.721	156	5.00	0.44	5.329	86
		1.5	5.00	0.38	4.580	126	5.00	0.24	2.871	60
		2.5	5.00	0.19	2.258	132	5.00	0.11	1.308	49
		3.5	5.00	0.05	0.622	121	5.00	0.04	0.522	19
		4.5	5.00	0.02	0.250	121	5.00	0.01	0.089	75
21	C1F15L15W40	0.5	5.00	0.57	6.814	151	5.00	0.43	5.113	80
		1.5	5.00	0.11	1.355	122	5.00	0.08	0.932	72
		2.5	5.00	0.02	0.277	73	5.00	0.01	0.152	23
		3.5	5.00	0.01	0.171	90	5.00	0.01	0.084	56
		4.5	5.00	0.01	0.139	109	5.00	0.01	0.118	46
22	C1F15L15W50	0.5	5.00	0.56	6.677	115	5.00	0.38	4.609	63
		1.5	5.00	0.17	1.985	104	5.00	0.11	1.282	71
		2.5	5.00	0.01	0.070	164	5.00	0.01	0.156	67
		3.5	5.00	0.01	0.156	109	5.00	0.01	0.145	43
		4.5	5.00	0.01	0.067	150	5.00	0.01	0.071	78
23	C1F25L5W40	0.5	5.00	0.52	6.230	144	5.00	0.41	4.936	53
		1.5	5.00	0.03	0.328	140	5.00	0.02	0.263	64
		2.5	5.00	0.02	0.194	100	5.00	0.00	0.052	96
		3.5	5.00	0.01	0.128	115	5.00	0.01	0.120	47
		4.5	5.00	0.01	0.136	103	5.00	0.01	0.105	57
24	C1F25L5W50	0.5	5.00	0.53	6.370	186	5.00	0.45	5.436	83
		1.5	5.00	0.08	1.018	143	5.00	0.06	0.668	114
		2.5	5.00	0.01	0.155	123	5.00	0.01	0.090	78
		3.5	5.00	0.06	0.768	33	5.00	0.01	0.073	71
		4.5	5.00	0.01	0.124	113	5.00	0.01	0.164	37

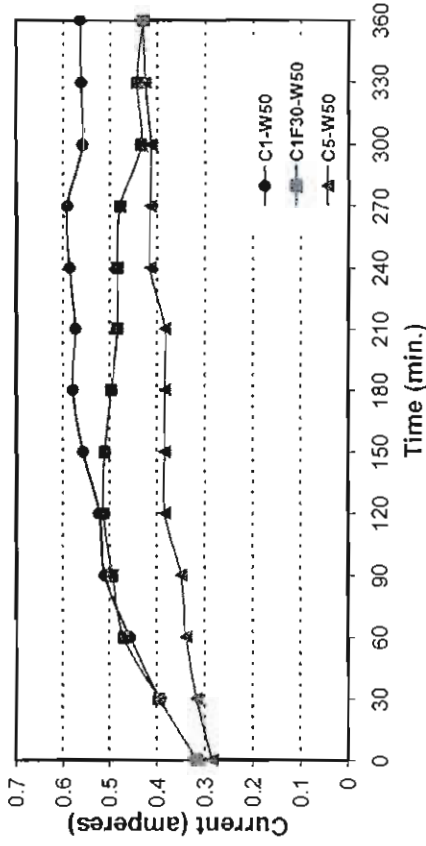
Chloride Titration (182 days)										
No	Designation	Depth (cm)	Total chloride				Free chloride			
			Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)	Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)
1	C1W40	0.5	5.00	0.48	6.860	152	5.00	0.42	5.947	63
		1.5	5.00	0.20	2.911	113	5.00	0.16	2.343	64
		2.5	5.00	0.03	0.408	125	5.00	0.02	0.254	65
		3.5	5.00	0.01	0.113	117	5.00	0.01	0.092	28
		4.5	5.00	0.01	0.111	121	5.00	0.01	0.074	34
2	C1W50	0.5	5.00	0.50	7.059	149	5.00	0.38	5.463	58
		1.5	5.00	0.33	4.747	128	5.00	0.25	3.518	29
		2.5	5.00	0.16	2.339	110	5.00	0.12	1.707	59
		3.5	5.00	0.04	0.633	152	5.00	0.04	0.583	47
		4.5	5.00	0.02	0.262	118	5.00	0.01	0.131	72
3	C5W40	0.5	5.00	0.51	7.201	116	5.00	0.43	6.144	77
		1.5	5.00	0.26	3.426	110	5.00	0.20	2.876	65
		2.5	5.00	0.04	0.853	111	5.00	0.03	0.487	60
		3.5	5.00	0.02	0.453	121	5.00	0.01	0.106	70
		4.5	5.00	0.02	0.294	138	5.00	0.01	0.107	59
4	C5W50	0.5	5.00	0.46	6.601	104	5.00	0.36	5.143	104
		1.5	5.00	0.32	4.557	114	5.00	0.27	3.779	59
		2.5	5.00	0.18	2.645	110	5.00	0.13	1.889	111
		3.5	5.00	0.08	1.288	111	5.00	0.05	0.720	100
		4.5	5.00	0.02	0.562	128	5.00	0.02	0.322	64
5	C1E10W40	0.5	5.00	0.51	7.264	106	5.00	0.40	5.657	61
		1.5	5.00	0.24	3.618	130	5.00	0.18	2.499	55
		2.5	5.00	0.03	0.584	90	5.00	0.01	0.064	109
		3.5	5.00	0.02	0.460	118	5.00	0.01	0.086	42
		4.5	5.00	0.02	0.450	120	5.00	0.01	0.098	53
6	C1E10W50	0.5	5.00	0.68	9.678	117	5.00	0.57	7.945	48
		1.5	5.00	0.43	6.069	114	5.00	0.32	4.475	62
		2.5	5.00	0.21	3.546	125	5.00	0.19	2.615	58
		3.5	5.00	0.10	1.571	121	5.00	0.08	1.049	50
		4.5	5.00	0.04	0.622	128	5.00	0.01	0.193	72
7	C5E10W40	0.5	5.00	0.42	5.933	113	5.00	0.36	5.024	57
		1.5	5.00	0.20	2.776	136	5.00	0.15	2.102	52
		2.5	5.00	0.03	0.445	126	5.00	0.02	0.239	55
		3.5	5.00	0.02	0.080	160	5.00	0.02	0.241	5
		4.5	5.00	0.02	0.256	120	5.00	0.01	0.113	21
8	C5E10W50	0.5	5.00	0.41	5.778	122	5.00	0.33	4.552	50
		1.5	5.00	0.26	3.689	124	5.00	0.18	2.553	83
		2.5	5.00	0.13	1.802	164	5.00	0.09	1.290	94
		3.5	5.00	0.04	0.556	120	5.00	0.03	0.358	39
		4.5	5.00	0.02	0.289	115	5.00	0.01	0.109	54
9	C1F30W40	0.5	5.00	0.52	7.420	127	5.00	0.43	6.077	64
		1.5	5.00	0.05	0.654	124	5.00	0.03	0.440	62
		2.5	5.00	0.01	0.165	128	5.00	0.01	0.124	59
		3.5	5.00	0.02	0.054	148	5.00	0.01	0.129	38
		4.5	5.00	0.01	0.145	130	5.00	0.01	0.097	61
10	C1F30W50	0.5	5.00	0.79	11.200	123	5.00	0.63	8.768	117
		1.5	5.00	0.08	1.138	123	5.00	0.05	0.676	108
		2.5	5.00	0.01	0.109	139	5.00	0.01	0.085	58
		3.5	5.00	0.01	0.124	134	5.00	0.01	0.101	59
		4.5	5.00	0.02	0.244	81	5.00	0.01	0.088	56
11	C1E10F30W40	0.5	5.00	0.49	6.891	130	5.00	0.40	5.640	124
		1.5	5.00	0.06	0.800	150	5.00	0.04	0.615	106
		2.5	5.00	0.01	0.146	110	5.00	0.01	0.113	55
		3.5	5.00	0.01	0.050	140	5.00	0.01	0.103	50
		4.5	5.00	0.01	0.085	120	5.00	0.01	0.102	47
12	C1E10F30W50	0.5	5.00	0.59	8.206	119	5.00	0.43	6.008	61
		1.5	5.00	0.20	2.835	129	5.00	0.15	2.059	110
		2.5	5.00	0.01	0.205	108	5.00	0.01	0.113	79
		3.5	5.00	0.01	0.175	99	5.00	0.01	0.092	63
		4.5	5.00	0.01	0.134	115	5.00	0.01	0.114	48

Chloride Titration (182 days)										
No	Designation	Depth (cm)	Total chloride				Free chloride			
			Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)	Sample weight (g)	% Cl	AgCl (ml)	U (mV)
13	C1L5W40	0.5	5.00	0.43	5.961	156	5.00	0.32	4.484	95
		1.5	5.00	0.21	2.917	149	5.00	0.14	2.006	106
		2.5	5.00	0.03	0.476	147	5.00	0.03	0.436	56
		3.5	5.00	0.01	0.074	144	5.00	0.01	0.110	57
		4.5	5.00	0.01	0.107	113	5.00	0.01	0.071	58
14	C1L5W50	0.5	5.00	0.43	5.965	146	5.00	0.32	4.448	97
		1.5	5.00	0.27	3.715	125	5.00	0.19	2.601	105
		2.5	5.00	0.12	1.680	102	5.00	0.09	1.297	43
		3.5	5.00	0.03	0.449	128	5.00	0.01	0.195	110
		4.5	5.00	0.01	0.112	145	5.00	0.01	0.220	58
15	C1L15W40	0.5	5.00	0.41	5.737	129	5.00	0.28	3.982	57
		1.5	5.00	0.23	3.261	133	5.00	0.17	2.321	53
		2.5	5.00	0.10	1.418	127	5.00	0.07	0.952	63
		3.5	5.00	0.01	0.202	164	5.00	0.01	0.239	51
		4.5	5.00	0.01	0.181	126	5.00	0.01	0.118	55
16	C1L15W50	0.5	5.00	0.43	5.823	127	5.00	0.32	2.444	58
		1.5	5.00	0.24	3.574	133	5.00	0.08	0.837	74
		2.5	5.00	0.09	1.738	145	5.00	0.01	0.477	89
		3.5	5.00	0.01	0.304	126	5.00	0.01	0.070	65
		4.5	5.00	0.01	0.147	135	5.00	0.00	-	-
17	C1L25W40	0.5	5.00	0.33	4.633	135	5.00	0.25	3.208	84
		1.5	5.00	0.21	2.884	147	5.00	0.05	0.488	72
		2.5	5.00	0.13	1.865	154	5.00	0.01	0.855	56
		3.5	5.00	0.05	0.695	157	5.00	0.01	0.219	38
		4.5	5.00	0.03	0.390	128	5.00	0.01	0.058	48
18	C1L25W50	0.5	5.00	0.38	5.410	127	5.00	0.23	1.682	74
		1.5	5.00	0.11	3.563	135	5.00	0.06	0.766	98
		2.5	5.00	0.01	0.991	127	5.00	0.02	0.283	46
		3.5	5.00	0.01	0.742	117	5.00	0.01	-	-
		4.5	5.00	0.01	0.329	145	5.00	0.01	0.082	56
19	C1F5L25W40	0.5	5.00	0.36	5.570	135	5.00	0.27	2.370	108
		1.5	5.00	0.17	2.743	125	5.00	0.08	0.511	112
		2.5	5.00	0.03	0.974	127	5.00	0.03	0.239	63
		3.5	5.00	0.01	0.371	127	5.00	0.01	0.085	40
		4.5	5.00	0.01	0.089	109	5.00	0.00	-	-
20	C1F5L25W50	0.5	5.00	0.43	6.457	117	5.00	0.32	2.324	91
		1.5	5.00	0.32	4.952	110	5.00	0.14	1.007	116
		2.5	5.00	0.03	1.274	127	5.00	0.03	0.427	64
		3.5	5.00	0.01	0.841	136	5.00	0.01	0.077	67
		4.5	5.00	0.01	0.321	145	5.00	0.01	0.053	58
21	C1F15L15W40	0.5	5.00	0.40	5.539	124	5.00	0.21	2.284	62
		1.5	5.00	0.22	3.144	109	5.00	0.09	0.125	93
		2.5	5.00	0.07	0.960	117	5.00	0.02	0.079	78
		3.5	5.00	0.02	0.324	126	5.00	0.01	0.084	70
		4.5	5.00	0.01	0.113	135	5.00	0.01	0.048	54
22	C1F15L15W50	0.5	5.00	0.45	6.727	114	5.00	0.33	2.237	111
		1.5	5.00	0.31	2.477	132	5.00	0.07	0.271	68
		2.5	5.00	0.02	0.963	145	5.00	0.03	0.183	73
		3.5	5.00	0.01	0.742	127	5.00	0.01	0.061	59
		4.5	5.00	0.01	0.529	154	5.00	0.01	-	-
23	C1F25L5W40	0.5	5.00	0.42	7.763	135	5.00	0.25	1.581	66
		1.5	5.00	0.32	5.479	142	5.00	0.11	0.071	51
		2.5	5.00	0.01	1.283	127	5.00	0.03	0.062	46
		3.5	5.00	0.01	0.974	164	5.00	0.00	-	-
		4.5	5.00	0.01	0.541	127	5.00	0.01	0.067	48
24	C1F25L5W50	0.5	5.00	0.47	6.608	134	5.00	0.35	2.840	83
		1.5	5.00	0.18	2.525	124	5.00	0.09	0.433	60
		2.5	5.00	0.01	0.093	164	5.00	0.01	0.074	69
		3.5	5.00	0.03	0.371	124	5.00	0.01	0.084	55
		4.5	5.00	0.01	0.084	127	5.00	0.01	0.049	47

