

แบบจำลองสำหรับการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและอายุการใช้งาน  
ที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์

อัญชญา กิจงานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

พฤษภาคม 2560

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ อัญชญา กิจงานนท์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

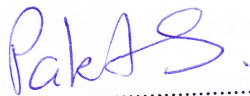
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธาน

(ดร. ภักพัฒน์ แสนเจริญ)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว)



..... กรรมการ

(ดร. รอรู รังสิเวศ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร. อาณัติ ตีพัฒนา)

วันที่ 17 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

57910231: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์/ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์/  
แบบจำลองการคั่งคู่อิออนคลอไรด์/ ปริมาณคลอไรด์/ คอนกรีต/ แก้วลอย

อัญชญา กิจงานนท์: แบบจำลองสำหรับการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต  
และอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้  
สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ (A MODEL FOR DETERMINING CHLORIDE PENETRATION  
PROFILE IN CONCRETE AND REPAIRED-FREE SERVICE LIFE OF REINFORCED  
CONCRETE UNDER CHLORIDE ENVIRONMENT) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: ทวีชัย  
สำราญวานิช, Ph.D., 273 หน้า. ปี พ.ศ. 2560.

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งพัฒนาแบบจำลองสำหรับการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของ  
คอนกรีตผสมแก้วลอยที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยแบบจำลองหลักประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อย  
ได้แก่ แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และ  
แบบจำลองการคั่งคู่อิออนคลอไรด์ ซึ่งแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ได้พิจารณาทั้ง  
การยึดจับคลอไรด์ทางเคมี และทางกายภาพ แต่งานวิจัยนี้พัฒนาเฉพาะแบบจำลองการยึดจับ  
คลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ ด้วยการขยายขอบเขตของข้อมูล และเพิ่มผลกระทบ  
ของความละเอียดของแก้วลอย และความเข้มข้นคลอไรด์ที่เผชิญเข้าไปในแบบจำลอง ส่วน  
แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ถูกปรับปรุงโดยการขยายขอบเขตของข้อมูลการทดลอง  
การแพร่ออกคลอไรด์ ขณะที่แบบจำลองการคั่งคู่อิออนคลอไรด์พัฒนาด้วยการขยายฐานข้อมูล  
ของการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ และเพิ่มผลกระทบของอัตราส่วนแก้วลอยต่อวัสดุประสานไว้  
ในแบบจำลองด้วย

จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองสามารถคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์และ  
คอนกรีตที่ผสมแก้วลอยและไม่ผสมแก้วลอย ที่ความลึก ระยะเวลาบ่มน้ำ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์  
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนแก้วลอยต่อวัสดุประสาน ชนิดของปูนซีเมนต์และแก้วลอย  
ต่าง ๆ ได้ โดยแบบจำลองสามารถทำนายได้ทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระ  
และผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในช่วง  $-15.88\%$  ถึง  $+28.97\%$  สำหรับผล  
การทดลองที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง และมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในช่วง  $-11.93\%$  ถึง  $+20.95\%$   
สำหรับผลการทดลองของนักวิจัยอื่น ๆ ยิ่งไปกว่านั้นแบบจำลองสามารถใช้ทำนายอายุการใช้งาน  
ที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ได้  
ด้วย

57910231: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M. Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: CHLORIDE BINDING CAPACITY MODEL/ CHLORIDE DIFFUSION  
COEFFICIENT MODEL/ CHLORIDE ION ADSORPTION MODEL/  
CHLORIDE PROFILE/ CONCRETE/ FLY ASH

AUNCHANA KIJJANON: A MODEL FOR DETERMINING CHLORIDE  
PENETRATION PROFILE IN CONCRETE AND REPAIRED-FREE SERVICE LIFE OF  
REINFORCED CONCRETE UNDER CHLORIDE ENVIRONMENT. ADVISORY  
COMMITTEE: TAWEECHAI SUMRANWANICH, Ph.D. 273 P. 2017.

This thesis aims to study time-dependent chloride penetration profiles of concrete with fly ash. The main model consists of 3 sub-models, chloride binding capacity model, chloride diffusion coefficient model and chloride ion adsorption model. The chloride binding capacity model is considered for both chemical binding and physical binding. But, in this research only physical binding model is developed by extending the range experimental result and considering the effect of blaine fineness of fly ash and external chloride concentration in the model. The chloride diffusion coefficient model is improved by extending the range of experimental results of chloride diffusion. While, the chloride ion adsorption model is developed by extending the range experimental result of chloride penetration and taking into account the effect of fly ash to binder ratio in the model.

From the study, it was found that the model can calculate chloride penetration profiles of mortar and concrete with and without fly ash at various depths, curing times, chlorides exposure periods, water to binder ratios, fly ash to binder ratios and types of cement and fly ash. The model can predict chloride penetration profiles of mortar and concrete for both total chloride contents and free chloride contents. The calculated results from model indicate the average error between -15.88% to +28.97% compared to the experimental results of developing model and -11.93% to +20.95% compared to the experimental results of other researchers. Moreover, the model can be applied to predict the repaired-free service life of reinforced concrete structures under chloride environment.

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ โครงการทุนผู้ช่วยสอน ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่มอบทุนการศึกษาให้แก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา และยังกรุณามอบทุนช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งอย่างยิ่ง จึงกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว ดร. อมรชัย ใจยงค์ ดร. ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ดร. ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ นักวิจัย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา ดร. รอบรู้ รังสิเวศ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี Mr. Lyna Prak และ Mrs. Sothearath Chour นิติบัญญัติเอก และมหาดบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำชี้แนะและคำปรึกษา ทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบรวมทั้งให้คำแนะนำต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ข้าพเจ้าจึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย

เหนือสิ่งอื่นใดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวินิจ กิจจานนท์ และคุณแม่ช่อนกลิ่น กิจจานนท์ ตลอดจนญาติพี่น้องและบรรพบุรุษของข้าพเจ้าทุกท่านที่ต่อสู้และอดทนกับการทำงานเพื่อเลี้ยงดูลูกจนมีวันนี้ได้

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบเป็นกตัญญูทเวทิตาแด่บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

อัญชนา กิจจานนท์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์.....	4
ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต.....	11
การแพร่ของคลอไรด์เข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีต.....	12
การดึงคูคดิออนคลอไรด์ของคอนกรีต.....	14
กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์.....	15
ปูนซีเมนต์.....	23
เถ้าลอย.....	30
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
3 การพัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต.....	48
แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย.....	48
แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์.....	52
แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์.....	67
แบบจำลองการดึงคูคดิออนคลอไรด์.....	82

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 การตรวจสอบแบบจำลอง.....	89
การตรวจสอบแบบจำลองความสามารถก็เก็บคลอไรด์.....	89
การตรวจสอบแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์.....	100
การตรวจสอบแบบจำลองการดึงดูดอออนคลอไรด์.....	109
การตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง.....	158
5 การศึกษาตัวแปรของแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์.....	159
แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมถั่วลอย.....	159
การคำนวณอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซม.....	176
6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	179
สรุปผล.....	179
ข้อเสนอแนะ.....	181
บรรณานุกรม.....	182
ภาคผนวก.....	188
ภาคผนวก ก.....	189
ภาคผนวก ข.....	198
ภาคผนวก ค.....	203
ภาคผนวก ง.....	219
ภาคผนวก จ.....	228
ภาคผนวก ฉ.....	233
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	256

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ขอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต.....	7
2-2 องค์ประกอบของน้ำทะเล.....	7
2-3 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของนักวิจัยต่าง ๆ.....	22
2-4 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต.....	23
2-5 การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์.....	29
2-6 ข้อกำหนดทางเคมีของถ้ำลอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	31
2-7 ข้อกำหนดทางเคมีของถ้ำลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545.....	31
2-8 การทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของถ้ำลอย.....	34
3-1 ขอบเขตของข้อมูลที่ใช้พัฒนาแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ ของ Sumranwanich (2004) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนา.....	52
3-2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และถ้ำลอยที่ใช้ สำหรับสร้างแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์.....	54
3-3 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองความสามารถ กักเก็บคลอไรด์.....	57
3-4 ขอบเขตของข้อมูลที่ใช้พัฒนาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ของ Sumranwanich (2004) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนา.....	67
3-5 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และถ้ำลอยที่ใช้ สำหรับสร้างแบบจำลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์.....	78
3-6 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองโครงสร้าง โพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์.....	79
3-7 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และถ้ำลอยที่ใช้ สำหรับสร้างแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์.....	80
3-8 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ คลอไรด์.....	81
3-9 ขอบเขตของข้อมูลที่ใช้พัฒนาแบบจำลองการคั่งคูดอออนคลอไรด์ ของ Sumranwanich (2004) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนา.....	82



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3-10 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองการดึงคูดอออนคโลไรด์.....	85
3-11 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองการดึงคูดอออนคโลไรด์	87
4-1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ของนักวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับตรวจสอบแบบจำลองความสามารถกักเก็บคโลไรด์.....	90
4-2 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลอง ของนักวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับตรวจสอบแบบจำลองความสามารถกักเก็บคโลไรด์.....	92
4-3 ส่วนผสมของคอนกรีต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย.....	136
4-4 ส่วนผสมของคอนกรีต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2.....	139
4-5 ส่วนผสมของคอนกรีต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย.....	144
4-6 ส่วนผสมของคอนกรีต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย.....	155
4-7 ความคลาดเคลื่อนของแต่ละแบบจำลองในงานวิจัยของ Sumranwanich (2004) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนา.....	158
5-1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ที่ใช้สำหรับการศึกษาตัวแปรของแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคโลไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย.....	159
5-2 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลอง ที่ใช้สำหรับการศึกษาตัวแปรของแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคโลไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย.....	160
5-3 เงื่อนไขการทดลอง ที่ใช้สำหรับการศึกษาตัวแปรของแบบจำลองสำหรับทำนายการแทรกซึมคโลไรด์ในคอนกรีต ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง.....	167
5-4 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลอง ที่ใช้สำหรับการศึกษาอายุการใช้งานของคอนกรีตที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซม.....	176
5-5 ปริมาณคโลไรด์วิกฤตของคอนกรีตตาม มยผ. 1332-55.....	176

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	ลักษณะของโครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเล..... 6
2-2	การแพร่ของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต..... 8
2-3	การดึงดูดไอออนเข้าไปในคอนกรีต..... 9
2-4	การดึงดูดแบบคาพิลลารี..... 10
2-5	กลไกการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต โดยแรงดันน้ำ..... 10
2-6	ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต..... 12
2-7	กลไกการดึงดูดไอออนคลอไรด์..... 15
2-8	การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์..... 16
3-1	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและความชื้นสัมพัทธ์ในโพรงของคอนกรีต..... 49
3-2	แผนผังการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต..... 50
3-3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของ $C_3A$ และ $C_4AF$ และ ความแตกต่างของดัชนีการเกิดปฏิกิริยา..... 63
3-4	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพ กับปริมาณคลอไรด์ ทั้งหมด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ..... 65
3-5	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพ กับปริมาณคลอไรด์ ทั้งหมด ที่ความละเอียดของเถ้าลอยต่าง ๆ..... 66
3-6	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพ กับปริมาณคลอไรด์ ทั้งหมด ที่ความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญต่าง ๆ..... 66
3-7	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบ จำลองของซีเมนต์เพสต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง..... 70
3-8	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบ จำลองของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานต่าง ๆ..... 71
3-9	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จาก แบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และความละเอียดของปูนซีเมนต์ต่าง ๆ..... 71

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-10 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงช่องว่างที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จาก แบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และความละเอียดของเถ้าลอยต่าง ๆ.....	72
3-11 ความพรุนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ.....	74
3-12 ความพรุนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานต่าง ๆ.....	74
3-13 ความพรุนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และความละเอียดของปูนซีเมนต์ต่าง ๆ.....	75
3-14 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์ ที่ผสมเถ้าลอย.....	77
3-15 อัตราการดึงคูดอออนคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์.....	85
4-1 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง ของซีเมนต์เพสต์ล้วน.....	93
4-2 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (เถ้าลอยชนิด 2ก และ 2ข).....	94
4-3 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยจังหวัดระยองชนิด FAH และ FAHM (เถ้าลอยชนิด 2ก).....	94
4-4 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับ ผลการทดลองของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยจังหวัดระยองชนิด FAB และ FABM (เถ้าลอยชนิด 2ก).....	95
4-5 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของ Maruya (1995).....	96
4-6 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของ Hussian et al. (1994).....	97
4-7 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของ Rasheeduzzofar et al. (1991).....	98
4-8 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของ Arya et al. (1990).....	99
4-9 การทดลองการแพร่ออกของคลอไรด์.....	100

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-10 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1).....	101
4-11 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1).....	101
4-12 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5).....	102
4-13 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5).....	102
4-14 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20 และ 0.40 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน และระยะเวลาแช่น้ำประปา 28 วัน.....	103
4-15 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20 และ 0.40 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน และระยะเวลาแช่น้ำประปา 28 วัน.....	104
4-16 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20 และ 0.40 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน และระยะเวลาแช่น้ำประปา 140 วัน.....	105
4-17 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20 และ 0.40 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน และระยะเวลาแช่น้ำประปา 28 วัน.....	106
4-18 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในมอร์ต้าร์ล้วน ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	107
4-19 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	108
4-20 การทดลองการแทรกซึมคลอไรด์.....	109
4-21 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (FAN) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	110



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-35 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	124
4-36 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	125
4-37 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสาน 0.40 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	126
4-38 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสาน 0.50 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	127
4-39 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5.....	128
4-40 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5.....	129
4-41 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5.....	130
4-42 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วน ภายใต้วัฏจักรเปียกสลับแห้ง ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	131
4-43 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	133
4-44 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	134
4-45 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วน ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	135
4-46 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.45.....	137
4-47 ปรากฏการณ์เปียกสลับแห้ง (Cyclic wetting and drying).....	138



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-61 การตรวจสอบแบบจำลองปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 1,825 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60.....	154
4-62 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	156
4-63 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	157
5-1 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่าง ๆ (w/b = 0.50 และระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน).....	161
5-2 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ระยะเวลาบ่มน้ำต่าง ๆ (w/b = 0.50 และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน).....	162
5-3 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ (ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน).....	163
5-4 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ชนิดของปูนซีเมนต์ต่าง ๆ (w/b = 0.50, ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน).....	164
5-5 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ชนิดของเถ้าลอยต่าง ๆ (w/b = 0.50, ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน).....	165
5-6 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานต่าง ๆ และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน.....	166
5-7 การคำนวณปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ความถี่ของวัฏจักรเปียกสลับแห้งต่าง ๆ.....	168
5-8 การคำนวณปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ความถี่ของวัฏจักรเปียกสลับแห้งต่าง ๆ.....	169
5-9 การคำนวณปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะเวลาเปียกและระยะเวลาแห้งต่าง ๆ.....	171
5-10 การคำนวณปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะเวลาเปียกและระยะเวลาแห้งต่าง ๆ.....	173



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-11 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่พิจารณาเฉพาะผลกระทบของ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และผลกระทบของสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์รวม กับการดึงดูดอออนคลอไรด์.....	175
5-12 อายุการใช้งานของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ปลอดการบำรุงรักษาซ่อมแซม.....	177
5-13 ปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตตลอดอายุการใช้งานของคอนกรีต ผสมเถ้าลอย.....	178

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากเกลือคลอไรด์ถือเป็นปัญหาหลักที่ทำให้โครงสร้างมีความคงทนลดลง กล่าวคือ คลอไรด์แพร่ผ่านโครงสร้างโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตไปยังเหล็กเสริม เมื่อปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวของเหล็กเสริมมีค่ามากกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต ชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่เคลือบผิวของเหล็กเสริมจะถูกทำลายลง และเมื่อมีปริมาณของออกซิเจนและความชื้นที่เพียงพอ เหล็กเสริมที่ถูกฝังอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตจะเริ่มเกิดสนิม เมื่อมีการขยายตัวของปริมาตรสนิมของเหล็กเสริมทำให้อายุการใช้งานของคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนและดันให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว ซึ่งเป็นเหตุให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสามารถในการรับกำลังและอายุการใช้งานลดลง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงจำเป็นต้องอาศัยแนวทางการป้องกันการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต เช่น การเพิ่มระยะหุ้มเหล็กเสริม หรือการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการใช้งานในโครงสร้างที่ต้องเผชิญกับคลอไรด์

ในปัจจุบันนิยมใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสำหรับเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีต โดยวัสดุปอซโซลานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานคอนกรีต คือ เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ เฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ที่สามารถใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ทำให้เกิดผลผลิต เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้อนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ โดยอนุภาคที่เล็กนี้สามารถเข้าไปอุดโพรงช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์และมวลรวมทำให้คอนกรีตมีโครงสร้างโพรงช่องว่างลดลง คอนกรีตมีความทึบน้ำมากยิ่งขึ้น ทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น ทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูงขึ้น

จากที่กล่าวมาแล้วว่า การใช้คอนกรีตที่มีความคงทนสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ ดังนั้นเพื่อเลือกส่วนผสมคอนกรีตที่มีความคงทนจึงจำเป็นต้องอาศัยการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถออกแบบและทำนายปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมสำหรับใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ ทั้งนี้ยัง

สามารถอาศัยแบบจำลองที่พัฒนาใช้ในการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจในการวางแผนบำรุงรักษาซ่อมแซมต่อไปได้อีกด้วย

ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมถั่วลันเตาจึงประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อย คือ แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูดอออนคลอไรด์ ซึ่งแบบจำลองนี้ถูกปรับปรุงต่อจากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) โดยทำการขยายฐานข้อมูลและเพิ่มปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อในแต่ละแบบจำลองเข้าไว้พิจารณาด้วย

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมถั่วลันเตา โดยแบบจำลองประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่ แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูดอออนคลอไรด์ โดยพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติมซึ่งมีผลกระทบต่อเข้าไปในแบบจำลองด้วยการอาศัยข้อมูลผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ
2. เพื่อคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ส่วนผสมคอนกรีตต่าง ๆ ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ในสถานะเงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงไป

### ขอบเขตของงานวิจัย

การปรับปรุงแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมถั่วลันเตาประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่ แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูดอออนคลอไรด์ของคอนกรีตผสมถั่วลันเตา ซึ่งมีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1. แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตผสมถั่วลันเตา ถูกพิจารณาให้คำนึงถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด อัตราส่วนถั่วลันเตาต่อวัสดุประสาน ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ความละเอียดของถั่วลันเตา และความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ภายนอก ซึ่งแบบจำลองถูกปรับปรุงโดยใช้อัตราส่วนถั่วลันเตาต่อวัสดุประสาน 0.30, 0.50 และ 0.70 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30, 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 1, 7, 28 และ 91 วัน และแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3.0 และ 5.0 เป็นเวลา 28, 56 และ 91 วัน

2. แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ถูกพัฒนาโดยการขยายฐานข้อมูลของโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต ปริมาณของน้ำในโพรงช่องว่างของคอนกรีต และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน ซึ่งการพัฒนาแบบจำลองใช้ผลการทดลองการแพร่ออกของคลอไรด์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30, 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.40 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้มี 2 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เถ้าลอยที่ใช้มีทั้งเถ้าลอยชนิด 2ก และชนิด 2ข ระยะเวลาบ่ม 3, 7 และ 28 วัน และระยะเวลาแช่น้ำ 28, 91, 140 และ 182 วัน

3. แบบจำลองการดึงดูดอออนคลอไรด์ ถูกพัฒนาโดยการขยายฐานข้อมูลของปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีต ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ชั้นที่ 1 และค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างของคอนกรีต และผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานถูกพิจารณาเพิ่มในแบบจำลองนี้ด้วย ซึ่งการพัฒนาแบบจำลองใช้ผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่มีปริมาณวัสดุประสานตั้งแต่ 300 ถึง 600 กก./ม.<sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30, 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20, 0.30 และ 0.50 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้มี 2 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ความละเอียดของปูนซีเมนต์ตั้งแต่ 3190 ถึง 3700 ซม.<sup>2</sup>/กรัม เถ้าลอยที่ใช้มีทั้งเถ้าลอยชนิด 2ก และ 2ข ระยะเวลาบ่ม 27 และ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28, 35, 91, 182 และ 365 วัน

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แบบจำลองสามารถคำนวณและทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ได้
2. แบบจำลองสามารถทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ได้
3. แบบจำลองสามารถประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีความคงทนสำหรับก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์

มาตรฐานกรมโยธาและผังเมือง [มยผ.] (2555) กล่าวว่า การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการกำหนดข้อกำหนดของคอนกรีตเป็นลักษณะเดียวกัน แม้ว่าสภาพแวดล้อมภายนอกของโครงสร้างจะมีความแตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีอายุการใช้งานสั้นลง ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมสูง หากสามารถกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตโดยให้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างต้องเผชิญจะทำให้คอนกรีตมีอายุการใช้งานยาวนาน ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมในอนาคต ดังนั้นการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้พิจารณาถึงปัญหาด้านความคงทนที่จะต้องเผชิญในแต่ละลักษณะสภาวะแวดล้อม

ทวีชัย สำราญวานิช (2553) กล่าวว่า ปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine environment) เป็นปัญหาที่พบมากในประเทศไทย โดยทั่วไปโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลนั้น อาจเกิดการเสื่อมสภาพได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน อาทิเช่น การกัดเซาะ การชะล้าง การตกผลึกของเกลือ การทำลายโดยเกลือซัลเฟต แต่สาเหตุหลักก็คือ การทำลายโดยเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลจะส่งผลโดยตรงต่อเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีต ทำให้เหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนเป็นสนิม และเนื้อสนิมที่เกิดขึ้นจะดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็ว และมีอายุการใช้งานสั้นกว่าที่ควรจะเป็น

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) กล่าวว่า การเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีผลเสียคือ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมบริเวณที่เป็นขั้วลบ (ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอน) ลดลง ส่วนเหล็กเสริมบริเวณที่เป็นขั้วบวกจะเป็นสนิมพอกพูนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยสนิมจะขยายตัวเพิ่มปริมาตรถึง 4-6 เท่า และแรงยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตในส่วนนี้จะลดลงด้วย และท้ายที่สุด โครงสร้างคอนกรีตจะแตกออกด้วยการเป่งตัวของสนิมเหล็ก และเสียความสามารถในการรับกำลังลงไปอย่างมาก สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่จมอยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged zone) หรือโครงสร้างคอนกรีต ที่อยู่ในบริเวณใต้พื้นทะเล (Sea bed zone) จะได้รับความเสียหายจากการทำลายโดยสารละลายซัลเฟตเป็นหลักมากกว่าที่จะเกิดจากสารละลาย

คลอไรด์ ผลกระทบโดยรวมจากการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์ คือ กำลังรับแรงต่าง ๆ ของคอนกรีตลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางด้านความต้านทานความล้า (Fatigue) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือการเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้าง รวมถึงความยืดหยุ่น (Stiffness) ก็ลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่ผลข้างเคียงจากการทำลายโดยกระบวนการดังกล่าวคือการแตกร้าวของคอนกรีต เป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยเร่งให้น้ำและออกซิเจนสามารถเข้าถึงบริเวณผิวของเหล็กเสริมได้เร็วและมากขึ้น ทำให้มีการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้น

#### 1. ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล

โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2-1 สามารถแบ่งได้ 5 บริเวณ ดังนี้

1.1 บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) เป็นบริเวณที่คอนกรีตไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงแต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่พัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปนจะมีความเข้มข้นของเกลือลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทาง และความแรงของกระแสลมที่พัดพาละอองไอเกลือ ซึ่งความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม