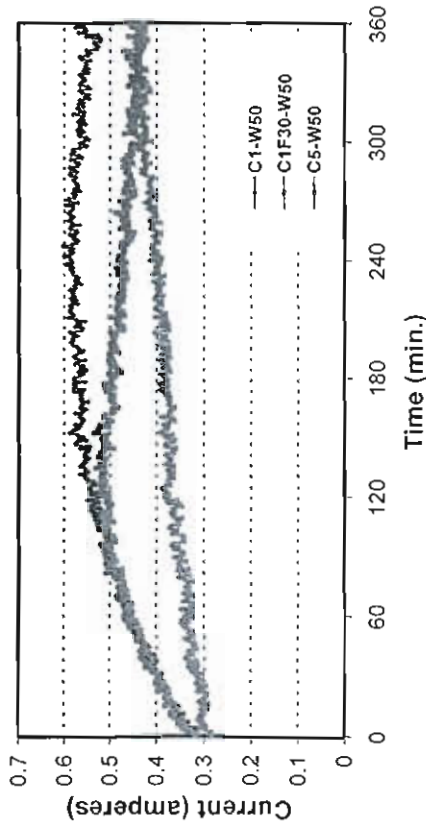
ภาคผนวก ก

ตัวอย่างข้อมูลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

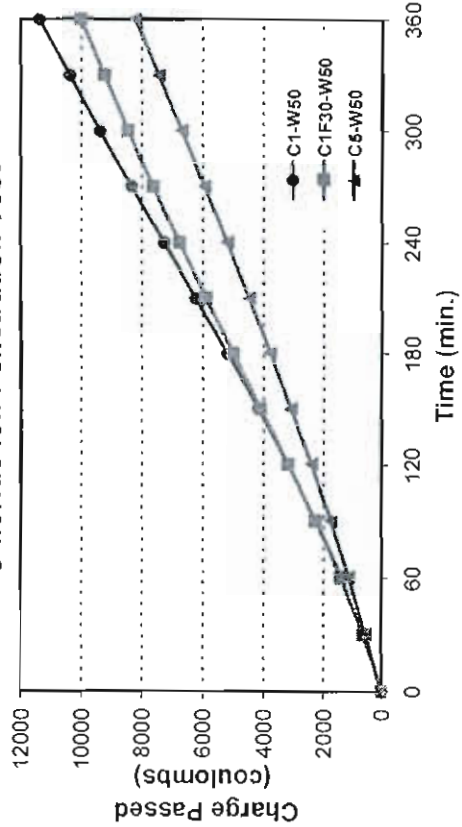
Sampling Rate Time 30 minute



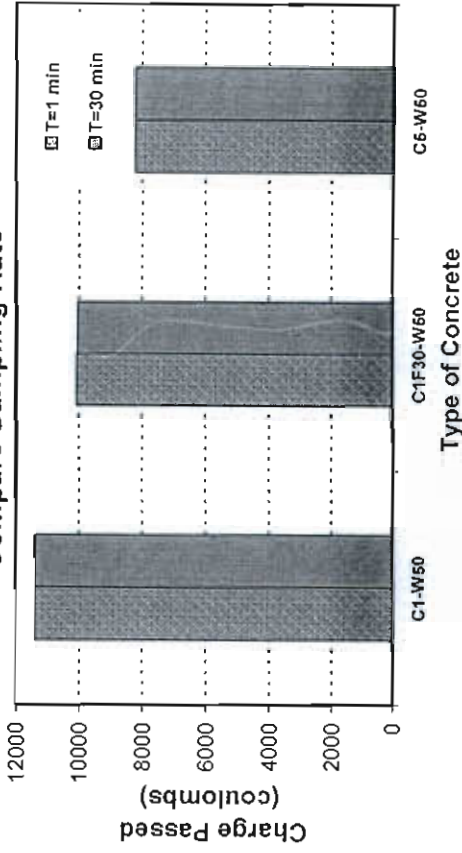
Sampling Rate Time 1 minute



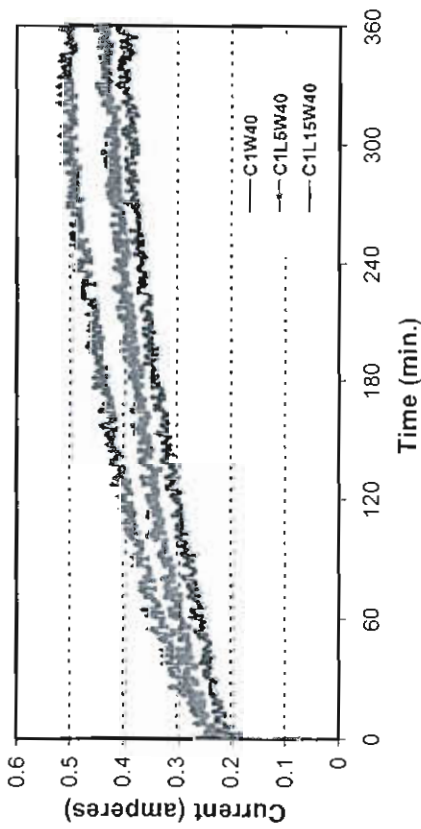
Chloride Ion Penetration Test



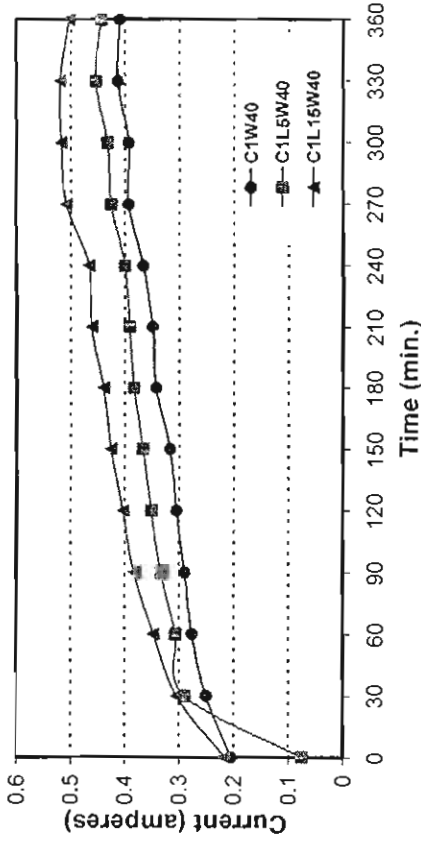
Compare Sampling Rate



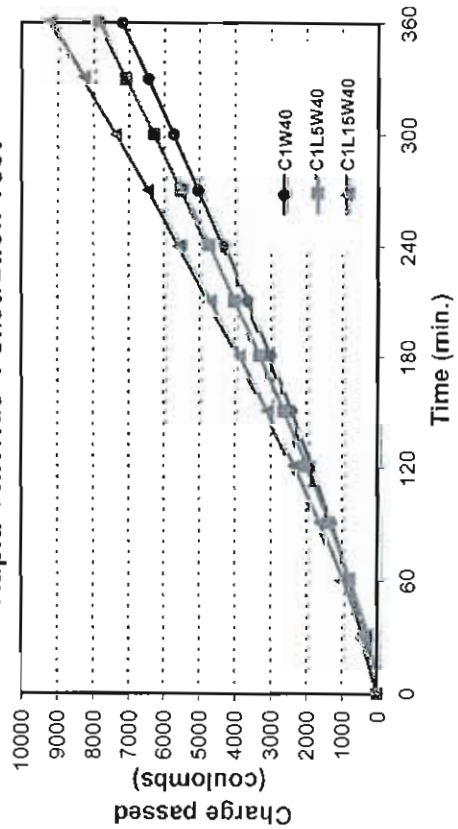
Sampling Period 1 minute



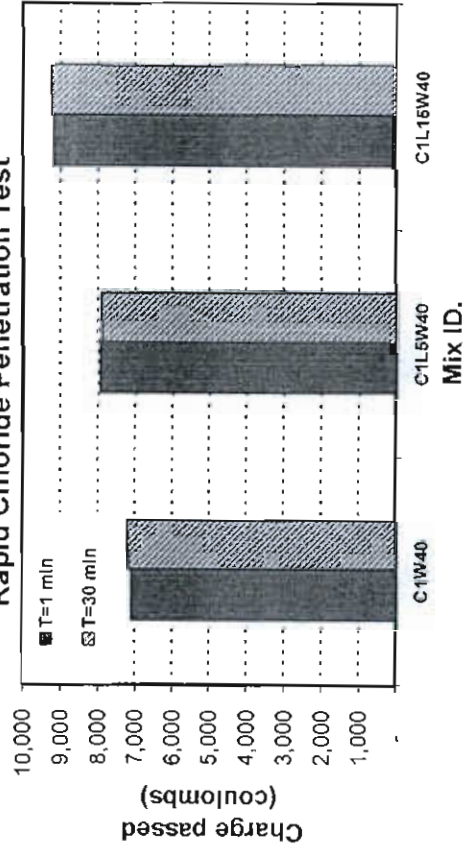
Sampling Period 30 minute



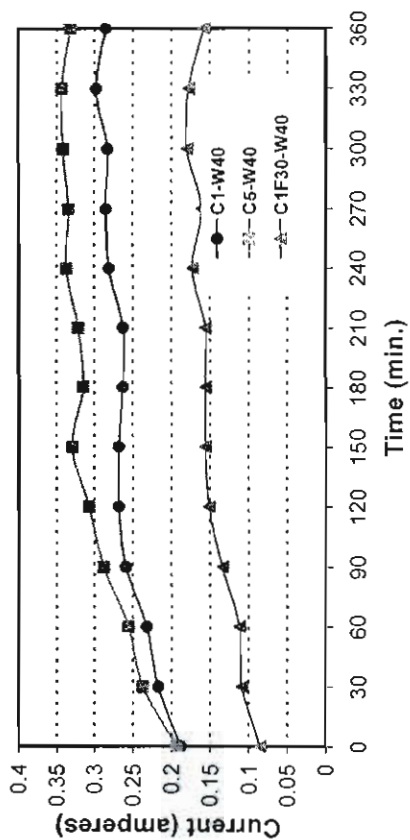
Rapid Chloride Penetration Test



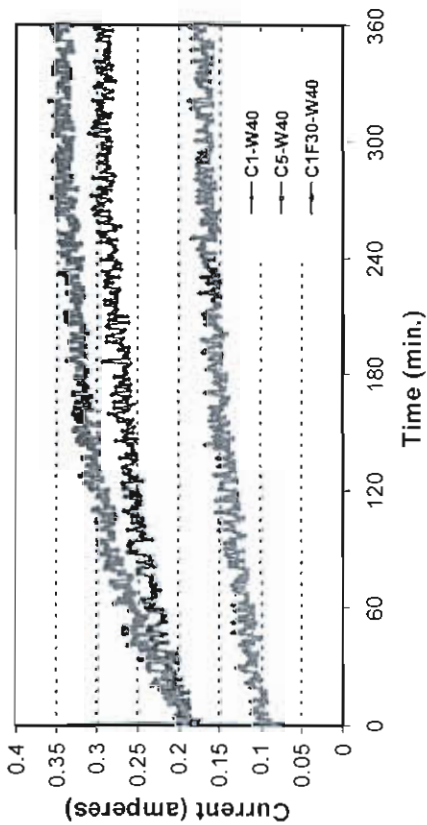
Rapid Chloride Penetration Test



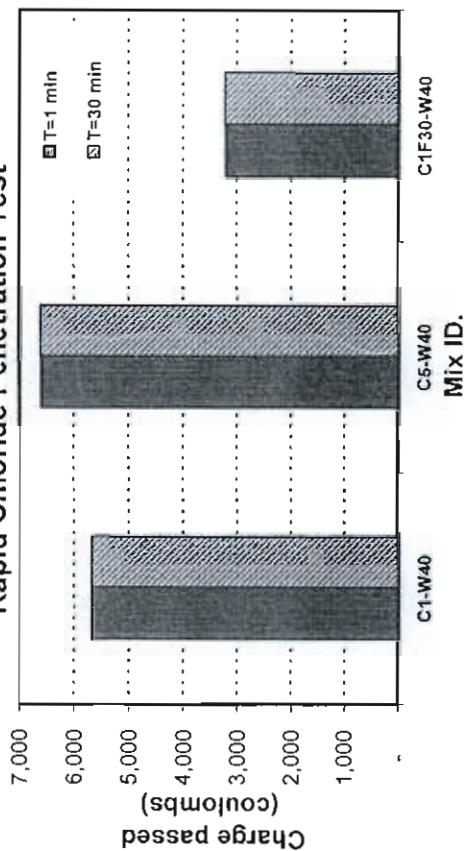
Sampling Period 30 minute



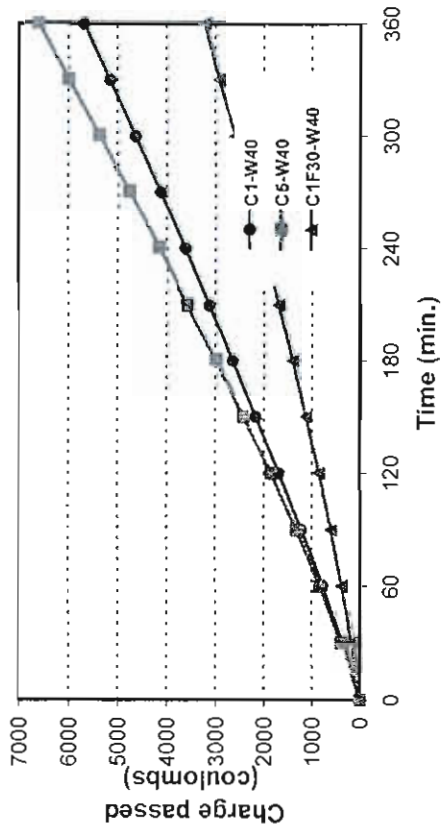
Sampling Period 1 minute



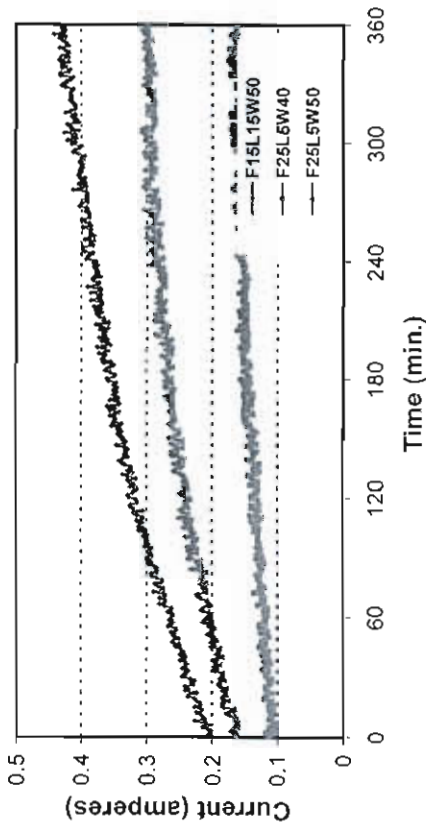
Rapid Chloride Penetration Test



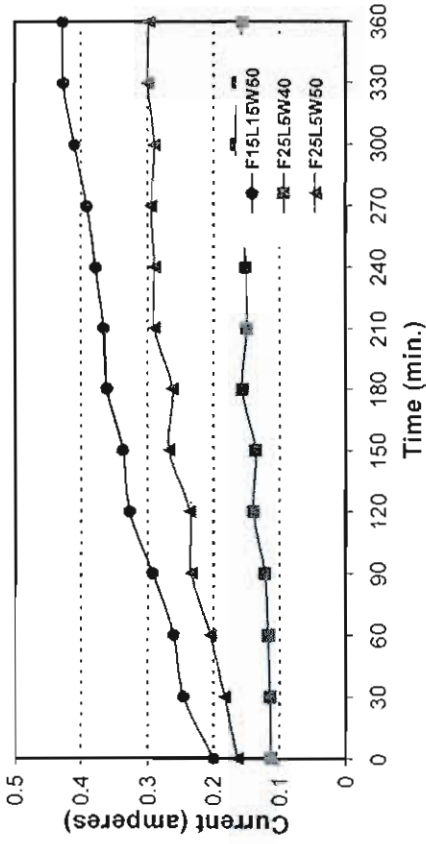
Rapid Chloride Penetration Test



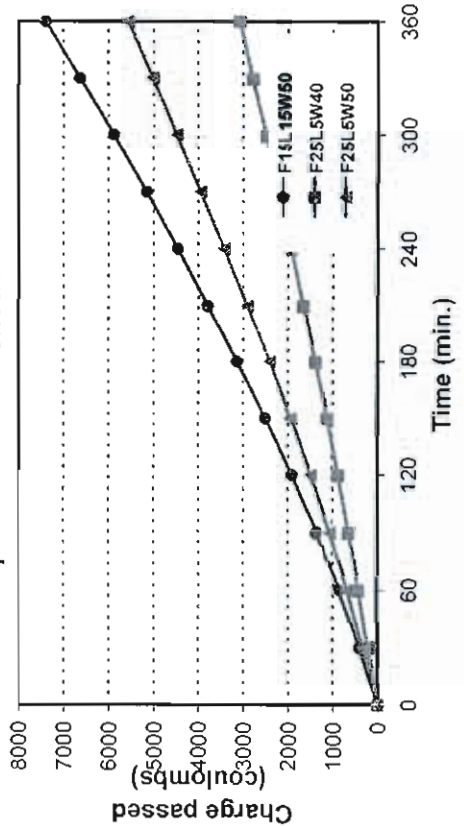
Sampling Period 1 minute



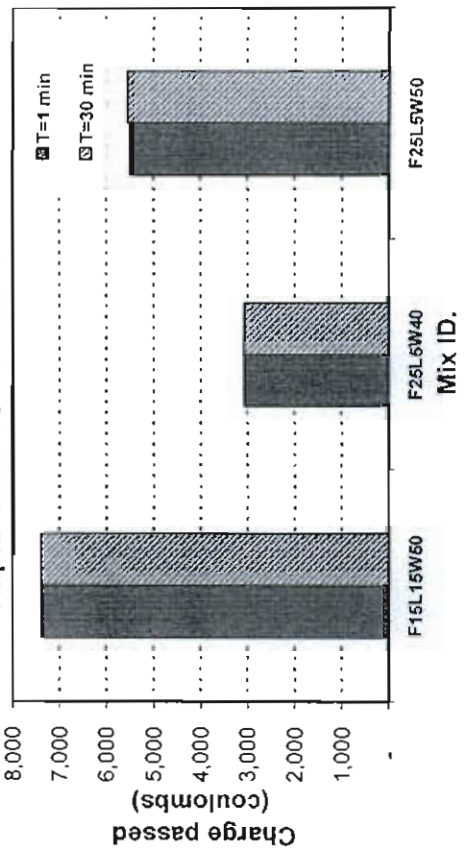
Sampling Period 30 minute



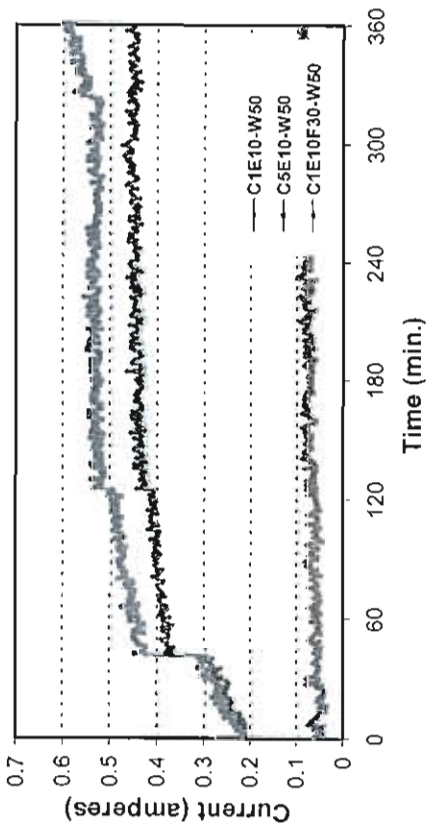
Rapid Chloride Penetration Test



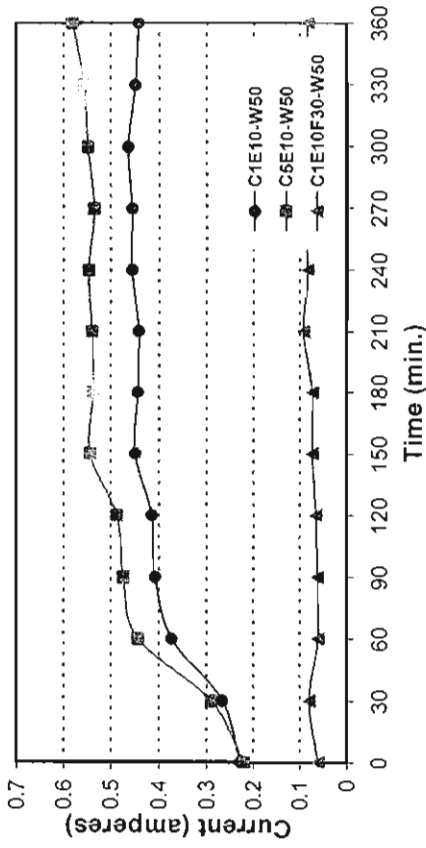
Rapid Chloride Penetration Test



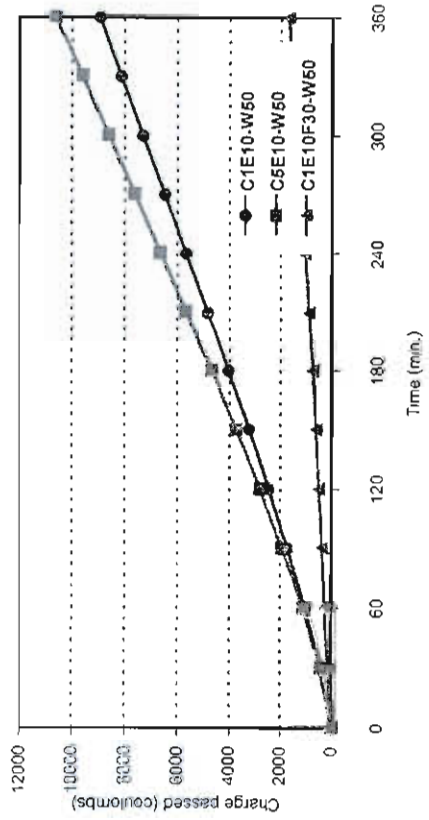
Sampling Period 1 minute



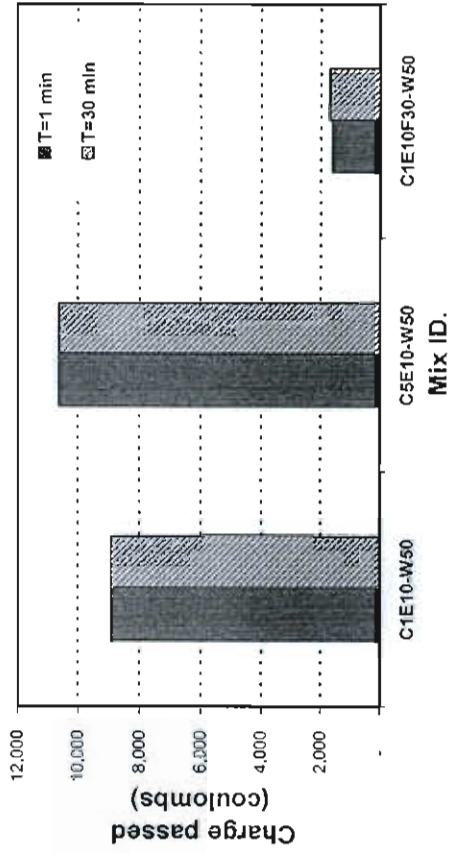
Sampling Period 30 minute



Rapid Chloride Penetration Test



Rapid Chloride Penetration Test



ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง

Sample No. Test 1 Cast Date: 23/9/2008 Test Date 21/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 51.8

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1W40	10.0	11.2	11.1	11.4	11.6	12.4	12.1	11.4

Sample No. Test 2 Cast Date: 23/9/2008 Test Date 21/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 50.2

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1W50	19.0	17.9	18.8	18.5	18.5	17.1	17.7	18.2

Sample No. Test 3 Cast Date: 23/9/2008 Test Date 21/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C5W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.0 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 50.1

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C5W40	8.3	8.7	8.2	8.1	8.6	8.4	8.3	8.3

Sample No. Test 4 Cast Date: 24/9/2008 Test Date 22/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C5W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.0 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 49.1

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C5W50	15.4	17.9	16.3	17.1	17.2	15.2	15.7	16.4

Sample No. Test 5 Cast Date: 24/9/2008 Test Date 22/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1E10W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.2 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 49.2

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1E10W40	13.9	13.1	13.0	12.8	13.7	12.7	13.7	13.2

Sample No. Test 6 Cast Date: 24/9/2008 Test Date 22/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1E10W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.2 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 51.3

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1E10W50	16.4	17.4	18.4	16.8	18.5	16.0	16.5	17.1

Sample No. Test 7 Cast Date: 25/9/2008 Test Date 23/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C5E10W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.3 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 50.6

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C5E10W40	11.5	13.4	12.3	12.6	-	11.0	13.3	12.3

Sample No. Test 8 Cast Date: 25/9/2008 Test Date 23/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C5E10W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.2 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 50.8

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C5E10W50	13.6	15.9	12.2	14.5	13.6	14.8	13.6	14.0

Sample No. Test 9 Cast Date: 25/9/2008 Test Date 23/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1F30W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.0 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 47.1

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1F30W40	8.9	8.8	8.5	9.8	7.7	8.4	8.4	8.6

Sample No. Test 10 Cast Date: 26/9/2008 Test Date 24/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1F30W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.2 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 50.3

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1F30W50	11.1	11.1	12.2	12.1	13.2	12.1	12.7	12.1

Sample No. Test 11 Cast Date: 26/9/2008 Test Date 24/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1E10F30W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.3 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 49.3

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1E10F30W40	10.6	9.1	9.4	9.8	10.0	9.7	9.3	9.7

Sample No. Test 12 Cast Date: 26/9/2008 Test Date 24/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1E10F30W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 47.7

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1E10F30W50	13.6	13.3	14.2	12.7	12.7	15.6	12.3	13.5

Sample No. Test 13 Cast Date: 27/9/2008 Test Date 25/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1L5W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.0 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 51.7

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1L5W40	17.7	11.7	15.9	11.1	16.5	10.5	13.7	13.9

Sample No. Test 14 Cast Date: 27/9/2008 Test Date 25/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1L5W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 49.8

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1L5W50	15.6	15.8	15.9	16.9	15.6	16.4	14.8	15.8

Sample No. Test 15 Cast Date: 27/9/2008 Test Date 25/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1L15W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 51.9

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1L15W40	14.7	15.2	14.8	14.9	14.8	14.5	14.7	14.8

Sample No. Test 16 Cast Date: 28/9/2008 Test Date 26/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1L15W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 50.3

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1L15W50	23.2	23.4	20.5	22.8	21.2	22.8	21.1	22.1

Sample No. Test 17 Cast Date: 28/9/2008 Test Date 26/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1L25W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 48.9

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1L25W40	19.1	19.6	19.1	-	19.1	18.5	18.8	19.0

Sample No. Test 18 Cast Date: 28/9/2008 Test Date 26/10/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1L25W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 25
 Thickness(mm): 49.9

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1L25W50	30.3	30.3	30.9	29.9	28.9	29.1	28.9	29.7

Sample No. Test 19 Cast Date: 5/10/2008 Test Date 2/11/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1F5L25W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 25.1
 Thickness (mm) 49.6

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1F5L25W40	15.7	17.0	15.1	20.7	13.9	20.1	16.7	17.0

Sample No. Test 20 Cast Date: 5/10/2008 Test Date 2/11/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1F5L25W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 25.1
 Thickness (mm) 48.7

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1F5L25W50	30.4	30.8	25.0	30.5	27.6	30.3	29.4	29.1

Sample No. Test 21 Cast Date: 5/10/2008 Test Date 2/11/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1F15L15W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 25.1
 Thickness (mm) 48.9

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1F15L15W40	11.7	11.1	11.8	11.5	12.9	11.7	13.3	12.0

Sample No. Test 22 Cast Date: 6/10/2008 Test Date 3/11/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1F15L15W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 23.9
 Thickness (mm) 48.6

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1F15L15W50	20.6	20.9	22.3	20.8	22.0	21.1	21.4	21.3

Sample No. Test 23 Cast Date: 6/10/2008 Test Date 3/11/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1F25L5W40 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.1 Room temp (c): 23.9
 Thickness (mm) 49.7

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1F25L5W40	14.1	14.8	13.5	12.6	11.7	11.5	14.2	13.2

Sample No. Test 24 Cast Date: 6/10/2008 Test Date 3/11/2008
 Sample : Age 28 days Concrete Mixture: C1F25L5W50 Test by Akekasak
 Diameter (mm): 100.05 Room temp (c): 23.9
 Thickness (mm) 50.5

Designation	Penetration depth (mm)							Avg. Depth
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	
C1F25L5W50	18.9	20.1	18.9	19.3	19.5	19.7	20.2	19.5

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างข้อมูลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

Sample No.1
 Sample : Age 28 days
 Mass of condition disc: 914.06 g (Prior to sealing sides)
 Diameter (mm): 100.1
 Thickness (mm): 52.8
 Water temp (c): 26.3
 Cast Date: 23/9/2008
 Concrete Mixture: C1W40
 Mass after sealing specimen: 919.40 g
 Exposed Area: 7865.0 mm²
 Test Date 21/10/2008

	Test Time		$\sqrt{\text{Time}}$ (s ^{1/2})	Mass (g)	ΔMass (g)	Mass/(area x density) of water = l (mm)
	days	s				
		0	0	919.40	0.00	0.0000
		60	8	919.79	0.39	0.0496
		300	17	920.27	0.87	0.1106
		660	26	920.72	1.32	0.1678
		1200	35	921.16	1.76	0.2238
		1800	42	921.50	2.10	0.2670
		3600	60	922.32	2.92	0.3713
		7200	85	923.23	3.83	0.4870
		10860	104	923.86	4.46	0.5671
		14400	120	924.24	4.84	0.6154
		18000	134	924.60	5.20	0.6612
		21600	147	924.87	5.47	0.6955
1		95880	310	927.98	8.58	1.0909
2		181560	426	929.55	10.15	1.2905
3		269280	519	930.54	11.14	1.4184
5		440160	663	931.68	12.28	1.5613
6		528120	727	932.04	12.64	1.6071
7		615360	784	932.47	13.07	1.6618
8		702060	838	932.65	13.25	1.6847

Sample No.13
 Sample : Age 28 days
 Mass of condition disc: 814.58 g (Prior to sealing sides)
 Diameter (mm): 100.1
 Thickness (mm): 48.5
 Water temp (c): 26.3

Cast Date: 25/9/2008
 Concrete Mixture: C5E10W40
 Mass after sealing specimen: 819.20 g
 Exposed Area: 7865.0 mm²

Test Date 23/10/2008

	Test Time		$\sqrt{\text{Time}}$ (s ^{1/2})	Mass (g)	ΔMass (g)	Mass/(area x density) of water = l (mm)
	days	s				
		0	0	819.20	0.00	0.0000
		60	8	819.99	0.79	0.1004
		300	17	820.81	1.61	0.2047
		640	25	821.30	2.10	0.2670
		1230	35	821.73	2.53	0.3217
		1800	42	822.09	2.89	0.3675
		3600	60	822.69	3.49	0.4437
		7200	85	823.31	4.11	0.5226
		10800	104	823.79	4.59	0.5836
		14400	120	824.22	5.02	0.6383
		18000	134	824.52	5.32	0.6764
		21600	147	824.72	5.52	0.7018
1		95400	309			
2		181020	425			
3		268740	518			
5		439620	663			
6		527580	726			
7		614820	784			
8		701520	838			

Sample No.33
 Sample : Age 28 days
 Mass of condition disc: 861.81 g (Prior to sealing sides)
 Diameter (mm): 100.1
 Thickness (mm): 51.5
 Water temp (c): 26.1

Cast Date: 28/9/2008
 Concrete Mixture: C1L25W40
 Mass after sealing specimen: 865.89 g
 Exposed Area: 7865.0 mm²

Test Date 26/10/2008

	Test Time		$\sqrt{\text{Time}}$ (s ^{1/2})	Mass (g)	ΔMass (g)	Mass/(area x density) of water = <i>l</i> (mm)
	days	s				
		0	0	865.89	0.00	0.0000
		60	8	866.72	0.83	0.1055
		300	17	867.76	1.87	0.2378
		600	24	868.55	2.66	0.3382
		1200	35	869.33	3.44	0.4374
		1800	42	869.95	4.06	0.5162
		3600	60	871.16	5.27	0.6701
		7200	85	872.63	6.74	0.8570
		10800	104	873.67	7.78	0.9892
		14460	120	874.46	8.57	1.0896
		18060	134	875.14	9.25	1.1761
		21600	147	875.74	9.85	1.2524
1		96180	310	882.11	16.22	2.0623
2		183480	428	886.45	20.56	2.6141
3		267360	517	888.84	22.95	2.9180
5		435240	660	891.75	25.86	3.2880
6		523860	724	892.41	26.52	3.3719
7		612000	782	892.80	26.91	3.4215
8		699000	836	893.02	27.13	3.4495