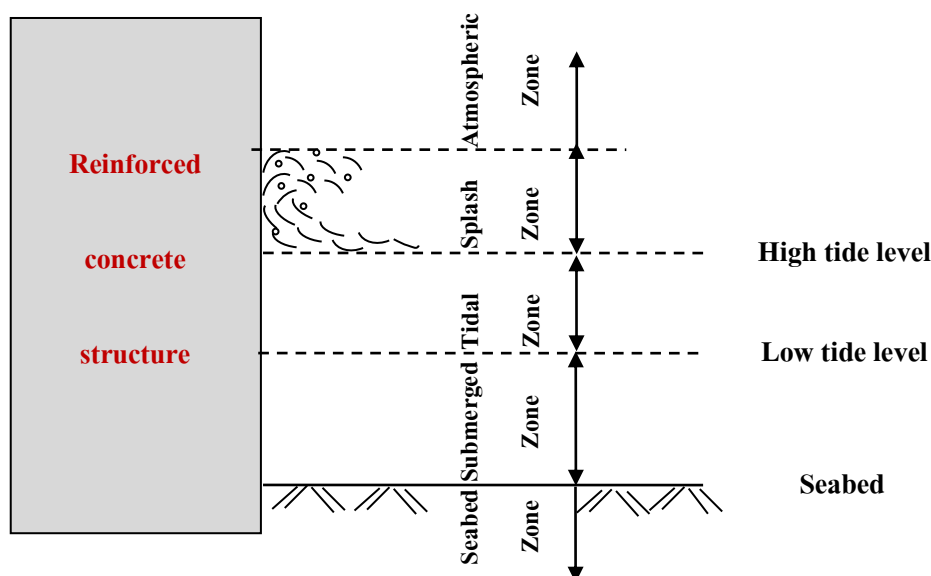
1.2 บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด โดยคอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากคอนกรีตที่สภาพเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ประกอบกับความชื้นและก๊าซออกซิเจนในโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตสูงทำให้คอนกรีตเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความเสียหายเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนเนื่องจากการกัดเซาะจากแรงกระแทกของคลื่น ซึ่งคอนกรีตที่อยู่ในบริเวณนี้จะมีความเสียหายรุนแรงกว่าส่วนอื่น ๆ

1.3 บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) บริเวณนี้อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและระดับน้ำลงต่ำสุด โดยคอนกรีตจะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนจะแห้งคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) ความเสียหายเกิดได้จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การขัดสีจากทรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล

1.4 บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) บริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลต่ำสุด โดยคอนกรีตในบริเวณนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดจากการกัดกร่อนโดยซัลเฟตเป็นหลัก การเกิดสนิมในเหล็กเสริมพบได้น้อย เนื่องจากไม่มี

ก๊าซออกซิเจนเพียงพอทำให้เกิดสนิม

1.5 บริเวณใต้พื้นทะเล (Seabed zone) บริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตจะเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟตเป็นหลัก



ภาพที่ 2-1 ลักษณะของโครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเล (Tangtermsirikul, 2003)

## 2. แหล่งที่มาและประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์สามารถพบได้ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติทั่วไป ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม หรืออาจมีคลอไรด์อยู่ในคอนกรีตเอง เช่น ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือที่ปนเปื้อนมากับหิน ทราย (โดยเฉพาะทรายที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล) รวมถึงคลอไรด์ที่มาจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว ดังนั้นมาตรฐานกรมโยธาและผังเมือง (มยพ., 2555) จึงกำหนดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีตต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด ดังตารางที่ 2-1

แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตนั้นส่วนใหญ่มาจากสภาพแวดล้อมภายนอกในช่วงระยะเวลาของการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็ง (De-Icing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้แหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบที่รุนแรงต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนใหญ่มาจากน้ำทะเล ซึ่งในน้ำทะเลประกอบไปด้วย สารประกอบซัลเฟตและคลอไรด์ของโซเดียมและแมกนีเซียมเป็นส่วนใหญ่ ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต (มยผ., 2555)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด ที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต (ร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
1. คอนกรีตอัดแรง	0.08
2. คอนกรีตเสริมเหล็กที่ขณะใช้งานมีการสัมผัสกับ คลอไรด์ เช่น กำแพงกันคลื่น (Sea-retaining walls)	0.20
3. คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพแห้ง หรือขณะใช้งาน มีการป้องกันความชื้น	1.00
4. คอนกรีตเสริมเหล็กอื่น	0.30

หมายเหตุ: การทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายในกรดได้ ให้เป็นไปตามมาตรฐาน

ASTM C 1152/C 1152M : Standard test method for acid-soluble chloride in mortar  
and concrete

ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบของน้ำทะเล (Mindess & Yong, 1981)

Compositions 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



### 3. การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์จากภายนอกเข้าสู่เนื้อคอนกรีต

การเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์จากภายนอกเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตถือเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสื่อมเหล็กเสื่อมสภาพ โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เรียกว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration) ซึ่งเกิดขึ้นจากกลไกต่าง ๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้นคลอไรด์ ประจุไฟฟ้า และแรงดันน้ำ นอกจากนี้ยังอาจเกิดขึ้นจากแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนผ่านด้วย ดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไกหลัก ๆ ดังนี้

3.1 การแพร่ (Diffusion) กลไกนี้มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์เข้าไปยังโพรงช่องว่างของคอนกรีตที่อึดตัวด้วยน้ำ แรงขับเคลื่อนของเกลือคลอไรด์ ในกลไกนี้เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ กล่าวคือ เกลือคลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังภาพที่ 2-2 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อสองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ 2-1

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

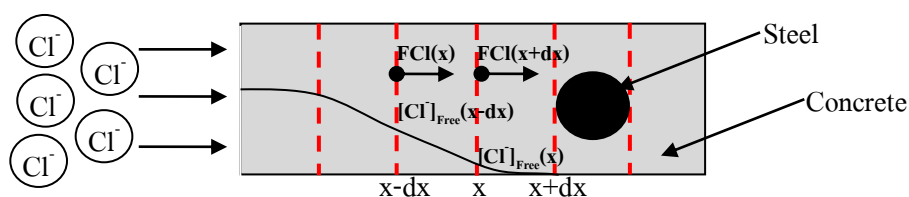
โดยที่  $C_t(x,t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง  $x$  จากผิวด้านนอก  
ที่ระยะเวลา  $t$  ใด ๆ (โมล/ ลิตร)

$C_f(x,t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง  $x$  จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา  $t$  ใด ๆ  
(โมล/ ลิตร)

$D_a$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.<sup>2</sup>/ ปี)

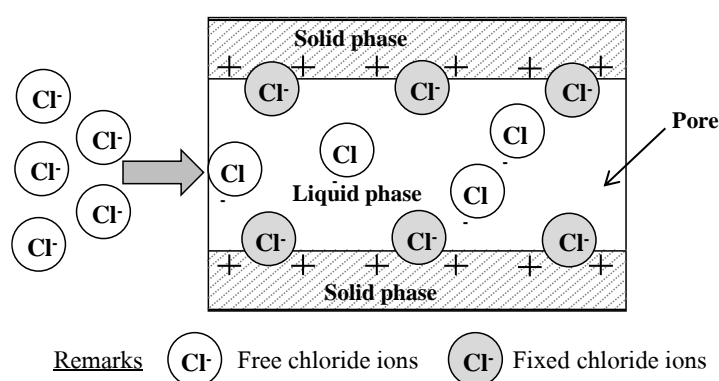
$x$  คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)

$t$  คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)



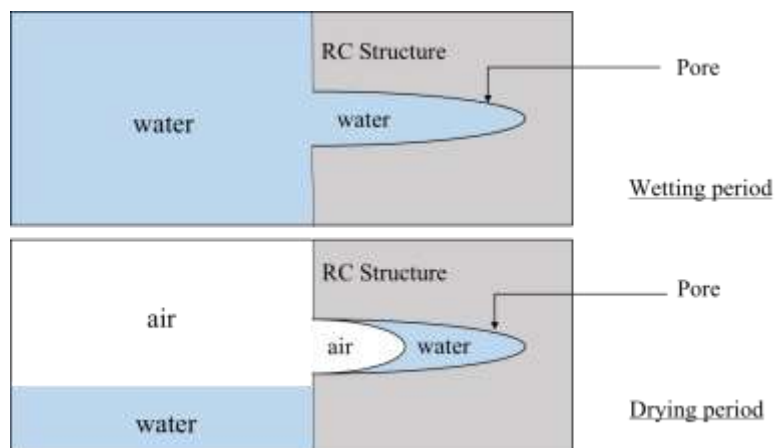
ภาพที่ 2-2 การแพร่ของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต

3.2 การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลหรือเปียกอยู่ตลอดเวลาพบว่า ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ที่อยู่บริเวณผิวหน้าของโครงสร้างจะมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เนื่องจากการแพร่จะยุติลงเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ภายในคอนกรีตเท่ากับสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนสามารถทำให้ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวหน้าสูงขึ้นได้เพราะว่าที่ผิวของโพรงช่องว่างเล็ก ๆ ในคอนกรีตมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกจะดึงดูดเกลือคลอไรด์ ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่บริเวณนั้นให้สูงขึ้นได้ ดังภาพที่ 2-3



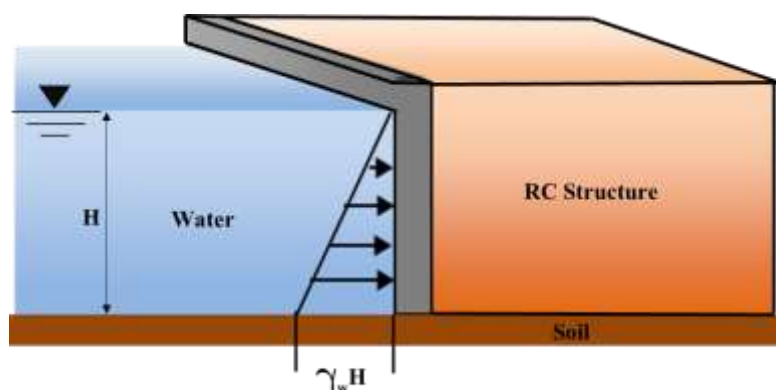
ภาพที่ 2-3 การดึงดูดไอออนเข้าไปในคอนกรีต

3.3 การดึงดูดคาพิลลารี (Capillary suction) เกิดขึ้นจากวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Wet-dry cycle) เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกด้วยน้ำทะเล คอนกรีตจะดูดน้ำและคลอไรด์ไอออนเก็บไว้ภายในโพรงช่องว่าง และเมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตจะระเหยออกไป ทำให้เกลือคลอไรด์เกิดการตกผลึกอยู่ภายในโพรงช่องว่าง เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น เนื่องจากการสะสมของปริมาณคลอไรด์จากภายนอกกับปริมาณคลอไรด์ที่ตกผลึกอยู่ภายในโพรงช่องว่าง ทำให้คลอไรด์เกิดการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้งจะทำให้คลอไรด์มีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ จึงส่งผลทำให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การดึงดูดแบบคาพิลลารี

3.4 แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำ ซึ่งมีคลอไรด์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำกว่า ซึ่งจะนำพาคลอไรด์ไอออนเข้าสู่โครงสร้างคอนกรีตด้วย ดังภาพที่ 2-5



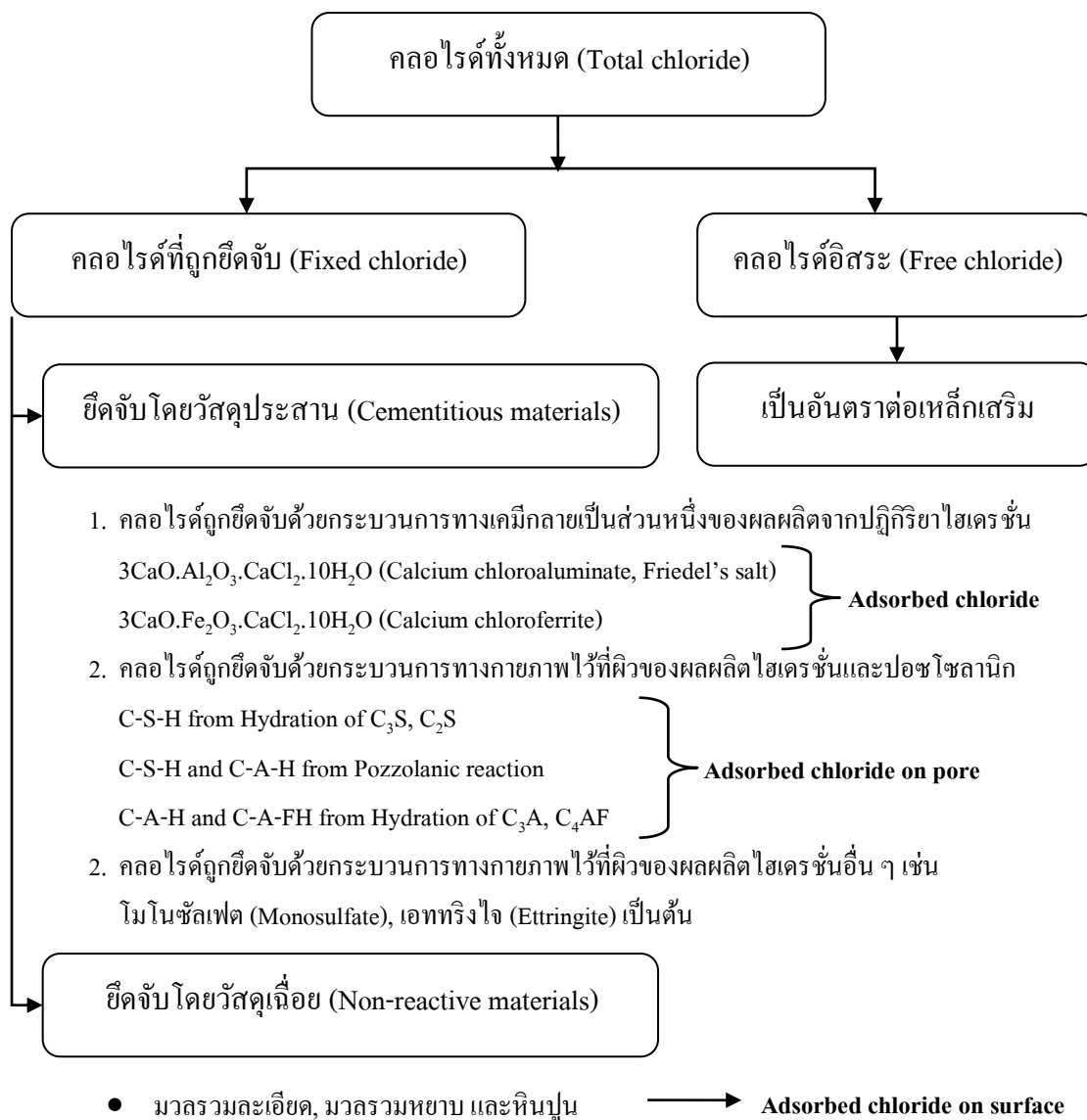
ภาพที่ 2-5 กลไกการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตโดยแรงดันน้ำ

## ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต

คลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปอยู่ในเนื้อคอนกรีตทั้งหมด เรียกว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ซึ่งเป็นผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท ได้แก่ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) และคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ดังภาพที่ 2-6

1. คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) หมายถึง การยึดจับคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีตให้เป็นคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) โดยแต่ละส่วนผสมของคอนกรีตมีความสามารถในการยึดจับคลอไรด์ได้แตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้เองที่เรียกว่า ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วการยึดจับคลอไรด์เกิดจาก 2 กระบวนการ ได้แก่ การยึดจับคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมี (Chemical binding) การยึดจับทางเคมีจะเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอไรด์กับสารประกอบ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ในปูนซีเมนต์ทำให้เกิดเป็นสารประกอบ  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Friedel's salt) และ  $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Calcium chloroferrite) ตามลำดับ อีกกระบวนการหนึ่งคือ การยึดจับคลอไรด์ทางกายภาพ (Physical binding) โดยคลอไรด์จะถูกยึดจับด้วยแรงยึดเหนี่ยวไว้ที่ผิว (Surface force) ของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถถูกยึดจับไว้ที่ผิวของวัสดุเนื้อที่ไม่มีการทำปฏิกิริยาในคอนกรีต เช่น ทราย หิน หรือ ผงหินปูน โดยปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับจะน้อยหรือมากจะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ ปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อายุการบ่ม และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ เป็นต้น หากส่วนผสมใดของคอนกรีตมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์สูงจะส่งผลดีต่อคอนกรีตในการป้องกันปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เพราะสามารถลดปริมาณคลอไรด์อิสระที่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตให้น้อยลงได้

2. คลอไรด์อิสระ (Free chloride) หมายถึง คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในสารละลายภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) ซึ่งคลอไรด์ประเภทนี้ถ้ามีปริมาณที่มากพอจะสามารถทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมขึ้นได้



ภาพที่ 2-6 ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต (ทวิชัย สารานุกรม, 2553)

### การแพร่ของคลอไรด์เข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีต

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยคลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำ จึงทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีต โดยการแพร่คลอไรด์สามารถอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อที่หนึ่งของฟิคส์ (Fick's first law of diffusion) ดังสมการที่ 2-2

$$F_{Cl}(x, t) = -D_{Cl}(x, t) \frac{\partial C_{free}(x, t)}{\partial x} \quad (2-2)$$

เมื่อ  $F_{Cl}(x, t)$  คือ ฟลักซ์ของคลอไรด์ที่ระยะ  $x$  จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา  $t$

(โมล/ ซม.<sup>2</sup>/ วัน)

$D_{Cl}(x, t)$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ระยะ  $x$  จากผิวนอกที่ระยะเวลา  $t$

(ซม.<sup>2</sup>/ วัน)

$C_{free}(x, t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะ  $x$  จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา  $t$

(โมล/ ลิตร)

$x$  คือ ระยะจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)

$t$  คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)

สำหรับสมการการรักษาสมดุลมวลของคลอไรด์ (Chloride mass conservation) ในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำ แสดงดังสมการที่ 2-3

$$\frac{\partial C_{tot}(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial F_{Cl}(x, t)}{\partial x} \quad (2-3)$$

เมื่อ  $C_{tot}(x, t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ  $x$  จากผิวด้านนอกที่เวลา  $t$  ใด ๆ

(โมล/ ลิตร)

แทนสมการที่ 2-2 ในสมการที่ 2-3 ได้สมการของกลไกการแพร่คลอไรด์ในคอนกรีต เรียกว่า กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ 2-4

$$\frac{\partial C_{tot}(x, t)}{\partial t} = -D_{Cl}(x, t) \frac{\partial^2 C_{free}(x, t)}{\partial^2 x} \quad (2-4)$$

เมื่อ  $C_{tot}(x, t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง  $x$  จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา  $t$

(โมล/ ลิตร)

$D_{Cl}(x, t)$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ระยะทาง  $x$  จากผิวด้านนอก

ที่ระยะเวลา  $t$  (ซม.<sup>2</sup>/ ปี)

$C_{free}(x, t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง  $x$  จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา  $t$   
(โมล/ลิตร)

$x$  คือ ระยะทางจากผิวด้านนอก (ซม.)

$t$  คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)

คำตอบ (Error function solution) ของสมการที่ 2-4 แสดงดังสมการที่ 2-5

$$C(x, t) = (C_s - C_i) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{D_{Cl} \times t}} \right) \right] + C_i \quad (2-5)$$

เมื่อ  $C(x, t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะทาง  $x$  จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา  $t$   
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$D_{Cl}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (ซม.<sup>2</sup>/ปี)

$C_s$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_i$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่มีในคอนกรีตตั้งแต่ต้น (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

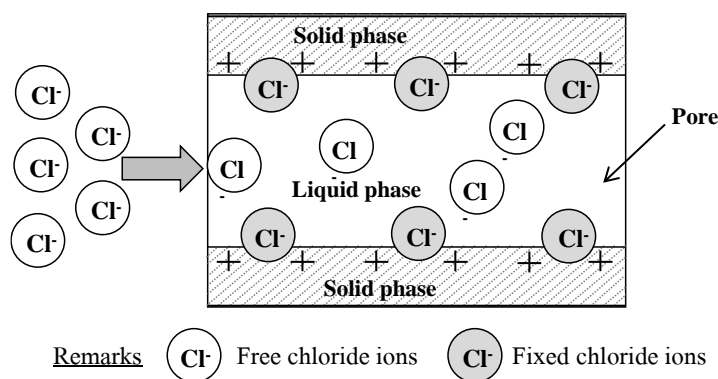
$x$  คือ ระยะทางจากผิวด้านนอก (ซม.)

$t$  คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

### การดึงดูคอออนคลอไรด์ของคอนกรีต

Maruya, Tangtermsirikul, and Matsuoka (1998) กล่าวว่า ปริมาณคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลาจะมีความเข้มข้นคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นคลอไรด์ของน้ำทะเล ซึ่งปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่เพียงกระบวนการเดียว เนื่องจากการแพร่จะยุติลงเมื่อความเข้มข้นคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่จากการทดลองพบว่าคลอไรด์ที่ชั้นผิวหน้ามีค่าความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นคลอไรด์ภายนอกซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากกลไกการดึงดูคอออน กล่าวคือ บริเวณผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีตจะมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกสามารถดึงดูคอออนคลอไรด์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมเข้ามาในคอนกรีต ดังภาพที่ 2-7 โดยการดึงดูคอออนคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับคลอไรด์อิสระในคอนกรีต เนื่องจากการดึงดูคอออนคลอไรด์มีค่าลดลงเมื่อคลอไรด์อิสระในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น และยังมีค่าขึ้นอยู่กับอีกหลาย ๆ ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต

ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงช่องว่าง และความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ เป็นต้น โดยปริมาณวัสดุประสานและอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีตเพิ่มขึ้น มีผลให้การดึงดูดไอออนคลอไรด์สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มประจุบวกให้กับผนังของโพรงช่องว่างในคอนกรีต ในทำนองเดียวกัน เมื่อความพรุนในคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น ทำให้การดึงดูดคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความพรุนในคอนกรีตที่สูงทำให้การดึงดูดไอออนระหว่างประจุบวกที่ผนังโพรงช่องว่างที่ซีเมนต์เพสต์และประจุลบจากคลอไรด์เป็นไปได้อย่างสะดวกมากขึ้น



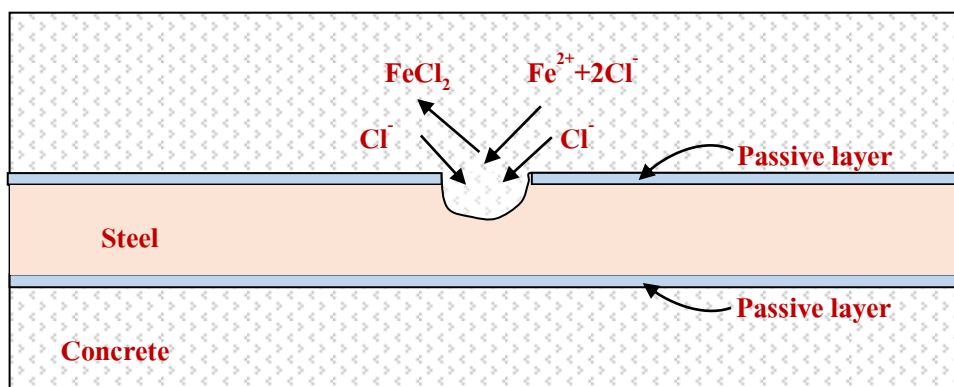
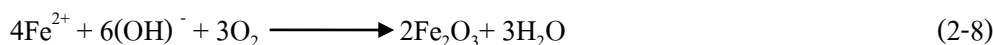
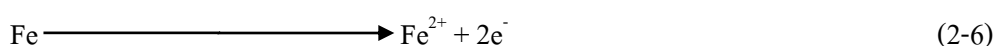
ภาพที่ 2-7 กลไกการดึงดูดไอออนคลอไรด์ (Maruya et al., 1998)

### กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่ คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม และเป็นสาเหตุหลักที่ทำลายของค้ำอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ปัญหาดังกล่าวเกิดจากภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลผลิตอย่างหนึ่งที่ได้ คือ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง ทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง หรือมีค่า pH อยู่ในช่วง 12.5-13.5 ซึ่งความเป็นด่างนี้จะขึ้นฟิล์มบาง ๆ ที่เรียกว่า  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  เคลือบผิวของเหล็กเสริมอยู่เพื่อป้องกันน้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้ทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม ทำให้ไม่เกิดสนิมขึ้นโดยสภาพเช่นนี้เรียกว่า Passivity แต่หากมีการแทรกซึมของคลอไรด์จนถึงผิวของเหล็กเสริมและมีการสะสมจนมีปริมาณถึงค่าคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) ชั้นฟิล์มนี้จะถูกทำลายลง เมื่อน้ำหรือความชื้นและก๊าซออกซิเจนที่เพียงพอจะทำให้กระบวนการเกิดสนิมจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เนื่องจากเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวของเหล็กเสริมทำให้เกิดสภาพขั้วบวกและขั้วลบ (Cathode and Anode) เกิดการไหลกระแสไฟฟ้า โดยคลอไรด์เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ให้อิเลคตรอนวิ่งผ่าน ปฏิกิริยา



ไฟฟ้าเคมีเริ่มจากขั้วบวก Anode ซึ่งเหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) เข้าสู่สภาพสารละลาย โดยอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) จะวิ่งไปตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้วลบ Cathode ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic reaction) ดังสมการที่ 2-6 จากนั้น  $e^-$  จากปฏิกิริยาอะโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic reaction) ดังสมการ 2-7 และเมื่อ  $\text{Fe}^{2+}$  รวมตัวกับ  $\text{OH}^-$  จะเกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) ซึ่งจะออกซิไดซ์ต่อไปเป็นไฮดรตเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ดังสมการ 2-8 หรือเป็นสนิมเหล็กในที่สุด ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์

(Sumranwanich, 2004)

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) กล่าวว่า กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ คลอไรด์ไอออนเป็นตัวการที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เมื่อคลอไรด์ไอออนเข้าไปสะสมที่ผิวของเหล็กเสริมมากจนถึงจุดวิกฤต เหล็กเสริมจะเริ่มเกิดสนิม และพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จนกระทั่ง โครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ โดยกระบวนการในการเกิดสนิมจากสาเหตุของการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออนผ่านเนื้อคอนกรีตนั้น สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอน คือ

Initial period หรือ ระยะเวลาช่วงแรก หมายถึง ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่หล่อคอนกรีตเสร็จ จนถึงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วงนี้คลอไรด์จะแพร่เข้ามาสะสมในคอนกรีต จนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต  $Fe^{2+}$  จะทำปฏิกิริยากับ  $Cl^-$  เกิดเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_2$ ) ดังสมการ 2-9 จากนั้น  $FeCl_2$  ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีตจะกลายเป็นสนิม เหล็ก ดังสมการ 2-10 ซึ่งระยะเวลาช่วงแรกนี้จะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ความสามารถซึมผ่านได้ของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต และความหนาของคอนกรีต ที่หุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น



Propagation period หรือ ระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง หมายถึง ช่วงระยะเวลา ของการพัฒนาการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในคอนกรีต คือ เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมี ของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ หรืออยู่ในสภาพ ที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งาน

#### 1. วิธีการวัดคลอไรด์และความต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีต

การทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตในระยะความลึกต่าง ๆ นิยม ใช้วิธีการวิเคราะห์ทางเคมี โดยต้องเจาะหรือนำเอาคอนกรีตบริเวณที่ต้องการหาปริมาณคลอไรด์ ไปบดให้ละเอียดและวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ ซึ่งในการทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์ มี 2 ลักษณะ คือ วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble) ตาม ASTM C1152 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) และใช้น้ำเป็นตัว ทำละลาย (Water-soluble) ตามมาตรฐาน ASTM C1218 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) โดยหลังจากเตรียมสารละลายเสร็จ สามารถไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ ที่อยู่ในคอนกรีตด้วยมือหรือด้วยเครื่อง Potentiometric titration ซึ่งเป็นเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ ที่สามารถคำนวณร้อยละของคลอไรด์ที่เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคอนกรีตได้ ดังสมการ 2-11

$$Cl\% = \frac{3.545[V_1 - V_2]}{w} \quad (2-11)$$

เมื่อ  $V_1$  คือ Millilitres ของสารละลาย 0.05N  $AgNO_3$  ที่ใช้สำหรับการไทเทรตตัวอย่าง

$V_2$  คือ Millilitres ของสารละลาย 0.05N  $AgNO_3$  ที่ใช้สำหรับการไทเทรต Blank

N คือ Exact normality ของสารละลาย 0.05N AgNO<sub>3</sub>

0.01 คือ Milliequivalents ของ NaCl ที่เติม (2.0 มิลลิลิตร × 0.05N)

0.02 คือ น้ำหนักของผงตัวอย่างคอนกรีต (กรัม)

การทดสอบความสามารถต้านทานคลอไรด์ยังสามารถทำได้โดยใช้วิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) ตาม ASTM C1202 ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ประจุไฟฟ้าให้วิ่งผ่านชั้นตัวอย่างคอนกรีตระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์ประมาณ 60 โวลต์ ซึ่งปริมาณประจุไฟฟ้า (คูลอมป์) จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการแทรกซึมของคลอไรด์ วิธีนี้สามารถบอกผลได้อย่างรวดเร็วว่าคอนกรีตสามารถต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากน้อยเพียงใด

## 2. ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) ของคอนกรีต หมายถึง ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ณ ระดับผิวเหล็กเสริมที่เพียงพอทำให้เกิดการสูญเสียชั้นฟิล์มต้านทานการเกิดสนิมเฉพาะที่ (Local passive film) และทำให้กระบวนการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดขึ้น โดยทั่วไปอาจแสดงในเทอมของอัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออน (Ratio of chloride hydroxyl ions) หรือปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) หรือปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) เทียบเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสาน

มีงานวิจัยจำนวนมากพยายามมุ่งหาปริมาณระดับคลอไรด์วิกฤตที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม แต่ค่าที่วัดออกมาได้พบว่าการกระจายตัวค่อนข้างมาก ดังตารางที่ 2-3 ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากวิธีการวัดค่าระดับคลอไรด์วิกฤต วิธีการแสดงผลค่าระดับคลอไรด์วิกฤตจากสภาพของรอยต่อระหว่างเหล็กกับคอนกรีต และส่วนผสมคอนกรีต รวมทั้งอิทธิพลของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้นสัมพัทธ์และปริมาณก๊าซออกซิเจนในอากาศ เป็นต้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าคอนกรีตแต่ละชนิดจะมีปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่แตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ มาตรฐานกรมโยธาและผังเมือง (มยพ. 1332-55) กำหนดปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ดังตารางที่ 2-4

### 2.1 การวัดค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

#### 2.1.1 การเริ่มเกิดการผุกร่อน (Corrosion initiation)

ในการหาค่าระดับคลอไรด์วิกฤตนั้น จำเป็นต้องทราบระยะเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อนพอดีและปริมาณคลอไรด์ที่ระดับผิวเหล็กเสริมที่เริ่มผุกร่อนนั้น การหาว่าเหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อนพอดีสามารถหาได้จากการตรวจสอบการไหลของกระแสมาโครเซลล์ (Macrocell current) ระหว่างขั้วแอโนด (Anode) และคาโทด (Cathode) การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

(Half-cell potential) หรือการวัดอัตราการผุกร่อน (Corrosion rate) ด้วยเทคนิคโพลาไรเซชัน (Polarization technique) หรือวิธี AC impedance เป็นต้น

อุปกรณ์มาโครเซลล์เป็นวิธีการตรวจวัดความเสี่ยงของการผุกร่อน โดยการผุกร่อนเกิดเมื่อกระแสมาโครเซลล์สูงขึ้น โดยทันที มาโครเซลล์ประกอบด้วยเหล็กขั้วแอโนดและขั้วคาโทดที่ทำจากตาข่ายไทเทเนียม แกรไฟท์หรือเหล็กสแตนเลส ทั้งหมดถูกฝังในคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมไว้ ทั้งนี้การวัดกระแสมาโครเซลล์ไม่ได้ให้อัตราการผุกร่อนโดยตรง และอาจให้ค่าที่ผิดพลาดได้เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นวิธีการที่เป็นที่ยอมรับในการวัดความเสี่ยงของการผุกร่อนของเหล็กเสริม ในทางปฏิบัติจะทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลาย ๆ จุดบนผิวหน้าคอนกรีตตามแนวของเหล็กเสริม แล้วสร้างเป็นแผนที่ศักย์ไฟฟ้า (Potential map) ขึ้น พื้นที่ตรงบริเวณที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงบ่งบอกถึงมีความเสี่ยงสูงในการเกิดการผุกร่อนของเหล็กเสริม แต่อย่างไรก็ตามค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ขึ้นกับสภาพของคอนกรีต เช่น ระดับความชื้น ระดับของการเกิดคาร์บอนขึ้น และการตกผลึกของคลอไรด์ ซึ่งมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้และนำไปสู่การแปลผลที่ผิดพลาดได้

การวัดอัตราการผุกร่อนด้วยเทคนิคโพลาไรเซชัน (Polarization technique) หรือวิธี AC impedance เป็นวิธีการที่ให้ค่าอัตราการผุกร่อนโดยตรง แต่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผุกร่อนและการเริ่มเกิดการผุกร่อนยังไม่ชัดเจน มีความแปรปรวนค่อนข้างมากซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำของระดับคลอไรด์วิกฤต อัตราการผุกร่อนของเหล็กเสริมเริ่มมีนัยสำคัญเมื่อมีค่าเกินกว่า  $1-2 \text{ mA/m}^2$  อีกทั้งความไม่แน่นอนรอบ ๆ บริเวณที่สูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมด้วย เนื่องจากการผุกร่อนของเหล็กเสริมไม่สามารถสังเกตด้วยตาเปล่า ต้องใช้ระยะเวลาานเพียงพอที่จะเห็นสีออกไอซ์ของเหล็กที่เกิดสนิมขึ้น

การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากการผุกร่อนสามารถใช้ในการหาระดับคลอไรด์วิกฤตได้ แม้ว่าจะไม่ได้ให้เวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อนก็ตาม การสูญเสียน้ำหนักคำนวณจากผลต่างน้ำหนักแห้งเหล็กก่อนฝังลงในคอนกรีต และเมื่อเวลาผ่านไปช่วงระยะหนึ่งก็กะเทาะคอนกรีตเอาแท่งเหล็กออกมาทำความสะอาดเนื้อสนิมออกไปแล้ววัดน้ำหนักอีกครั้ง วิธีการนี้จะใช้ได้เมื่อการเกิดสนิมเกิดขึ้นไปได้ระยะหนึ่งจนสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่วิธีการนี้ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพสำหรับการวัดการผุกร่อนหลุมลึก (Pitting corrosion) หากมีการสูญเสียน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

### 2.1.2 ปริมาณคลอไรด์ (Chloride content)

เมื่อการผูกมัดเกิดขึ้นแล้วจะต้องทำการวัดปริมาณคลอไรด์หรือการกระจายตัวของคลอไรด์ตามระดับความลึกเพื่อที่จะหาค่าระดับคลอไรด์วิกฤต ในการวัดปริมาณคลอไรด์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การเก็บตัวอย่าง (Sampling) และการวิเคราะห์ (Analysis)

การเก็บตัวอย่างใช้วิธีการเจาะคอนกรีตแล้วเก็บเอาฝุ่นคอนกรีตที่ระดับความลึกจากผิวหน้าต่าง ๆ ซึ่งต้องพยายามให้มีส่วนที่เป็นเนื้อซีเมนต์เพสต์ในแต่ละตัวอย่างเท่า ๆ กัน โดยประมาณด้วยการเทียบกับเนื้อคอนกรีตนั้น เพราะหากเก็บตัวอย่างที่มีส่วนที่เป็นมวลรวมมากเกินไปอาจทำให้การวิเคราะห์ผลคลาดเคลื่อนได้

การวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระ (Free chloride) หรือ คลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water soluble chloride) จากสารละลายของตัวอย่างฝุ่นผงคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ในน้ำด้วยการต้ม โดยความเข้มข้นของคลอไรด์สามารถหาได้โดยวิธี Potentiometry หรือการใช้ขั้ววัดคลอไรด์ และแสดงค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของซีเมนต์หรือคอนกรีต คลอไรด์อิสระที่วัดด้วยการใช้น้ำละลายออกมาขึ้นอยู่กับความละเอียดของฝุ่นผงที่บด ปริมาณน้ำที่เติม อุณหภูมิ วิธีการกวน และเวลาที่ปล่อยให้คลอไรด์ถูกชะออกมา ส่วนการใช้วิธีการกดเอาสารละลายในโพรงช่องว่างออกมาจากซีเมนต์เพสต์ด้วยความดันสูงนั้น (Pore press method) ให้ค่าคลอไรด์อิสระได้ถูกต้องมากกว่าวิธีการใช้น้ำละลายออกมา เพราะวิธีการวิเคราะห์ด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระนี้อาจทำให้คลอไรด์ที่ถูกยึดจับกลายเป็นคลอไรด์อิสระได้ ซึ่งทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงกว่าความจริงได้

สำหรับวิธีการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ด้วยการวัดคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) หรือคลอไรด์ที่ละลายด้วยการใช้กรดละลายออกมา (Acid soluble chloride) โดยตั้งสมมติฐานว่าทั้งคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและคลอไรด์อิสระจะละลายออกมาด้วยกรด การวัดคลอไรด์ที่ละลายในกรดหรือคลอไรด์ทั้งหมดนี้อาจทำได้ด้วยการใช้ขั้ววัดคลอไรด์ หรือด้วยวิธีการไตเตรท

### 2.2 การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตแสดงให้เห็นถึงปริมาณคลอไรด์ที่เป็นอันตราย (Aggressive chloride content) และคุณสมบัติการยับยั้งคลอไรด์ของเนื้อประสานจากซีเมนต์ (Inhibitive properties of cement matrix) คลอไรด์ที่ถูกแยกออกมาจากสารละลายในคอนกรีตด้วยเนื้อประสานส่วนที่เป็นของแข็ง (คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ) จะไม่เคลื่อนที่และไม่สามารถเคลื่อนที่ลึกเข้าไปที่ผิวของเหล็กเสริม ดังนั้นตามทฤษฎีแล้วปริมาณคลอไรด์อิสระ (คลอไรด์ที่ละลายในน้ำ) จึงนิยมใช้แสดงในค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

โดยพิจารณาเฉพาะคลอไรด์อิสระเท่านั้นที่ส่งผลต่อกระบวนการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีแนวความคิดเกี่ยวกับคลอไรด์ที่ถูกยึดจับที่ระดับผิวเหล็กเสริมจะถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อค่า pH ลดลง เนื่องจากการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Depassivation) และ ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถต้านทานการลดลงของ pH ได้ ด้วยเหตุผลสองประการข้างต้น จึงไม่สามารถใช้ปริมาณคลอไรด์อิสระในการบอกความเสี่ยงของการผุกร่อน แต่หากใช้ปริมาณคลอไรด์อิสระในการแสดงในรูปแบบของอัตราส่วน โดยโมลของคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต

อัตราส่วนของคลอไรด์ต่อไฮดรอกซิลไอออน ( $Cl^- / OH^-$ )

สำหรับการแสดงผลแบบนี้ค่าคลอไรด์ที่ถูกยึดจับถูกสมมติว่าไม่มีผลต่อความเสี่ยงของการผุกร่อนเลย และความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนบ่งบอกถึงปริมาณสารยับยั้งของสิ่งแวดล้อมด้วยการที่สารละลายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีค่า pH สูงมาก

สำหรับอัตราส่วนของ  $Cl^- / OH^-$  นอกจากจะแสดงถึงความเสี่ยงที่เกิดจากคลอไรด์แล้ว ยังบอกถึงความเสี่ยงที่เกิดคาร์บอนขึ้นร่วมกันอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของ  $Cl^- / OH^-$  ไม่สามารถแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตได้คืบนัก เพราะไม่รวมผลการยับยั้งของเนื้อประสานจากวัสดุประสานเข้ามาด้วย ซึ่งอาจมีชั้นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่แน่นบริเวณรอบผิวเหล็กเสริมการตกผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เกิดชั้นฟิล์มต่อเนื่องบนผิวเหล็กเสริมที่ต้านทานการลดลงของค่า pH ได้ นอกจากนี้อัตราส่วนของ  $Cl^- / OH^-$  ไม่ได้เกี่ยวข้องกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนต่าง ๆ

การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตด้วยค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเป็นวิธีการที่ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุด จากการแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตแบบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในรูปร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเป็นที่นิยม เพราะสะดวกในการคำนวณและครอบคลุมความเสี่ยงของการผุกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วย

ตารางที่ 2-3 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของนักวิจัยต่าง ๆ (Ann & Song, 2007)

สภาพการทดสอบ	ระดับคลอไรด์วิกฤต			วิธีการหา	อ้างอิง	
	คลอไรด์ทั้งหมด (% โดยน้ำหนักของ ซีเมนต์)	คลอไรด์อิสระ (% โดยน้ำหนัก ของซีเมนต์)	[Cl <sup>-</sup> ]/[OH <sup>-</sup> ]			
สารละลายในคอนกรีต (Pore solution)	ตัวอย่างที่ผสมคลอไรด์เข้าไป ข้างใน (Internal chloride)			0.6	ศักย์ไฟฟ้าครึ่ง เซลล์	Hausmann (1967)
				0.3	โพลาริเซชัน	Gouda (1970)
	ตัวอย่างที่ผสมคลอไรด์เข้าไป ข้างใน (Internal chloride)			8-63	โพลาริเซชัน	Yonesawa et al. (1988)
		0.5-2.0			กระแสมาโคร เซลล์	Schiessl and Raupach (1990)
		0.079-0.19			AC impedance	Hope and Ip (1989)
		0.32-1.9			การสูญเสีย น้ำหนัก	Treadaway et al. (1989)
		0.78-0.93	0.11-0.12	0.16-0.26	ศักย์ไฟฟ้า ครึ่งเซลล์	Oh et al. (2003)
		0.45 (SRPC)	0.10	0.27		
		0.90 (15% PFA)	0.11	0.19		
		0.68 (30% PFA)	0.07	0.21		
0.97 (30% GGBS)	0.03	0.23				
ตัวอย่างที่เผชิญคลอไรด์จาก ภายนอก (External chloride)		0.35-1.00	0.14-0.22		Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup> = 0.3	Hussain et al. (1995)
	0.227	0.364	1.5	โพลาริเซชัน	Bamforth (1999)	
	0.5-1.5			ศักย์ไฟฟ้าครึ่ง เซลล์	Bamforth (1999)	
	0.70 (OPC)			การสูญเสีย น้ำหนัก	Thomas (1996)	
	0.65 (15% PFA)					
	0.50 (30% PFA)					
	0.20 (50% PFA)					
	1.8-2.9			โพลาริเซชัน	Pettersson (1993)	
	0.5-1.4			ไม่ระบุ	Tuutti (1993)	

หมายเหตุ: SRPC = Sulfate resistant Portland cement, PFA = Pulverized fly ash,

GGBS = Ground granulated blast furnace slag, OPC = Ordinary Portland cemen

ตารางที่ 2-4 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต (มยผ., 2555)

ประเภทของวัสดุประสาน	ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (ร้อยละโดยน้ำหนัก ของวัสดุประสาน)
ปูนซีเมนต์ล้วน	0.45
ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน -ที่มีอัตราส่วน โดยน้ำหนัก ผงหินปูนต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.15	0.45
ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย -เมื่ออัตราส่วน โดยน้ำหนักเถ้าลอยต่อวัสดุประสา นน้อยกว่า 0.15	0.45
-เมื่ออัตราส่วน โดยน้ำหนักเถ้าลอยต่อวัสดุประสานตั้งแต่ 0.15 แต่ไม่ ถึง 0.35	0.35
-เมื่ออัตราส่วน โดยน้ำหนักเถ้าลอยต่อวัสดุประสานตั้งแต่ 0.35 ถึง 0.50	0.30

หมายเหตุ: สำหรับปูนซีเมนต์ผสมทั้งผงหินปูนและเถ้าลอย โดยที่มีผงหินปูนต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.15 ให้ใช้ตามค่าปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

## ปูนซีเมนต์

ซีเมนต์ (cement) หมายถึง วัสดุประสานซึ่งสามารถยึดวัตถุชิ้นเล็ก ๆ เข้าด้วยกัน คำว่าซีเมนต์ยังรวมถึงสารซีเมนต์หลายประเภท แต่สำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธาและการก่อสร้าง ซีเมนต์ หมายถึง วัสดุผงละเอียดสีเทาหรือสีเทาเข้ม เมื่อผสมน้ำจะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานยึด วัสดุประเภท อิฐ หิน และทราย เป็นต้น

### 1. องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่เป็นออกไซด์หลัก (Major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>), อลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ออกไซด์ ทั้ง 4 นี้รวมกัน ได้มากกว่าร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (Minor oxides) ซึ่งได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), ออกไซด์ของอัลคาไล (Na<sub>2</sub>O และ K<sub>2</sub>O) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) และยังมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่น ๆ รวมอยู่ด้วย เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและ ส่วนประกอบอื่นซึ่งจะจัดรวมอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition,



LOI) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบ

## 2. สารประกอบของปูนซีเมนต์

สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ 4 อย่าง ได้แก่

2.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  และย่อได้ว่า  $\text{C}_3\text{S}$  เป็นสารประกอบที่มีมากที่สุดในการปูนซีเมนต์ โดยมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 เป็นสารประกอบที่ให้กำลังก่อนข้างดี

2.2 ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  และย่อได้ว่า  $\text{C}_2\text{S}$  เป็นสารประกอบที่มีในการปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 เป็นสารประกอบที่ให้กำลังก่อนข้างช้ากว่า  $\text{C}_3\text{S}$

2.3 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  และย่อได้ว่า  $\text{C}_3\text{A}$  เป็นสารประกอบที่มีในการปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 เป็นสารประกอบที่ให้กำลังเร็วมาก คือ สามารถพัฒนากำลังได้ภายในวันเดียวแต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าก่อนข้างต่ำมากเมื่อเทียบกับ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$

2.4 เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium aluminoferrite) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  และย่อได้ว่า  $\text{C}_4\text{AF}$  เป็นสารประกอบที่มีในการปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 เป็นสารประกอบที่ให้กำลังเร็วมาก คือ สามารถพัฒนากำลังได้เร็วเช่นเดียวกับ  $\text{C}_3\text{A}$  แต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าต่ำกว่า  $\text{C}_3\text{A}$  เล็กน้อย

## 3. ประเภทของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต โดยปูนซีเมนต์ที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่

3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement) เหมาะสำหรับการงานก่อสร้างทั่วไป ส่วนใหญ่จะใช้กับงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ต้องการคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติม เช่น องค์กรอาคาร ถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น ข้อเสียของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ ไม่ทนต่อซัลเฟต จึงไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟตจากดินหรือน้ำ และไม่ทนต่อปฏิกิริยาเคมี

3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ดัดแปลง (Modified cement) ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดขึ้นช้าและคายความร้อนออกมาน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับโครงสร้างที่ต้องมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ปานกลาง

3.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid hardening Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูง เป็นผลทำให้สามารถแข็งตัว และให้กำลังได้รวดเร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา จึงนิยมใช้ในงานที่เร่งด่วนหรือต้องการ ความรวดเร็วในการถอดแบบก่อสร้าง เช่น เสาเข็ม คอนกรีตอัดแรง และขณะเกิดปฏิกิริยาจะมีความร้อนสูง เพราะความร้อนนี้เองจึงไม่เหมาะสมกับการก่อสร้างที่มีขนาดใหญ่ (Mass concrete)

3.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low heat Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีการพัฒนากำลังของคอนกรีตอย่างช้า ๆ ทำให้อัตราการคายความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์น้อยลงไปด้วย ทำให้การขยายตัวน้อย ช่วยลดการแตกร้าวที่ผิวของคอนกรีต เหมาะสำหรับงานขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนขนาดใหญ่ เป็นต้น

3.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate resisting Portland cement) ที่มีสมบัติในการต้านทานซัลเฟตได้สูง เหมาะสำหรับการก่อสร้างในบริเวณที่มีการสัมผัสกับซัลเฟตที่เข้มข้น เช่น บริเวณดินหรือน้ำที่มีความเป็นด่างสูง ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีที่ใช้ต่างต่าง ๆ เป็นต้น