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างข้อมูลการหาปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจากการลากเส้นแนวโน้ม
โดยใช้วิธีผลรวมของผลต่างกำลังสองน้อยสุด

Mix No. 1
 Mix Designation C1W40 Exposure time = 35 day

Fick 's Second Law :

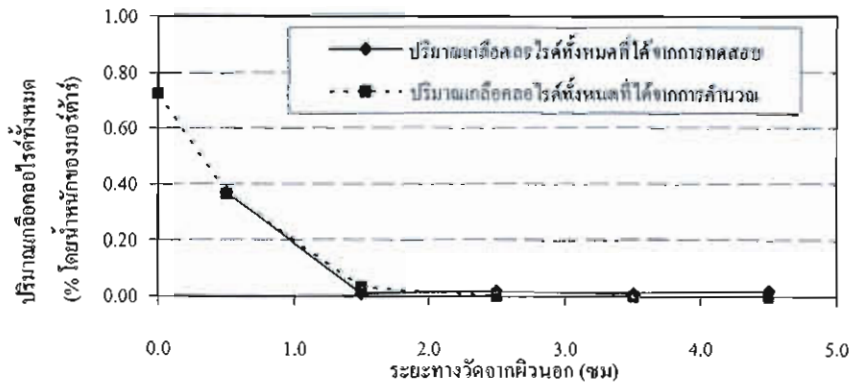
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation Input

- C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)
- C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of sample)
- C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of sample)
- t : Exposure time (year)
- x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm²/year)

D_a (cm ² /year)	C_s (% by Wt.of sample)	C_i (% by Wt.of sample)	time (years)	Depth (cm)	Chloride concentration at depth X (% by Wt.of sample)		S
					C_{xt}	C_{xt} Calculate	
2.94	0.723	0.00	0.096	0.0		0.723	
				0.5	0.370	0.365	0.0000
				1.5	0.010	0.033	0.0005
				2.5	0.020	0.001	0.0004
				3.5	0.010	0.000	0.0001
				4.5	0.020	0.000	0.0004
							0.0010



Then, Diffusion coefficient = 2.94 cm²/year

Mix No. 24

Mix Designation CIF25L5W50 Exposure time = 35 day

Fick 's Second Law :

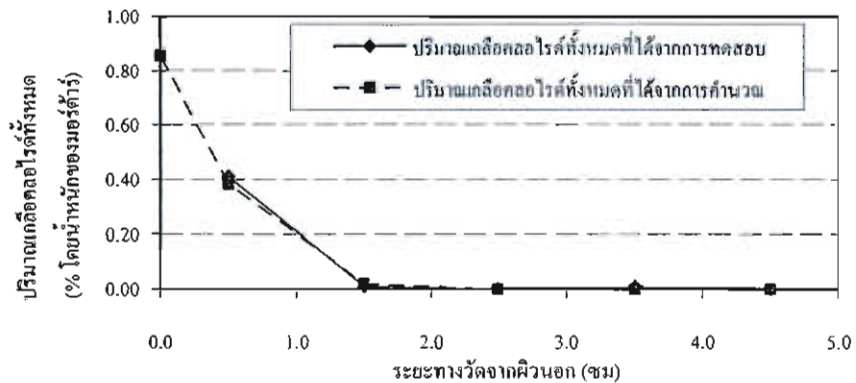
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation Input

- C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)
- C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of sample)
- C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of sample)
- t : Exposure time (year)
- x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm²/year)

D_a (cm ² /year)	C_s (% by Wt. of sample)	C_i (% by Wt. of sample)	time (years)	Depth (cm)	Chloride concentration at depth X (% by Wt. of sample)		S
					C_{xt}	C_{xt} Calculate	
2.26	0.857	0.00	0.096	0.0		0.857	
				0.5	0.410	0.383	0.0007
				1.5	0.010	0.019	0.0001
				2.5	0.000	0.000	0.0000
				3.5	0.010	0.000	0.0001
				4.5	0.000	0.000	0.0000
							0.0009



Then, Diffusion coefficient = 2.26 cm²/year

Mix No. 5

Mix Designation C1E10W40 Exposure time = 91 day

Fick's Second Law :

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

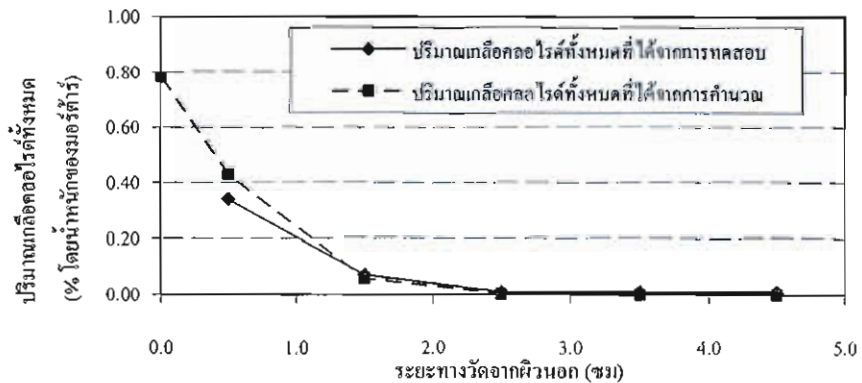
Calculation Input

- C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)
- C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of sample)
- C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of sample)
- t : Exposure time (year)
- x : Depth from exposure surface (cm)

Determine

- D_a : Diffusion coefficient (cm²/year)

D_a (cm ² /year)	C_s (% by Wt.of sample)	C_i (% by Wt.of sample)	time (years)	Depth (cm)	Chloride concentration at depth X (% by Wt.of sample)		S
					C_{xt}	$C_{xt \text{ Calculate}}$	
1.41	0.780	0.00	0.249	0.0		0.780	
				0.5	0.340	0.430	0.0080
				1.5	0.070	0.057	0.0002
				2.5	0.010	0.002	0.0001
				3.5	0.010	0.000	0.0001
				4.5	0.010	0.000	0.0001
							0.0083



Then, Diffusion coefficient = 1.41 cm²/year

Mix No. 9
 Mix Designation C1F30W40 Exposure time = 91 day

Fick 's Second Law :

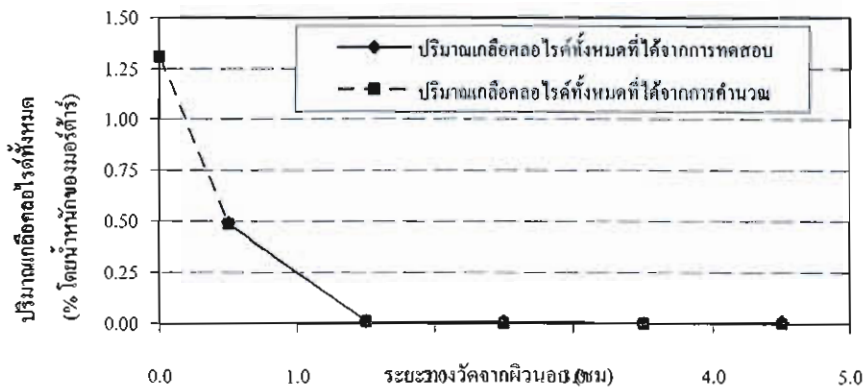
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation Input

- C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)
- C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of sample)
- C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of sample)
- t : Exposure time (year)
- x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm²/year)

D_a (cm ² /year)	C_s (% by Wt.of sample)	C_i (% by Wt.of sample)	time (years)	Depth (cm)	Chloride concentration at depth X (% by Wt.of sample)		S
					C_{xt}	C_{xt} Calculate	
0.62	1.310	0.00	0.249	0.0		1.310	
				0.5	0.490	0.484	0.0000
				1.5	0.010	0.009	0.0000
				2.5	0.010	0.000	0.0001
				3.5	0.000	0.000	0.0000
				4.5	0.010	0.000	0.0001
							0.0001



Then, Diffusion coefficient = 0.62 cm²/year

Mix No. 12

Mix Designation C1E10F30W50

Exposure time = 182 day

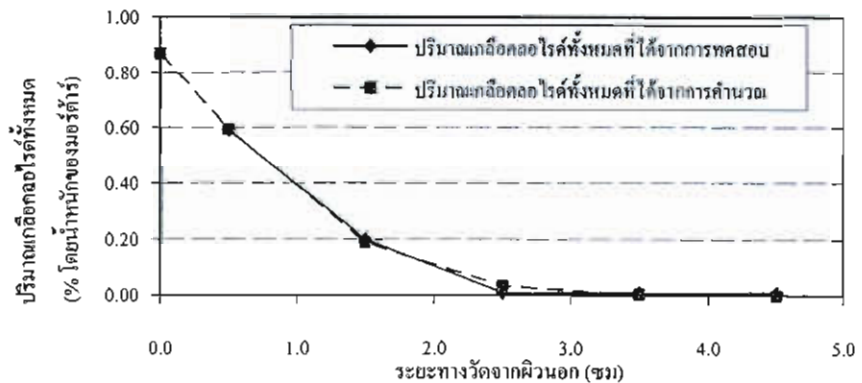
Fick's Second Law :

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation Input

- C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)
- C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of sample)
- C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of sample)
- t : Exposure time (year)
- x : Depth from exposure surface (cm)
- Determine D_a : Diffusion coefficient (cm²/year)

D _a (cm ² /year)	C _s (% by Wt.of sample)	C _i (% by Wt.of sample)	time (years)	Depth (cm)	Chloride concentration at depth X (% by Wt.of sample)		S
					C _{xt}	C _{xt Calculate}	
1.48	0.870	0.00	0.499	0.0		0.870	
				0.5	0.590	0.592	0.0000
				1.5	0.200	0.189	0.0001
				2.5	0.010	0.034	0.0006
				3.5	0.010	0.003	0.0000
				4.5	0.010	0.000	0.0001
							0.0008



Then, Diffusion coefficient = 1.48 cm²/year

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างข้อมูลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต
โดยใช้วิธี Trial & Error

Calculation of diffusion coefficient

No.25 C1F30 W/B 0.40
 Test duration 35 day

Fick 's Second Law :

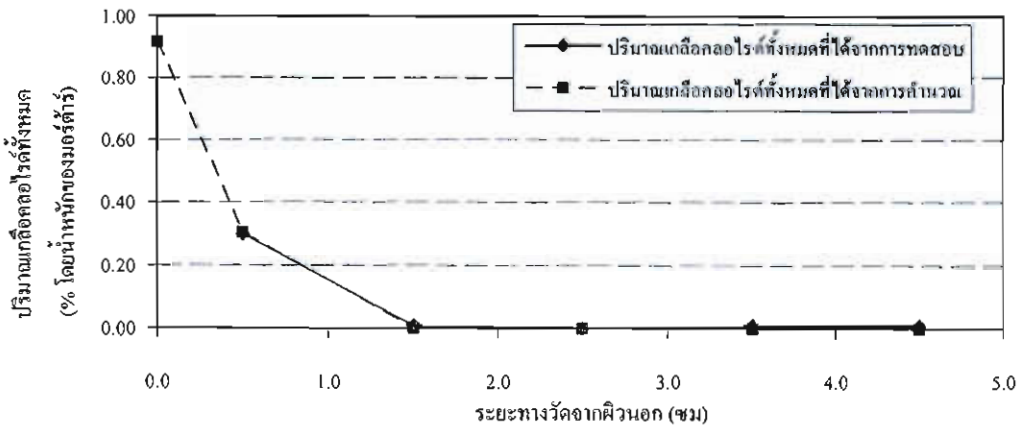
$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation Input

C_{xi} : Chloride concentration at depth X (cm)
 C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of sample)
 C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of sample)
 t : Exposure time (year)
 x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm²/year)

D_a (cm ² /year)	C_s (% by wt.of sample)	C_i (% by wt.of sample)	Exposure time, t (years)	Depth from exposure surface, X (cm)	Chloride concentration at depth X (% by wt.of sample)	
					C_{xi}	$C_{xi Cal}$
1.39	0.917	0.00	0.096	0.0		0.917
				0.5	0.300	0.305
				1.5	0.010	0.003
				2.5	0.000	0.000
				3.5	0.010	0.000
				4.5	0.010	0.000



Then, Diffusion coefficient = 1.39 cm²/year

Calculation of diffusion coefficient

No.34 C1E10F30 W/B 0.50

Test duration 91 day

Fick's Second Law :

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

Calculation Input

C_{xt} : Chloride concentration at depth X (cm)

C_s : Surface concentration of chloride (% by wt. of sample)

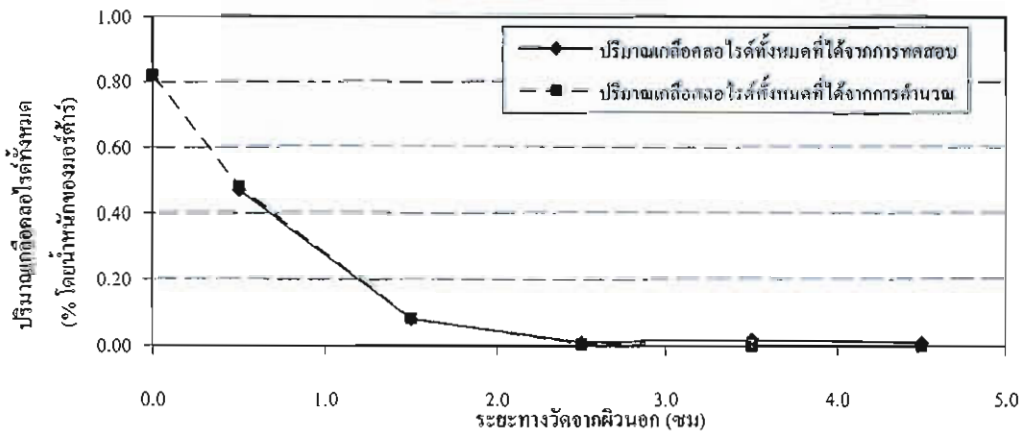
C_i : Initial concentration measured in concrete sample (% by wt. of sample)

t : Exposure time (year)

x : Depth from exposure surface (cm)

Determine D_a : Diffusion coefficient (cm²/year)

D_s (cm ² /year)	C_s (% by wt.of sample)	C_i (% by wt.of sample)	Exposure time, t (years)	Depth from exposure surface, X (cm)	Chloride concentration at depth X (% by wt.of sample)	
					C_{xt}	$C_{x, Cal}$
1.68	0.820	0.00	0.249	0.0		0.820
				0.5	0.470	0.480
				1.5	0.080	0.083
				2.5	0.010	0.005
				3.5	0.020	0.000
				4.5	0.010	0.000



Then, Diffusion coefficient = 1.68 cm²/year

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายเอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต
วัน เดือน ปี เกิด	4 พฤษภาคม 2521
สถานที่เกิด	อำเภอปากน้ำโพ จังหวัดนครสวรรค์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	710/180 ม. 7 ต. หนองปลิง อ. เมือง จ. นครสวรรค์ 60000
ตำแหน่งและประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2544-2547	วิศวกรสำนักงาน บริษัท รีเสิร์ช อีควิปเมนต์ จำกัด
พ.ศ. 2547-2550	วิศวกรประจำสนาม บริษัท ฤทธา จำกัด
พ.ศ. 2552-2555	วิศวกร เทศบาลตำบลหนองฉาง
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2539-2544	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พ.ศ. 2550-2555	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยบูรพา
รางวัลหรือทุนการศึกษา	ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา และจากศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการ ก่อสร้างและบำรุงรักษา (Construction & Maintenance Technology Research Center, CONTEC) สถาบัน เทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารแสดงการเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายเอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

จำนวน 4 บทความ ได้แก่

1. ความสามารถกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่น
หินปูน

(CHLORIDE BINDING CAPACITY AND CHLORIDE DIFFUSION OF CEMENT
PASTES WITH LIMESTONE POWDER)

การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9

วันที่ 14-15 มีนาคม 2551

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

2. CHLORIDE RESISTANCE OF PORTLAND CEMENT MORTAR WITH
FLY ASH, LIMESTONE POWDER AND EXPANSIVE ADDITIVES

The 1st ASEAN CIVIL ENGINEERING CONFERENCE

March 12-13, 2009

Ambassador City Jomtien Hotel, Pattaya, Thailand

3. ความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ฝุ่นหินปูน
และสารขยายตัว

(CHLORIDE RESISTANCE OF PORTLAND CEMENT MORTAR WITH
FLY ASH, LIMESTONE POWDER AND EXPANSIVE ADDITIVES)

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14

วันที่ 13-15 พฤษภาคม 2552

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ฝุ่นหินปูน และ สารขยายตัว

(CHLORIDE RESISTANCE OF PORTLAND CEMENT MORTAR WITH
FLY ASH, LIMESTONE POWDER AND EXPANSIVE ADDITIVES)

การประชุมคอนกรีตวิชาการครั้งที่ 5

วันที่ 20-22 ตุลาคม 2552

โรงแรมเดอะกรีนเนอรี รีสอร์ท เขาใหญ่ จ.นครราชสีมา

ความสามารถกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน
**CHLORIDE BINDING CAPACITY AND CHLORIDE DIFFUSION OF
CEMENT PASTES WITH LIMESTONE POWDER**

เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต¹ ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บัว² วสุ วิทเขตปกาศ² และทวีชัย สำราญวานิช³

¹นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

²บัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้เท่ากับ 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับ 0.05, 0.15 และ 0.25 และศึกษากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ด้วย

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง แต่เมื่ออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น การเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 จะลดลง แต่ที่อัตราส่วน 0.5 จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการแพร่ของคลอไรด์พบว่ามีแนวโน้มมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานหรืออัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น สำหรับกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมฝุ่นหินปูนที่อายุ 91 วัน พบว่ามีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานหรืออัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ความสามารถกักเก็บคลอไรด์ การแพร่ของคลอไรด์ ฝุ่นหินปูน ซีเมนต์เพสต์

ABSTRACT

The aim of this paper is to study the chloride binding capacity and chloride diffusion of cement pastes with limestone powder. Type I Portland cement was used as a main cementitious material for cement paste specimens. The specimens with water to binder ratio of 0.40 and 0.50 and limestone powder to binder ratio of 0.05, 0.15 and 0.25 were prepared. The compressive strength of cement pastes was also investigated.

The binding capacity reduced when the water to binder ratio increased. The increase of the limestone powder to binder ratio resulted in the decreased binding capacity of cement pastes with water to binder ratio of 0.40, but resulted in the increased of binding capacity for cement pastes with water to binder ratio of 0.50. For the chloride diffusion, it was found chloride diffusion increased when the water to binder ratio or the limestone powder to binder ratio increased. The compression strength of cement pastes at 91 days decreased when the water to binder ratio or the limestone powder to binder ratio increased.

Keywords: Chloride binding capacity, Chloride diffusion, Limestone powder, Cement pastes

1. บทนำ

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์หมายถึง ความสามารถในการจับคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ให้กลายเป็นคลอไรด์ที่ถูกจับยึด (Fixed chloride) ในซีเมนต์เพสต์ด้วยกลไกการยึดเหนี่ยวทางกายภาพและทางเคมี โดยคลอไรด์ที่ถูกจับยึดนี้ไม่สามารถจะไปทำอันตรายเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ ดังนั้นหากคอนกรีตมีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์สูง จะช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้ช้าลงได้ ส่วนการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ หมายถึง การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เนื่องด้วยผลของความแตกต่างของความเข้มข้นคลอไรด์ หากคลอไรด์สามารถแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้เร็ว ก็จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตมีโอกาสเกิดสนิมได้เร็ว ด้วยเหตุนี้คุณสมบัติของคอนกรีตในเรื่องความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์จึงเป็นดรชนีที่สำคัญค่าหนึ่งในการพิจารณาถึงความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตนั้นๆ

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาหาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนต่างๆกัน เพื่อหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนที่เหมาะสมเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลองความคงทนของคอนกรีตเสริมเหล็กต่อการทำลายของเกลือคลอไรด์

3. วิธีการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองหาค่าความสามารถกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ โดยทำการเตรียมตัวอย่างและจำลองสถานการณ์ตั้งแวดล้อมคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการทดสอบ พร้อมทั้งทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างด้วย โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การทดสอบความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

3.1.1 วัสดุส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์จำนวน 8 ชุดทดสอบตามส่วนผสมดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และฝุ่นหินปูน แสดงไว้ในตารางที่ 2 ในแต่ละส่วนผสมทำการหล่อตัวอย่างเป็นแผ่นบางๆ (Disc specimens) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร จำนวน 13 ชิ้น ทำการบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วันแล้วนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 5% ดังรูปที่ 1 เป็นระยะเวลา 91 วัน

3.1.2 การหาความสามารถเก็บกักคลอไรด์

เมื่อแช่ตัวอย่างครบกำหนด 91 วัน ก็ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเกลือคลอไรด์ภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างออกมา หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างจำนวน 10 ชิ้นมาบิบบเอาสารละลายในซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่องกดสารละลาย (Pore solution apparatus) รายละเอียดการกดสารละลายจากตัวอย่างดังในรูปที่ 2 (Bameyback and Diamond, 1981) ตัวอย่างที่เหลืออีก 3 ชิ้นของแต่ละส่วนผสมนำไปใช้หา Water Content นำตัวอย่างน้ำเกลือคลอไรด์ทั้งหมดไปวิเคราะห์หาค่าปริมาณคลอไรด์ตามสมการที่ 1, 2, 3 และ 4

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของซีเมนต์พิเศษที่ใช้

Mix id.	W/B	L/B
C1W40	0.40	0
C1L5W40	0.40	0.05
C1L15W40	0.40	0.15
C1L25W40	0.40	0.25
C1W50	0.50	0
C1L5W50	0.50	0.05
C1L15W50	0.50	0.15
C1L25W50	0.50	0.25

หมายเหตุ

C1 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I

W/B คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

L/B คือ อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ และฝุ่นหินปูน

องค์ประกอบทางเคมี	Type I Portland cement (% by weight)	Limestone powder (% by weight)
Silicon Dioxide ,SiO ₂	20.80	0.06
Aluminum Oxide,Al ₂ O ₃	5.50	0.09
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃	3.16	0.04
Calcium Oxide, CaO	64.97	54.80
Magnesium Oxide ,MgO	1.06	0.57
Sodium Oxide ,Na ₂ O	0.08	-
Potassium Oxide ,K ₂ O	0.55	-
Sulfur Trioxide ,SO ₃	2.96	-
Loss on Ignition ,LOI	2.89	43.80
Tricalcium Silicate ,C ₃ S	56.50	-
Dicalcium Silicate, C ₂ S	17.01	-
Tricalcium Aluminate, C ₃ A	9.23	-
Tetracalcium Aluminoferrite, C ₄ AF	9.62	-
Specific gravity	3.15	2.70
Blaine fineness (cm ² /g)	3,200	9,260