#### 4. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Hydration of cement)

##### 4.1 ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Degree of hydration of cement)

Sumranwanich (2004) ได้เสนอแบบจำลองสำหรับคำนวณดัชนีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของแต่ละสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยคำนึงถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม ดังสมการที่ 2-12 ถึง 2-15

$$\alpha_{C_3A}(t) = \frac{1 - e^{-a_1 \times \tan^{-1}(b_1 \times t)}}{1 + e^{c_1 \times t^{d_1}}} \times 100 \quad (2-12)$$

$$\text{เมื่อ } a_1 = 4.84 \times (w/b)^{-1.98} \quad (2-12a)$$

$$b_1 = 0.001 \times T^{1.86} \times (w/b)^{2.02} + 0.02 \quad (2-12b)$$

$$c_1 = (0.11 \times T^{0.58} - 1.64) \times \ln(w/b - 0.18) - 1.89 \quad (2-12c)$$

$$d_1 = \frac{0.003}{0.006 + e^{(-10.76 \times w/b)}} \quad (2-12d)$$

$$\alpha_{C_3S}(t) = \frac{1 - e^{-a_2 \times \tan^{-1}(b_2 \times t)}}{1 + e^{c_2 \times t^{d_2}}} \times 100 \quad (2-13)$$

$$\text{เมื่อ } a_2 = 1.76 \times \ln(w/b) + (-0.04 \times T - 2.32) \quad (2-13a)$$

$$b_2 = \frac{0.1}{0.08 + e^{(-0.05 \times T + 0.12)}} \times (w/b)^{-0.5} \quad (2-13b)$$

$$c_2 = \frac{-6.31}{1.78 + e^{(-0.01 \times T^{1.94} + 0.17)}} \times \ln(w/b) + \frac{-1.39}{0.22 + e^{(-0.01 \times T^{1.27} - 0.35)}} \times (w/b) - 1.1 \quad (2-13c)$$

$$d_2 = \frac{0.002}{0.002 + e^{(-6.83 \times (w/b)^{0.3} + 0.47)}} \quad (2-13d)$$

$$\alpha_{C_4AF}(t) = \frac{1 - e^{-a_3 \times \tan^{-1}(b_3 \times t)}}{1 + e^{c_3 \times t^{d_3}}} \times 100 \quad (2-14)$$

$$\text{เมื่อ } a_3 = (-0.001 \times T^{2.86} - 2.42) \times (w/b)^{(0.04 \times T^{0.94} + 1.98)} - 0.55 \quad (2-14a)$$

$$b_3 = 0.1 \times (w/b)^{-1.90} - 0.08 \quad (2-14b)$$

$$c_3 = 0.0001 \times (w/b)^{-5.83} - 0.88 \quad (2-14c)$$

$$d_3 = \frac{0.008}{0.008 + e^{(-8.86 \times (w/b))}} \quad (2-14d)$$

$$\alpha_{C_2S}(t) = \frac{1 - e^{-a_4 \times \tan^{-1}(b_4 \times t)}}{1 + e^{c_4 \times t^{d_4}}} \times 100 \quad (2-15)$$

$$\text{เมื่อ } a_4 = -5.6 \times (w/b) + 0.61 \quad (2-15a)$$

$$b_4 = (0.0022 \times T^{1.30} + 0.03) \times (w/b)^{(-0.003 \times T - 1.37)} \quad (2-15b)$$

$$c_4 = (-0.05 \times T + 2.15) \times \ln(w/b) + (-0.001 \times T^{1.63} - 0.04) \quad (2-15c)$$

$$d_4 = \frac{0.003}{0.003 + e^{(-12.5 \times (w/b))}} \quad (2-15d)$$

เมื่อ  $\alpha_i(t)$  คือ ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบหลัก  $i$  ของปูนซีเมนต์

ที่อายุ  $t$  (%)

$i$  คือ  $C_3A$ ,  $C_3S$ ,  $C_4AF$  และ  $C_2S$

$t$  คือ อายุของตัวอย่าง (วัน)

$T$  คือ อุณหภูมิของสภาพแวดล้อม (องศาเซลเซียส, °C)

$w/b$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

4.2 ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Average degree of hydration of cement) คือ ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของทั้ง 4 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ ดังสมการที่ 2-16

$$\alpha_{hy}(t) = \frac{\sum_i \left( \frac{m_i \alpha_i(t)}{100} \right)}{\sum_i m_i} \quad (2-16)$$

เมื่อ  $\alpha_{hy}(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์  
ที่ระยะเวลา  $t$  (%)

$\alpha_i(t)$  คือ ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบหลัก ที่ระยะเวลา  $t$  (%)

$m_i$  คือ ปริมาณของแต่ละสารประกอบหลักในคอนกรีต (กก./  $m^3$  ของคอนกรีต)

$t$  คือ ระยะเวลาที่กำหนด (วัน)

$i$  คือ สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ ได้แก่  $C_3A$ ,  $C_3S$ ,  $C_4AF$  และ  $C_2S$

4.3 ปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydrated weight of cement)

ปริมาณของแต่ละสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้แก่

$C_3A$ ,  $C_3S$ ,  $C_4AF$  และ  $C_2S$  ถูกคำนวณโดยใช้วิธีของ อาร์ เอช โบก (R. H. Bogue) หรือตามมาตรฐาน ASTM C150 ดังสมการที่ 2-17 ถึง 2-20

$$C_3A = 2.65Al_2O_3 - 1.69Fe_2O_3 \quad (2-17)$$

$$C_3S = 4.07(CaO - FreeCaO) - 7.6SiO_2 - 6.72Al_2O_3 - 1.43Fe_2O_3 - 2.85SO_3 \quad (2-18)$$

$$C_4AF = 3.04Fe_2O_3 \quad (2-19)$$

$$C_2S = 2.87SiO_2 - 0.754C_3S \quad (2-20)$$

เมื่อ  $Al_2O_3$  คือ ปริมาณอลูมินาในปูนซีเมนต์ (% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

$Fe_2O_3$  คือ ปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์ในปูนซีเมนต์ (% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

$SiO_2$  คือ ปริมาณซิลิกาในปูนซีเมนต์ (% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

$CaO$  คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในปูนซีเมนต์ (% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

FreeCaO คือ ปริมาณปูนขาวอิสระ (free lime) ในปูนซีเมนต์

(% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

$SO_3$  คือ ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ในปูนซีเมนต์

(% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)  
 ปริมาณของแต่ละสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้  
 ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydrated weight of cement) ที่อายุ  $t$  แสดงดังสมการที่ 2-21

$$m_{\text{hyd},i}(t) = m_i \times \frac{\alpha_i(t)}{100}, \quad i = C_3A, C_3S, C_4AF \text{ และ } C_2S, \quad (2-21)$$

เมื่อ  $m_{\text{hyd},i}(t)$  คือ ปริมาณของแต่ละสารประกอบ  $i$  ในปูนซีเมนต์ที่ใช้ใน  
 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (กก./ $m^3$  ของคอนกรีต)  
 $m_i$  คือ ปริมาณของแต่ละสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
 (กก./ $m^3$  ของคอนกรีต)  
 $\alpha_i(t)$  คือ ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบ  $i$  ของปูนซีเมนต์ ที่อายุ  $t$  (%)  
 $t$  คือ อายุของตัวอย่าง (วัน)

#### 4.4 ผลผลิตไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Hydrated products of cement)

4.4.1 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้อย่างรวดเร็ว  
 ทำให้เกิดแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ( $C_3AH_6$ ) ซึ่งปฏิกิริยาระหว่าง  $C_3A$  กับ น้ำ ส่งผลให้เกิดการ  
 ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังนั้นมีความจำเป็นที่ต้องผสมยิปซัม ( $3CSH_2$ ) เพื่อหน่วงการก่อตัว ปฏิกิริยา  
 ที่เกิดระหว่าง  $C_3A$  กับ น้ำ เมื่อยิปซามีซัลเฟตเพียงพอ จะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต  
 ( $C_6AS_3H_{32}$ ) หรือเรียกว่า เอททริงไคต์ (Ettringite) ขึ้นรอบ ๆ  $C_3A$  ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ยาก  
 จากนั้นเมื่อซัลเฟตทำปฏิกิริยาหมด  $C_3A$  จะทำปฏิกิริยากับเอททริงไคต์ และเปลี่ยนเป็น  
 แคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต ( $C_4ASH_{12}$ )

4.4.2 เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ ) การทำปฏิกิริยาค้ำยกับการ  
 การทำปฏิกิริยาของ  $C_3A$  ซึ่ง  $C_4AF$  ทำปฏิกิริยากับยิปซัมทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต  
 และซัลโฟเฟอร์ไรต์ ( $C_6(A, F)S_3H_{32}$ ) โดยผลผลิตนี้มีลักษณะคล้ายเอททริงไคต์

4.4.3 ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เมื่อผสม  
 กับน้ำจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH)

4.4.4 ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็น  
 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) เช่นเดียวกับ  $C_3S$

Mindess and Young (1981) แสดงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และผลผลิตไฮเดรชันของแต่ละสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ ดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Mindess & Young, 1981)

Compounds	Hydration reactions	Products
C <sub>3</sub> A	$C_3A + 3C\bar{S}H_2 + 26H \longrightarrow C_6AS_3H_{32}$	$C_6AS_3H_{32}$
	$2C_3A + C_6AS_3H_{32} + 4H \longrightarrow 3C_4ASH_{12}$	$C_4ASH_{12}$
	$C_3A + 6H \longrightarrow C_3AH_6$	$C_3AH_6$
C <sub>4</sub> AF	$C_4AF + 3C\bar{S}H_2 + 21H \longrightarrow C_6(A, F)S_3H_{32} + (A, F)H_3$	$C_6(A, F)S_3H_{32}$
	$C_4AF + C_6(A, F)S_3H_{32} + 7H \longrightarrow 3C_4(A, F)SH_{12} + (A, F)H_3$	$C_4(A, F)SH_{12}$
	$C_4AF + 9H + 4CH \longrightarrow C_4AFH_{13}$	$C_4(A, F)SH_{13}$
C <sub>3</sub> S	$2C_3S + 6H \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$	$C_3S_2H_3$
C <sub>2</sub> S	$2C_2S + 4H \longrightarrow C_3S_2H_3 + CH$	$C_3S_2H_3$

หมายเหตุ: “C” หมายถึง CaO

“S” หมายถึง SiO<sub>2</sub>

“A” หมายถึง Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

“F” หมายถึง Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

“H” หมายถึง H<sub>2</sub>O

“ $\bar{S}$ ” หมายถึง SO<sub>3</sub>

## เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash: PFA) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน เพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกว่า เถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะลอยไปกับอากาศร้อน จึงเรียกว่า เถ้าลอย โดยทั่วไปมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ลักษณะส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มม.) จนถึง 0.15 มม. ความละเอียดของเถ้าถ่านหินขึ้นอยู่กับกระบวนการบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา ถ่านหินที่เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะมีความละเอียดสูงและมีทรงกลม แต่กรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของเถ้าถ่านหินจะไม่แน่นอน เถ้าถ่านหินที่ละเอียดจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่หยาบ

### 1. องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลัก และ  $\text{Mg}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  เป็นองค์ประกอบรอง อัตราส่วนของออกไซด์จะขึ้นอยู่กับ ชนิดของเถ้าถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น ( $\text{H}_2\text{O}$ ) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) ด้วย

### 2. ประเภทของเถ้าลอย

สำหรับมาตรฐาน ASTM C 618 ได้แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท ดังตารางที่ 2-6 และหากแบ่งเถ้าลอยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2546) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังตารางที่ 2-7 ได้แก่

2.1 ประเภท F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส ปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับเถ้าลอยชนิด 2ก ตาม มอก. 2135-2545

2.2 ประเภท C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน

ASTM C 618 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมสูง ซึ่งสอดคล้องกับเถ้าลอยชนิด 2ข ตาม มอก. 2135-2545

ตารางที่ 2-6 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณ ซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70	50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> ) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na <sub>2</sub> O, ร้อยละ	1.5	1.5

ตารางที่ 2-7 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> ) ไม่น้อยกว่า, ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ร้อยละ	-	<10	>=10	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> ), ร้อยละ	5.0	5.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น ไม่เกิน, ร้อยละ	3.0	3.0	2.0	3.0
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา ไม่เกิน, ร้อยละ	6.0 <sup>1)</sup>	6.0 <sup>1)</sup>	6.0 <sup>1)</sup>	12.0

หมายเหตุ: <sup>1)</sup> ผู้ซื้ออาจยอมรับเถ้าลอยที่มีค่าน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผาไม่เกินร้อยละ 12.0 ได้ หากผู้ขายมีบันทึกยืนยันผลคุณลักษณะทางฟิสิกส์ที่ยอมรับได้จากการนำไปใช้งาน หรือจากรายงานผลการทดสอบของห้องปฏิบัติการทดสอบที่เชื่อถือได้



### 3. ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย (Pozzolanic reaction of fly ash)

3.1 Tatong (2001) เสนอแบบจำลองดัชนีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย (Degree of pozzolanic reaction of fly ash) ที่ระยะเวลา  $t$  ดังสมการที่ 2-22

$$\alpha_{\text{poz}}(t) = \frac{\tan^{-1}\left(\left(0.049 \times T^{0.496} - 0.186 \times (w/b) - 0.135\right) \times t\right)}{\tan^{-1}\left(\left(0.049 \times T^{0.496} - 0.186 \times (w/b) - 0.135\right) \times 365\right)} \times \alpha_{\text{poz}}(365) \quad (2-22)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{poz}}(365) &= (100 - (102 - 0.1 \times T) \times (0.416 + 0.0088 \times (w/b)^{-1.822}) \times \\ &\quad \tan^{-1}\left((7.927 \times (w/b)^{-1.546} - 15.699) \times \left(\frac{\text{SiO}_2}{\text{CaO}_{\text{eff}}} - \frac{\% \text{SiO}_{2,c}}{\text{CaO}_c}\right)\right) \times \\ &\quad \left(1 - \frac{\% \text{LOI}_f}{100}\right) \times (0.948 \times \tan^{-1}(7.227 \times 10^{-4} \times F_f)) \\ \text{SiO}_2 &= \frac{(W_c \times \% \text{SiO}_{2,c}) + (W_f \times \% \text{SiO}_{2,f})}{100} \\ \text{CaO}_{\text{eff}} &= \frac{(W_c \times \% \text{CaO}_c) + \psi \times (W_f \times \% \text{CaO}_f)}{100} \\ \psi &= \frac{1 - e^{(-a \times \% \text{CaO}_f)}}{1 + e^{(-a \times \% \text{CaO}_f)}} \\ a &= 0.0048 \times \left(\frac{F_f}{3,000}\right)^{3.0734} + 0.0245 \end{aligned}$$

เมื่อ  $\alpha_{\text{poz}}(t)$  คือ ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ที่ระยะเวลา  $t$  (%)

$\alpha_{\text{poz}}(365)$  คือ ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ที่ระยะเวลา 365 วัน (%)

$t$  คือ อายุของคอนกรีต (วัน)

$T$  คือ อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$w/b$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

$\% \text{CaO}_c$  คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในปูนซีเมนต์  
(% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

$\% \text{CaO}_f$  คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอย  
(% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

$\% \text{SiO}_{2,c}$  คือ ปริมาณซิลิกาในปูนซีเมนต์ (% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

$\% \text{SiO}_{2,f}$  คือ ปริมาณซิลิกาในเถ้าลอย (% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

$\text{CaO}_{\text{eff}}$  คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มีในคอนกรีต

(กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

SiO<sub>2</sub> คือ ปริมาณซิลิกาทั้งหมดที่ได้จากปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในคอนกรีต

(กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

ψ คือ แคลเซียมออกไซด์ที่มีในเถ้าลอย (อัตราส่วน)

W<sub>c</sub> คือ ปริมาณของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

W<sub>f</sub> คือ ปริมาณของเถ้าลอยในคอนกรีต (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

F<sub>f</sub> คือ ความละเอียดของเถ้าลอย (Blaine fineness of fly ash, ซม<sup>2</sup>/ กรัม)

%LOI<sub>f</sub> คือ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของเถ้าลอย

(% โดยน้ำหนักของเถ้าลอย)

### 3.2 ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย (Average degree of reaction of cement and fly ash) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-23

$$\alpha_{ave}(t) = \frac{\sum_i (m_i \alpha_i(t)) + m_{fa} \alpha_{poz}(t)}{\sum_i (m_i) + m_{fa}} \times 100 \quad (2-23)$$

เมื่อ t คือ อายุของคอนกรีต (วัน)

$\alpha_{ave}(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของระบบวัสดุประสาน  
ที่เวลา t (%)

i คือ สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ ได้แก่ C<sub>3</sub>A, C<sub>3</sub>S, C<sub>4</sub>AF และ C<sub>2</sub>S

m<sub>i</sub> คือ ปริมาณของแต่ละสารประกอบหลักในคอนกรีต (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

m<sub>fa</sub> คือ ปริมาณของเถ้าลอยในคอนกรีต (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$\alpha_i(t)$  คือ ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของแต่ละสารประกอบหลัก  
ที่ระยะเวลา t (%)

$\alpha_{poz}(t)$  คือ ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย ที่ระยะเวลา t (%)

### 3.3 ปริมาณของเถ้าลอยที่ใช้ทำปฏิกิริยา (Reacted weight of fly ash)

ปริมาณของเถ้าลอยที่ใช้ทำปฏิกิริยาในปฏิกิริยาปอซโซลานิก ที่อายุ  $t$  วัน สามารถคำนวณดังสมการที่ 2-24

$$m_{\text{poz,fa}}(t) = m_{\text{fa}} \times \frac{\alpha_{\text{fa}}(t)}{100} \quad (2-24)$$

เมื่อ  $m_{\text{poz,fa}}(t)$  คือ ปริมาณของเถ้าลอยที่ใช้ทำปฏิกิริยา ที่อายุ  $t$  วัน

(กก./  $\text{m}^3$  ของคอนกรีต)

$m_{\text{fa}}$  คือ ปริมาณของเถ้าลอยในคอนกรีต (กก./  $\text{m}^3$  ของคอนกรีต)

$\alpha_{\text{fa}}(t)$  คือ ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยที่อายุ  $t$  วัน (%)

$t$  คือ อายุของตัวอย่าง (วัน)

### 3.4 ผลผลิตปอซโซลานิกของเถ้าลอย (Pozzolanic products of fly ash)

เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานิกที่นิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีต เนื่องจากซิลิกา และอลูมินา ที่มีอยู่ในเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ

Mindess and Young (1981) แสดงการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก และผลผลิตปอซโซลานิกของแต่ละองค์ประกอบในเถ้าลอย ดังตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2-8 การทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย (Mindess & Young, 1981)

Compounds	Hydration reactions	Products
S	$2S+3CH \longrightarrow C_3S_2H_3$	$C_3S_2H_3$
A	$2A+3CH \longrightarrow C_3A_2H_3$	$C_3A_2H_3$

หมายเหตุ: “C” หมายถึง CaO

“S” หมายถึง  $\text{SiO}_2$

“A” หมายถึง  $\text{Al}_2\text{O}_3$

“H” หมายถึง  $\text{H}_2\text{O}$

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. ความสามารถกักเก็บคลอไรด์

Weerd, Colombo, Coppola, Justnes and Geiker (2015) ศึกษาความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ โดยตัวอย่าง เผิฉุยกับสารละลายคลอไรด์ 3 ชนิด คือ  $MgCl_2$ ,  $CaCl_2$  และ  $NaCl$  ที่อุณหภูมิ  $20\text{ }^{\circ}C$  จากการทดลองพบว่า ความแตกต่างของการยึดจับเกลือคลอไรด์ที่วัดได้มีค่าขึ้นอยู่กับไอออนบวกที่ถูกควบคุม โดยค่า pH ของสารละลายเกลือคลอไรด์ที่ซีเมนต์เพสต์ต้องเผชิญ และ CSH มีบทบาทที่สำคัญในการยึดจับเกลือคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ ซึ่ง CSH มีค่าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

Chour (2014) เสนอแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก โดยแบบจำลองมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ซึ่งจากการตรวจสอบความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองนี้สามารถใช้เพื่อคำนวณหาความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดได้ ดังสมการที่ 2-25

$$\alpha_{\text{fix}}(t) = \left[ 1 - \frac{1}{1.048} \left( \left( -0.27 \times \frac{w}{b} + 1.155 \right) \left( \frac{s}{b} \right)^{7.5} + \left( 0.18 \times \frac{w}{b} - 0.298 \right) \times \frac{s}{b} + \left( 0.74 \times \frac{w}{b} + 0.49 \right) \right) \right] \quad (2-25)$$

เมื่อ  $\alpha_{\text{fix}}(t)$  คือ อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ

$t$  คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)

$w/b$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

$s/b$  คือ อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน

Ipavec, Vuk, Gabrovsek and Kaucic (2013) ศึกษาความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุปอซโซลานที่แตกต่างกัน จากผลการศึกษา พบว่า เมื่อวัสดุประสานใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสม จะส่งผลกระทบต่ออย่างเห็นได้ชัดต่อความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ กล่าวคือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับในปูนซีเมนต์ที่ผสมวัสดุปอซโซลานมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาณอลูมินัมในแต่ละวัสดุประสาน เมื่อวัสดุประสานมีปริมาณของอลูมินัมสูง ส่งผลให้การยึดจับเกลือคลอไรด์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อผสมเถ้าลอยในส่วนผสม ทำให้มีปริมาณอลูมินัมเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

Florea and Brouwers (2012) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการยึดจับคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตกับปริมาณการยึดจับคลอไรด์เนื่องจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยกลไกการยึดจับคลอไรด์ที่ถูกนำมาพิจารณามี 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการยึดจับทางกายภาพและกระบวนการยึดจับทางเคมี โดยทั้ง 2 กระบวนการคำนึงถึงความเข้มข้นของคลอไรด์และปริมาณของผลผลิตแต่ละชนิดที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

Cheewaket, Jaturapitakkul and Chalee (2010) ศึกษาความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล โดยการศึกษาความสามารถกักเก็บคลอไรด์คำนึงถึงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ และปริมาณเถ้าลอย ซึ่งใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ 0%, 15%, 25%, 35% และ 50% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้คือ 0.45, 0.55 และ 0.65 จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในคอนกรีตส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญสภาวะแวดล้อมทะเล

Yuan et al. (2009) ศึกษาความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่เผชิญคลอไรด์จากสภาพแวดล้อมภายนอก จากการศึกษาพบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กหรือเถ้าลอยช่วยเพิ่มความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ ในขณะที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมลดความสามารถกักเก็บคลอไรด์ซีเมนต์เพสต์ และนอกจากนี้  $C_3A$  ยังมีบทบาทที่สำคัญในการยึดจับเกลือคลอไรด์ เช่นเดียวกับกับ  $C_3S$ ,  $C_2S$  และ  $C_4AF$

Sumranwanich and Tangtermsirikul (2004) เสนอแบบจำลองสำหรับทำนายความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งพิจารณาถึงผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ ทั้งนี้แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ถูกพิจารณาทั้งกระบวนการยึดจับทางเคมี และกระบวนการยึดจับทางกายภาพ ดังสมการที่ 2-26

$$C_{\text{fix}}(t_s, t_c) = C_{\text{fix, chem}}(t_s, t_c) + C_{\text{fix, phy}}(t_c) \quad (2-26)$$

เมื่อ  $t_s$  คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มเผชิญคลอไรด์ (วัน)

$t_c$  คือ อายุของคอนกรีตที่สิ้นสุดการเผชิญคลอไรด์ (วัน)

$C_{\text{fix}}(t_s, t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{fix, chem}}(t_s, t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางเคมี  
ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{fix, phy}}(t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพของ  
คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

กระบวนการยึดจับทางเคมี ถูกแสดงดังสมการที่ 2-27

$$C_{\text{fix, chem}}(t_s, t_e) = C_{\text{fix, C}_3\text{A}}(t_s, t_e) + C_{\text{fix, C}_4\text{AF}}(t_s, t_e) \quad (2-27)$$

$$C_{\text{fix, C}_3\text{A}}(t) = \lambda_{\text{fix, C}_3\text{A}} \times (m_{\text{hyd, C}_3\text{A}}(t_e) - m_{\text{hyd, C}_3\text{A}}(t_s))$$

$$C_{\text{fix, C}_4\text{AF}}(t) = \lambda_{\text{fix, C}_4\text{AF}} \times (m_{\text{hyd, C}_4\text{AF}}(t_e) - m_{\text{hyd, C}_4\text{AF}}(t_s))$$

เมื่อ  $C_{\text{fix, chem}}(t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางเคมีในช่วง  
ระยะเวลาของการเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$C_{\text{fix, C}_3\text{A}}(t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางเคมีของ  $C_3A$   
ในช่วงระยะเวลาของการเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$C_{\text{fix, C}_4\text{AF}}(t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางเคมีของ  
 $C_4AF$  ในช่วงระยะเวลาของการเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$B$  คือ ปริมาณของวัสดุประสาน (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$t$  คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต (วัน)

$\lambda_{\text{fix, C}_3\text{A}}$  คือ อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของ  $C_3A$  เนื่องจากกระบวนการทาง  
เคมี (คลอไรด์ที่ถูกยึดจับหารด้วยปริมาณของ  $C_3A$  ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน)

$m_{\text{hyd, C}_3\text{A}}(t_e)$  คือ ปริมาณของ  $C_3A$  ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สิ้นสุดการเผชิญ  
คลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$m_{\text{hyd, C}_3\text{A}}(t_s)$  คือ ปริมาณของ  $C_3A$  ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เริ่มต้นเผชิญคลอไรด์  
(กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$\lambda_{\text{fix, C}_4\text{AF}}$  คือ อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของ  $C_4AF$  เนื่องจากกระบวนการ  
ทางเคมี (คลอไรด์ที่ถูกยึดจับหารด้วยปริมาณของ  $C_4AF$  ที่ทำ

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน)

$m_{\text{hyd},C_4AF}(t_e)$  คือ ปริมาณของ  $C_4AF$  ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สิ้นสุดการเผชิญ  
คลอไรด์ (กก./  $m^3$  ของคอนกรีต)

$m_{\text{hyd},C_4AF}(t_s)$  คือ ปริมาณของ  $C_4AF$  ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เริ่มต้นเผชิญคลอไรด์  
(กก./  $m^3$  ของคอนกรีต)

กระบวนการยึดจับทางกายภาพ ถูกแสดงดังสมการที่ 2-28

$$C_{\text{fix,phy}}(t_e) = \frac{\left( \frac{\phi_{\text{fix}}}{100} \times \sum M_{\text{product}}(t_e) \right)}{B} \times 100 \quad (2-28)$$

เมื่อ  $C_{\text{fix,phy}}(t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$\phi_{\text{fix}}$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับโดยการยึดจับทางกายภาพของผลผลิต  
ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิก (% โดยน้ำหนักของผลผลิต)

$\sum M_{\text{product}}$  คือ ผลรวมของปริมาณผลผลิตไฮเดรชันและปอซโซลานิกที่  
ระยะเวลาสิ้นสุดการเผชิญคลอไรด์ (กก./  $m^3$  ของคอนกรีต)

B คือ ปริมาณของวัสดุประสาน (กก./  $m^3$  ของคอนกรีต)

## 2. สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

Simcic, Pejovnik, Schutter and Bosiljkov (2015) ศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้ง โดยเถ้าลอย 2 ชนิด ถูกใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนที่ 0%, 20% และ 50% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากการศึกษาพบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยบางส่วนส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย กล่าวคือ เถ้าลอยช่วยทำให้คอนกรีตมีความพรุนลดลง นอกจากนี้ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยยังมีบทบาทการแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต นั่นคือ คอนกรีตผสมเถ้าลอยชนิด FA I ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมต่ำ แสดงให้เห็นความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยชนิด FA II ในช่วง 90 วันแรก แต่คอนกรีตผสมเถ้าลอยชนิด FA II ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมสูง จะมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยชนิด FA I หลังจาก 126 วัน โดยผลของการแทรกซึมคลอไรด์นี้มีค่าสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

Chour (2014) เสนอแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก โดยแบบจำลองคำนึงถึงปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ซึ่งจากการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองนี้สามารถใช้เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดได้ ดังสมการที่ 2-29

$$D_{Cl}(x,t) = \left( \left( 6.462 \times \frac{w}{b} - 1.135 \right) \times \left( \frac{s}{b} \right)^2 - \left( 11.01 \times \frac{w}{b} - 2.109 \right) \times \frac{s}{b} + \left( 4.683 \times \frac{w}{b} - 0.759 \right) \right) \times \left( \frac{43.5}{t^{0.547} \times b^{1.014}} \right) \quad (2-29)$$

เมื่อ  $D_{Cl}(x,t)$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ( $\text{cm}^2/\text{ปี}$ )

$t$  คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)

$w/b$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

$s/b$  คือ อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน

$b$  คือ ปริมาณของวัสดุประสาน ( $\text{กก./ม}^3$ )

Petcherdchoo (2013) เสนอแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และปริมาณคลอไรด์ที่ชั้นผิวหน้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ซึ่งคำนวณโดยใช้กฎ



การแพร่ข้อที่สองของฟิคซ์ (Fick's second law) แบบจำลองที่พัฒนาจะใช้ผลจากการคำนวณย้อนกลับที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณย้อนกลับที่ได้จากการทดลอง โดยแบบจำลองคำนึงถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณการแทนที่ของปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ตั้งแต่ 0% ถึง 50% ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นและจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหากมีการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สูงขึ้นทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้อย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้มีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมเร็วขึ้น

แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ถูกแสดงดังสมการที่ 2-30

$$D_a = \frac{D_{28}}{1-m} \left[ \left( 1 + \frac{28}{365 \times t} \right)^{1-m} - \left( \frac{28}{365 \times t} \right)^{1-m} \right] \times \left( \frac{28}{365 \times t} \right)^{1-m} \quad (2-30)$$

เมื่อ  $D_a$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ระยะเวลา  $t$  (มม<sup>2</sup>/ปี)

$$m = 0.2 + 0.4 \left( \frac{\%FA}{50} \right)$$

$$D_{28} = 10^{[1.776 + 1.364 \times w/b] + [5.806 - 18.69 \times w/b] \times [\%FA]}$$

แบบจำลองปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้า ถูกแสดงดังสมการที่ 2-31

$$C_s(t) = 10^{[0.814 \times w/b - 0.213]} + 2.11 \sqrt{t} \quad (2-31)$$

เมื่อ  $C_s(t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าที่ระยะเวลา  $t$  (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$w/b$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

$t$  คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

Chalee and Jaturapitakkul (2009) ศึกษาของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

และความละเอียดของเถ้าลอยที่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีตที่เผชิญสภาพแวดล้อมทะเล โดยการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ 0%, 15%, 25%, 35% และ 50% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ โดยตัวอย่างจะถูกทดสอบหาค่าการแทรกซึมคลอไรด์หลังจากแช่ในทะเลเป็นเวลา 2, 3, 4 และ 5 ปี จากผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทุกส่วนผสมมีค่าลดลงเมื่อมีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น นอกจากนี้การลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานส่งผลให้สัมประสิทธิ์

การแพร่มีค่าลดลง และการใช้ถ้ำลอยที่มีความละเอียดสูงทำให้อัตราการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าลดลง

Chalee, Jaturapitakkul and Chindaprasirt (2009) เสนอแบบจำลองสำหรับทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมถ้ำลอยภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล โดยแบบจำลองประยุกต์ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์เพื่อสร้างสมการเชิงทดลองสำหรับทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต โดยแบบจำลองคำนึงถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณถ้ำลอย และระยะจากผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 25\%$  กับผลการทดลอง แบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมถ้ำลอย ถูกแสดงดังสมการที่ 2-32

$$C_{x,t} = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \sqrt{\frac{(31,536,000t)^{(1-\beta)}}{(1-\beta)}}} \right) \right] \quad (2-32)$$

เมื่อ  $C_{x,t}$  คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ  $x$  ที่ระยะเวลา  $t$

(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_0$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$t$  คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

$\beta$  คือ สัมประสิทธิ์เชิงทดลอง (Empirical coefficient)

Song, Lee and Ann (2008) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญสภาพแวดล้อมทะเล จากการศึกษาพบว่า 1) สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวอย่างมีการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อเนื่องเป็นเวลานาน ส่งผลให้ตัวอย่างมีความพรุนลดลง หรือตัวอย่างมีการยึดจับคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น 2) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างความพรุนของตัวอย่างเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้ามีค่าลดลง และคอนกรีตที่ผสมถ้ำลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก หรือซิลิกาฟูม สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าลดลง และปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความพรุนในคอนกรีตมีค่าลดลงและมีการเพิ่มขึ้นของการยึดจับเกลือคลอไรด์ ตามลำดับ 3) สำหรับการแพร่คลอไรด์มีค่าขึ้นอยู่กับวิธีการบ่มตัวอย่าง โดยจะเห็นว่าสำหรับคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม การบ่มในอากาศสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าได้มากขึ้น และการบ่มในน้ำของคอนกรีตที่ผสมถ้ำลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กส่งผลให้ลดปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าได้มากขึ้น 4) สำหรับความสูง

ของระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้า มีค่าเพิ่มขึ้น 5) โครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อมทางทะเลที่มีอุณหภูมิสูง ส่งผลให้ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิปกติ เนื่องจากการแพร่ ของคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นและการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ และ 6) การเพิ่มขึ้น ของปริมาณอากาศในคอนกรีตส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณคลอไรด์ ที่ผิวหน้ามีค่าลดลง โดยปริมาณอากาศในคอนกรีต เกิดจากการบดอัดที่ไม่ดีของตัวอย่างส่งผลให้ ตัวอย่างมีความพรุนสูง ซึ่งความพรุนนี้จะเป็นช่องทางในการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ ในคอนกรีต

Sumranwanich (2004) เสนอแบบจำลองการแพร่คลอไรด์ มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลากับ การพัฒนาของโพรงช่องว่างของคอนกรีต โดยมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาณของเพสต์ และปริมาณของน้ำ ในโพรงช่องว่างของคอนกรีตหรือปริมาณน้ำในคอนกรีต สำหรับโพรงช่องว่างของคอนกรีต สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่าง (Average pore diameter,  $d_{ave}(t)$ ) และความพรุนทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ (Total porosity,  $n(t)$ ) เมื่อเพสต์มีความทึบน้ำส่งผลให้ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่างและความพรุนทั้งหมดในคอนกรีตมีค่าลดลง ทำให้ค่า สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ อัตราส่วนเพสต์และปริมาณน้ำในคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนเพสต์ หมายถึง อัตราส่วน ระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต และปริมาณน้ำ หมายถึง ปริมาณน้ำในโพรง ของคอนกรีต โดยแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ แสดงดังสมการที่ 2-33 ถึง สมการที่ 2-36 ตามลำดับ

สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ชั้นผิวหน้า

$$D_{Cl}(l, t) = \frac{0.000012}{0.00043 + e^{-0.0197 \times \left( 200 \times d_{ave}^{1.5}(t) \times \left( \frac{n(t)}{100} \right)^{3.5} \right)}} \times (R_p^{0.25} - 0.35) \times 0.72 \times \left( \frac{C_w(l, t)}{100} \right)^3 \quad (2-33)$$

สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ชั้นด้านใน

$$D_{Cl}(x, t) = \frac{0.000010}{0.00039 + e^{-0.0184 \times \left( 200 \times d_{ave}^{1.5}(t) \times \left( \frac{n(t)}{100} \right)^{3.5} \right)}} \times (R_p^{0.25} - 0.35) \times 0.72 \times \left( \frac{C_w(x, t)}{100} \right)^3 \quad (2-34)$$

สำหรับซีเมนต์เพสต์ผสมเกล็ดลอยที่ชั้นผิวหน้า

$$D_{Cl}(l, t) = \frac{0.000012}{0.00043 + e^{-0.0197 \times \left( 200 \times d_{ave}^{1.5}(t) \times \left( \frac{n(t)}{100} \right)^{3.5} \right)}} \times (R_p^{0.25} - 0.35) \times \frac{0.25}{0.95 + e^{-2 \times (f/b)}} \\ \times 0.72 \times \left( \frac{C_w(l, t)}{100} \right)^3 \quad (2-35)$$

สำหรับซีเมนต์เพสต์ผสมเกล็ดลอยที่ชั้นด้านใน

$$D_{Cl}(x, t) = \frac{0.000010}{0.00039 + e^{-0.0184 \times \left( 200 \times d_{ave}^{1.5}(t) \times \left( \frac{n(t)}{100} \right)^{3.5} \right)}} \times (R_p^{0.25} - 0.35) \times \frac{0.25}{0.95 + e^{-2 \times (f/b)}} \\ \times 0.72 \times \left( \frac{C_w(x, t)}{100} \right)^3 \quad (2-36)$$

เมื่อ  $D_{Cl}(l, t)$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของชั้นที่ 1 ที่ระยะเวลา  $t$  (ซม<sup>2</sup>/ วัน)

$D_{Cl}(x, t)$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของชั้นที่  $x$  ที่ระยะเวลา  $t$  (ซม<sup>2</sup>/ วัน)

$D_{ave}(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่างที่ระยะเวลา  $t$  (นาโนเมตร)

$n(t)$  คือ ความพรุนทั้งหมดในระบบวัสดุประสานที่ระยะเวลา  $t$

(% โดยปริมาตรของเพสต์)

$R_p$  คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต

$C_w(l, t)$  คือ ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในโพรงช่องว่างที่ชั้นที่ 1

ที่ระยะเวลา  $t$  (%)

$C_w(x, t)$  คือ ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในโพรงช่องว่างที่ชั้นที่  $x$

ที่ระยะเวลา  $t$  (%)

$f/b$  คือ อัตราส่วนเกล็ดลอยต่อวัสดุประสาน

### 3. การดึงดูดไอออนคลอไรด์

Chour (2014) เสนอแบบจำลองการดึงดูดไอออนคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก โดยแบบจำลองคำนึงถึงปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ซึ่งจากการตรวจสอบการดึงดูดไอออนคลอไรด์ของคอนกรีตที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองนี้สามารถใช้เพื่อคำนวณหาการดึงดูดไอออนคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดได้ ดังสมการที่ 2-37

$$F_{ad}(1,t) = \left(0.92 \times \frac{w}{b} - 0.141\right) \times 10^{-5} \times e^{-2.1 \times \frac{s}{b}} \times \frac{0.0153}{t^{0.331} \times (0.015 + e^{(-0.02 \times b)})} \quad (2-37)$$

เมื่อ  $F_{ad}(1,t)$  คือ ฟลักซ์ของการดึงดูดไอออนคลอไรด์ที่ชั้นที่ 1 จากผิวหน้าของคอนกรีตที่เวลา  $t$  (โมล/ ซม<sup>2</sup>/ปี)

$s/b$  คือ อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน

$w/b$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

$b$  คือ ปริมาณของวัสดุประสาน (กก./ ม<sup>3</sup>)

$t$  คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

Sumranwanich (2004) เสนอแบบจำลองการดึงดูดไอออนคลอไรด์ โดยสมมุติให้เกิดขึ้นที่ชั้นผิวหน้าเท่านั้น ซึ่งแสดงจากฟลักซ์ของคลอไรด์เนื่องจากกลไกการดึงดูดไอออน (Flux of ion adsorption) ฟลักซ์นี้จะถูกร่วมกับฟลักซ์ของความแตกต่างของความเข้มข้นคลอไรด์ เนื่องจากกระบวนการแพร่ (Chloride diffusion) ดังสมการที่ 2-38 และ 2-39 ตามลำดับ

สำหรับคอนกรีตล้วน

$$F_{ad}(1,t) = (0.000025 \times B^{0.1}) \times R_p^{0.05} \times \left( \frac{0.001}{0.0002 + e^{-0.202 \times n(t)}} \right) \times \left( 1 - 0.006 \times \left( \frac{F_c}{3200} \right)^7 \right) \times \left( \frac{0.0036}{0.0017 + e^{-12.28 \times (w/b)}} \right) \times (-0.35 \times C_{free}^{0.5}(1,t) + 1) \times e^{-C_{free}(1,t)} \quad (2-38)$$

สำหรับคอนกรีตผสมถ้ำลอย

$$F_{ad}(1, t) = (0.000025 \times B^{0.1}) \times R_p^{0.05} \times \left( \frac{0.001}{0.0002 + e^{-0.202 \times n(t)}} \right) \times \left( 1 - 0.006 \times \left( \frac{F_c}{3200} \right)^7 \right) \\ \times \left( \frac{0.0036}{0.0017 + e^{-12.28 \times (w/b)}} \right) \times (-0.35 \times C_{free}^{0.5}(1, t) + 1) \times e^{-C_{free}(1, t)} \times \left( \frac{d_{ave}(1, t)}{30} \right)^3 \quad (2-39)$$

เมื่อ  $F_{ad}(1, t)$  คือ พลังค์ของการดึงดูดอออนคลอไรด์ที่ชั้นที่ 1 จากผิวหน้าของคอนกรีต ที่ระยะเวลา  $t$  (โมล/ ซม<sup>2</sup>/ วัน)

$B$  คือ ปริมาณของวัสดุประสาน (กก./ ม<sup>3</sup>)

$R_p$  คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต

$n(t)$  คือ ความพรุนทั้งหมดในระบบวัสดุประสานที่ระยะเวลา  $t$  (% โดยปริมาตรของเพสต์ในคอนกรีต)

$F_c$  คือ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ (ซม<sup>2</sup>/ กรัม)

$C_{free}(1, t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ชั้นที่ 1 จากผิวหน้าของคอนกรีตที่ระยะเวลา  $t$  (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$d_{ave}(1, t)$  คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่างที่ชั้นที่ 1 จากผิวหน้าของคอนกรีต ที่ระยะเวลา  $t$  (นาโนเมตร)

$t$  คือ อายุของคอนกรีต (วัน)

$w/b$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

Maruya, Tangtermsirikul and Matsuoka (1998) เสนอแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอออนคลอไรด์ที่ชั้นผิวหน้าในคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดอออนเกิดจากบริเวณผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีตมีประจุไฟฟ้าบวก จะดึงดูดอออนคลอไรด์ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีต โดยการดึงดูดอออนคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับคลอไรด์อิสระในคอนกรีต กล่าวคือ การดึงดูดอออนคลอไรด์จะมีค่าลดลง เมื่อคลอไรด์อิสระในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2-40 ถึง 2-43 ตามลำดับ

สำหรับคอนกรีตล้วน

$$S_c = 1.4 \times 1.0 \times 10^{-5} \times \exp(-1.15 \times C_{free}(1, t)) \quad (2-40)$$

สำหรับคอนกรีตผสมถ้ำลอย

$$S_c = 1.4 \times 0.6 \times 10^{-5} \times \exp(-1.15 \times C_{free}(1,t)) \quad (2-41)$$

สำหรับคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

$$S_c = 1.4 \times 0.3 \times 10^{-5} \times \exp(-1.15 \times C_{free}(1,t)) \quad (2-42)$$

สำหรับคอนกรีตผสมถ้ำลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

$$S_c = 1.4 \times 0.2 \times 10^{-5} \times \exp(-1.15 \times C_{free}(1,t)) \quad (2-43)$$

เมื่อ  $S_c$  คือ ฟลักซ์ของการดึงคู่อิออนคลอไรด์ที่ชั้นที่ 1 จากผิวหน้าของคอนกรีต  
ที่ระยะเวลา  $t$  (โมล/ ซม<sup>2</sup>/ วัน)

$C_{free}(1,t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ชั้นผิวหน้าของคอนกรีต  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

#### 4. ปริมาณคลอไรด์วิกฤต

วิเชียร ชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมถ้ำลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45, 0.55 และ 0.60 และอัตราส่วนถ้ำลอยต่อวัสดุประสานที่ 0.15, 0.25 0.35 และ 0.50 ตามลำดับ มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ 10, 20 50 และ 75 mm. หลังจากหล่อตัวอย่างครบ 28 วัน จึงนำตัวอย่างแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี จากการศึกษาพบว่า เมื่ออัตราส่วนถ้ำลอยต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นปริมาณคลอไรด์วิกฤตมีค่าลดลง และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นปริมาณคลอไรด์วิกฤตมีค่าลดลง

วสุ วิทยเขตปภา, ทวีชัย สำราญวานิช, ภัควัฒน์ แสนเจริญ และสมนึก ตั้งเต็มศิริกุล (2553) ศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมถ้ำลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.30, 0.40 และ 0.50 ใช้อัตราส่วนถ้ำลอยต่อวัสดุประสานที่ 0.30 และ 0.50 ตามลำดับ จากนั้นบ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 7 และ 28 วัน จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้นช่วยให้ความสามารถต้านทานคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาที่เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเริ่มสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมเพิ่มมากขึ้น และปริมาณคลอไรด์วิกฤตเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

Manera and Vennessland (2008) ศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตสำหรับระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม ตัวอย่างถูกหล่อโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแทนที่ด้วยซิลิกาฟูม 10% และละลายโซเดียมคลอไรด์ในส่วนผสมน้ำที่ความเข้มข้น 1 และ 2% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 10% มีค่าต่ำกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตล้วน โดยคอนกรีตล้วนมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ 1.1–2.0 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ 0.6–1.2 % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

Oh, Jang and Shin (2003) ศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0, 15 และ 30 ส่งผลให้ระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตลดลงเป็น 0.93, 0.90 และ 0.68 % โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ปริมาณ  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์มีผลต่อระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤต กล่าวคือ ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $C_3A$  สูง ระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตจะสูงตามไปด้วย

Alonso et al. (2000) ศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมในมอร์ตาร์ โดยตัวอย่างใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย 1/3 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 โดยผสม  $NaCl$  และ  $CaCl_2$  ในส่วนผสมของน้ำ จากการศึกษาพบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่เป็นคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 1.24–3.08 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่เป็นคลอไรด์อิสระมีค่าอยู่ในช่วง 0.39–1.16 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่เป็น  $Cl^-/OH^-$  มีค่าอยู่ในช่วง 1.17–3.98 %

Thomas (1996) ศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤตและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยมีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานที่ 0, 0.15, 0.30 และ 0.50 ซึ่งแช่ตัวอย่างในน้ำทะเลเป็นเวลา 1 ถึง 4 ปี การหาปริมาณคลอไรด์วิกฤตใช้วิธีการวัดการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน ส่งผลให้ระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตมีค่าลดลง โดยมีค่าอยู่ที่ 0.70, 0.65, 0.50 และ 0.20 % และการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยมีผลทำให้การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมีค่าลดลงด้วย



### บทที่ 3

## การพัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

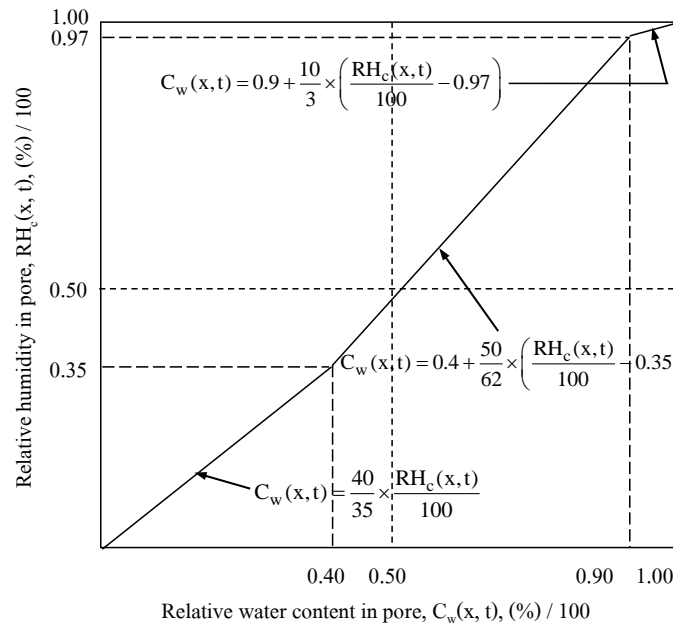
### แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย