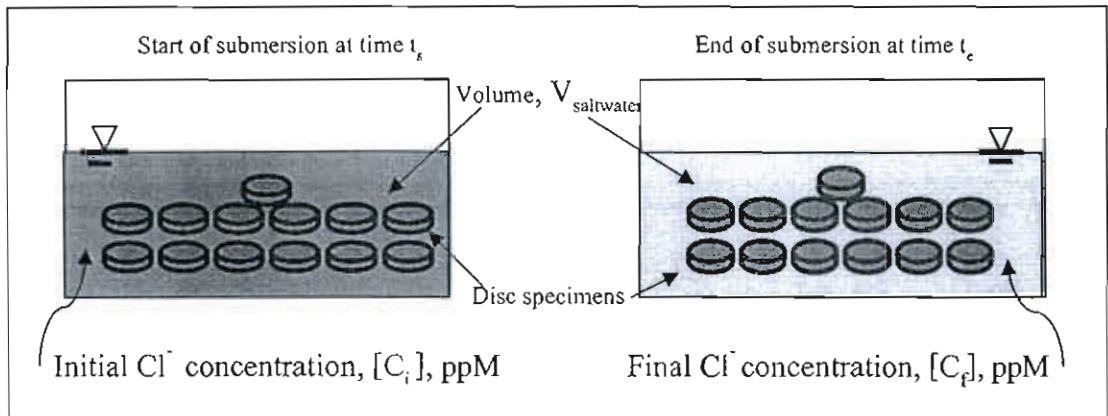
$$\text{Total Cl}^-_{\text{indispecimens}} = \{[C_i] - [C_f]\} \times V_{\text{saltwater}} \quad (1)$$

$$\text{Free Cl}^-_{\text{indispecimens}} = [C_{\text{free}}] \times V_{\text{waterindispecimens}} \quad (2)$$

$$V_{\text{waterindispecimens}} = [W_{\text{evaporable}} / 100] \times W_{\text{discspecimens}} \quad (3)$$

$$\text{Fixed Cl}^-_{\text{indispecimens}} = \text{Total Cl}^-_{\text{indispecimens}} - \text{Free Cl}^-_{\text{indispecimens}} \quad (4)$$

โดยที่	Total Cl ⁻ _{indispecimens}	คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ (กรัม)
	Free Cl ⁻ _{indispecimens}	คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระในซีเมนต์เพสต์ (กรัม)
	Fixed Cl ⁻ _{indispecimens}	คือ ปริมาณคลอไรด์ถูกจับยึดซีเมนต์เพสต์ (กรัม)
	V _{waterindispecimens}	คือ ปริมาตรของน้ำในชิ้นตัวอย่าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	V _{saltwater}	คือ ปริมาตรของน้ำเกลือคลอไรด์ที่ใช้แช่ตัวอย่าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	W _{evaporable}	คือ น้ำหนักของน้ำที่ระเหยได้ในชิ้นตัวอย่าง (กรัม)
	W _{discspecimens}	คือ น้ำหนักทั้งหมดของชิ้นตัวอย่างที่สภาพอ้อมตัวผิวแห้ง (กรัม)
	C _i , C _f	คือ ความเข้มข้นของสารละลายเกลือคลอไรด์เมื่อคอนกรีตเริ่มต้นและเมื่อสิ้นสุดการแช่ตัวอย่าง (%)
	C _{free}	คือ ความเข้มข้นของสารละลายเกลือคลอไรด์อิสระในตัวอย่าง (%)



รูปที่ 1 ลักษณะการทดลองเพื่อหาความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์



(ก) เครื่องทดสอบแรงกดเป็นต้นกำเนิดแรงกด



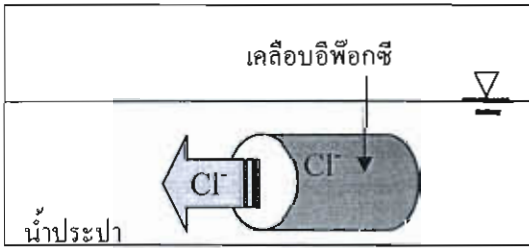
(ข) เครื่องกัดสารละลายในตัวอย่าง

รูปที่ 2 การกัดสารละลายจากตัวอย่าง

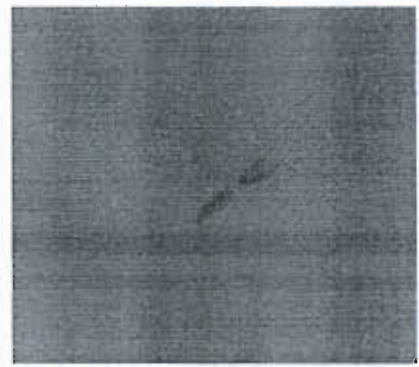
3.2 การทดสอบการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์

3.2.1 วัสดุ ส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ตามส่วนผสมในตารางที่ 1 รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร โดยเพิ่มเกลือโซเดียมคลอไรด์ลงไปนซีเมนต์เพสต์ เพื่อให้มีปริมาณคลอไรด์ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทั้งนี้รายละเอียดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 เมื่อทำการหล่อก่อนตัวอย่างเสร็จ ก็ทำการเคลือบผิวทุกด้านของก้อนซีเมนต์เพสต์ด้วยสารอีพ็อกซี ยกเว้นผิวด้านปลายด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) ซึ่งเมื่อซีเมนต์เพสต์มีอายุได้ 3 วัน จึงนำไปแช่ในภาชนะพลาสติกที่ใส่น้ำประปา ดังรูปที่ 3(ข) เป็นระยะเวลา 91 วัน โดยเมื่อครบระยะเวลาการแช่ในน้ำจึงนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ขึ้นมาจากน้ำ แล้วทำการตัดก้อนตัวอย่างเป็นแผ่นบางๆ หนาชั้นละ 10 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้นนับจากปลายด้านที่ไม่เคลือบสารอีพ็อกซี แล้วนำชิ้นซีเมนต์เพสต์มาตัดแยกเอาเฉพาะส่วนตรงกลางไปทดสอบ โดยเลือกเอาเฉพาะตัวอย่างที่ห่างจากขอบด้านข้างที่เคลือบอีพ็อกซีประมาณ 1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4

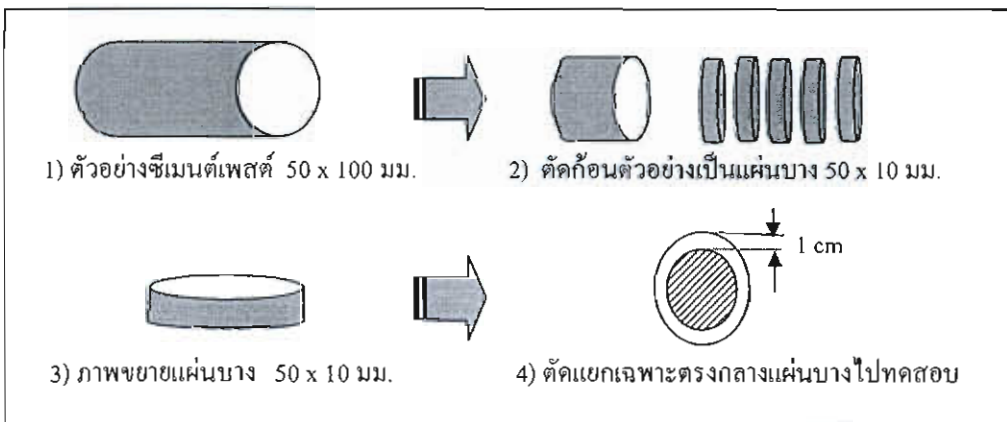


(ก) การแพร่ของคลอไรด์ออกจากตัวอย่าง



(ข) ตัวอย่างการทดสอบการแพร่ของคลอไรด์

รูปที่ 3 การทดลองเพื่อหาการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ตามระดับความลึก

3.2.2 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

นำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่บดเป็นผงและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แล้ว ไปทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM C1152 และ ASTM C 1218 โดยวิธีการไตเตรท (Titration) ซึ่งใช้สารละลายกรดไนตริกหรือน้ำ (ขึ้นอยู่กับประเภทของคลอไรด์) เป็นตัวทำละลายเอาคลอไรด์ทั้งหมดหรือคลอไรด์อิสระในซีเมนต์เพสต์ออกมา แล้วใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเป็นตัวไตเตรนต์เพื่อหาปริมาณคลอไรด์ โดยพิจารณาจุดยุติของปฏิกิริยาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกวิธีวิเคราะห์นี้ว่า Potentiometric titration

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์

3.3.1 วัสดุ ส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างจะมีสัดส่วนการผสมดังตารางที่ 1 โดยหล่อตัวอย่างเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม

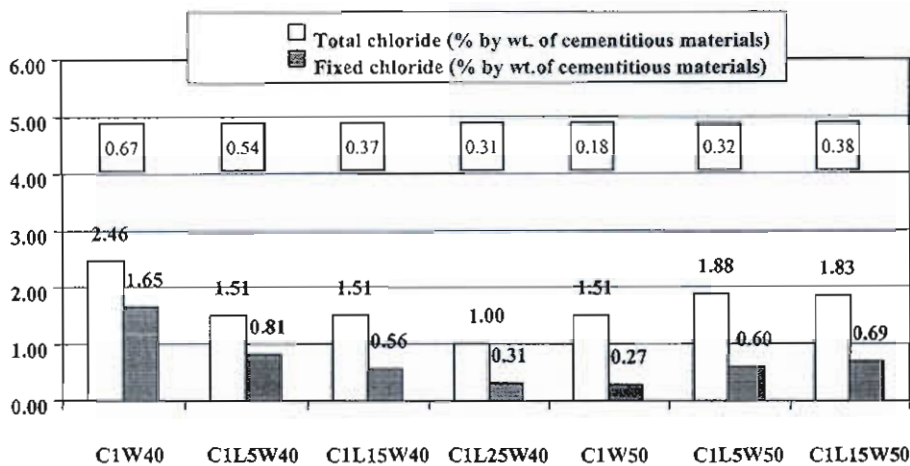
3.3.2 ทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร ที่อายุ 91 วัน พิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่างทดสอบจากแต่ละชุดส่วนผสม

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน

จากรูปที่ 5 ตัวเลขในกรอบสี่เหลี่ยมเหนือกราฟแท่งคือ อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกจับยึด (Fixed chloride ratio) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ถูกจับยึดเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ ถ้ามีค่ามากแสดงว่าซีเมนต์เพสต์นั้นมีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ที่ดี ดังนั้นจากรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาจากค่า Fixed chloride ratio พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากัน เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น ความสามารถเก็บกักคลอไรด์จะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเกิดจากเนื้อซีเมนต์มีโพรงช่องว่างมากขึ้น การแพร่คลอไรด์เกิดได้ง่าย ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเพิ่มขึ้น แต่คลอไรด์ที่ถูกจับยึดโดยวัสดุประสานยังคงมีปริมาณเท่าเดิม ทำให้ค่า Fixed chloride ratio ลดลง และเมื่อพิจารณาถึงผลจากอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนที่แตกต่างกันพบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เมื่อมีการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนมากขึ้น ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าลดลง เกิดจากการทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่าง (Filler effect) ในเนื้อซีเมนต์เพสต์ของฝุ่นหินปูน ที่ทำให้โพรงช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ลดลง แต่ความสามารถในการจับยึดคลอไรด์ก็ลดลงเช่นกัน เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง โดยปริมาณคลอไรด์ที่ถูกจับยึดลดลงในสัดส่วนที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ทำให้ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ลดลง สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 เมื่อมีการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนมากขึ้น ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากโพรงช่องว่างที่มีจำนวนมากเนื่องจากปริมาณน้ำที่มากขึ้น ทำให้ฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วนการแทนที่ 0.05 และ 0.15 ไม่สามารถเติมช่องว่างได้เพียงพอกับจำนวนโพรงช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์ ทำให้

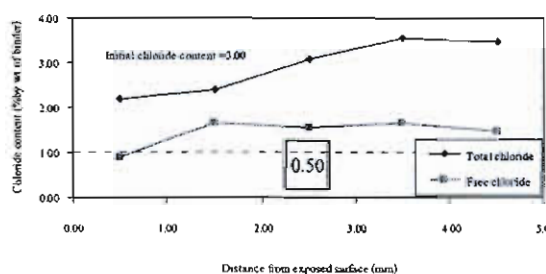


รูปที่ 5 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน

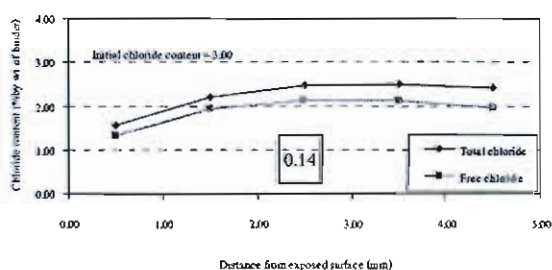
หมายเหตุ จากผลการทดลองรูปที่ 5 ไม่มีข้อมูลของตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และมีกรแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน 0.25 เนื่องจากยังดำเนินการทดสอบอยู่

คลอไรด์แพร่เข้ามาตามโพรงช่องว่างที่เหลือ สำหรับปริมาณคลอไรด์ถูกจับยึดที่เพิ่มขึ้น อาจเกิดจากขนาดโพรงช่องว่างที่เหมาะสมและจากปริมาณฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้มีความสามารถจับยึดคลอไรด์ทางกายภาพเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มในสัดส่วนที่มากกว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด จึงทำให้ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์เพิ่มขึ้น

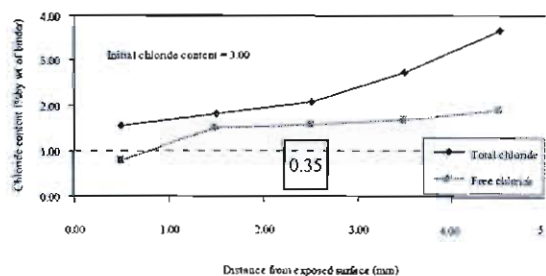
4.2 การแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน



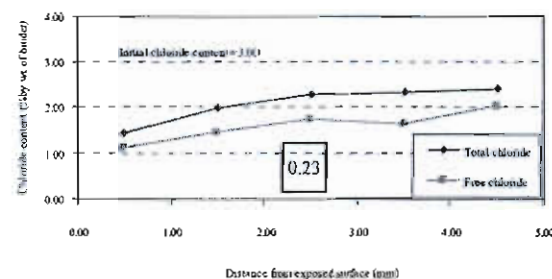
รูปที่ 6 การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่าง C1W40



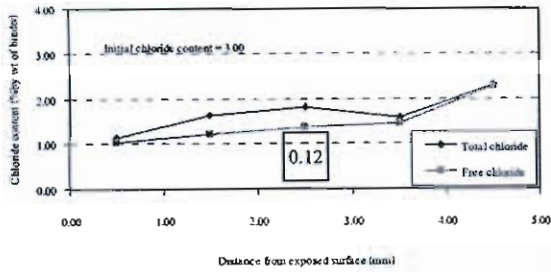
รูปที่ 7 การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่าง C1W50



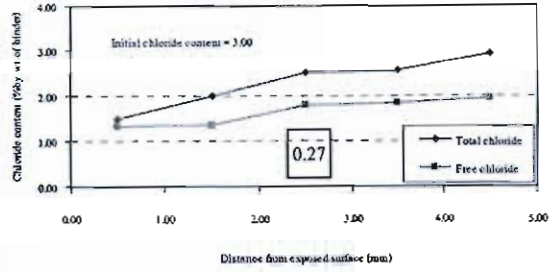
รูปที่ 8 การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่าง C1L5W40



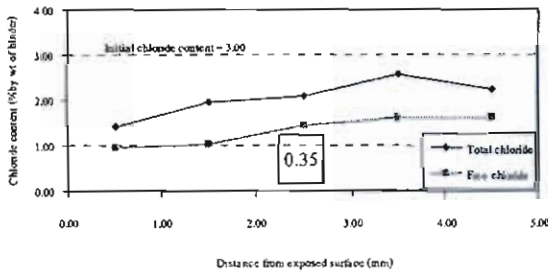
รูปที่ 9 การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่าง C1L5W50



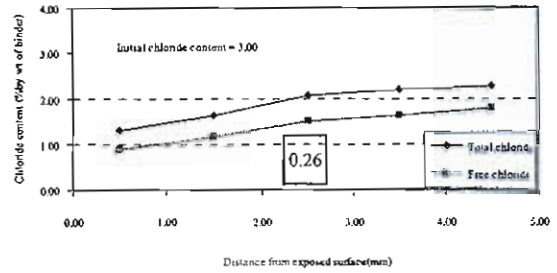
รูปที่ 10 การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่าง CIL15W40



รูปที่ 11 การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่าง CIL15W50



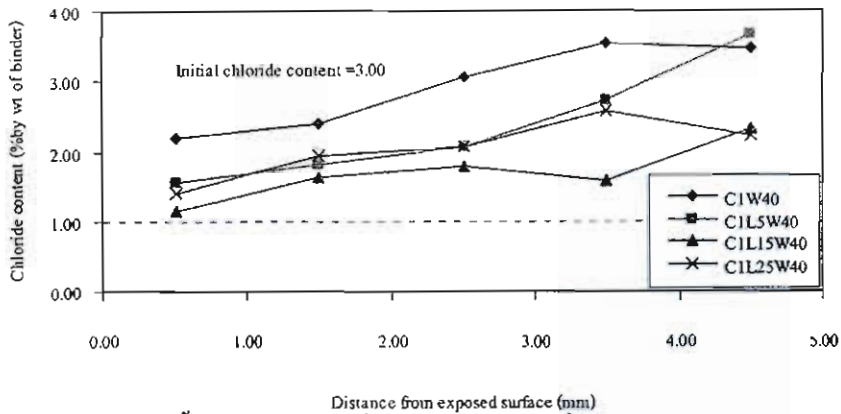
รูปที่ 12 การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่าง CIL25W40



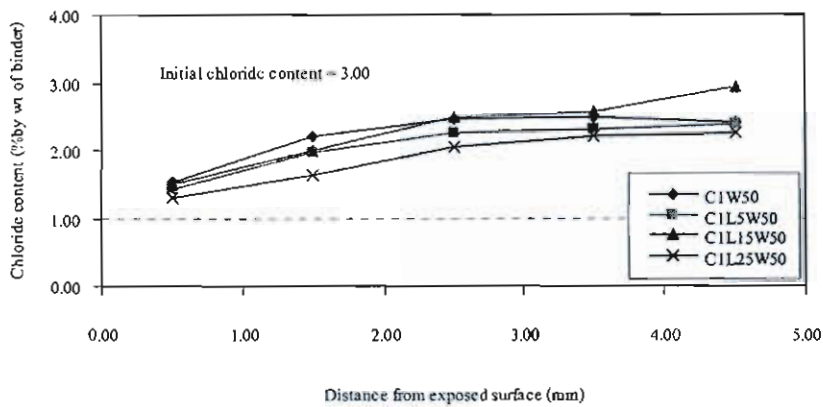
รูปที่ 13 การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่าง CIL25W50

จากรูปที่ 6-13 แสดงให้เห็นถึงการแพร่ของคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระในซีเมนต์เพสต์เปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนที่แตกต่างกัน โดยตัวเลขในกรอบสี่เหลี่ยมในแต่ละรูป คือ ค่าเฉลี่ยของ Fixed chloride ratio ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 0 ถึง 50 มม. โดยค่าปริมาณคลอไรด์ที่ถูกจับยึดจับหาได้จากค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระที่ทุกๆ ระยะจากผิวคานนอกที่สัมผัสกับน้ำประปาตั้งแต่ 0 ถึง 50 มม. และจากผลการทดลอง พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนที่เท่ากัน เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่า แนวโน้มของความสามารถกักเก็บคลอไรด์จะมีค่าลดลง และพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนที่แตกต่างกัน ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 แนวโน้มของความสามารถกักเก็บคลอไรด์จะมีค่าลดลง เมื่อฝุ่นหินปูนมีปริมาณเพิ่มขึ้น และพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 แนวโน้มของความสามารถกักเก็บคลอไรด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อฝุ่นหินปูนมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองเรื่องความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ในงานวิจัยนี้

เนื่องด้วยในการทดสอบหาค่าความสามารถกักเก็บคลอไรด์ได้ใช้ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์แช่ในน้ำเกลือ โดยให้เกลือคลอไรด์แพร่เข้าไปในตัวอย่าง แต่ในการทดสอบการแพร่ของคลอไรด์ ได้ใช้น้ำเกลือเป็นส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ตั้งแต่เริ่มต้น และให้เกลือคลอไรด์แพร่ออกจากตัวอย่าง นอกจากนั้นยังมีความแตกต่างกันเรื่องขนาดตัวอย่างทดสอบ การเคลื่อนตัวอย่าง ดังนั้นในการทดลองทั้งสองวิธี ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์ที่ถูกจับยึดที่วัดค่าได้จากการทดสอบ จะไม่ถูกนำมาเปรียบเทียบกันเนื่องจากมีเงื่อนไขและสถานะที่ต่าง

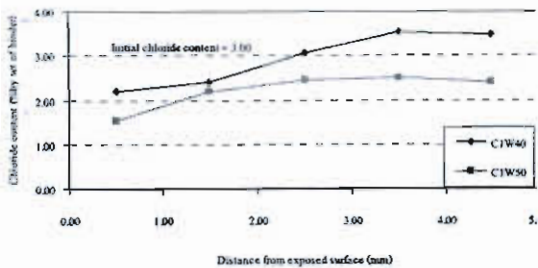


รูปที่ 14 การแพร่ของคลอไรด์ทั้งหมดในตัวอย่างที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานต่างๆ กัน แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก

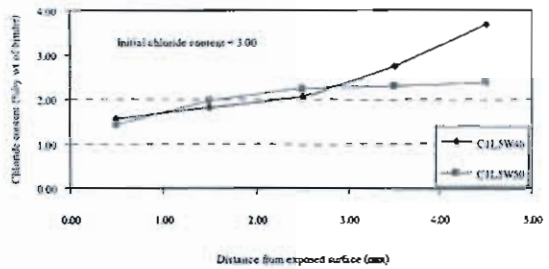


รูปที่ 15 การแพร่ของคลอไรด์ทั้งหมดในตัวอย่างที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานต่างๆ กัน แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก

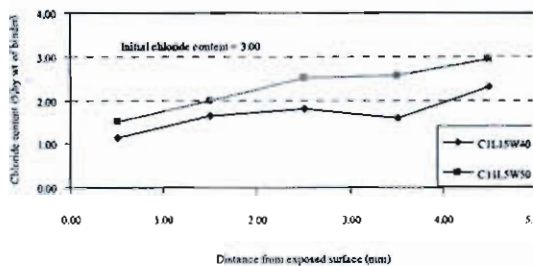
เมื่อพิจารณาผลการทดลองใน รูปที่ 14 และ รูปที่ 15 พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มมากขึ้น แนวโน้มการแพร่ของคลอไรด์ก็จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เหตุผลเนื่องจากฝุ่นหินปูนที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็มช่องว่าง (Filler) แต่ไม่มีคุณสมบัติของวัสดุประสานเหมือนปูนซีเมนต์ เมื่อใช้ปริมาณมากเกินไปจะทำให้คลอไรด์สามารถแพร่ได้ง่าย และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่ามีความสอดคล้องกัน เช่น งานวิจัยของ M. Ghrici et al. (2007) ที่ได้ทำการทดสอบ Rapid chloride ion permeability ด้วยตัวอย่างคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วน 0.15 เปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เท่ากัน พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนจะมีค่ามากกว่าปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนถึง 67% ที่อายุ 28 วันและเพิ่มขึ้นเป็น 135% ที่ 90 วัน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Bonavetti et al. (2000) ที่ทำการศึกษาเรื่อง Penetration of chloride ion พบว่าปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 43% เป็น 114% เมื่อเพิ่มปริมาณฝุ่นหินปูนจาก 10% เป็น 20% เป็นต้น



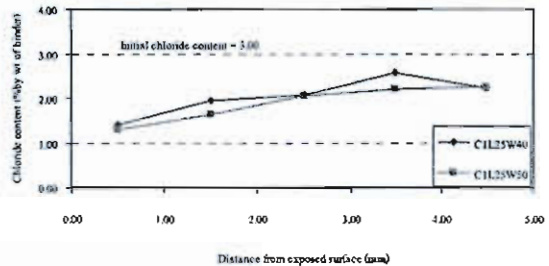
รูปที่ 16 เปรียบเทียบการแพร่ของคลอไรด์ทั้งหมดระหว่างตัวอย่าง C1W40 กับ C1W50



รูปที่ 17 เปรียบเทียบการแพร่ของคลอไรด์ทั้งหมดระหว่างตัวอย่าง C1L5W40 กับ C1L5W50



รูปที่ 18 เปรียบเทียบการแพร่ของคลอไรด์ทั้งหมดระหว่างตัวอย่าง C1L15W40 กับ C1L15W50



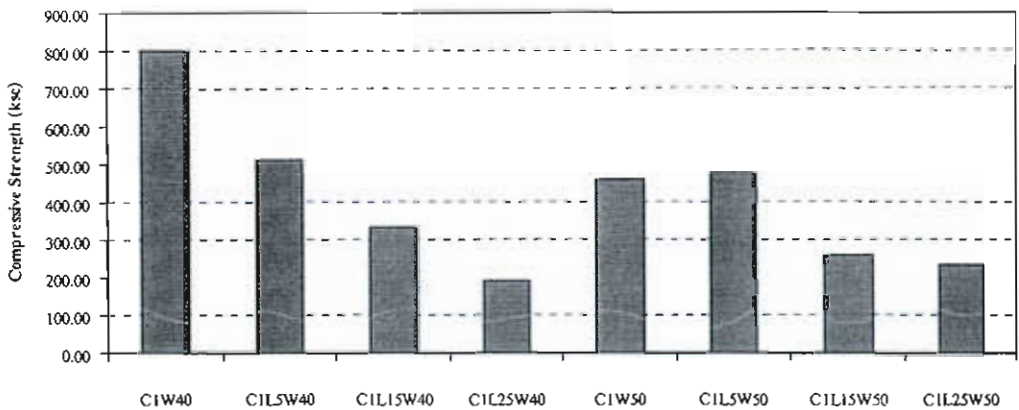
รูปที่ 19 เปรียบเทียบการแพร่ของคลอไรด์ทั้งหมดระหว่างตัวอย่าง C1L25W40 กับ C1L25W50

เมื่อพิจารณา ผลการทดลอง รูปที่ 16-19 พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากัน พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีแนวโน้มการแพร่ของคลอไรด์มากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อาจเกิดจากเมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อซีเมนต์ไม่แน่น เกิดโพรงช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น เป็นช่องทางให้คลอไรด์แพร่ได้ง่าย และเมื่อนำผลการทดสอบนี้ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตของ Hobbs and Matthews (1998) พบว่าผลที่ได้มีความสัมพันธ์สอดคล้องกัน ทั้งนี้ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน 0.15 พบว่าเกิดการแพร่ของคลอไรด์น้อยกว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น ต้องได้รับการตรวจสอบเพิ่มเติมต่อไป

4.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน

การทดลองในส่วนนี้ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน 3 อัตราส่วน คือ 0.05 0.15 และ 0.25 ทำการทดสอบโดยผสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ 5% เข้าไปในตัวอย่าง และนำไปแช่น้ำเปล่า ทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 91 วัน

จากรูปผลการทดลองที่ 20 ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดมีค่ามากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากเนื้อซีเมนต์ที่แน่นกว่าและโพรงช่องว่างในเนื้อซีเมนต์ที่น้อยกว่า สำหรับตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มมากขึ้น ค่าความสามารถกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่จะลดลง ซึ่งเกิดจากผลของฝุ่นหินปูนที่



รูปที่ 20 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานฝุ่นหินปูน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน

ไม่มีคุณสมบัติของการเป็นวัสดุประสาน แต่ทำหน้าที่เป็น filler ประกอบกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงทำให้การยึดประสานภายในเนื้อซีเมนต์เพสต์ไม่ดี ทำให้ความสามารถในการรับแรงน้อยลง ซึ่งพบว่าผลที่ได้มีค่าสอดคล้องกับผลทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนในอัตราส่วน 0.20 0.40 0.60 ในงานวิจัยของ ปิติและคณะ (2000) แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลวิจัยของ Tsivilis et al. (2000) ที่ทำการทดสอบหาลำดับรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดผสมฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุประสาน ที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าใกล้เคียงกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตล้วน เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ชนิดที่มีส่วนผสมของฝุ่นหินปูนไม่เกิน 20% ซึ่งผลที่แตกต่างกันนี้เกิดเนื่องจากปูนซีเมนต์ผสมฝุ่นหินปูนแบบสำเร็จรูปนั้น เม็ดปูนสุก (Clinker) จะครบร่วมกับหินปูนตั้งแต่เริ่มต้นทำให้มีความละเอียดของปูนซีเมนต์มากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ตัวอย่างที่มีส่วนผสมจากปูนสำเร็จรูปนำมารวมกับฝุ่นหินปูนภายหลัง ความละเอียดมากก็ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมากขึ้นด้วย

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาวิจัยความสามารถกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหินปูน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความสามารถกักเก็บคลอไรด์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถกักเก็บคลอไรด์จะมีค่าลดลง และเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของวัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่ม การเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะลดลง แต่ที่อัตราส่วน 0.50 จะมีค่าเพิ่มขึ้น
2. การแพร่ของคลอไรด์มีผลขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน โดยการแพร่ของคลอไรด์มีแนวโน้มที่จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนมีค่าเพิ่มขึ้น การแพร่ของคลอไรด์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน

3. กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมฝุ่นหินปูนมีผลขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราทดแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน โดยพบว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่ออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดก็มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา โดยทุนอุดหนุนวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2551 และจากศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (Construction & Maintenance Technology Research Center, CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- ปิติ เสรมธากุล, บรุฉัตร ฉัตรวีระ, สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล (2000). การใช้ประโยชน์จากผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอชโซลาน. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6*, 10-12 พฤษภาคม 2543, MAT41-46
- American Society for Testing and Materials (2005). ASTM C109, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars. *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 04.01: 76-81
- American Society for Testing and Materials (2005). ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 04.02: 638-641
- American Society for Testing and Materials (2005). ASTM C1218, Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 04.02: 657-659
- Barneyback Jr., R.S., Diamond, S. (1981), Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars, *Cement and Concrete Research*, 11, 279-285
- Bonavetti, V., Donza, H., Rahhal, V., Irassar, E. (2000). Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement. *Cement Concrete Research*, 30(5), 703-708
- Ghrichi, M., Kenai, S., Said-Mansour M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements, *Cement & Concrete Composites*, 29, 542-549
- Hobbs, D.W., Matthews, J.D. (1998). Minimum requirements for concrete to resist deterioration due to chloride induced corrosion. *Minimum requirements for Durable Concrete*, D.W. Hobbs (Ed.). British Cement Association, Crowthorne, UK, 43-89
- Tsivilis, S., Batis, G., Chaiotakis, E., Grigoriadis, Gr., Theodossis, D. (2000). Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 30, 1679-1683

CHLORIDE RESISTANCE OF PORTLAND CEMENT MORTAR WITH FLY ASH, LIMESTONE POWDER AND EXPANSIVE ADDITIVES

A. Rerkmahalikhit¹, T. Sumranwanich², and S. Tangtermsirikul³

¹Graduate student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand, 20131, e-mail: akekasak_r@yahoo.com

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand, 20131, e-mail: twc@buu.ac.th

³Professor, Construction and Maintenance Technology Research Center (CONTEC), Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Pathum Thani, Thailand, 12121, e-mail: somnuk@siit.tu.ac.th

Abstract: This paper presents a study on chloride resistance of Portland cement mortar with fly ash, limestone powder and expansive additives. Generally, fly ash (FA) concrete is good for chloride resistance. However, it has some disadvantages such as low strength development at early ages. Thus, limestone powder (LP) is employed as a filler material to develop the shortcoming of fly ash and also an expansive additive (EA) is employed to solve the crack problems due to shrinkage. In this research, short-term tests: rapid chloride penetration test (RCPT), rapid migration test (RMT) and water absorption test of mortar were performed as well as long-term test: immersion test was investigated. The results indicate that type 1 Portland cement mortar with fly ash was appropriate for chloride resistance as compared to others mix proportions at the age of 28 days. The higher water to binder ratio (w/b) or LP content resulted in the decrease of chloride resistance. However, when EA content increased, the chloride resistance of mortar increased. Mixes of blend portion of FA and EA or of FA and LP produced good resistance of chloride penetration. Finally, it was found that the results obtained from RCPT and RMT were correlated. Both tests had similar trend of results.

Keywords: Chloride resistance, Mortar, Fly ash, Limestone powder, Expansive additive, Chloride penetration.

1. INTRODUCTION

Chloride attack is a main factor of the corrosion of reinforcement in concrete structures. It is one of the most important issues concerning the durability of concrete structures. When the chloride concentration of concrete exceeds a certain threshold value, depassivation of the steel occurs and reinforced steel starts to corrode [see Thomas (1996) for more details]

Fly ash (FA) is a promising pozzolan and a by-product obtained from a power plant. It is the most common pozzolan and is being used worldwide. The use of fly ash as part of Portland cement reduces negative environment impact because approximately 3 million tons of fly ash is produced annually in Thailand. Many studies [Metha (1981) and Massazza (1993)] have shown that FA has been widely used as a substitute for Portland cement in many applications because of their beneficial properties, which include improvement in the durability of concrete especially for chloride resistance. However, it is often associated with shortcoming such as the need for moist-curing over longer a period of time and a reduction of strength from the beginning up to 28 days.

Limestone powder (LP) is a by-product from rock crushing processes to be used as a raw material in cement manufacturing industries and also in concrete industries. The benefits of limestone powder filler as partial replacement of Portland cement are well-established.

Economic and environmental advantages by reducing CO₂ emission are well-known. LP addition to Portland cement causes an increase of hydration at the early ages inducing a high early strength [see Lawrence (2003) for more details].

The problems from shrinkage and low tensile strength are two major unpreferable properties of concrete. Therefore, under restrained condition, concrete structures may crack due to shrinkage. Application of expansive additives (EA) in concrete is one of the effective solutions for shrinkage cracking problem of concrete. Under restrained condition, when expansive concrete expands, it produces compressive stress in the restrained expansive concrete. The compressive stress in the concrete will reduce or eliminate tensile stress which occurs when concrete shrinks in restrained condition [see Lam (2008) for more details].

Therefore, the objective of this work is to investigate the effect of LP and EA on chloride resistance of cement-only mortar and fly ash mortar. This is to be able to utilize LP or EA as a cementitious replacement material and additive to improve some properties of FA for better performance of concrete. The tendency of results obtained from short-term test and long-term test was analyzed for comparison in order to develop the relationship between short-term test and long-term test on the further study.

2. EXPERIMENT PROGRAM

2.1. Materials and mix proportion

2.1.1. Materials

Type 1 Portland cement (C1), type 5 Portland cement (C5), fly ash (FA), limestone powder (LP) and expansive additives (EA) were used as binders. Chemical composition and physical properties of these materials are given in Table 1. River sand was used as fine aggregates. The fine aggregates used in the experiments comply with ASTM C33-97.

2.1.2. Mix proportion

Cement mortar and fly ash mortar (with FA of 5%, 15%, 25%, 30%) containing different amount of LP (5%, 15%, 25%) and EA (0%, 10%) were used in short-term tests. The details of mix proportions of mortar are given in Table 2. Mix proportions of paste are the same as the mix proportion used for mortar except the blended mixes of portion of LP and FA.

Table 1 Chemical compositions and physical properties of binders

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	LOI (%)	Fineness* (cm ² /g)	Specific gravity
C1	20.20	4.70	3.73	63.40	1.37	1.22	-	0.28	2.72	3,430	3.15
C5	20.97	3.49	4.34	62.86	3.33	2.12	0.12	0.47	2.30	3,330	3.18
FA	36.10	19.40	15.10	17.40	2.97	0.77	0.55	2.17	2.81	2,460	2.27
EA	9.60	2.50	1.30	67.30	0.40	18.00	-	-	0.40	3,500	3.04
LP	0.06	0.09	0.04	54.80	0.57	-	-	-	43.80	9,260	2.70

*Using Blaine's air permeability method

Table 2 Mix proportions of mortar

Designation	Cement (kg)	SSD sand (kg)	Admixture (kg)			Water (kg)
			FA	EA	LP	
C1W40	1	2.75	-	-	-	0.40
C1W50	1	2.75	-	-	-	0.50
C5W40	1	2.75	-	-	-	0.40
C5W50	1	2.75	-	-	-	0.50
C1E10W40	0.90	2.75	-	0.10	-	0.40
C1E10W50	0.90	2.75	-	0.10	-	0.50
C5E10W40	0.90	2.75	-	0.10	-	0.40
C5E10W50	0.90	2.75	-	0.10	-	0.50
C1F30W40	0.70	2.75	0.30	-	-	0.40
C1F30W50	0.70	2.75	0.30	-	-	0.50
C1E10F30W40	0.60	2.75	0.30	0.10	-	0.40
C1E10F30W50	0.60	2.75	0.30	0.10	-	0.50
C1L5W40	0.95	2.75	-	-	0.05	0.40
C1L5W50	0.95	2.75	-	-	0.05	0.50
C1L15W40	0.85	2.75	-	-	0.15	0.40
C1L15W50	0.85	2.75	-	-	0.15	0.50
C1L25W40	0.75	2.75	-	-	0.25	0.40
C1L25W50	0.75	2.75	-	-	0.25	0.50
C1F5L25W40	0.70	2.75	0.05	-	0.25	0.40
C1F5L25W50	0.70	2.75	0.05	-	0.25	0.50
C1F15L15W40	0.70	2.75	0.15	-	0.15	0.40
C1F15L15W50	0.70	2.75	0.15	-	0.15	0.50
C1F25L5W40	0.70	2.75	0.25	-	0.05	0.40
C1F25L5W50	0.70	2.75	0.25	-	0.05	0.50

2.2. Method of testing

2.2.1. Short-term test

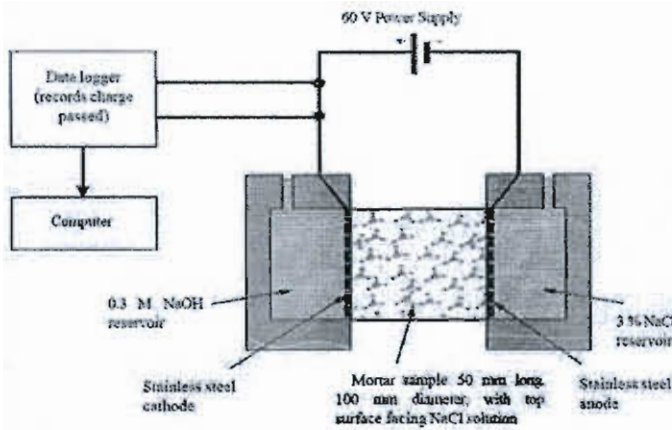
1. Rapid chloride penetration test (RCPT)

The 100 dia. x 50 mm cylinder mortar specimens were prepared. They were demoulded at the age of 24 hours. After being cured in water until the age of 27 days, they were tested at the age of 28 days for RCPT in accordance with the method described in ASTM C1202. A potential difference of 60 V dc is maintained across the ends of the specimen, one of which is immersed in a 3.0% by mass of sodium chloride (NaCl) solution, the other in a 0.3M sodium hydroxide (NaOH) solution. Test results were reported as the total charge passed, in coulombs, over the test period of 6 hours (Figure 1).

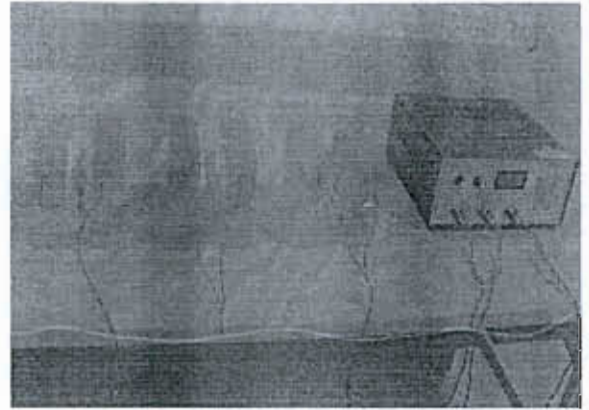
2. Rapid migration test (RMT)

The 100 dia. x 200 mm cylinder mortar specimens were prepared in accordance with ASTM C39. They were cut into 50 mm slices and curing same as RCPT specimens. At the age of 28 days, they were tested for the chloride penetration depth by using the rapid migration test as shown in Figure 2. The solutions employed in test were 3% NaCl solution in the cathode side and 0.3M NaOH solution in the anode side. Applied voltage of 30 V dc was employed for 8 hours. The depth of chloride penetration was determined by splitting the specimen and spraying 0.1M silver nitrate solution on the freshly split section. When the white silver

chloride precipitation on the split surface is clearly visible (Figure 3), measure the penetration depth at 7 positions and report an average depth as the test result.

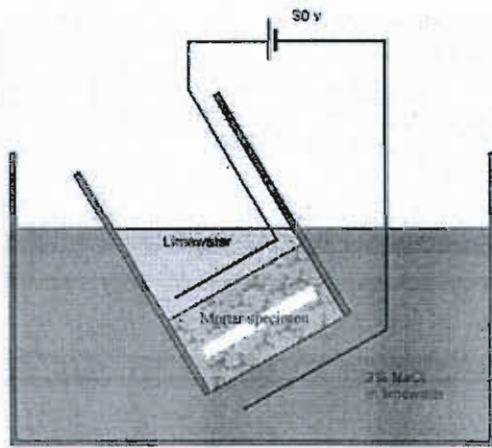


(a) Details of testing

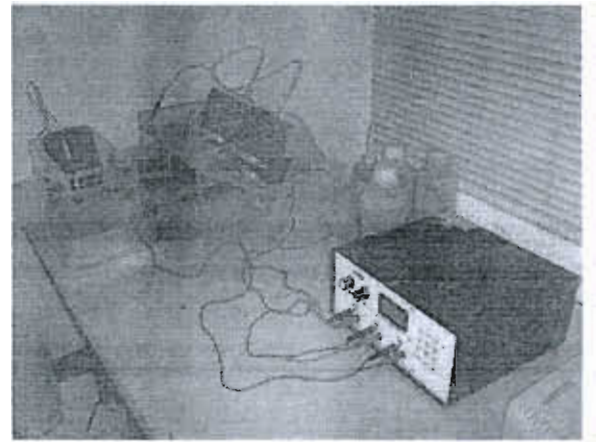


(b) Test-setup

Figure 1 Rapid chloride penetration test (RCPT)



(a) Details of testing



(b) Test-setup

Figure 2 Rapid migration test (RMT)

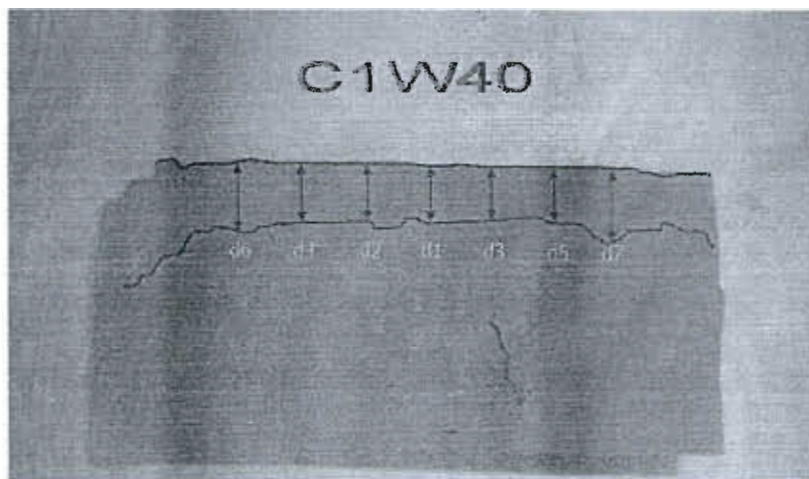


Figure 3 Measurement of chloride penetration depth

3. Water absorption test

This test determines the sorptivity or rate of water absorption through the mortar surface. In this test method, only one surface is exposed to water at room temperature while the other surface is sealed for simulating water absorption in a member that is in contact with water on one side only. The 100 dia. x 200 mm cylinder mortar specimens were prepared conformably with ASTM C1585. At 28 days, the specimens were preconditioned in an oven at 50 ± 2 °C for 3 days. After the 3 days, place each specimen inside a sealable container. Use a separate container for each specimen and store the container at 23 ± 2 °C for 15 days. Seal the side surface of each specimen with a vinyl electrician's tape and seal the end of specimen that will not be exposed to water using a loosely attached plastic sheet as shown in Figure 4. The uptake of water by capillary absorption was measured through the weight gain of the specimen at the set time intervals of 60 s, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 60 min. Continue the measurement every hour up to 6 hrs. The rate of water absorption is defined as the slope of the line that is the best fit to I (the absorption) plotted against the square root of time ($s^{0.5}$) as shown in Figure 5, report as test results (a correlation coefficient not less than 0.98).



Figure 4 Specimens in water absorption test

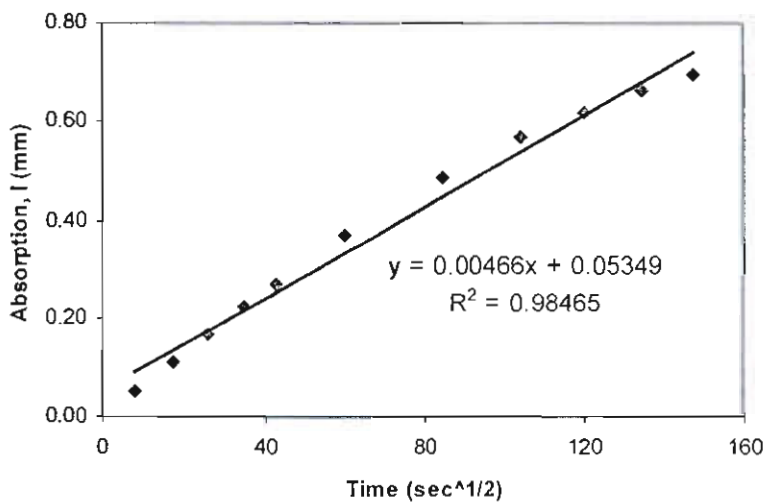


Figure 5 Example of results from water absorption test (CIW40)

2.2.2. Long-term test

1. Immersion test

The cement pastes specimens with the size of 50-mm in diameter and 100-mm in length were used for immersion test. Sodium chloride was introduced into the mixing of cement paste so as to get an initial chloride content of 3.0% by weight of binder. All surfaces of the specimens were sealed by the epoxy except for one end face. Then, an air curing method was employed with the specimens for 7 days before submerging them into the tap water for 91 days. At the end of submersion, the specimen was investigated for chloride content along the depth from the exposed surface. Test results were reported as chloride diffusion profiles.

3. RESULTS

3.1. Rapid chloride penetration test

Figure 6 shows the charge passed values increased when the water to binder ratio increased. The results indicate that the charge passed of type 1 Portland cement (OPC) mortar was less than type 5 Portland cement mortar. Fly ash mortar had a good result as the charge passed decreased significantly when compared with OPC mortar. When an expansive additive was employed at 10% by weight of binder as partial replacement of type 1 Portland cement, the charge passed was lower when compared with OPC mortar and charge passed was the lowest at mortar with 10% of expansive additives and 30% of fly ash. However, there was a significant impact when the limestone powder (LP) was employed as an additive in OPC mortar. The charge passed increased when LP content was higher. But, the charge passed of limestone powder mortar was substantially reduced with incorporation of fly ash, especially at fly ash to limestone powder proportion of 15%:15% and 25%:5% (C1F15L15 and C1F25L5, respectively) had good results as compared with OPC mortar.