งานวิจัยนี้มุ่งปรับปรุงแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยต่อจากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) ซึ่งประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่ แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูดอออนคลอไรด์ โดยแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์พิจารณาทั้งการยึดจับคลอไรด์ทางเคมี และการยึดจับคลอไรด์ทางกายภาพ เพื่อใช้ในการทำนายการยึดจับคลอไรด์ในคอนกรีต แต่งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงเฉพาะแบบจำลองการยึดจับคลอไรด์ทางกายภาพ ด้วยการขยายฐานข้อมูลและเพิ่มปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่าในแบบจำลองด้วย สำหรับแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ถูกปรับปรุงโดยการขยายฐานข้อมูลของการพัฒนาโครงสร้าง โพรงช่องว่างของคอนกรีต อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต ปริมาณของน้ำในโพรงช่องว่างของคอนกรีต และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน และแบบจำลองการดึงดูดอออนคลอไรด์ถูกปรับปรุงโดยการขยายฐานข้อมูลของปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงช่องว่าง ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีต ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ชั้นที่ 1 และผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน ถูกพิจารณาเพิ่มในแบบจำลองนี้

ทั้งนี้แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ถูกพัฒนาขึ้นด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Finite difference method ของระยะทาง  $x$  และระยะเวลา  $t$  ซึ่งใช้โปรแกรม Microsoft Visual basic ในการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต และสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในแบบจำลองนี้ถูกสร้างด้วยโปรแกรม Statistica

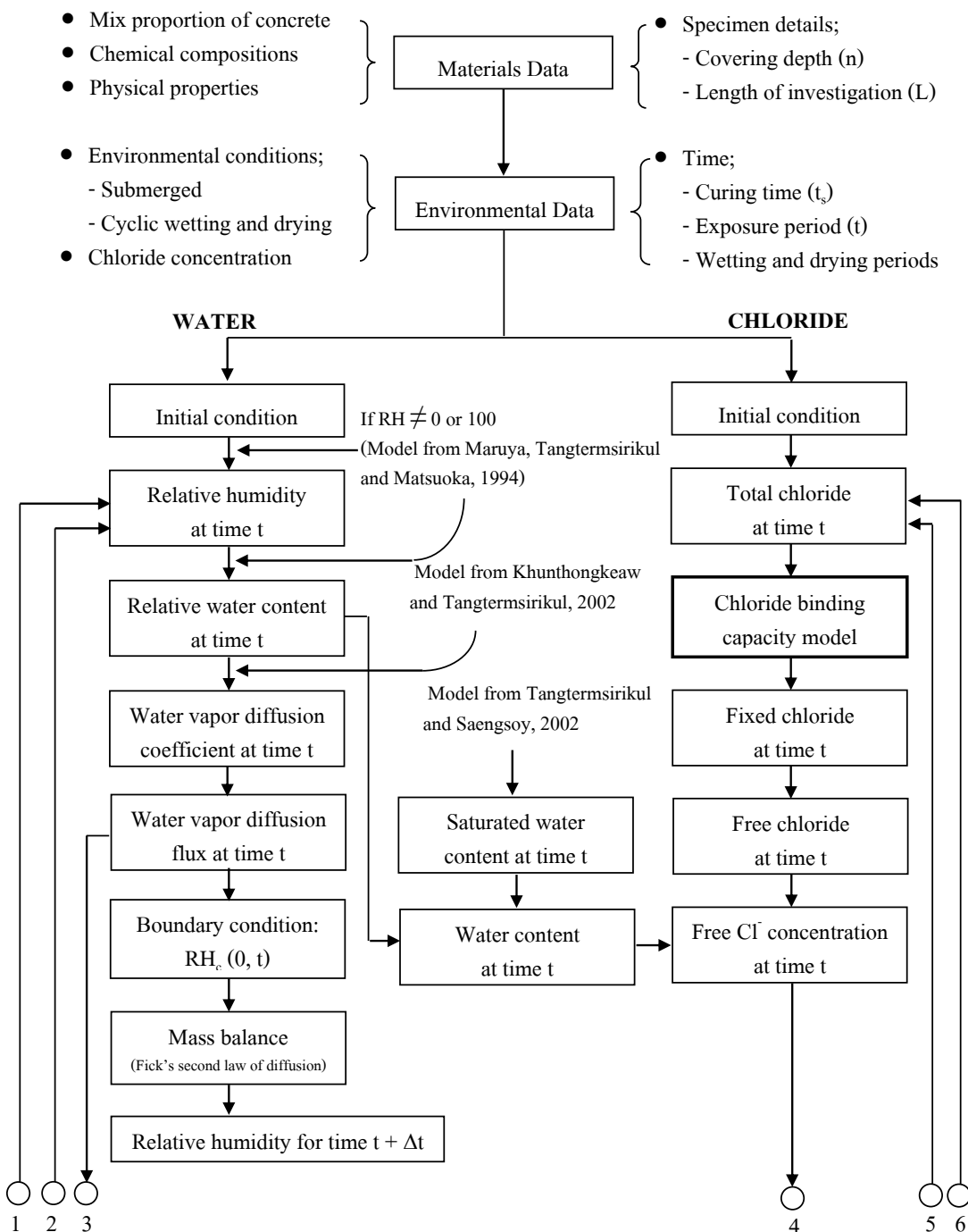
เพื่อคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย นอกจาก 3 แบบจำลองย่อยที่ได้กล่าวมาแล้ว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ เช่น แบบจำลองการระเหยของน้ำ (Khunthongkeaw & Tangtermsirikul, 2002) แบบจำลองปริมาณน้ำอิสระ (Tangtermsirikul & Saengsoy, 2002) แบบจำลองความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณน้ำ (Maruya, Tangtermsirikul & Matsuoka, 1994) ยังถูกรวมเพื่อใช้ในการทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยด้วย

Tangtermsirikul and Saengsoy (2002) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อหาปริมาณน้ำอิสระใน  
 เฟสค์ และได้พิจารณาผลกระทบของเกลือต่อปริมาณน้ำอิสระในซีเมนต์เฟสค์ผสมเกลือด้วย  
 Maruya, Tangtermsirikul and Matsuoka, (1994) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ  
 น้ำและความชื้นสัมพัทธ์ในโพรง ดังภาพที่ 3-1

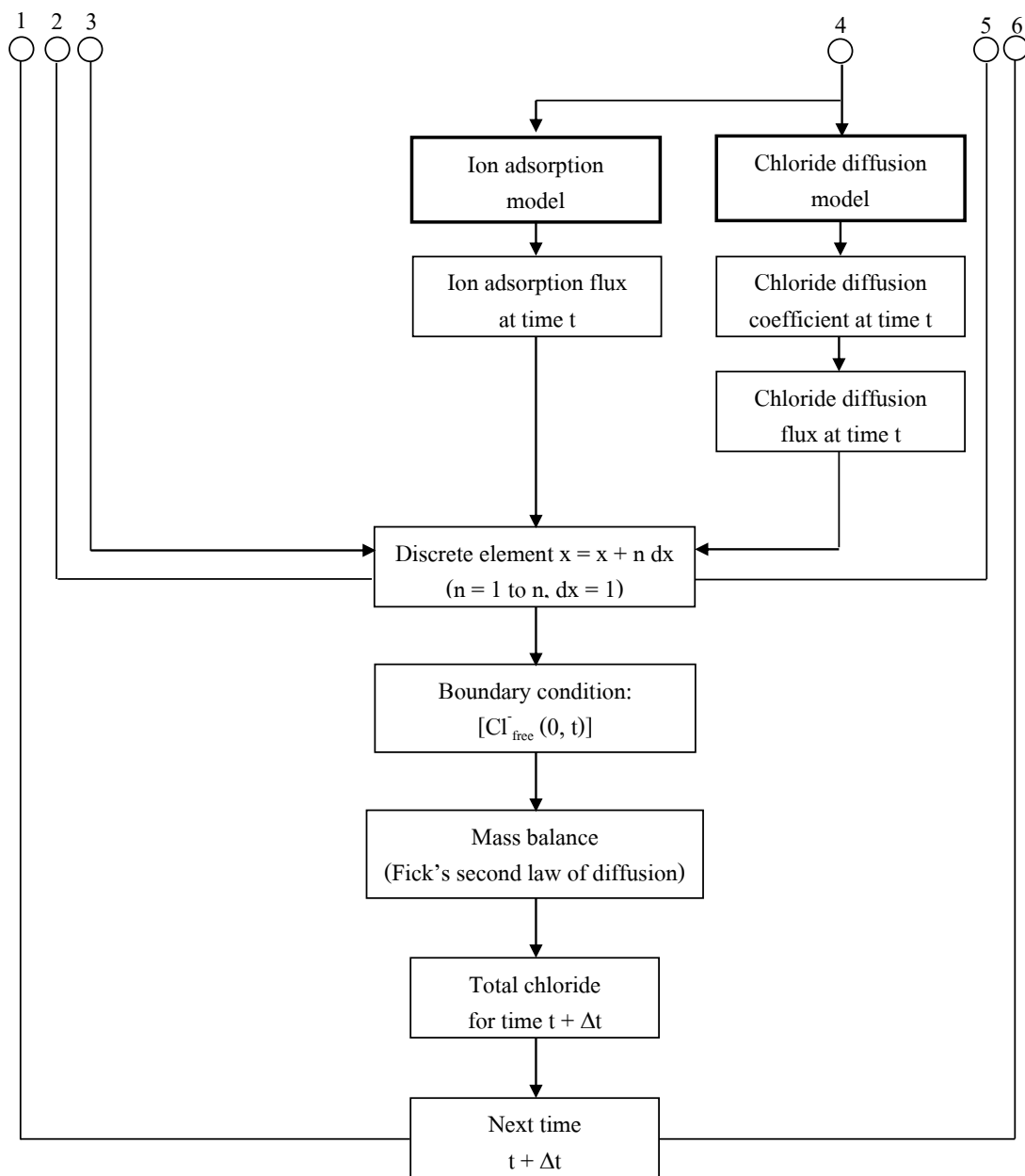


ภาพที่ 3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและความชื้นสัมพัทธ์ใน โพรงของคอนกรีต

สำหรับแผนผังการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเกลือ ถูกแสดง  
 ดังภาพที่ 3-2 ขั้นตอนการคำนวณประกอบด้วยแบบจำลอง 2 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ การคำนวณ  
 ปริมาณน้ำ และการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ โดยการคำนวณหาปริมาณน้ำถูกนำมาใช้  
 ในการคำนวณหาความเข้มข้นคลอไรด์ของคอนกรีต ด้วยการอาศัยกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์  
 สำหรับคิดสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ นอกจากนี้การประเมินปริมาณของน้ำในโพรงช่องว่างของ  
 คอนกรีตหรือปริมาณน้ำในคอนกรีต และความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีต ถูกคำนวณในการหา  
 ความเข้มข้นคลอไรด์ภายในคอนกรีต ซึ่งเงื่อนไขการเผชิญคลอไรด์ต่าง ๆ ถูกจำลองโดยการ  
 กำหนดในเงื่อนไขการเผชิญคลอไรด์เริ่มต้น สำหรับการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์เป็นการหา  
 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ  $x$  และ  $t$  ใด ๆ โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดถูกคำนวณจากกฎการ  
 แพร่ข้อที่สองของฟิคส์ นอกจากนี้ปริมาณคลอไรด์อิสระยังสามารถคำนวณได้จากผลต่างระหว่าง  
 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับอีกด้วย



ภาพที่ 3-2 แผนผังการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต



ภาพที่ 3-2 (ต่อ)

## แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอรีน

แบบจำลองแรกที่ทำกรพัฒนาในงานวิจัยนี้ คือ แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอรีนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย สาเหตุที่ทำกรพัฒนาแบบจำลองนี้ เนื่องจากเมื่อตรวจสอบผลที่ได้จากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) กับผลการทดลองที่ทำกรขยายขอบเขต พบว่าผลที่ได้ให้ค่าไม่สอดคล้องกัน โดยผลการทดลองที่นำมาตรวจสอบนี้มีขอบเขตของข้อมูลอยู่นอกช่วงกับผลการทดลองที่ใช้พัฒนาแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) ดังตารางที่ 3-1 ที่แสดงถึงขอบเขตของข้อมูลที่ใช้พัฒนาแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนา

ตารางที่ 3-1 ขอบเขตของข้อมูลที่ใช้พัฒนาแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอรีนของ Sumranwanich (2004) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนา

ตัวแปรที่มีผลกระทบ	ขอบเขตของตัวแปร	
	Sumranwanich (2004)	แบบจำลองที่ถูกพัฒนา
w/b	0.30, 0.40, 0.50	0.30, 0.40, 0.50
f/b	0.30, 0.50, 0.70	0.30, 0.50, 0.70
$F_c(\text{cm}^2/\text{g})$	3190-4770	3190-4770
$F_f(\text{cm}^2/\text{g})$	3460-3510	2460-3510
ชนิดของปูนซีเมนต์	I, III, V	I, III, V
ชนิดของเถ้าลอย	2ก, 2ข	2ก, 2ข
ความเข้มข้นคลอรีนภายนอกที่ตัวอย่างเผชิญ ( $Cl_{ex}$ ), (%)	3	3, 5

หมายเหตุ: เถ้าลอยถูกแบ่งตาม มอก. 2135-2545 โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

“2ก” หมายถึง เถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ก เป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าร้อยละ 10

“2ข” หมายถึง เถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ข เป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่าร้อยละ 10

ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองมีความครอบคลุมกับข้อมูลผลการทดลองมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้ จึงทำการปรับปรุงแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) ที่ทำการปรับปรุงเฉพาะแบบจำลอง ความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ สาเหตุที่ปรับปรุงเฉพาะ แบบจำลองนี้ คือ สามารถทราบจำนวนของมวลโมเลกุลของผลผลิตไฮดรอกไซด์และปอซโซลานิกได้จากมวลโมเลกุลของแต่ละสารประกอบที่ทำปฏิกิริยากัน การปรับปรุงแบบจำลองจะทำการขยายฐานข้อมูลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และความละเอียดของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อแบบจำลอง เช่น ความละเอียดของเถ้าลอย และความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญ ถูกพิจารณาเข้าไปในแบบจำลองด้วย สาเหตุที่พิจารณาผลกระทบของความละเอียดของเถ้าลอย และความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญ มีดังนี้ เนื่องจากความละเอียดของเถ้าลอยสูงสามารถปรับปรุงปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้เกิดผลผลิตเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตก็เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญสูงขึ้น ทำให้ความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น ทำให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตสูงขึ้น ซึ่งเป็นส่วนช่วยเพิ่มโอกาสในการยึดเกาะคลอไรด์ทางกายภาพที่ผิวของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์และปฏิกิริยาปอซโซลานิก

การพัฒนาแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ ถูกพัฒนาจากผลการทดลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ของ สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2556); เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต (2555); ณรงค์เกียรติ สุนันท์วิริยาภรณ์ (2553); ลิตาภรณ์ อภาศรีทองสกุล (2553); ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บรร และวสุ วิทยเขตปภา (2549); Sumranwanich (2004) โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ดังตารางที่ 3-2 และส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลอง ดังตารางที่ 3-3 สำหรับการแบ่งประเภทของเถ้าลอยถูกแบ่งตาม มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2556) โดยเถ้าลอยที่ใช้ในแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ก. ซึ่งเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าร้อยละ 10 ได้แก่ เถ้าลอยแม่เมาะ (FL) เถ้าลอยจังหวัดระยอง (เถ้าลอยบิทุมินัส Hunter valley (FAH) เถ้าลอยบิทุมินัส Hunter valley and Melawan (FAHM) เถ้าลอยบิทุมินัส Blair athol (FAB) และเถ้าลอยบิทุมินัส Blair athol and Melawan (FABM)) และ เถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ข. ซึ่งเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่า ร้อยละ 10 ได้แก่ เถ้าลอยแม่เมาะ (FH) ซึ่งการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดถูกทดสอบตาม มาตรฐาน ASTM C1152 และการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1218

ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ใช้  
สำหรับสร้างแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์

งานวิจัย	สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2556)						เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต (2555)		
	I	FH	FAH	FAB	FA HM	FA BM	I	V	FH
ชนิดของวัสดุ ประสาน									
Chemical compositions									
SiO <sub>2</sub> (%)	19.87	39.40	65.15	62.37	61.64	60.34	20.80	21.52	36.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.87	17.93	22.06	28.68	21.86	26.78	5.50	3.56	19.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.55	12.92	4.17	2.57	5.85	4.75	3.16	4.51	15.10
CaO (%)	65.03	19.19	1.25	0.75	2.13	1.32	64.97	66.70	17.40
SO <sub>3</sub> (%)	0.73	3.03	0.18	0.10	0.24	0.16	2.96	2.11	0.77
LOI (%)	2.26	0.17	3.78	2.57	4.09	3.29	2.89	1.74	2.81
Bogue's potential compound compositions									
C <sub>3</sub> S (%)	-	-	-	-	-	-	56.50	71.60	-
C <sub>2</sub> S (%)	-	-	-	-	-	-	17.01	7.68	-
C <sub>3</sub> A (%)	-	-	-	-	-	-	9.23	1.80	-
C <sub>4</sub> AF (%)	-	-	-	-	-	-	9.62	13.72	-
Physical properties									
Specific gravity	3.11	2.29	2.24	2.21	2.23	2.20	-	-	2.27
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)									

หมายเหตุ: "I, III, V" หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ

"FL" หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ก

"FH" หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ข

"FAH, FAHM, FAB, FABM" หมายถึง การใช้เถ้าลอยจังหวัดระยองชนิด

เถ้าลอยบิทูมินัส Hunter valley เถ้าลอยบิทูมินัส Hunter valley and Melawan

เถ้าลอยบิทูมินัส Blair athol และ เถ้าลอยบิทูมินัส Blair athol and Melawan

ที่เป็นเถ้าลอยชนิด 2ก แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

ตารางที่ 3-2 (ต่อ)

งานวิจัย	ณรงค์เกียรติ์ สุนันท์วิทยากรณ์ (2555)				ลิขิตาภรณ์ อากาศีทองสกุล (2553)			
	I	FH	FAH	FA HM	I	FH	FAB	FA BM
ชนิดของวัสดุ ประสาน								
Chemical compositions								
SiO <sub>2</sub> (%)	19.87	39.40	65.15	61.64	20.80	39.40	62.37	60.34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.87	17.93	22.06	21.86	5.50	17.93	28.68	26.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.55	12.92	4.17	5.85	3.16	12.92	2.57	4.75
CaO (%)	65.03	19.19	1.25	2.13	64.97	19.19	0.75	1.32
SO <sub>3</sub> (%)	0.73	3.03	0.18	0.24	2.96	3.03	0.10	0.16
LOI (%)	2.26	0.17	3.78	4.09	2.26	0.14	2.57	3.29
Bogue's potential compound compositions								
C <sub>3</sub> S (%)	49.00	-	-	-	56.50	-	-	-
C <sub>2</sub> S (%)	25.00	-	-	-	17.01	-	-	-
C <sub>3</sub> A (%)	12.00	-	-	-	9.23	-	-	-
C <sub>4</sub> AF (%)	8.00	-	-	-	9.62	-	-	-
Physical properties								
Specific gravity	3.10	2.29	2.24	2.23	3.10	2.29	2.21	2.20
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3350	2836	2860	3030	3350	2836	2790	3030

หมายเหตุ: "I, III, V" หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ

"FL" หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ก

"FH" หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ข

"FAH, FAHM, FAB, FABM" หมายถึง การใช้เถ้าลอยจังหวัดระยองชนิด

เถ้าลอยบิทูมินัส Hunter valley เถ้าลอยบิทูมินัส Hunter valley and Melawan

เถ้าลอยบิทูมินัส Blair athol และ เถ้าลอยบิทูมินัส Blair athol and Melawan

ที่เป็นเถ้าลอยชนิด 2ก แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน



ตารางที่ 3-2 (ต่อ)

งานวิจัย	ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บวร และ วสุ วิทยเขตปภา (2549)			Sumranwanich (2004)				
	I	V	FH	I	III	V	FL	FH
ชนิดของวัสดุ ประสาน								
Chemical compositions								
SiO <sub>2</sub> (%)	20.80	21.52	36.10	20.61	20.73	20.97	45.88	38.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.50	3.56	19.40	5.03	4.49	3.49	26.20	19.17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.16	4.51	15.10	3.03	3.32	4.34	10.94	10.93
CaO (%)	64.97	66.70	17.40	64.89	64.89	62.86	8.28	17.28
SO <sub>3</sub> (%)	2.96	2.11	0.77	2.70	2.76	2.12	1.04	2.01
LOI (%)	2.89	1.74	2.81	1.23	1.23	1.21	0.17	0.05
Bogue's potential compound compositions								
C <sub>3</sub> S (%)	56.50	71.60	-	61.64	63.77	60.77	-	-
C <sub>2</sub> S (%)	17.01	7.68	-	12.68	11.41	14.37	-	-
C <sub>3</sub> A (%)	9.23	1.80	-	8.21	6.29	1.91	-	-
C <sub>4</sub> AF (%)	9.62	13.72	-	9.21	10.09	13.19	-	-
Physical properties								
Specific gravity	-	-	2.27	3.15	3.22	3.13	2.03	2.38
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	-	-	2460	3190	4770	3760	3460	3510

หมายเหตุ: "I, III, V" หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ

"FL" หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ก

"FH" หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ข

"FAH, FAHM, FAB, FABM" หมายถึง การใช้เถ้าลอยจังหวัดระยองชนิด

เถ้าลอยบิทูมินัส Hunter valley เถ้าลอยบิทูมินัส Hunter valley and Melawan

เถ้าลอยบิทูมินัส Blair athol และ เถ้าลอยบิทูมินัส Blair athol and Melawan

ที่เป็นเถ้าลอยชนิด 2ก แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

ตารางที่ 3-3 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์

งานวิจัย	รหัส	วัสดุ	w/b	f/b	w/b	f/b	ระยะเวลา		
		ชนิดของปูนซีเมนต์	ชนิดของตัวอย่าง	ชนิดของเถ้าลอย			ระยะเวลาบ่ม (วัน)	เผชิญคลอไรด์ (วัน)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (%)
สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2556)	OPC	I		-	0.40, 0.50	-	28, 91	91	5.0
	FAMM	I		High CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91	91	5.0
	FAH	I	Cement	Low CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91	91	5.0
	FAHM	I	paste	Low CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91	91	5.0
	FAB	I		Low CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91	91	5.0
	FABM	I		Low CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91	91	5.0
เอกศักดิ์ ฤกษ์มหา ลิขิต (2555)	OPC	I, V	Cement	-	0.40, 0.50	-	7	91	5.0
	FAMM	I, V	paste	High CaO	0.40, 0.50	0.30	7	91	5.0
ณรงค์เกียรติ สุนันท์วิริยาภรณ์ (2555)	OPC	I		-	0.40, 0.50	-	28, 91	91	5.0
	FAMM	I	Cement	High CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91	91	5.0
	FAH	I	paste	Low CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91	91	5.0
	FAHM	I		Low CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91	91	5.0

ตารางที่ 3-3 (ต่อ)

งานวิจัย	รหัส	วัสดุ	w/b	f/b	w/b	f/b	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ระยะเวลา เผชิญคลอ ไรต์ (วัน)	ความเข้มข้น คลอไรต์ (%)
		ชนิดของ ปูนซีเมนต์	ชนิด ของ ตัวอย่าง	ชนิดของ เถ้าลอย					
ลิตาภรณ์ อากาศรี ทองสกุล (2553)	OPC	I		-	0.40, 0.50	-	28, 91	91	5.0
	FAMM	I	Cement	High CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91	91	5.0
	FAB	I	paste	Low CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91	91	5.0
	FABM	I		Low CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91	91	5.0
ภูมินทร์ กิตติศักดิ์ บวร และ วสุ วิทย์ เขตปลา (2549)	OPC	I	Cement	-	0.40, 0.50	-	7	91	5.0
	FAMM	I	paste	High CaO	0.40, 0.50	0.30	7	91	5.0
Sumranwanich (2004)	OPC	I		-	0.30, 0.40, 0.50	-	1, 7, 28	28, 56, 91	3.0
	OPC	III		-	0.40	-	1, 7, 28	28, 56, 91	3.0
	OPC	V	Cement	-	0.40	-	1, 7, 28	28, 56, 91	3.0
	FAMM	I	paste	Low CaO	0.40	0.30, 0.50, 0.70	1, 7, 28	28, 56, 91	3.0
	FAMM	I		High CaO	0.40	0.30, 0.50, 0.70	1, 7, 28	28, 56, 91	3.0