3.2. Rapid migration test (RMT)

The results of RMT using 30 V dc as shown in Figure 7 tend to be similar to those of RCPT. The chloride penetration depth increased when the water to binder ratio increased. However, the chloride penetration depth of Portland type 1 cement-only mortar was close to Portland type 5 cement-only mortar. Cement mortar with expansive additives was clearly lower penetration depth than OPC the same as RCPT result. It has been found that the penetration depth of cement-only mortar was higher when increasing the limestone powder content. The results indicate that fly ash mortar was the lowest of penetration depth and the accelerated penetration depths are substantially reduced with incorporation of fly ash as compared with OPC, expansive mortar and limestone powder mortar.

3.3. Water absorption test

The results of the water absorption test are presented in Figure 8. The results were different to results of RCPT and RMT. Absorption rate increased when the water to binder ratio increased. Type 1 Portland cement mortar had close value of absorption rate when compared to type 5 Portland cement mortar. However, when cement was partially replaced by FA or LP or 10% EA, absorption rate was higher to be the same as mixes of blend portion of FA and EA, or of FA and LP.

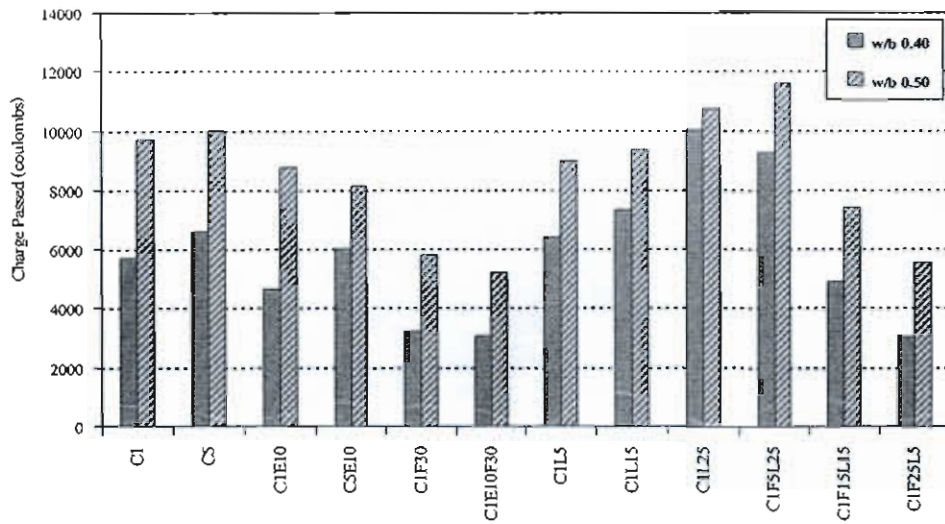


Figure 6 Charge passed of rapid chloride penetration test (RCPT)

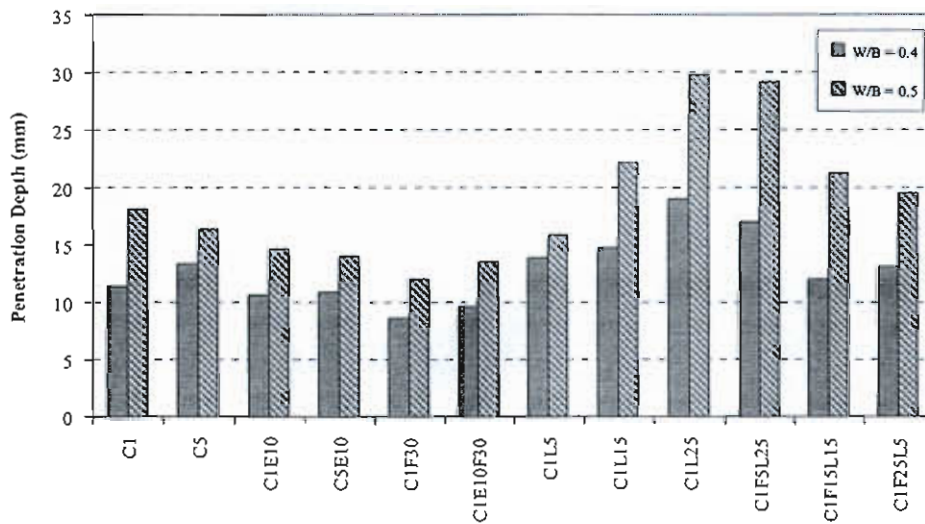


Figure 7 Chloride penetration depth of rapid migration test (RMT)

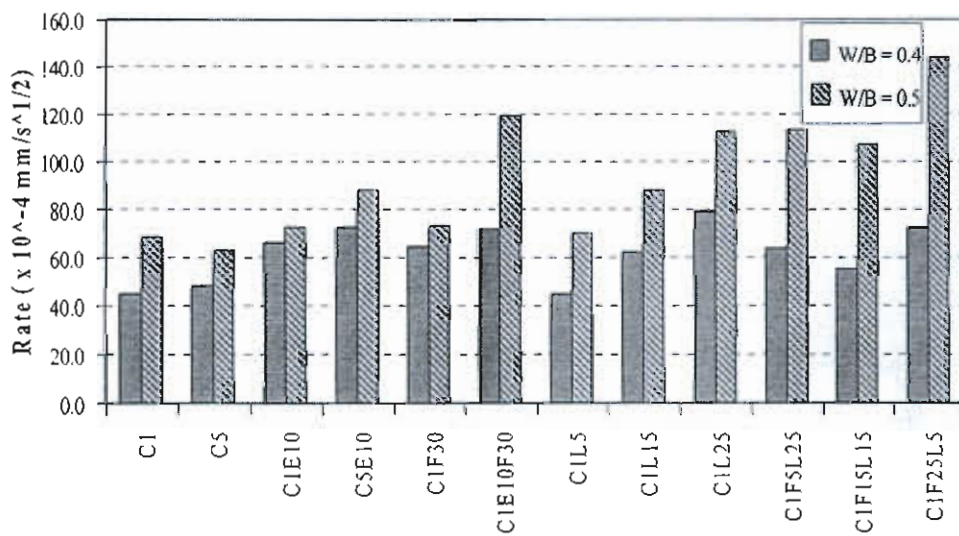


Figure 8 Absorption rate of water absorption test

3.4. Immersion test

3.4.1. Comparison of chloride diffusion at different water to binder ratio

Figure 9 shows chloride diffusion profiles of type 5 Portland cement paste at water to binder ratio of 0.40 and 0.50. It was found that a chloride diffusion of paste at water to binder ratio of 0.40 was lower than that at water to binder ratio of 0.50 in every distance from exposed surface (5-45 mm). Figure 10 shows the similar results as presented in Figure 9. Although the chloride diffusion of type 1 Portland cement paste with fly ash at water to binder ratio of 0.50 was lower than the same proportion at water to binder ratio of 0.40, but the chloride diffusion at the distance 15-35 mm from exposed surface of paste with water to binder ratio of 0.50 was higher than paste with water to binder ratio of 0.40.

3.4.2. Comparison of chloride diffusion at different binder replacement ratio

Figure 11 shows total chloride content in cement pastes with different binder replacement ratio at water to binder ratio of 0.40, it was found that cement-only paste had the best resistance of chloride movement because the chloride diffusion profile was the highest.

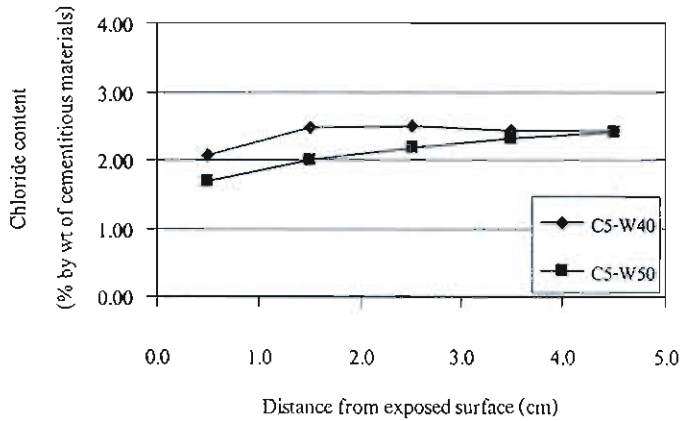


Figure 9 Chloride profiles of type 5 Portland cement paste with water to binder ratio of 0.40 and 0.50

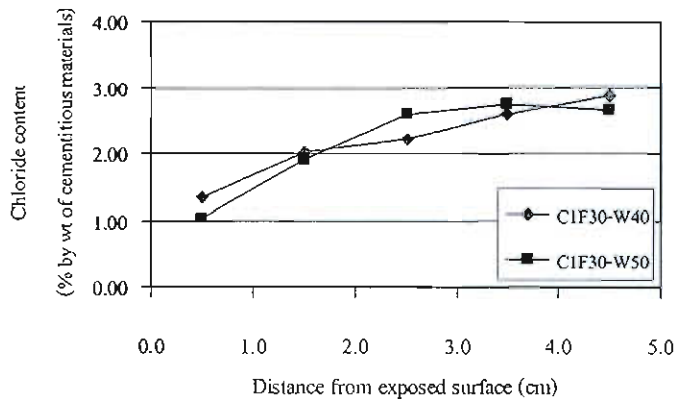


Figure 10 Chloride profiles of type 1 Portland cement paste with fly ash at water to binder ratio of 0.40 and 0.50

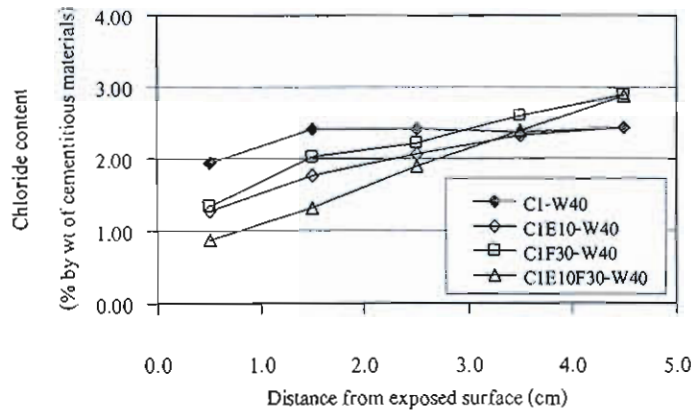


Figure 11 Chloride profiles of type 1 Portland cement paste with expansive additive, fly ash and blend of portion of EA and FA at water to binder ratio 0.40

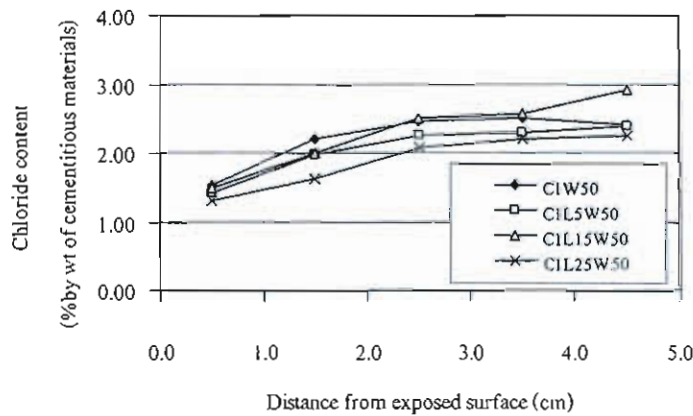


Figure 12 Chloride profiles of type 1 Portland cement paste with limestone powder content of 5%, 15%, 25% at water to binder ratio 0.50

While fly ash cement paste had a lower chloride resistance as compared to cement-only paste. The use of expansive additives as a partial replacement of cement paste and fly ash cement paste caused the increase of chloride diffusion. When limestone powder was employed, chloride diffusion tended to increase with the increase of limestone powder content as shown in Figure 12.

4. DISCUSSIONS

From the test results, it was found that the chloride resistance of type 1 Portland cement mortar was close to that of type 5 Portland cement mortar. However, type 1 Portland cement with fly ash was better in chloride resistance as presented in test results. Therefore, the mix proportion of type 1 Portland cement and fly ash is more appropriate to concrete structures exposed to chloride environment.

Since water has the highest heat of vaporization among the common kinds of liquid, the use of higher water to binder ratio of mortar at ordinary temperature results in large excess amount of water in liquid state of mortar and being as porous material which is worse for chloride resistance [see Metha (2006) for more details].

Fly ash is well-known in that it is good for chloride resistance, but the test results obtained from immersion test was contradictory. This may be because the curing time of fly ash paste was only 7 days. Normally, the pozzolanic reaction need a longer time for strength

development. Thus, the cement pastes with fly ash at the age of 7 days became worse as compared with OPC.

The limestone powder (LP) reduced the chloride resistance of specimen because LP is not pozzolanic material. It was used as a filler material without cementitious property. Thus, the porosity of cement mortar or fly ash mortar with LP was higher than cement mortar or fly ash mortar without LP and chloride can penetrate into cement mortar or fly ash mortar with LP easier than cement mortar or fly ash mortar without LP.

The use of 10% expansive additives increased the chloride resistance. This may be because the use of expansion additive with a suitable content, it produced denser mortar, resulting in improvement of chloride resistance.

Finally, the use of the blend cement with FA and EA, or with FA and LP produced good resistance mixes to chloride penetration resistance. Moreover, the results obtained from RCPT and RMT tended to be likely similar and had the same directions of results. When the results of short-term (RCPT and RMT) and long-term tests were correlated, it was found that the relationship between both tests gave some the same directions of test results.

5. CONCLUSIONS

From the test results, the following conclusions can be drawn:

1. The mix proportion of type 1 Portland cement with fly ash had good chloride resistance and was appropriate to concrete structures exposed to chloride environment.
2. When water to binder ratio or limestone powder content increased, the chloride resistance decreased.
3. The use of 10% EA additives increased the chloride resistance.
4. Both type 1 and type 5 Portland cements with expansive additive of 10% replacement and fly ash of 30% replacement (C1E10F30 and C5E10F30, respectively) were good mix proportions for fly ash mortar with expansive additives.
5. Type 1 Portland cement with fly ash of 15 and 25% replacement and limestone powder of 15 and 5% replacement (C1F15L15 and C1F25L5, respectively) were good mix proportions for fly ash mortar with limestone powder.
6. The chloride resistance results obtained from RCPT and RMT was correlated. Both tests had similar trend of results.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the research and development fund, contract no. 17/2550, provided by the faculty of engineering, Burapha University, Thailand for developing the equipment. The authors would also like to acknowledge Construction & maintenance Technology Research Center (CONTEC), Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Thailand for the provision of support for this research.

REFERENCES

- ASTM C 33-97, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM Standard, Vol. 04.02.
- ASTM C 39/C39M-01, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM Standard, Vol. 04.02.

ASTM C 1202-97, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, ASTM Standards, Vol. 04.02.

ASTM C 1585-04, Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concrete. ASTM Standard, Vol. 04.02.

Lam, N.T., Sumranwanich, T., Krammart, P., Sahanitmongkol, R. and Tangtermsirikul, S. (2008), Durability properties of concrete with expansive additive. *Journal of the Engineering Institute of Thailand*, 19 (4): 8-15

Lawrence, P., Cyr, M. and Ringot, E. (2003), "Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short term hydration" *Cement and Concrete Composite* 33(12):1939-47.

Massazza, F. (1993), "Pozzolanic cements" *Cement and Concrete Composite*, 15(4):185-214

Metha, P.K. (1981), "Studies on blended Portland cements containing Santorin earth" *Cement and Concrete Research*, 11(4):507-18

Metha, P.K., Monterio, P.J.M. (2006), "Concrete: Microstructure, Properties and Materials", 3th Edition, The McGraw-Hill companies.

Thomas, M. (1996), "Chloride thresholds in marine concrete" *Cement and Concrete Research*, 26(4):513-9



ความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว

CHLORIDE RESISTANCE OF PORTLAND CEMENT MORTAR WITH FLY ASH, LIMESTONE POWDER AND EXPANSIVE ADDITIVES

เอกศักดิ์ อุกษมहालिจิต (Akekasak Rerkmahalikhit)¹

ทวีชัย สำราญวานิช (Taweechai Sumranwanich)²

ภักวัฒน์ แสนเจริญ (Pakawat Sancharoen)³

สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล (Somnuk Tangtermsirikul)⁴

¹นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา E-mail: akekasak_r@yahoo.com

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา E-mail: twc@buu.ac.th

³นักวิจัย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร E-mail: pakawat@siit.tu.ac.th

⁴ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร E-mail: somnuk@siit.tu.ac.th

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่แทนที่บางส่วนของวัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ทำการทดสอบ Rapid chloride penetration test (RCPT), Rapid migration test (RMT) และ Water absorption test เมื่อมอร์ตาร์มีอายุได้ 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีค่าความต้านทานคลอไรด์มากกว่ามอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ส่วนมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักมีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก ขณะที่มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่ผสมสารขยายตัวมีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน และมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินปูนมีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ลดลง ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมของเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนที่บางอัตราส่วนผสมและมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัวมีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดี นอกจากนี้ยังพบว่า ผลการทดสอบด้วยวิธี RCPT และ RMT มีความสัมพันธ์กันและแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ABSTRACT : This research aims to study the chloride resistance of Portland cement mortar which binder was partially replaced by fly ash (FA), limestone powder (LA) and expansive additives (EA). The water to binder ratio (w/b) was employed at 0.40 and 0.50. Rapid chloride penetration test (RCPT), rapid migration test (RMT) and water absorption test were determined at the age of 28 days of mortar. From the experimental results, it was found that mortar with w/b of 0.40 had better chloride resistance than mortar with w/b of 0.50. Type 1 Portland cement mortar had chloride resistance close to type 5 Portland cement mortar. Mortar with fly ash and mortar with expansive additives were good in chloride resistance when compared with cement mortar only, while mortar with limestone powder became worse. Some mixes of ternary blend portion of FA and LP or FA and EA mortar had good resistance to chloride. Furthermore, it was found that the results obtained from RCPT and RMT test were correlated and had the same tendency of results.

KEYWORDS : Chloride resistance, Mortar, Fly ash, Limestone powder, Expansive additive.

1. บทนำ

การแทรกซึมเนื่องจากคลอไรด์เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นสนิม ส่งผลทำให้ความทนทานของโครงสร้างลดลง โดยเมื่อค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สะสมบริเวณผิวเหล็กเสริมมีค่าเกินกว่าค่าคลอไรด์วิกฤต [1] จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มต้นเกิดสนิม ดังนั้นการปรับปรุงส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดี รวมถึงการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์เพื่อทำการตรวจสอบหรือป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากคลอไรด์ จึงเป็นเรื่องที่จำเป็นและสำคัญสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

เถ้าลอยเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเป็นส่วนผสมที่ก่อให้เกิดความต้านทานคลอไรด์ที่ดี แต่มีข้อเสียคือ การพัฒนากำลังรับแรงในช่วงอายุเริ่มต้นค่อนข้างช้า เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกต้องใช้เวลาานาน [2] ในขณะที่เดียวกันการใช้วัสดุเนื้ออย่างฝุ่นหินปูนมีข้อดีในการช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงเริ่มต้นทำให้กำลังรับแรงในช่วงอายุเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น [3] นอกจากนี้การใส่สารขยายตัวเพื่อช่วยผลกระทบจากการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) [4]

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว เพื่อหาส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดี นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ได้รับจากการทดสอบ เพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของวิธีการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์

2. รายละเอียดการทดสอบ

2.1 วัสดุผสม

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้สารผสมเพิ่มจำนวน 3 ชนิด คือเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว โดยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในส่วนผสมมอร์ตาร์ ทั้งนี้องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพแสดงตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ฝุ่นหินปูน และสารขยายตัว

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์		เถ้าลอย	ฝุ่นหินปูน	สารขยายตัว
	ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	ปอร์ตแลนด์ประเภท 5			
SiO ₂	20.20	20.97	36.10	0.06	9.60
Al ₂ O ₃	4.70	3.49	19.40	0.09	2.50
Fe ₂ O ₃	3.73	4.34	15.10	0.04	1.30
CaO	63.40	62.86	17.40	54.80	67.30
MgO	1.37	3.33	2.97	0.57	0.40
SO ₃	1.22	2.12	0.77	-	18.00
Na ₂ O	-	0.12	0.55	-	-
K ₂ O	0.28	0.47	2.17	-	-
LOI	2.72	2.30	2.81	43.80	0.40
คุณสมบัติทางกายภาพ					
Specific gravity	3.15	3.18	2.27	2.70	3.04
Fineness (cm ² /g)	3,430	3,330	2,460	9,260	3,500

2.2 ส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

ใช้มอร์ตาร์เป็นตัวอย่างทดสอบ โดยใช้อัตราส่วนของทรายอิมตัวผิวแห้ง (SSD) ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 ตารางที่ 2 แสดงส่วนผสมของมอร์ตาร์ ทำการถอดแบบเมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 1 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำอีก 27 วัน

2.3 Rapid chloride penetration test (RCPT)

ใช้ตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์ขนาด 100 x 50 มม. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [5] โดยใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 60 V dc คร่อมระหว่างด้านท้ายสองด้านของตัวอย่าง ด้านหนึ่งแช่ในสารละลาย NaCl เข้มข้น 3% อีกด้านหนึ่งแช่ในสารละลาย 0.3 M NaOH ใช้เวลาทดสอบ 6 ชม. รายงานผลการทดสอบเป็นค่า Total charge passed (Coulombs) แสดงรายละเอียดการทดสอบตามภาพที่ 1

2.4 Rapid migration test (RMT)

ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกมอร์ตาร์ขนาด 100 x 200 มม. ทดสอบที่อายุ 28 วัน คัดตัวอย่างให้มีความหนา 50 มม. ทำการทดสอบดังรายละเอียดในภาพที่ 2 [6-7] ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด

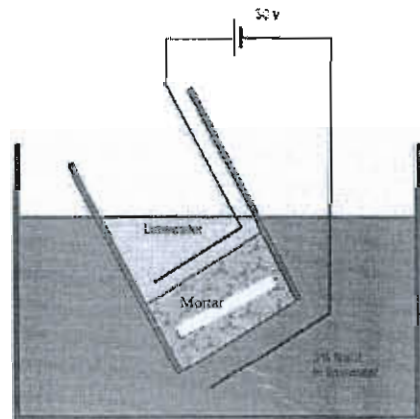
ตารางที่ 2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ทดสอบ

Mix Designation	Cement (kg)	Additives (kg)			Water (kg)
		FA	EA	LP	
C1W40	1	-	-	-	0.40
C1W50	1	-	-	-	0.50
C5W40	1	-	-	-	0.40
C5W50	1	-	-	-	0.50
C1E10W40	0.90	-	0.10	-	0.40
C1E10W50	0.90	-	0.10	-	0.50
C5E10W40	0.90	-	0.10	-	0.40
C5E10W50	0.90	-	0.10	-	0.50
C1F30W40	0.70	0.30	-	-	0.40
C1F30W50	0.70	0.30	-	-	0.50
C1E10F30W40	0.60	0.30	0.10	-	0.40
C1E10F30W50	0.60	0.30	0.10	-	0.50
C1L5W40	0.95	-	-	0.05	0.40
C1L5W50	0.95	-	-	0.05	0.50
C1L15W40	0.85	-	-	0.15	0.40
C1L15W50	0.85	-	-	0.15	0.50
C1L25W40	0.75	-	-	0.25	0.40
C1L25W50	0.75	-	-	0.25	0.50
C1F5L25W40	0.70	0.05	-	0.25	0.40
C1F5L25W50	0.70	0.05	-	0.25	0.50
C1F15L15W40	0.70	0.15	-	0.15	0.40
C1F15L15W50	0.70	0.15	-	0.15	0.50
C1F25L5W40	0.70	0.25	-	0.05	0.40
C1F25L5W50	0.70	0.25	-	0.05	0.50