ความสามารถกักเก็บคลอไรด์ (Chloride binding capacity) ของคอนกรีต หมายถึง ความสามารถของคอนกรีตในการยึดจับคลอไรด์ภายในเนื้อของคอนกรีตให้เป็นคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ในระบบวัสดุประสาน ประกอบด้วยปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ดังสมการที่ 3-1

$$C_{\text{tot}}(t_s, t_e) = C_{\text{fix}}(t_s, t_e) + C_{\text{free}}(t_s, t_e) \quad (3-1)$$

เมื่อ  $C_{\text{tot}}(t_s, t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมแล้วลอย (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{fix}}(t_s, t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมแล้วลอย (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{free}}(t_s, t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมแล้วลอย (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$t_s$  คือ อายุของซีเมนต์เพสต์ที่เริ่มเผชิญคลอไรด์ (วัน)

$t_e$  คือ อายุของซีเมนต์เพสต์ที่สิ้นสุดการเผชิญคลอไรด์ (วัน)

ความสามารถกักเก็บคลอไรด์ในระบบวัสดุประสานของคอนกรีตที่ผสมแล้วลอย สามารถแบ่งกระบวนการยึดจับคลอไรด์ออกเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ การยึดจับคลอไรด์ทางเคมี และการยึดจับคลอไรด์ทางกายภาพ โดยการยึดจับคลอไรด์ทางเคมี คลอไรด์ทำปฏิกิริยากับสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต,  $C_3A$  และเตรตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์,  $C_4AF$  ในปูนซีเมนต์ ซึ่งทำให้เกิดแคลเซียมคลอโรอลูมิเนต (Calcium chloraluminat) หรือเกลือฟรีเดล (Friedel's salt) ในขณะที่การยึดจับคลอไรด์ทางกายภาพ คลอไรด์ถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาปอซโซลานิก และผลผลิตอื่นในระบบวัสดุประสาน อาทิเช่น C-S-H, C-A-H เอทริงไต์ (Ettringite) และ โมโนซัลเฟต (Monosulfate) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการยึดจับคลอไรด์ มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับเวลา ทั้งอายุเมื่อเริ่มเผชิญคลอไรด์ และอายุเมื่อสิ้นสุดการเผชิญคลอไรด์ ดังสมการที่ 3-2

$$C_{\text{fix}}(t_s, t_e) = C_{\text{fix, chem}}(t_s, t_e) + C_{\text{fix, phy}}(t_e) \quad (3-2)$$

เมื่อ  $C_{\text{fix}}(t_s, t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับในคอนกรีตที่ผสมแล้วลอย

(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{fix, chem}}(t_s, t_c)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางเคมีของคอนกรีต  
ที่ผสมเถ้าลอย (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{fix, phy}}(t_s, t_c)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพของ  
คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$t_s$  คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มเผชิญคลอไรด์ (วัน)

$t_c$  คือ อายุของคอนกรีตที่สิ้นสุดการเผชิญคลอไรด์ (วัน)

#### 1. ความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมี (Chemical binding)

ความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมี โดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทำปฏิกิริยาระหว่างคลอไรด์กับ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ในช่วงระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมคลอโรลูมินเนต หรือเกลือฟรีเดิล (Calcium chloroaluminate or Friedel's salt) และแคลเซียมคลอโรเฟอร์ไรต์ (Calcium chloroferrite) ตามลำดับ แต่เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่นำไปสู่การยึดจับคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมีมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมีของ Sumranwanich (2004) มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับร่วมกับแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางกายภาพที่ทำการพัฒนาในงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยของ Sumranwanich (2004) สมมติอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการทำปฏิกิริยาในช่วงระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ ดังนี้

1. ให้ครึ่งหนึ่งของยิปซัมในปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับ  $C_3A$  และเกิดเป็นเอททริงไคต์ ส่วนยิปซัมที่เหลืออีกครึ่งหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ  $C_4AF$  และเกิดเป็นเอททริงไคต์เช่นกัน
2. ให้ครึ่งหนึ่งของเอททริงไคต์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างยิปซัม กับ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  กลายเปลี่ยนเป็นโมโนซัลเฟต
3. ให้ครึ่งหนึ่งของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ที่เหลือภายหลังจากทำปฏิกิริยากับยิปซัม จะทำปฏิกิริยากับน้ำและคลอไรด์ในช่วงระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ ทำให้เกิดเป็นผลผลิตไฮเดรชันและเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมคลอโรลูมินเนต หรือเกลือฟรีเดิล และแคลเซียมคลอโรเฟอร์ไรต์ตามลำดับ

สำหรับการคำนวณความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมี ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางเคมี ( $C_{\text{fix, chem}}(t_s, t_e)$ ) ถูกคำนวณดังสมการที่ 3-3 โดยคำนึงถึงผลกระทบของระยะเวลาเผชิญคลอไรด์

$$C_{\text{fix, chem}}(t) = \frac{C_{\text{fix, C}_3\text{A}}(t) + C_{\text{fix, C}_4\text{AF}}(t)}{B} \times 100 \quad (3-3)$$

เมื่อ  $C_{\text{fix, chem}}(t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางเคมี ในช่วงระยะเวลาของการเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$C_{\text{fix, C}_3\text{A}}(t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางเคมีของ  $\text{C}_3\text{A}$  ในช่วงระยะเวลาของการเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$C_{\text{fix, C}_4\text{AF}}(t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางเคมีของ  $\text{C}_4\text{AF}$  ในช่วงระยะเวลาของการเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

B คือ ปริมาณของวัสดุประสาน (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต (วัน)

#### 1.1 ความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมีของ $\text{C}_3\text{A}$

ความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมีของ  $\text{C}_3\text{A}$  สามารถคำนวณได้จาก อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ ( $\lambda_{\text{fix, C}_3\text{A}}$ ) คูณกับปริมาณของ  $\text{C}_3\text{A}$  ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ ดังสมการที่ 3-4 โดยอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกเสนอโดย Sumranwanich (2004) ดังสมการที่ 3-4a

$$C_{\text{fix, C}_3\text{A}}(t) = \lambda_{\text{fix, C}_3\text{A}} \times (m_{\text{hyd, C}_3\text{A}}(t_e) - m_{\text{hyd, C}_3\text{A}}(t_s)) \quad (3-4)$$

$$\lambda_{\text{fix, C}_3\text{A}} = \frac{1.12}{3.3 + e^{(0.03 \times \Delta\alpha_{\text{C}_3\text{A}})}} \quad (3-4a)$$

เมื่อ  $C_{\text{fix, C}_3\text{A}}(t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางเคมีของ  $\text{C}_3\text{A}$  ในช่วงระยะเวลาของการเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$\lambda_{\text{fix, C}_3\text{A}}$  คือ อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของ  $\text{C}_3\text{A}$  เนื่องจากกระบวนการทางเคมี

$m_{\text{hyd, C}_3\text{A}}(t_e)$  คือ ปริมาณของ  $\text{C}_3\text{A}$  ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ระยะเวลาสิ้นสุดการเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$m_{\text{hyd, C}_3\text{A}}(t_s)$  คือ ปริมาณของ  $\text{C}_3\text{A}$  ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ระยะเวลาเริ่มต้น

การเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$\Delta\alpha_{C_3A}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของ  $C_3A$  ในช่วงระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ (%)

1.2 ความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมีของ  $C_4AF$

ความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมีของ  $C_4AF$  สามารถคำนวณได้จาก อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ ( $\lambda_{\text{fix},C_4AF}$ ) คูณกับปริมาณของ  $C_4AF$  ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ ดังสมการที่ 3-5 โดยอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกเสนอ โดย Sumranwanich (2004) ดังสมการที่ 3-5a

$$C_{\text{fix},C_4AF}(t) = \lambda_{\text{fix},C_4AF} \times (m_{\text{hyd},C_4AF}(t_e) - m_{\text{hyd},C_4AF}(t_s)) \quad (3-5)$$

$$\lambda_{\text{fix},C_4AF} = \frac{1.12}{3.3 + e^{(0.03 \times \Delta\alpha_{C_4AF})}} \quad (3-5a)$$

เมื่อ  $C_{\text{fix},C_4AF}(t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางเคมีของ

$C_4AF$  ในช่วงระยะเวลาของการเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$\lambda_{\text{fix},C_4AF}$  คือ อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของ  $C_4AF$  เนื่องจากกระบวนการทางเคมี

$m_{\text{hyd},C_4AF}(t_e)$  คือ ปริมาณของ  $C_4AF$  ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ระยะเวลาสิ้นสุด

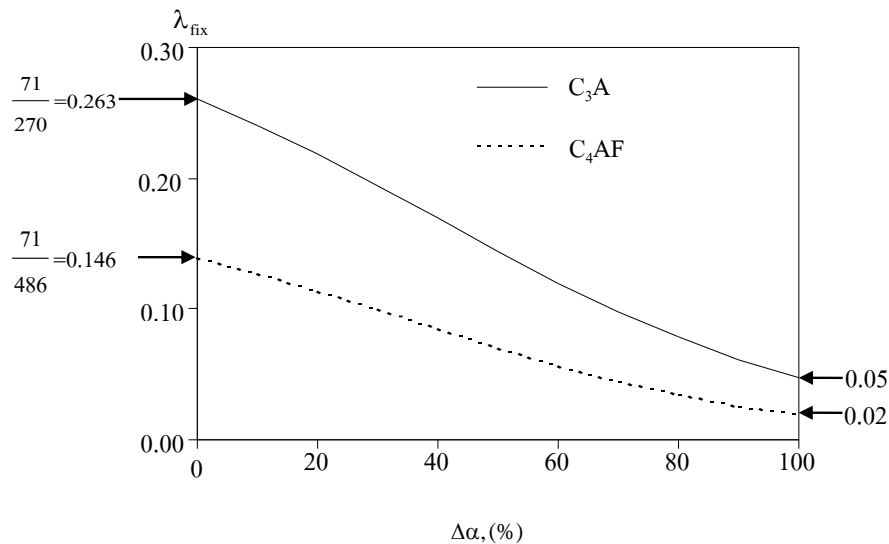
การเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$m_{\text{hyd},C_4AF}(t_s)$  คือ ปริมาณของ  $C_4AF$  ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ระยะเวลาเริ่มต้น

การเผชิญคลอไรด์ (กก./ ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$\Delta\alpha_{C_4AF}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของ  $C_4AF$  ในช่วงระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ (%)

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ( $\lambda_{\text{fix},C_3A}$  และ  $\lambda_{\text{fix},C_4AF}$ ) กับการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการเกิดปฏิกิริยา แสดงดังภาพที่ 3-3 โดยอธิบายได้ว่า เมื่อการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการเกิดปฏิกิริยาในช่วงเวลาเผชิญคลอไรด์ ( $\Delta\alpha$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับลดลง กล่าวคือ การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$ ,  $C_4AF$  และ น้ำ ในช่วงเวลาการเผชิญคลอไรด์มีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เหลือปริมาณของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ที่จะทำปฏิกิริยากับคลอไรด์น้อยลง ส่งผลให้อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางเคมีมีค่าลดลงตามไปด้วย



ภาพที่ 3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของ C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF และความแตกต่างของดัชนีการเกิดปฏิกิริยา (Sumranwanich, 2004)

## 2. ความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ (Physical binding)

ความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ ( $C_{\text{fix,phy}}$ ) คือ ปริมาณที่คลอไรด์ถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาปอซโซลานิก และผลผลิตอื่น ๆ ของปฏิกิริยาในระบบวัสดุประสาน เช่น CSH, CAH, CAFH, เอททริงไกต์ และ โมโนซัลเฟต เป็นต้น ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการพัฒนาแบบจำลองจึงมีความจำเป็นที่ต้องสมมุติผลผลิตไฮเดรชันและปอซโซลานิกในช่วงระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ ดังนี้

1. ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก ถูกแสดงดังตารางที่ 2-5 และ ตารางที่ 2-8

2. ให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีความสามารถในการยึดจับคลอไรด์ได้เท่ากัน

โดยปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ ( $C_{\text{fix,phy}}(t_c)$ ) คำนวณได้จากผลรวมของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก ที่ระยะเวลาสิ้นสุดการเผชิญคลอไรด์คูณกับอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพ ( $\phi_{\text{fix}}$ ) ดังสมการที่ 3-6 ซึ่งแบบจำลองถูกปรับปรุงต่อจากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) ที่คำนึงถึงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และความละเอียดของปูนซีเมนต์ และใน



งานวิจัยนี้เสนอให้แบบจำลองคำนึงถึงผลกระทบของความละเอียดของแก้วลอย และความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญไว้ในแบบจำลองด้วย ดังสมการที่ 3-6a

$$C_{\text{fix,phy}}(t_e) = \frac{\left( \frac{\phi_{\text{fix}}}{100} \times \sum M_{\text{product}}(t_e) \right)}{B} \times 100 \quad (3-6)$$

$$\phi_{\text{Fixed}} = \left( \frac{0.044 \times (w/b)^{-0.67}}{0.035 + \text{EXP}(3.25 \times w/b) - 3.2} \times \frac{C_{\text{tot}}}{C_{\text{tot}} + 0.01} \right) \times \left( \frac{F_c}{3190} \right)^{0.25} \\ \times \left( \frac{F_f}{3510} \right)^{0.65} + \frac{1}{F_f + 1} \times \left( \frac{Cl_{\text{ex}}}{0.513} \right)^{0.292} \quad (3-6a)$$

เมื่อ  $C_{\text{fix,phy}}(t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$\phi_{\text{fix}}$  คือ อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพ (% โดยน้ำหนักของผลผลิต)

$\sum M_{\text{product}}$  คือ ผลรวมของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ระยะเวลาสิ้นสุดการเผชิญคลอไรด์ (กก./ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

B คือ ปริมาณของวัสดุประสาน (กก./ม<sup>3</sup> ของคอนกรีต)

$C_{\text{tot}}$  คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

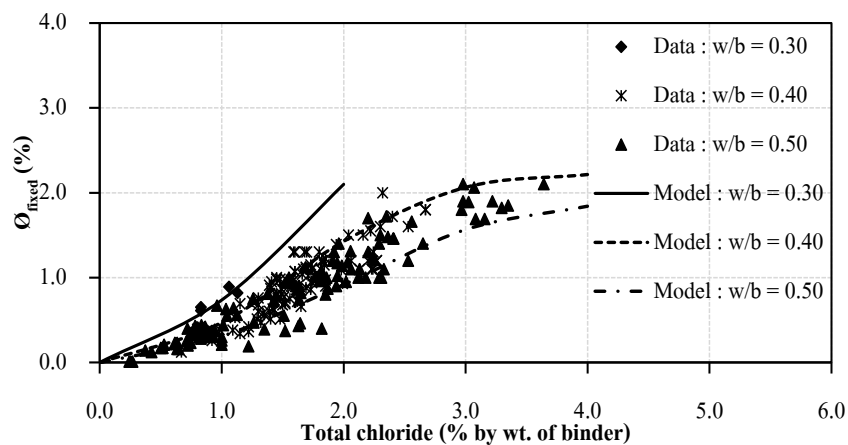
$F_c$  คือ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ (ซม<sup>2</sup>/กรัม)

$F_f$  คือ ความละเอียดของแก้วลอย (ซม<sup>2</sup>/กรัม)

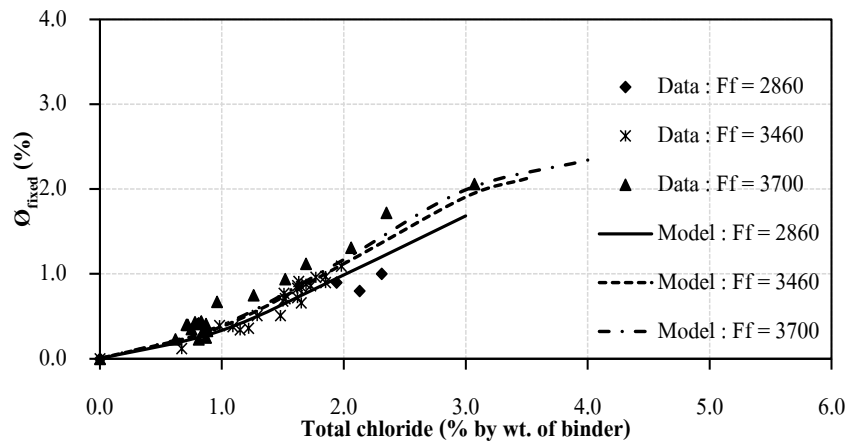
$Cl_{\text{ex}}$  คือ ความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญ (โมล/ลิตร)

โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพ กับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ถูกแสดงดังภาพที่ 3-4 กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง ส่งผลให้อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพของผลผลิตเพิ่มขึ้น (Sumranwanich & Tangtermsirikul, 2004) เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และแก้วลอยมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ดังนั้นทำให้มีผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยามากขึ้น อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดของแก้วลอย ดังภาพที่ 3-5 พบว่า แก้วลอยที่มีความละเอียดสูงส่งผลให้กระบวนการยึดจับคลอไรด์ทางกายภาพสูงขึ้น เนื่องจากแก้วลอยที่มีความละเอียดสูงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าแก้วลอยที่มีความละเอียดต่ำ ทำให้ผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราส่วน

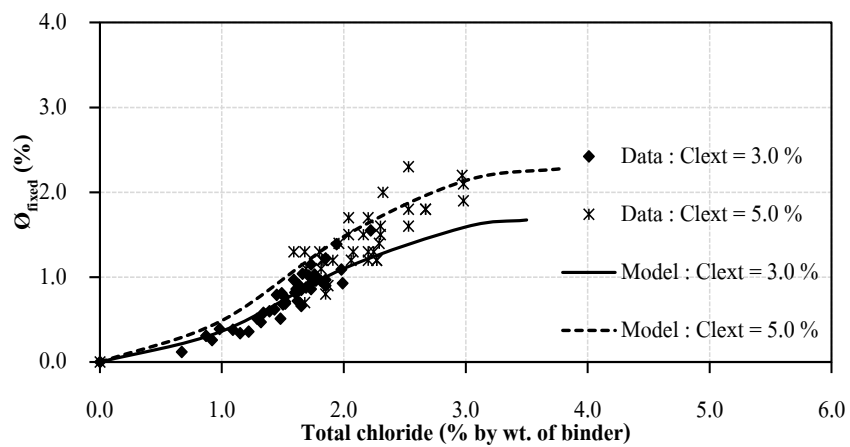
คลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพจึงมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญกับอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพ ดังภาพที่ 3-6 พบว่าอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญ (Dhir & Jones, 1999) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นช่วยเพิ่มโอกาสในการยึดเกาะคลอไรด์ทางกายภาพที่ผิวของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก



ภาพที่ 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ



ภาพที่ 3-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพ กับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ที่ความละเอียดของเถ้าลอยต่าง ๆ



ภาพที่ 3-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทางกายภาพ กับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ที่ความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญต่าง ๆ

## แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

การพัฒนาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ถูกปรับปรุงต่อจากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) สาเหตุที่ทำการพัฒนาแบบจำลองนี้ เนื่องจากเมื่อตรวจสอบผลที่ได้จากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) กับผลการทดลองที่ทำการขยายขอบเขต พบว่า ผลที่ได้ให้ค่าไม่สอดคล้องกัน โดยผลการทดลองที่นำมาตรวจสอบนี้มีขอบเขตของข้อมูลอยู่นอกช่วงกับผลการทดลองที่ใช้พัฒนาแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) ดังตารางที่ 3-4 ที่แสดงขอบเขตของข้อมูลที่ใช้พัฒนาแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนา

ตารางที่ 3-4 ขอบเขตของข้อมูลที่ใช้พัฒนาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของ Sumranwanich (2004) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนา

ตัวแปรที่มีผลกระทบ	ขอบเขตของตัวแปร	
	Sumranwanich (2004)	แบบจำลองที่ถูกพัฒนา
w/b	0.50	0.30, 0.40, 0.50
f/b	0.20	0.20, 0.40
$F_c(\text{cm}^2/\text{g})$	3190	3190-3760
$F_f(\text{cm}^2/\text{g})$	3700	2460-3700
ชนิดของปูนซีเมนต์	I	I, V
ชนิดของเถ้าลอย	2ก	2ก, 2ข
ความเข้มข้นคลอไรด์ภายในตัวอย่าง ( $Cl_{in}$ ), (%)	0.94	0.94-2.80

หมายเหตุ: เถ้าลอยถูกแบ่งตาม มอก. 2135-2545 โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- “2ก” หมายถึง เถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ก เป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าร้อยละ 10
- “2ข” หมายถึง เถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ข เป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่าร้อยละ 10

การพัฒนาแบบจำลองนี้อาศัยการขยายฐานข้อมูลผลการทดลองการแพร่ออกคลอไรด์ (Chloride dissolving test) ที่มีจำนวนมากขึ้น โดยคำนึงถึงผลกระทบของการพัฒนาโครงสร้างโพรง ช่องว่างของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งแบ่งออกเป็นค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่าง (Average pore diameter,  $d_{ave}(t)$ ) และความพรุนทั้งหมดในคอนกรีต (Total porosity,  $n(t)$ ) กล่าวคือ เมื่อเพสต์มีความที่บ่มน้ำส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่าง และความพรุนทั้งหมดในคอนกรีตลดลง ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้แบบจำลองยังพิจารณาถึงผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต ( $R_p$ ) ปริมาณน้ำในโพรงช่องว่างของคอนกรีต ( $C_w(x, t)$ ) และอัตราส่วนแก้ลวตต่อวัสดุประสาน ( $f/b$ ) กล่าวคือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต และปริมาณน้ำในคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น และการใช้แก้ลวตแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ลดลงด้วย

ซึ่งก่อนที่จะพัฒนาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต ได้แก่ แบบจำลองค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่าง และความพรุนทั้งหมดของคอนกรีต

#### 1. โครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore structure of concrete)

แบบจำลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore structure of concrete.)