ตัวอย่างมาผ่าแยกแล้วพ่นด้วยสารละลาย 0.1 M AgNO₃ [8]

2.5 Water absorption test

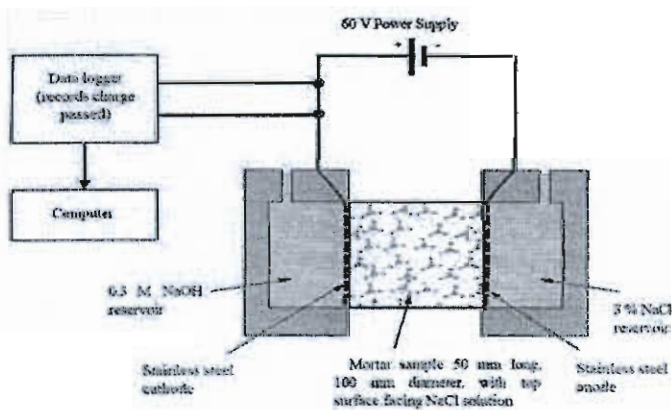
เป็นการทดสอบหาค่าอัตราการดูดซึมน้ำ (Sorptivity or rate of water absorption) ของตัวอย่างที่ไม่อมน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูคาพิลลารี (Capillary suction) เนื่องจากโพรงช่องว่างที่ผิวตัวอย่างเมื่อสัมผัสกับน้ำครั้งแรก เป็นการทดสอบโดยทางอ้อม ไม่ใช้การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยตรง ใช้การจำลองสถานการณ์ของโครงสร้างที่เผชิญกับน้ำเพียงด้านเดียว ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในสิ่งแวดล้อมจริง ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกมอร์ตาร์ขนาด 100 x 200 มม. ทำการตัดตัวอย่างให้มีขนาดความหนา 50 มม. ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1585 [9] นำตัวอย่างที่มีอายุครบ 28 วัน ไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 50° c เป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นแยกเก็บตัวอย่างในภาชนะที่มีฝาปิดเป็นเวลาอีก 15 วัน แล้วจึงนำตัวอย่างไปทดสอบตามภาพที่ 3 โดยบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นเนื่องน้ำหนักน้ำที่ถูกดูดซึมต่อเวลา และหาค่าการดูดซึมได้จากความชันของกราฟดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 2 รายละเอียดการทดสอบ Rapid migration test (RMT)

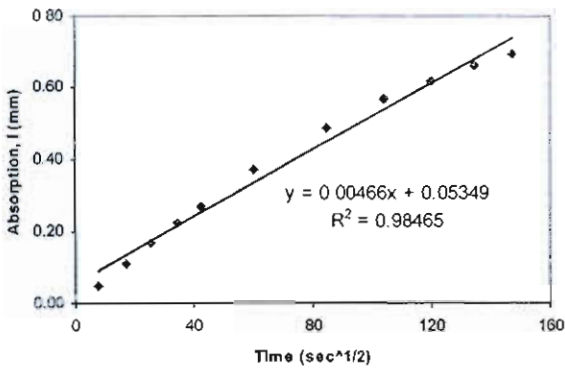


ภาพที่ 3 การทดสอบ Water absorption test



ภาพที่ 1 รายละเอียดการทดสอบ Rapid chloride penetration test (RCPT)

30 V dc ทดสอบ 8 ชม. จากนั้นนำตัวอย่างไปหาค่าความลึกจากการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration depth) โดยนำ



ภาพที่ 4 ตัวอย่างกราฟจากการทดสอบ Water absorption test

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบ RCPT

จากแผนภูมิในภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่าส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เนื่องจากมีค่า Charge passed ต่ำกว่า และส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักมีแนวโน้มของค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่าส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและสารขยายตัวมีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้น แต่ส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ต่ำกว่าเดิมเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน ในขณะที่เดียวกันส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยวัสดุ 2 ชนิด ในส่วนของเถ้าลอยกับสารขยายตัวก่อให้เกิดค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดี สำหรับส่วนผสมที่มีเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 15:15 (C1F15L15) และ 25:5 (C1F25L5) ตามลำดับ ก็ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีเช่นเดียวกัน

3.2 ผลการทดสอบ RMT

จากแผนภูมิในภาพที่ 6 พบว่าผลการทดสอบที่ได้รับจาก RMT มีแนวโน้มที่คล้ายกับผลการทดสอบที่ได้รับจาก RCPT คือ ส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะมีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่าส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เนื่องจากมีค่า Penetration depth ที่ต่ำกว่าและส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

หลักมีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก สำหรับส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน ในขณะที่เดียวกันส่วนผสมที่แทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวมีแนวโน้มที่จะให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้นเช่นกัน สำหรับการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนมีผลทำให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ต่ำลง ส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยวัสดุ 2 ชนิดให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน เช่นเดียวกันกับการทดสอบ RCPT

3.3 ผลการทดสอบ Water absorption test

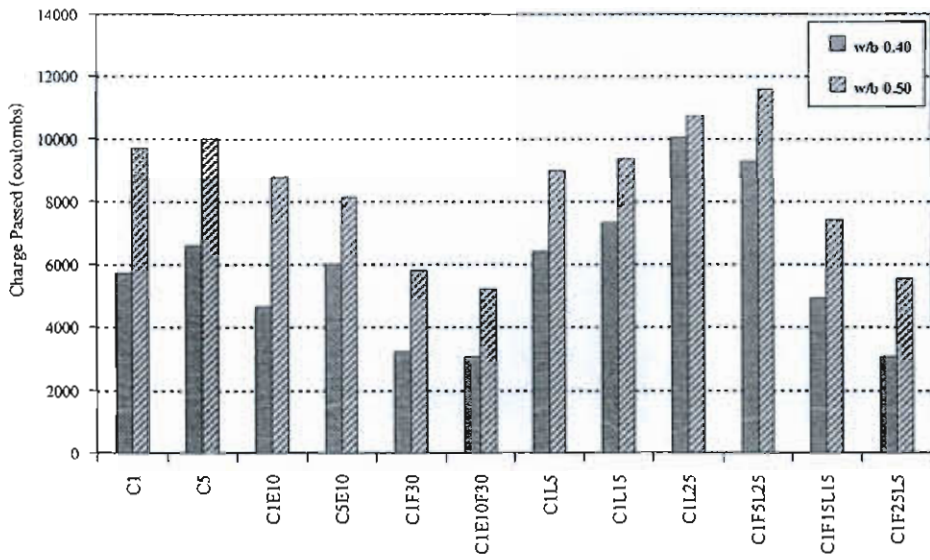
จากแผนภูมิในภาพที่ 7 พบว่าส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะให้ค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักมีแนวโน้มของการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักเช่นกัน แต่ส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย สารขยายตัว และฝุ่นหินปูน ให้ค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน สำหรับส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยวัสดุ 2 ชนิด ก็พบว่าให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ

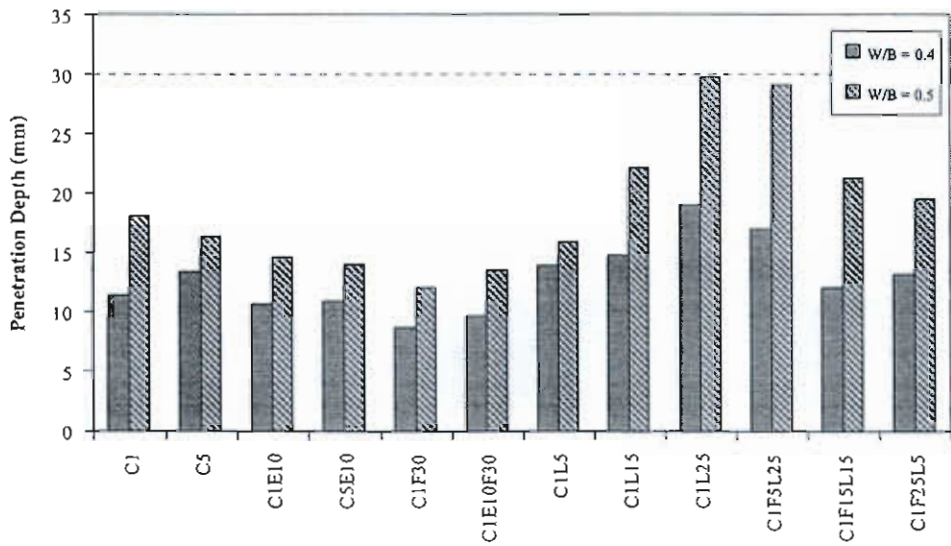
ผลการทดสอบที่ได้รับจากการทดสอบ RCPT และ RMT มีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตามภาพที่ 8 และมีแนวโน้มของผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน หรือชนิดของวัสดุแทนที่หรืออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิด ขณะเดียวกันการทดสอบ Water absorption test ไม่ได้ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมดกับการทดสอบ RCPT และ RMT

4. การอภิปรายผล

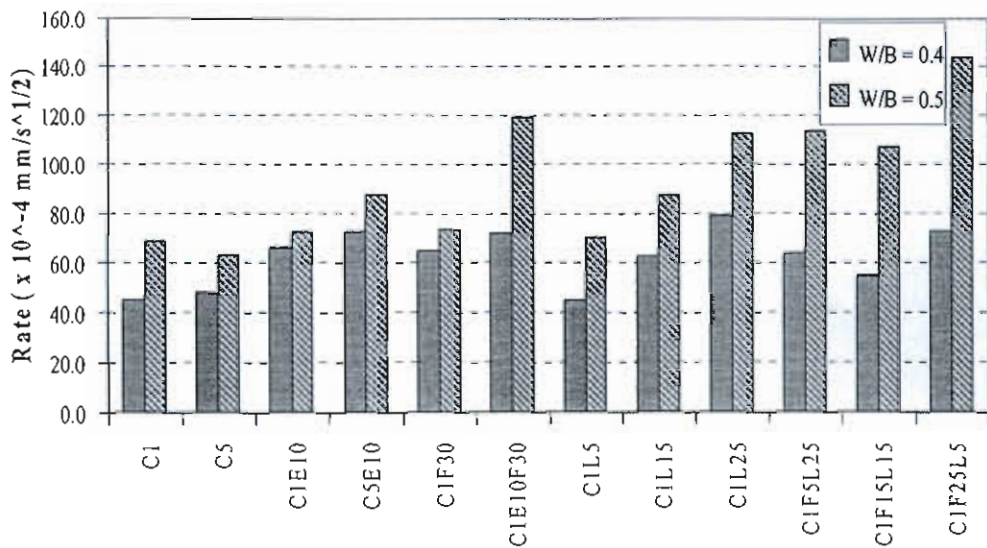
ผลการทดสอบพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อย่างไรก็ตาม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



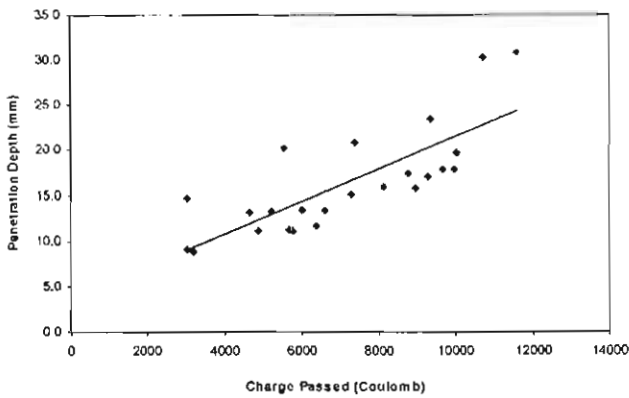
ภาพที่ 5 ผลการทดสอบ RCPT



ภาพที่ 6 ผลการทดสอบ RMT



ภาพที่ 7 ผลการทดสอบ Water absorption test



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการทดสอบ RCPT-RMT

เมื่อแทนที่ด้วยเกลือจะมีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดี มีความเหมาะสมกับโครงสร้างที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

สำหรับส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่น้อยกว่าน้ำที่อัตราส่วน 0.40 เพราะการใช้ปริมาณน้ำที่สูง ทำให้น้ำส่วนเกินเหลืออยู่มากจึงทำให้มีความพรุนสูงในมอร์ตาร์ ทำให้ง่ายต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ [10]

ในส่วนของผู้หิปปูน พบว่าให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ลดลง อาจเกิดขึ้นจากผลกระทบจากการเป็นวัสดุอุดโพรงช่องว่าง (Filler effect) แต่ขาดคุณสมบัติของการเป็นวัสดุประสาน ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านได้

สำหรับสารขยายตัวพบว่าให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้น อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ปริมาณสารขยายตัวที่เหมาะสม (10%) ทำให้เนื้อมอร์ตาร์แน่นมากขึ้น [11] การแทรกซึมของคลอไรด์ทำได้ยากขึ้น

Water absorption test ให้ผลการทดสอบที่ต่างกับการทดสอบ RCPT และ RMT อาจเกิดเนื่องจากเงื่อนไขในการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบจริงที่แตกต่างกัน เนื่องจากสภาวะของตัวอย่างทดสอบที่แห้งแตกต่างจากการทดสอบ RCPT และ RMT ที่ตัวอย่างทดสอบอยู่ในสภาวะอิ่ม หรือกระทั่งในเรื่องของอายุตัวอย่างทดสอบที่เมื่อรวมระยะเวลาที่ต้องใช้ในการเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ พบว่าตัวอย่างทดสอบ Water absorption test มีอายุเพิ่มขึ้นมากกว่า 28 วัน

5. การสรุปผล

จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ลดลง
2. การใช้เกลือหรือสารขยายตัวแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้ความต้านทานคลอไรด์ดีขึ้น
3. การใช้ผู้หิปปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ มีผลทำให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ลดลง
4. การใช้เกลือกับผู้หิปปูน, เกลือกับสารขยายตัวแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนที่เหมาะสม ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดี
5. การทดสอบ RCPT และ RMT มีผลการทดสอบที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นไปในทิศทางเดียวกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา โดยทุนอุดหนุนวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และจากศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (Construction & Maintenance Technology Research Center, CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

7. บรรณานุกรม

- [1] Thomas, M. (1996), Chloride thresholds in marine concrete. Cement and Concrete Research, 26(4):513-519
- [2] ปรีญา จินดาประเสริฐ. (2548), เกลือในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). สมาคมคอนกรีตไทย
- [3] Lawrence, P., Cyr, M. and Ringot, E. (2003), Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short term hydration. Cement and Concrete Composite, 33(12):1939-1947.
- [4] เครือซีเมนต์ไทย. (2548), ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน.
- [5] ASTM C 1202-97, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM Standards, Vol. 04.02.
- [6] Tang, L., Nilsson, LO. (1992), Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. ACI Mater J, 89(1):49-53
- [7] Tong, L., Gjorv, OE. (2001), Chloride diffusivity based on migration testing. Cem Concr Res, 31: 973-982

- [8] Otsuki, N., Nagataki, S., and Nakashita, K. (1992), Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into **Hardened** Cementitious Matrix Materials. ACI Materials Journal, 89(6):587-592
- [9] **ASTM C 1585-04**, Standard test method for measurement of rate of **absorption** of water by hydraulic-cement concrete. ASTM Standard, Vol. 04.02.
- [10] **Metha**, P.K., Monerio, P.J.M. (2006), Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 3rd Edition, The McGraw-Hill companies.
- [11] Lam, N.T., Sumranwanich, T., Krammart, P., Sahamitmongkol, R. and Tangtermsirikul, S. (2008), Durability properties of concrete with expansive additive. Journal of the Engineering Institute of Thailand, 19 (4): 8-15

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว
CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE OF MORTAR WITH FLY ASH, LIMESTONE
POWDER AND EXPANSIVE ADDITIVES

เอกศักดิ์ อุกษมहाลิขิต (Aekasak Roekmalalikhit)¹

ทวิชัย สำราญวานิช (Taweechai Sumranwanich)²

ภัควัฒน์ แสนเจริญ (Pakawat Sancharoen)³

สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล (Somnuk Tangtermsirikul)⁴

¹นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา E-mail: aekasak_r@hotmail.com

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา E-mail: twc@buu.ac.th

³นักวิจัย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร E-mail: pakawat@siit.uu.ac.th

⁴ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร E-mail: sannuk@siit.uu.ac.th

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่แทนที่บางส่วนของวัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ทำการทดสอบ Bulk diffusion test, Rapid chloride penetration test (RCPT), Rapid migration test (RMT) และ Water absorption test เมื่อมอร์ตาร์มีอายุได้ 28 วัน จากผลการทดลองพบว่า มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่ามอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ส่วนมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน ขณะที่มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่ผสมสารขยายตัวมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน และมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินปูนมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ลดลง ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนที่บางอัตราส่วนผสมและมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัวมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี นอกจากนี้พบว่า ผลการทดสอบด้วยวิธี Bulk diffusion test วิธี RCPT และวิธี RMT มีแนวโน้มผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน

ABSTRACT : This research aims to study the chloride penetration resistance of mortar which binder was partially replaced by fly ash (FA), limestone powder (LA) and expansive additives (EA). The water to binder ratio (w/b) was employed at 0.40 and 0.50. Bulk diffusion test, rapid chloride penetration test (RCPT), rapid migration test (RMT) and water absorption test were determined at 28 days. From the experimental results, it was found that mortar with w/b of 0.40 had higher chloride penetration resistance than mortar with w/b of 0.50. Type 1 Portland cement mortar had chloride penetration resistance close to type 5 Portland cement mortar. Mortar with fly ash and mortar with expansive additives were good in chloride penetration resistance when compared with cement mortar only, while mortar with limestone powder became worse. Some mixes of ternary blend portion of FA and LP or FA and EA mortar had good resistance to chloride penetration. Furthermore, it was found that the results obtained from bulk diffusion test, RCPT and RMT test had the same tendency of results.

KEYWORDS : Chloride penetration resistance, Mortar, Fly ash, Limestone powder, Expansive additives.

1. บทนำ

การแทรกซึมเนื่องจากคลอไรด์เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่งผลให้ความทนทานของโครงสร้างลดลง โดยเมื่อปริมาณเกลือคลอไรด์ที่สะสมบริเวณผิวเหล็กเสริมมีค่าเกินกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต [1] จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มต้นสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) ดังนั้นการปรับปรุงส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี รวมทั้งการทดสอบหาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตจึงเป็นเรื่องสำคัญ เพื่อป้องกันความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

เจ้าลอยเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเป็นวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้เกิดความต้านทานคลอไรด์ที่ดี แต่มีข้อเสียคือ การพัฒนากำลังรับแรงในช่วงอายุเริ่มต้นค่อนข้างช้า เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกต้องใช้เวลาาน [2] ในขณะที่เวกกันการใช้วัสดุเนื้อย้อย่างฝุ่นหินปูนมีข้อดีในการช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงเริ่มต้น ทำให้กำลังรับแรงในช่วงอายุเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น [3] นอกจากนี้ การใช้สารขยายตัวในคอนกรีตเพื่อช่วยลดผลกระทบจากการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) [4]

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเจ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว เพื่อหาส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดี นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของวิธีการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์

2. รายละเอียดการทดสอบ

2.1 วัสดุประสาน

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้สารผสมเพิ่ม 3 ชนิด คือ เจ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว แทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เจ้าลอย ฝุ่นหินปูน และสารขยายตัว

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์		เจ้าลอย	ฝุ่นหินปูน	สารขยายตัว
	ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	ปอร์ตแลนด์ประเภท 5			
SiO ₂	20.20	20.97	36.10	0.06	9.60
Al ₂ O ₃	4.70	3.49	19.40	0.09	2.50
Fe ₂ O ₃	3.73	4.34	15.10	0.04	1.30
CaO	63.40	62.86	17.40	54.80	67.30
MgO	1.37	3.33	2.97	0.57	0.40
SO ₃	1.22	2.12	0.77	-	18.00
Na ₂ O	-	0.12	0.55	-	-
K ₂ O	0.28	0.47	2.17	-	-
LOI	2.72	2.30	2.81	43.80	0.40
คุณสมบัติทางกายภาพ					
Specific gravity	3.15	3.18	2.27	2.70	3.04
Fineness (cm ² /g)	3,430	3,330	2,460	9,260	3,500

ในส่วนผสมมอร์ตาร์ ทั้งนี้องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานแสดงในตารางที่ 1

2.2 ส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างทดสอบเป็นมอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วนของทรายอิมตัวผิวแห้ง (SSD) ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 ตารางที่ 2 แสดงส่วนผสมของมอร์ตาร์ ทำการถอดแบบเมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 1 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำอีก 27 วัน

2.3. Bulk Diffusion Test

หล่อตัวอย่างทรงกระบอกมอร์ตาร์ขนาด 50x100 มม. เมื่ออายุครบ 1 วัน นำตัวอย่างบ่มในน้ำ จนเมื่อตัวอย่างอายุครบ 25 วัน นำตัวอย่างมาเคลือบผิวด้วยอีพอกซี อกเว้นผิวด้านปลายด้านหนึ่งไว้ เมื่ออายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายคลอไรด์เข้มข้น 5% เป็นเวลา 35 และ 91 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C1556 [5] จากนั้นนำตัวอย่างไปตัด

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

Mix Designation	Cement (kg)	Additives (kg)			Water (kg)
		FA	EA	LP	
C1W40	1	-	-	-	0.40
C1W50	1	-	-	-	0.50
C5W40	1	-	-	-	0.40
C5W50	1	-	-	-	0.50
C1E10W40	0.90	-	0.10	-	0.40
C1E10W50	0.90	-	0.10	-	0.50
C5E10W40	0.90	-	0.10	-	0.40
C5E10W50	0.90	-	0.10	-	0.50
C1F30W40	0.70	0.30	-	-	0.40
C1F30W50	0.70	0.30	-	-	0.50
C1E10F30W40	0.60	0.30	0.10	-	0.40
C1E10F30W50	0.60	0.30	0.10	-	0.50
C1L5W40	0.95	-	-	0.05	0.40
C1L5W50	0.95	-	-	0.05	0.50
C1L15W40	0.85	-	-	0.15	0.40
C1L15W50	0.85	-	-	0.15	0.50
C1L25W40	0.75	-	-	0.25	0.40
C1L25W50	0.75	-	-	0.25	0.50
C1F5L25W40	0.70	0.05	-	0.25	0.40
C1F5L25W50	0.70	0.05	-	0.25	0.50
C1F15L15W40	0.70	0.15	-	0.15	0.40
C1F15L15W50	0.70	0.15	-	0.15	0.50
C1F25L5W40	0.70	0.25	-	0.05	0.40
C1F25L5W50	0.70	0.25	-	0.05	0.50

เป็นแผ่นบางหนา 1 ซม. โดยตัดจากผิวด้านที่ไม่ได้เคลือบอิพอกซี จำนวน 5 แผ่น แล้วนำไปบดเป็นผง จากนั้นนำตัวอย่างไปหาปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C1152 [6]

2.4 Rapid chloride penetration test (RCPT)

ใช้ตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์ขนาด 100x50 มม. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [7] โดยใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 60 V dc ต่อคร่อมระหว่างด้านท้ายสองด้านของตัวอย่าง ด้านหนึ่งแช่ในสารละลาย NaCl เข้มข้น 3% อีกด้านหนึ่งแช่ในสารละลาย 0.3 M NaOH ใช้

เวลาทดสอบ 6 ชม. แสดงผลการทดสอบเป็นค่า Total charge passed (Coulombs)

2.5 Rapid migration test (RMT)

ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกมอร์ตาร์ขนาด 100x200 มม. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ตัดตัวอย่างให้มีความหนา 50 มม. ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 30 V dc เวลาทดสอบ 8 ชม. [8-9] จากนั้นนำตัวอย่างไปหาค่าความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration depth) โดยนำตัวอย่างมาผ่าแยกแล้วพ่นด้วยสารละลาย 0.1 M AgNO₃ [10] รูปตัวอย่างการทดสอบและการวัดความลึกการแทรกซึมคลอไรด์สามารถดูได้จากบทความของผู้วิจัย [11-12]

2.6 Water absorption test

เป็นการทดสอบหาค่าอัตราการดูดซึมน้ำ (Sorptivity or rate of water absorption) ของตัวอย่างที่ไม่อมน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดคาพิลลารี (Capillary suction) จากโพรงช่องว่างที่มีตัวอย่างเมื่อสัมผัสกับน้ำครั้งแรก เป็นการทดสอบโดยทางอ้อม ไม่ใช้การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยตรง ใช้การจำลองสถานการณ์ของโครงสร้างที่เผชิญกับน้ำเพียงด้านเดียว เตรียมตัวอย่างทรงกระบอกมอร์ตาร์ ขนาด 100 x 200 มม. ทำการตัดตัวอย่างให้มีขนาดความหนา 50 มม. ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1585 [13] นำตัวอย่างที่มีอายุครบ 28 วัน ไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นแยกเก็บตัวอย่างในภาชนะที่มีฝาปิดเป็นเวลาอีก 15 วัน แล้วจึงนำตัวอย่างไปทดสอบจดบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นเนื่องน้ำหนักน้ำที่ถูกดูดซึมต่อเวลา รายงานผลการทดสอบเป็นค่าการดูดซึม

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบ Bulk diffusion test

จากภาพที่ 1 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่น้อยกว่าที่อัตราส่วน 0.40 เนื่องจากมีความเข้มข้นของคลอไรด์มากกว่าที่ทุกระยะความลึก (0.5-4.5 มม.) ขณะที่

ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าส่วนผสมที่ใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น (ภาพที่ 2) ในขณะที่ส่วนผสมที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง (ภาพที่ 3) ขณะที่ส่วนผสมที่แทนที่ด้วยสารขยายตัว 10% ให้แนวโน้มค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น และพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวและเถ้าลอยที่ร้อยละ 10:30 (C1E10F30) มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น (ภาพที่ 4) ส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 15:15 (C1F15L15) และ 25:5 (C1F25L5) ตามลำดับ ก็ให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี (ภาพที่ 5) เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมซีเมนต์ล้วน และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ระยะเวลาการแช่ในสารละลายคลอไรด์ที่ 35 วันกับการทดสอบที่ระยะเวลาการแช่ที่ 91 วัน พบว่าการทดสอบที่ 91 วัน ให้ผลการทดสอบที่สอดคล้องกับการทดสอบที่ 35 วัน แต่ให้ค่าปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มมากขึ้น (ภาพที่ 6) และพบว่าส่วนผสมที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมซีเมนต์ล้วนที่ระยะเวลาทดสอบ 91 วัน (ภาพที่ 7)

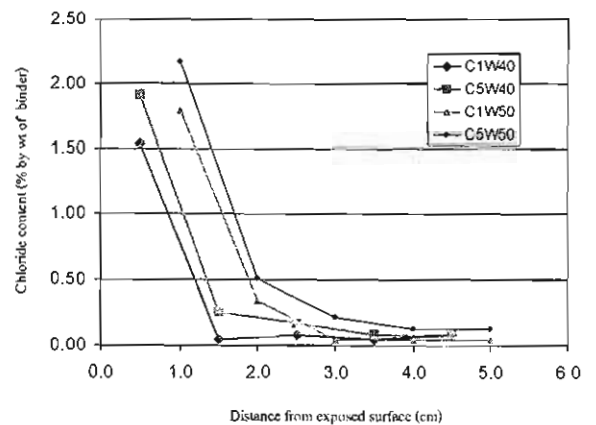
3.2 ผลการทดสอบ RCPT

RCPT ให้ผลการทดสอบที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการทดสอบ Bulk diffusion test กราฟแห่งในภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่าส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เนื่องจากมีค่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า (Charge passed) ต่ำกว่า และส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักมีแนวโน้มของค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยหรือสารขยายตัวมีค่า

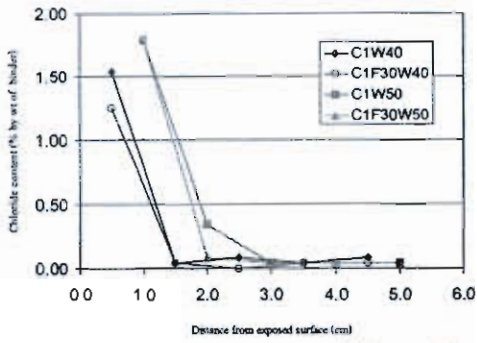
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น แต่ส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าเดิมเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน ขณะเดียวกันส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยวัสดุ 2 ชนิด ในส่วนของเถ้าลอยกับสารขยายตัว (C1E10F30) ให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี สำหรับส่วนผสมที่มีเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 15:15 (C1F15L15) และ 25:5 (C1F25L5) ตามลำดับ ก็ให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีเช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างซีเมนต์ล้วน และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน ดังกราฟแห่งในภาพที่ 9 พบว่าให้แนวโน้มผลการทดสอบไปในทางเดียวกัน นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อบ่มชิ้นตัวอย่างด้วยเวลาที่เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น

3.3 ผลการทดสอบ RMT

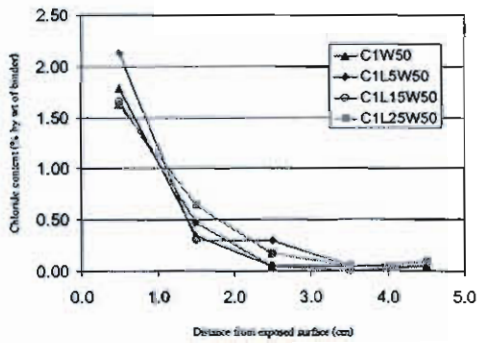
จากกราฟแห่งในภาพที่ 10 พบว่าผลการทดสอบที่ได้รับจาก RMT มีแนวโน้มที่คล้ายกับผลการทดสอบที่ได้รับจากการทดสอบ Bulk diffusion test และการทดสอบ RCPT คือ ส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะมีค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่าส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เนื่องจากมีค่าความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration depth) ที่ต่ำกว่า ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักมี



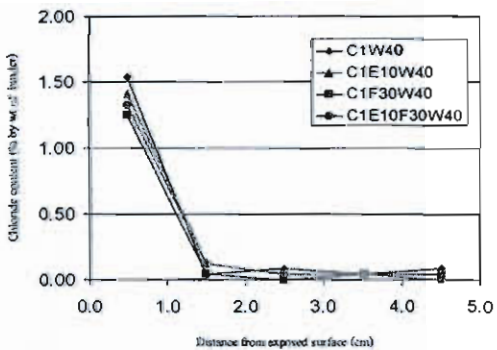
ภาพที่ 1 Total chloride profile ของมอร์ตาร์ที่ผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ ทดสอบที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน



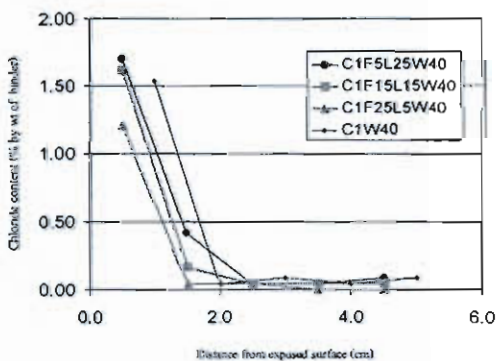
ภาพที่ 2 Total chloride profile ของมอร์ตาร์แทนที่ด้วยเถ้าลอย 30% ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ ที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน



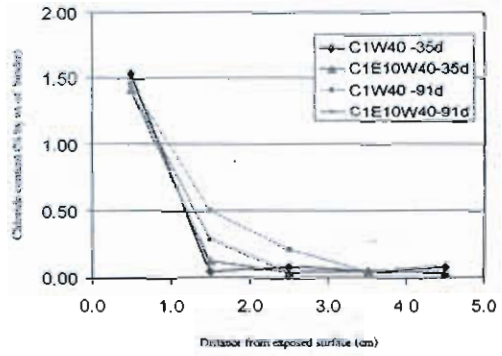
ภาพที่ 3 Total chloride profile ของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ทดสอบที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน



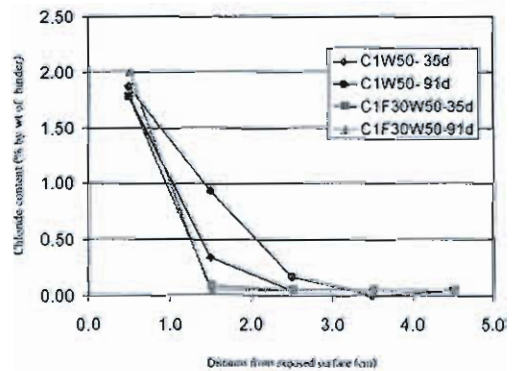
ภาพที่ 4 Total chloride profile ของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยสารขยายตัว 10% ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ ทดสอบที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน



ภาพที่ 5 Total chloride profile ของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ทดสอบที่ระยะเวลาการแช่ 35 วัน



ภาพที่ 6 Total chloride profile ของมอร์ตาร์ที่ผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยสารขยายตัว 10% ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 และ 91 วัน

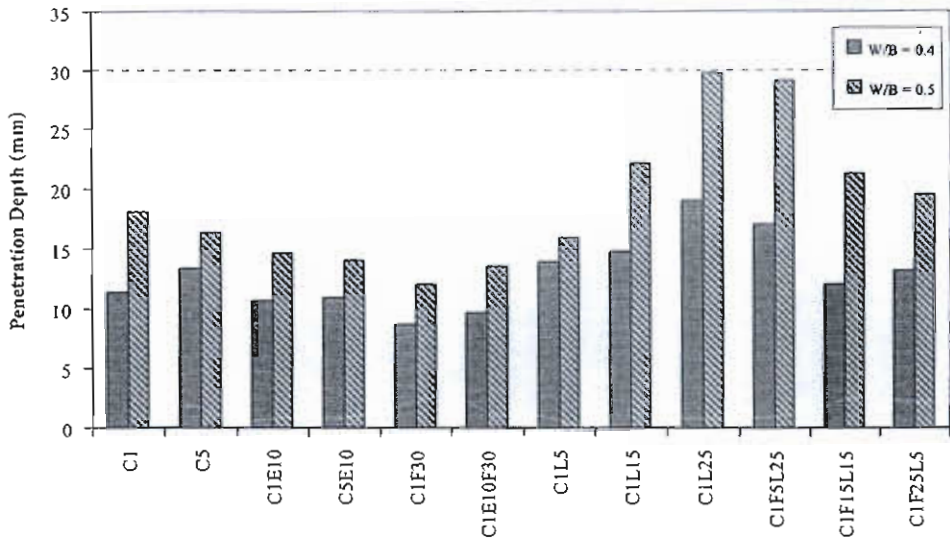


ภาพที่ 7 Total chloride profile ของมอร์ตาร์ที่ผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการแช่ 35 และ 91 วัน

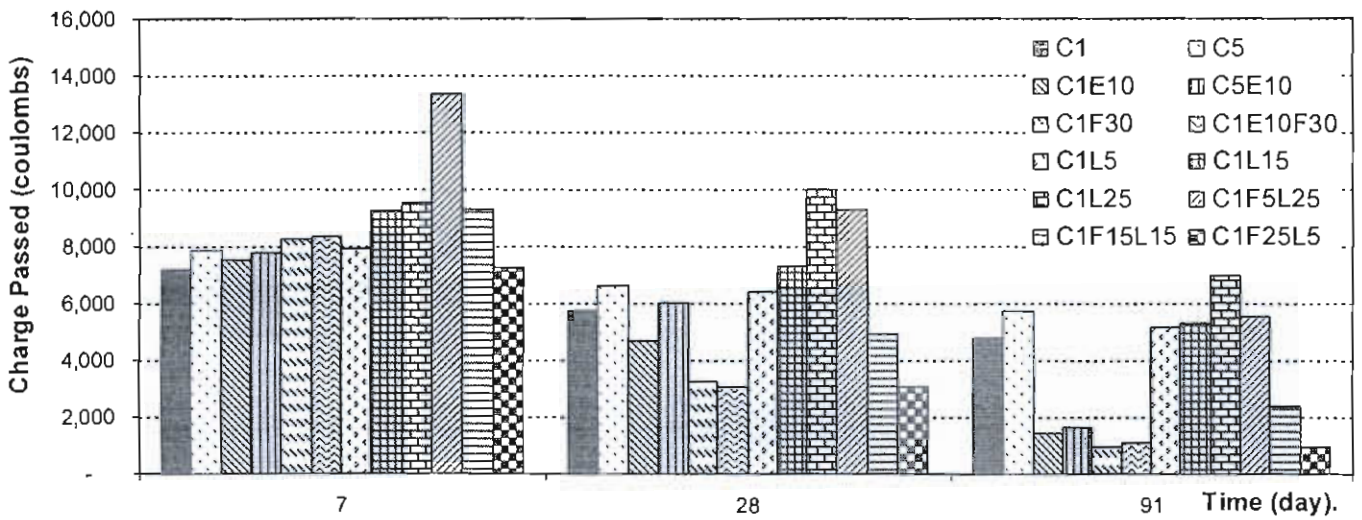
ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก สำหรับส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้น ในขณะที่ส่วนผสมที่แทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวมีแนวโน้มที่จะให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้นเช่นกัน สำหรับการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนมีผลทำให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ต่ำลง สำหรับส่วนผสมที่แทนที่วัสดุประสานด้วยวัสดุ 2 ชนิด ให้ค่าความต้านทานคลอไรด์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน

3.4 ผลการทดสอบ Water absorption test

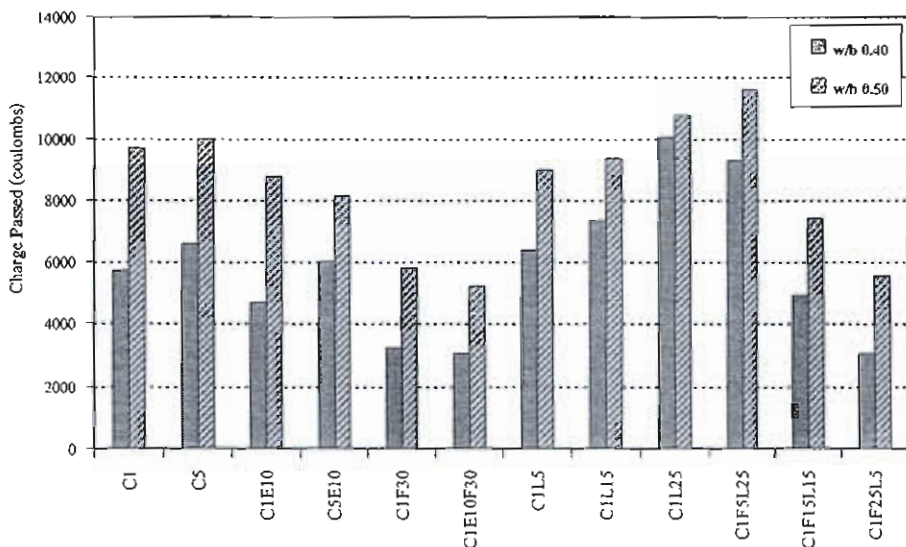
จากกราฟภาพที่ 11 ส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ให้ค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และส่วนผสมที่ใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักให้ค่าการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภท



ภาพที่ 8 ผลการทดสอบ RCPT ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน



ภาพที่ 9 ผลการทดสอบ RCPT ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ภาพที่ 10 ผลการทดสอบ RMT ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน

ที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก แต่ส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย สารขยายตัว และฝุ่นหินปูน ให้ค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน สำหรับส่วนผสมที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยวัสดุ 2 ชนิด ก็พบว่าให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบ

จากผลการทดลองพบว่าการทดสอบ Bulk diffusion test, RCPT และ RMT ให้แนวโน้มผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานหรือชนิดของวัสดุแทนที่ หรืออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิดขณะเดียวกันเมื่อนำผลการทดสอบระหว่าง RCPT และ RMT มาหาความสัมพันธ์ พบว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตามภาพที่ 12 สำหรับการทดสอบ Water absorption test ไม่ได้ให้ผลการทดสอบที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมดกับการทดสอบ อาจเกิดเนื่องจากเงื่อนไขในการเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบจริงที่แตกต่างกัน เนื่องจากสถานะของตัวอย่างทดสอบที่แห้งแตกต่างจากการทดสอบ RCPT และ RMT ที่ตัวอย่างทดสอบอยู่ในสถานะอิ่มตัว หรือเนื่องจากอายุตัวอย่างทดสอบที่เมื่อรวมระยะเวลาที่ต้องใช้ในการเตรียมตัวอย่างตัวอย่างก่อนการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบ Water absorption test มีอายุมากกว่า 28 วัน

4. การอภิปรายผล

ผลการทดสอบพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อย่างไรก็ตาม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี ซึ่งมีความเหมาะสมกับโครงสร้างที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

สำหรับส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่มากกว่าน้ำที่อัตราส่วน 0.40 เพราะการใช้ปริมาณน้ำที่สูง ทำให้น้ำส่วนเกินเหลืออยู่มากจึงทำให้มีความพรุนสูงในมอร์ตาร์ ทำให้ง่ายต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ [14]

ส่วนฝุ่นหินปูนพบว่า ให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ลดลง อาจเกิดขึ้นจากผลกระทบจากการเป็นวัสดุอุดโพรงช่องว่าง (Filler effect) แต่ขาดคุณสมบัติของการเป็นวัสดุประสาน ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านได้

สำหรับสารขยายตัวพบว่าให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ปริมาณสารขยายตัวที่เหมาะสม (10%) ทำให้น้ำมอร์ตาร์แน่นมากขึ้น [15] การแทรกซึมของคลอไรด์ทำได้ยากขึ้น

5. สรุปผล

จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลได้ดังนี้

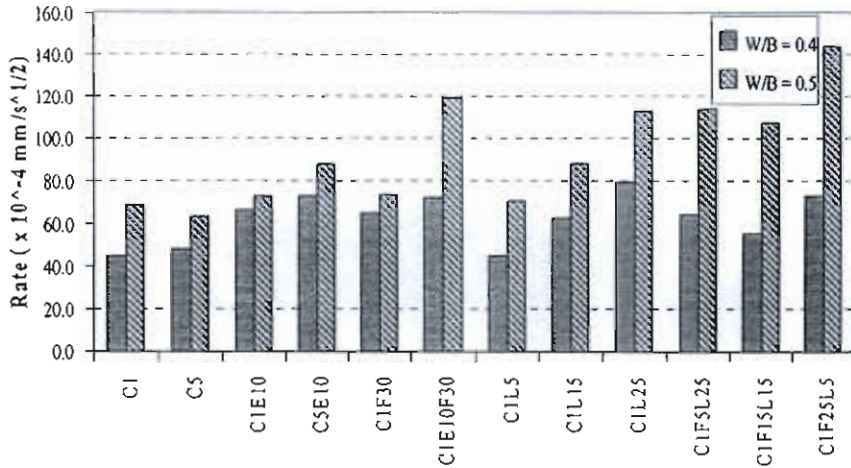
1. การใช้เถ้าลอยหรือสารขยายตัวแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีขึ้น
2. การใช้ฝุ่นหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ มีผลทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง
3. การใช้เถ้าลอยกับฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วน C1F15L15, C1F25L5 และเถ้าลอยกับสารขยายตัวที่อัตราส่วน C1E10F30 แทนที่ปูนซีเมนต์ ให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี
4. วิธีการทดสอบ Bulk diffusion test วิธี RCPT และวิธี RMT ให้ผลทดสอบที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

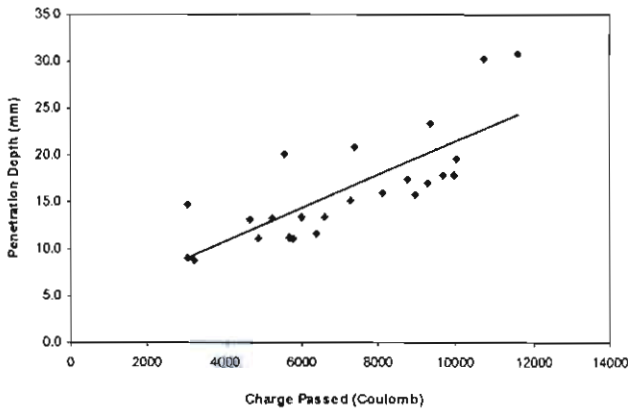
งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยบูรพา โดยทุนอุดหนุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน และจากศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (Construction & Maintenance Technology Research Center, CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

7. บรรณานุกรม

- [1] Thomas, M. (1996), Chloride Thresholds in Marine Concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(4):513-519



ภาพที่ 11 ผลการทดสอบ Water absorption test



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการทดสอบ RCPT-RMT

[2] ปริญญา ชินดาประเสริฐ. (2548), เด็กลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). สมาคมคอนกรีตไทย

[3] Lawrence, P., Cyr, M. and Ringot, E. (2003), Mineral Admixtures in Mortars: effect of inert materials on short term hydration. Cement and Concrete Composite. 33(12):1939-1947.

[4] เครือซีเมนต์ไทย. (2548), ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน.

[5] ASTM C1556, Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. Annual Book of ASTM Standard, Volume 04.02.

[6] ASTM C1152, Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02.

[7] ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02.

[8] NT BUILD 492, Chloride Migration Coefficient from Non-Steady State Migration Experiments, Nordtest Method, Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials.

[9] Tang, L., Nilsson, LO. (1992), Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field. ACI Mater J, 89(1):49-53

[10] Otsuki, N., Nagataki, S., and Nakashita, K. (1992), Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials. ACI Materials Journal, 89(6):587-592

[11] Rerkmahalikhit, A., Sumranwanich, T. and Tangtermsirikul, S., Chloride Resistance of Portland Cement Mortar with Fly Ash, Limestone Powder and Expansive Additives., 1st Asean Civil Engineering Conference, March 12-13, 2009, Pattaya, Thailand.

[12] เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต, ทวีชัย ตำราญวานิช, ภัทวิวัฒน์ แสนเจริญ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, ความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์ที่ผสมเด็กลอย ปูนซีเมนต์และสารขยายตัว, การประชุมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[13] ASTM C 1585, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02

[14] Metha, P.K., Monterio, P.J.M. (2006), Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 3rd Edition, The McGraw-Hill companies.

[15] Lam, N.T., Sunranwanich, T., Krammart, P., Saliemitmongkol, R. and Tangtermsirikul, S. (2008), Durability Properties of Concrete with Expansive Additive. Journal of the Engineering Institute of Thailand, 19 (4): 8-15