ประกอบด้วย 2 แบบจำลองย่อย ได้แก่ แบบจำลองค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่าง (Average pore diameter model) และแบบจำลองความพรุนทั้งหมด (Total porosity model) ของคอนกรีตผสมแก้ลวต โดยแบบจำลองจะพิจารณาถึงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ( $w/b$ ) ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประสาน ( $\alpha_{ave}(t)$ ) ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ( $F_c$ ) ปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) อัตราส่วนแก้ลวตต่อวัสดุประสาน ( $f/b$ ) และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในแก้ลวต ( $CaO_p$ ) นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังมุ่งปรับปรุงแบบจำลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต ให้คำนึงถึงผลกระทบของความละเอียดของแก้ลวต ( $F_p$ ) เพิ่มเข้ามาในแบบจำลองด้วย โดยแบบจำลองถูกปรับปรุงด้วยผลการทดลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) ต่อจากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) ซึ่งงานวิจัยของณรงค์เกียรติ สุนันท์วิริยาภรณ์ (2553) ถูกนำมาขยายฐานข้อมูลผลการทดลองเพิ่มขึ้นในแบบจำลองนี้ โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และแก้ลวต ดังตารางที่ 3-5 และส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลอง ดังตารางที่ 3-6

### 1.1 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่าง (Average pore diameter)

ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่าง ( $d_{ave}(t)$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประสาน ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ชนิดของปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของ  $C_3A$  แตกต่างกัน ความละเอียดของเถ้าลอย อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน และปริมาณ  $CaO$  ในเถ้าลอย ดังสมการที่ 3-7 และสมการที่ 3-8

ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่าง: สำหรับคอนกรีตล้วน

$$d_{ave}(t) = e^{((7.257)+((15.5 \times w/b - 11.095) \times \alpha_{ave}(t)/100))} \times \left( \frac{17.588}{F_c^{0.229}} - 1.772 \right) \times (0.00894(C_3A)^{1.5} - 0.069(C_3A) + 1.360) \quad (3-7)$$

ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่าง: สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

$$d_{ave}(t) = e^{(((7 \times w/b) + 2.77) + ((-3 \times f/b - 2.68) \times \alpha_{ave}(t)/100))} \times \left( \frac{17.588}{F_c^{0.229}} - 1.772 \right) \times (0.00894(C_3A)^{1.5} - 0.069(C_3A) + 1.360) \\ \times \left( \frac{51.755}{F_f^{0.145}} - 15.183 \right) \times \left( \frac{0.221}{\%CaO_f^{1.692}} + 0.999 \right) \quad (3-8)$$

เมื่อ  $d_{ave}(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างของคอนกรีต (นาโนเมตร)

$w/b$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

$\alpha_{ave}(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของระบบวัสดุประสานที่เวลา  $t$  (%)

$F_c$  คือ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ( $cm^2/g$ )

$C_3A$  คือ ปริมาณของ  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์ (% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

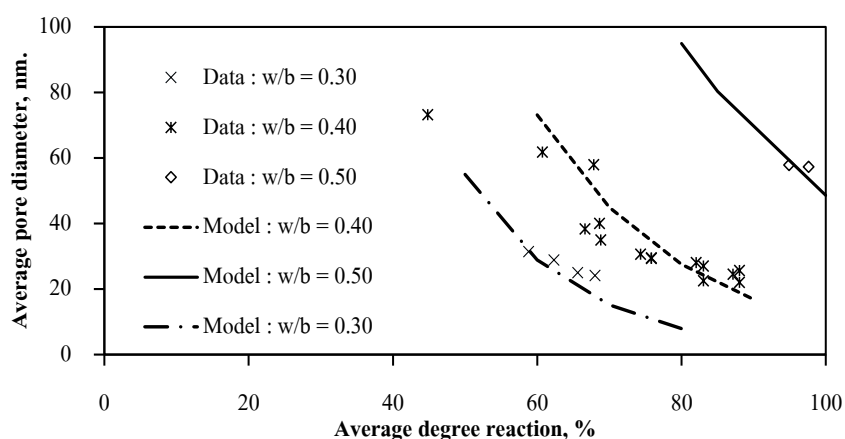
$f/b$  คือ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

$F_f$  คือ ความละเอียดของเถ้าลอย ( $cm^2/g$ )

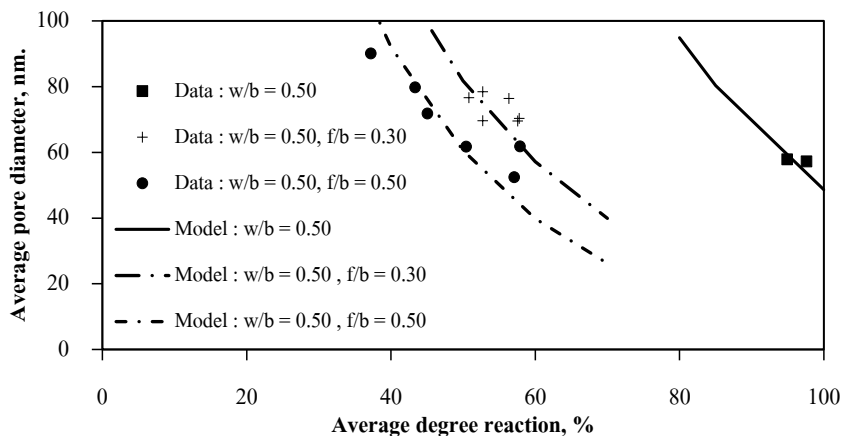
$\%CaO_f$  คือ ปริมาณของ  $CaO$  ในเถ้าลอย (% โดยน้ำหนักของเถ้าลอย)

เมื่อนำผลการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย พบว่า เมื่อค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประสานสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างมีค่าลดลง เนื่องจากดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประสานทำให้ผลผลิตที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นำไปสู่การปรับปรุงโครงสร้างขนาดเล็กของคอนกรีต นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างเพิ่มขึ้น เนื่องจาก

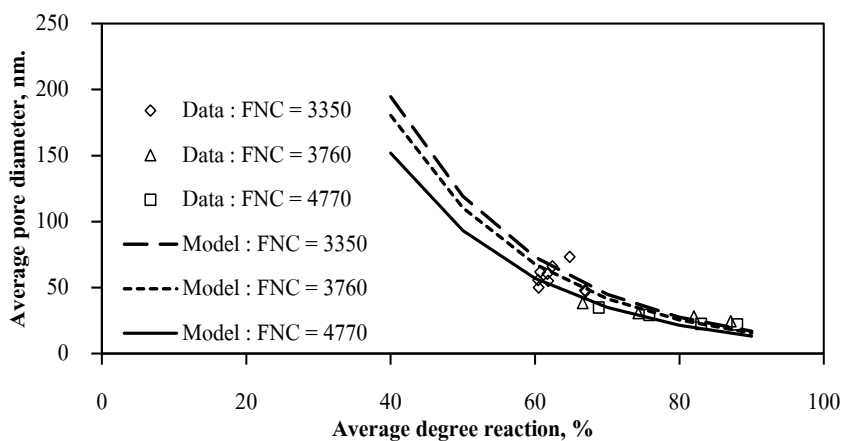
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังภาพที่ 3-7 และการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ขนาดและโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีตเกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคกลมสามารถกระจายตัวได้ดี ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยลดลง ดังภาพที่ 3-8 การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูง ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างมีค่าลดลง ดังภาพที่ 3-9 เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดต่ำ ทำให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลผลิตนี้นำไปสู่การปรับปรุงโครงสร้างขนาดเล็กของคอนกรีต ทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างลดลง เช่นเดียวกันกับการใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูง ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างลดลง เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่มีความละเอียดต่ำ ทำให้ผลผลิตเกิดขึ้นสูง คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 3-10 (Khatib, Mangat & Wright 2014; Yu & Ye, 2013; Chindaprasirt, Jaturapitakkul & Sinsiri 2007)



ภาพที่ 3-7 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ

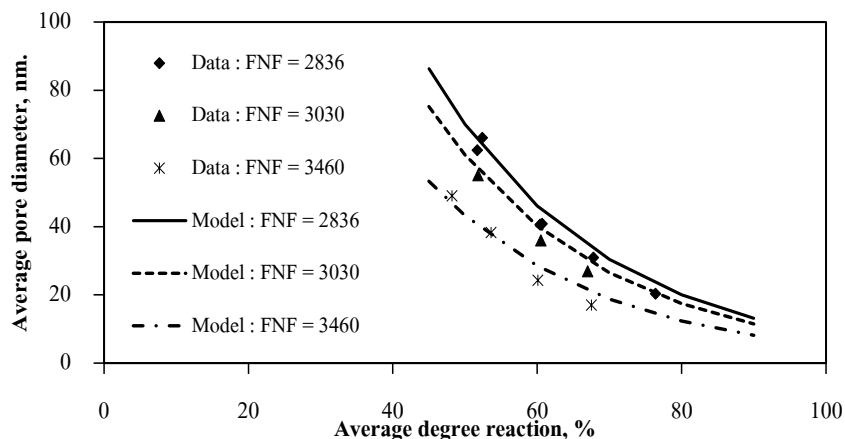


ภาพที่ 3-8 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงช่องว่างที่ได้จากการทดลองเทียบกับผล  
ที่ได้จากแบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน  
เท่ากับ 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานต่าง ๆ



ภาพที่ 3-9 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงช่องว่างที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จาก  
แบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40  
และความละเอียดของปูนซีเมนต์ต่าง ๆ





ภาพที่ 3-10 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงช่องว่างที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และความละเอียดของเถ้าลอยต่าง ๆ

### 1.2 ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีต (Total porosity)

ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีต ( $n(t)$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประสาน ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ชนิดของปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของ  $C_3A$  แตกต่างกัน ความละเอียดของเถ้าลอย อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน และปริมาณ  $CaO$  ในเถ้าลอย ดังสมการที่ 3-9 และสมการที่ 3-10 ตามลำดับ

ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีต: สำหรับคอนกรีตล้วน

$$n(t) = e^{((6.095) + ((11 \times w/b - 8.310) \times \alpha_{ave}(t)/100))} \times \left( \frac{7.960}{F_c^{0.1}} - 2.490 \right) \times (0.0069(C_3A)^{1.5} - 0.057(C_3A) + 1.312) \quad (3-9)$$

ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงช่องว่าง: สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

$$n(t) = e^{((4.351) + (((-68.887 \times f/b^4) + (29.483 \times f/b) - 2.668) \times w/b) + ((69.130 \times f/b^4) + (-25.108 \times f/b) + 3.039)) \times \alpha_{ave}(t)/100)} \times \left( \frac{7.960}{F_c^{0.1}} - 2.490 \right) \times (0.0069(C_3A)^{1.5} - 0.057(C_3A) + 1.312) \times \left( \frac{17.224}{F_f^{0.142}} - 4.605 \right) \times \left( \frac{0.312}{\%CaO_f^{1.739}} + 0.788 \right) \quad (3-10)$$

เมื่อ  $n(t)$  คือ ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีต (%)

$w/b$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

$\alpha_{ave}(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของระบบวัสดุประสานที่เวลา  $t$  (%)

$F_c$  คือ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ( $\text{ชม}^2/\text{กรัม}$ )

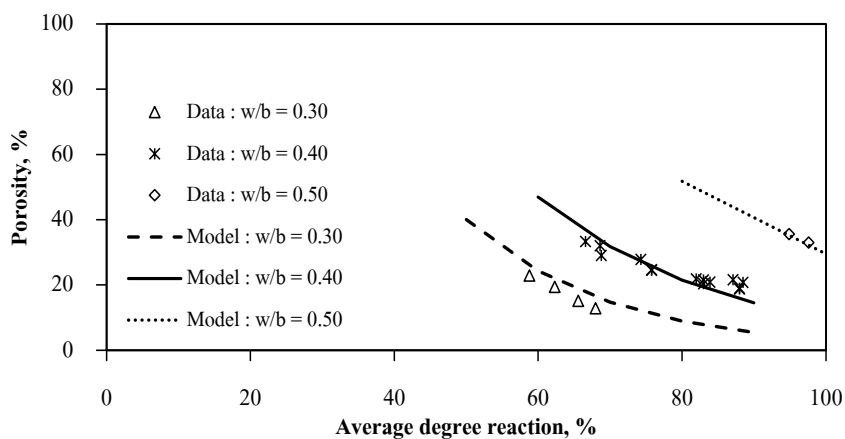
$C_{3A}$  คือ ปริมาณ  $C_{3A}$  ในปูนซีเมนต์ (% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

$f/b$  คือ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

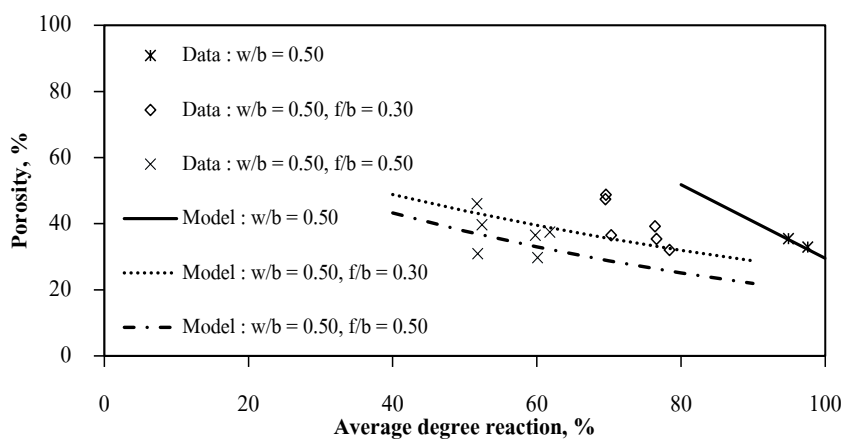
$F_f$  คือ ความละเอียดของเถ้าลอย ( $\text{ชม}^2/\text{กรัม}$ )

$\%CaO_f$  คือ ปริมาณ  $CaO$  ในเถ้าลอย (% โดยน้ำหนักของเถ้าลอย)

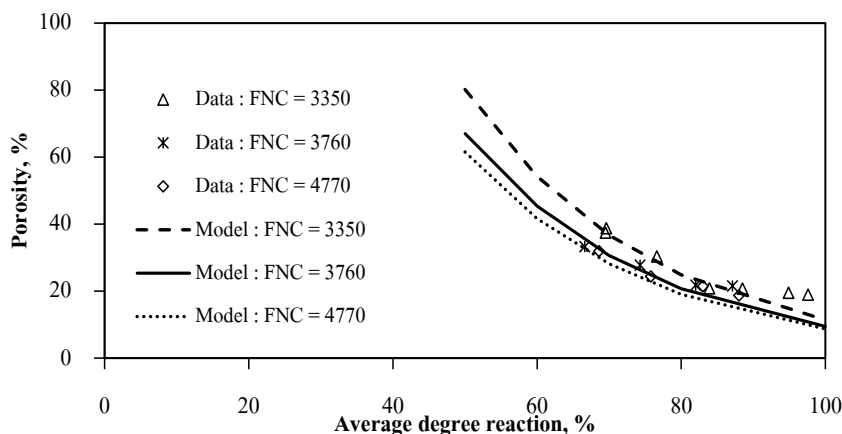
เมื่อนำผลการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย พบว่า เมื่อค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประสานสูงขึ้น ส่งผลให้ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีตลดลง เนื่องจากดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประสานทำให้ผลผลิตที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นำไปสู่การปรับปรุงโครงสร้างขนาดเล็กของคอนกรีต เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นทำให้ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น เป็นเหตุให้ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 3-11 และการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในสัดส่วนที่เหมาะสม ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นดังกล่าวทำให้ความพรุนทั้งหมดภายในคอนกรีตลดลง ดังภาพที่ 3-12 และการใช้ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูง ส่งผลให้ความพรุนทั้งหมดมีค่าลดลง ดังภาพที่ 3-13 เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดต่ำ ทำให้ความพรุนทั้งหมดลดลง (Khatib, Mangat & Wright 2014; Yu & Ye, 2013)



ภาพที่ 3-11 ความพรุนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ



ภาพที่ 3-12 ความพรุนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานต่าง ๆ



ภาพที่ 3-13 ความพรุนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของซีเมนต์เพสต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และความละเอียดของปูนซีเมนต์ต่าง ๆ

## 2. แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient model)

แบบจำลองถูกปรับปรุงขึ้นจากผลการทดลองของภูมินทร์ กิตติศักดิ์บวร และวสุวิทย์เขตปลา (2549); ณรงค์ฤทธิ์ เย็นอารมณ์ และเกษศุดา เลาอารีกิจ (2548); Maruya (1995) โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ดังตารางที่ 3-7 และส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลอง ดังตารางที่ 3-8 ซึ่งแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลากับการพัฒนาโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต อัตราส่วนระหว่างปริมาณของเพสต์ต่อปริมาณคอนกรีต ( $R_p$ ) ปริมาณของน้ำในโพรงช่องว่างของคอนกรีตหรือปริมาณน้ำในคอนกรีต ( $C_w(x, t)$ ) และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน ( $f/b$ ) โดยแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์จะพิจารณาทั้งชั้นผิวหน้า และชั้นด้านใน เพราะโดยทั่วไปแล้วสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ชั้นผิวหน้าจะมีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ชั้นด้านใน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแบ่งสัมประสิทธิ์การแพร่ออกเป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นผิวหน้า และชั้นด้านใน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sumranwanich, 2004 ซึ่งแบบจำลองที่ถูกพัฒนา แสดงดังสมการที่ 3-11 ถึง สมการที่ 3-14 สำหรับคอนกรีตล้วนและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์: สำหรับคอนกรีตล้วนที่ชั้นผิวหน้า

$$D_{Cl}(1,t) = \frac{0.000007}{0.00067 + e^{((-0.021 \times (200 \times d_{ave}^{0.35} \times \frac{n(t)}{100})^{0.25})}} \times R_p^{1.04} \times \left( \frac{C_w(1,t)}{100} \right)^3 \quad (3-11)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์: สำหรับคอนกรีตผิวที่ชั้นด้านใน

$$D_{Cl}(x,t) = \frac{0.0000055}{0.00067 + e^{((-0.021 \times (200 \times d_{ave}^{0.35} \times \frac{n(t)}{100})^{0.25})}} \times R_p^{1.04} \times \left( \frac{C_w(x,t)}{100} \right)^3 \quad (3-12)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์: สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ชั้นผิวหน้า

$$D_{Cl}(1,t) = \frac{0.000006}{0.00067 + e^{((-0.021 \times (200 \times d_{ave}^{0.35} \times \frac{n(t)}{100})^{0.25})}} \times R_p^{1.04} \times \left( \frac{C_w(1,t)}{100} \right)^3 \\ \times (37.766 \times (f/b)^{4.4} - 25.757 \times (f/b)^{3.8} - 1.796 \times (f/b)^{1.5} + 1) \quad (3-13)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์: สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ชั้นด้านใน

$$D_{Cl}(x,t) = \frac{0.000004}{0.00067 + e^{((-0.021 \times (200 \times d_{ave}^{0.35} \times \frac{n(t)}{100})^{0.25})}} \times R_p^{1.04} \times \left( \frac{C_w(x,t)}{100} \right)^3 \\ \times (37.766 \times (f/b)^{4.4} - 25.757 \times (f/b)^{3.8} - 1.796 \times (f/b)^{1.5} + 1) \quad (3-14)$$

เมื่อ  $D_{Cl}(1, t)$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ชั้นผิวหน้า ที่ระยะเวลา  $t$  ใด ๆ (ซม<sup>2</sup>/ วัน)

$D_{Cl}(x, t)$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ชั้นด้านใน ที่ระยะเวลา  $t$  ใด ๆ (ซม<sup>2</sup>/ วัน)

$d_{ave}(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงช่องว่างของคอนกรีต (นาโนเมตร)

$n(t)$  คือ ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีต (%)

$C_w(1, t)$  คือ ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในโพรงช่องว่างที่ชั้นที่ 1 ที่ระยะเวลา  $t$  (%)

$C_w(x, t)$  คือ ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในโพรงช่องว่างที่ชั้นที่  $x$  ที่ระยะเวลา  $t$  (%)

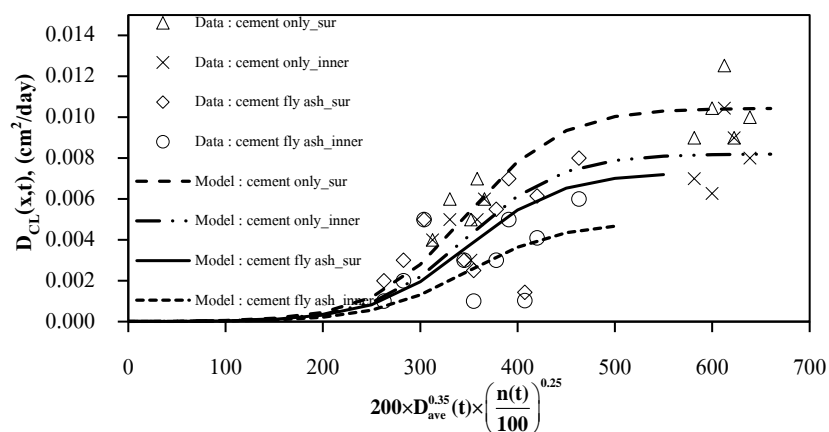
$f/b$  คือ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

$R_p$  คือ อัตราส่วนของเพสต์

เมื่อนำแบบจำลองสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์กับ

โครงสร้างโพรงช่องว่างในคอนกรีต พบว่า เมื่อความสัมพันธ์ของโครงสร้างโพรงช่องว่าง หรือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงช่องว่างกับความพรุนทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากคลอไรด์จะแพร่ผ่านโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดสัมประสิทธิ์การ

แพร่คลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยได้ เนื่องจากเถ้าลอยทำให้ขนาดและโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น เพราะเถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคกลมสามารถกระจายตัวได้ดีทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงช่องว่าง และความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (Cheewaket, Jaturapitakkul & Chalee, 2013; Leng, Feng & Lu, 2000) ดังภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์ ที่ผสมเถ้าลอย

ตารางที่ 3-5 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ใช้  
สำหรับสร้างแบบจำลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์

งานวิจัย	ณรงค์เกียรติ สุนันท์วิทยากรณ์ (2553)				Sumranwanich (2004)			
	I	FH	FAH	FA HM	I	III	V	FL
ชนิดของวัสดุ ประสาน								
Chemical compositions								
SiO <sub>2</sub> (%)	19.87	39.40	65.15	61.64	20.61	20.73	20.97	45.88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.87	17.93	22.06	21.86	5.03	4.49	3.49	26.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.55	12.92	4.17	5.85	3.03	3.32	4.34	10.94
CaO (%)	65.03	19.19	1.25	2.13	64.89	64.89	62.86	8.28
SO <sub>3</sub> (%)	0.73	3.03	0.18	0.24	2.70	2.76	2.12	1.04
LOI (%)	2.26	0.17	3.78	4.09	1.23	1.23	1.21	0.17
Physical properties								
Specific gravity	3.10	2.29	2.24	2.23	3.15	3.22	3.13	2.03
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3350	2836	2860	3030	3190	4770	3760	3460

หมายเหตุ: "I, III, V" หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ

"FH" หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ข

"FL" หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ก

"FAH, FAHM" หมายถึง การใช้เถ้าลอยจังหวัดระยองชนิดเถ้าลอยบิทุมินัส Hunter valley เถ้าลอยบิทุมินัส Hunter valley and Melawan ที่เป็นชนิด 2ก แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

ตารางที่ 3-6 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์

งานวิจัย	รหัส	วัสดุ			w/b	f/b	ระยะเวลาบ่ม (วัน)
		ชนิดของปูนซีเมนต์	ชนิดของตัวอย่าง	ชนิดของเถ้าลอย			
ณรงค์เกียรติ สุนันท์วิริยาภรณ์ (2553)	OPC	I	Cement paste	-	0.40, 0.50	-	28, 91
	FH	I	Cement paste	High CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91
	FAH	I	Cement paste	Low CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91
	FAHM	I	Cement paste	Low CaO	0.40, 0.50	0.30, 0.50	28, 91
Sumranwanich (2004)	OPC	I	Cement paste	-	0.30, 0.40	-	3, 7, 28, 91
	OPC	III	Cement paste	-	0.40	-	3, 7, 28, 91
	OPC	V	Cement paste	-	0.40	-	3, 7, 28, 91
	FL	I	Cement paste	Low CaO	0.40	0.30	3, 7, 28, 91
	FL	I	Cement paste	Low CaO	0.40	0.50, 0.70	28

หมายเหตุ: "I, III, V" หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ

"FH" หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ข

"FL" หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ก

"FAH" หมายถึง การใช้เถ้าลอยจังหวัดระยองชนิดเถ้าลอยบิทุมินัส Hunter valley เป็นเถ้าลอยชนิด 2ก

"FAHM" หมายถึง การใช้เถ้าลอยจังหวัดระยองชนิดเถ้าลอยบิทุมินัส Hunter valley and Melawan เป็นเถ้าลอยชนิด 2ก



ตารางที่ 3-7 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ใช้  
สำหรับสร้างแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

งานวิจัย	ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บวร และวสุ วิทยเขตปภา (2549)		ณรงค์ฤทธิ์ เย็นอารมณ์ และเกษสุดา เลอาารีกิจ (2548)		Maruya (1995)	
	I	V	I	FH	I	FA
ชนิดของวัสดุ ประสาน						
Chemical compositions						
SiO <sub>2</sub> (%)	20.80	21.52	18.46	37.58	20.50	55.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.50	3.56	4.64	19.49	5.00	5.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.16	4.51	3.29	13.39	3.00	2.20
CaO (%)	64.97	66.70	66.45	18.81	63.40	6.90
SO <sub>3</sub> (%)	2.96	2.11	2.70	3.46	2.00	0.50
LOI (%)	2.89	1.74	2.90	0.61	1.80	1.00
Physical properties						
Specific gravity	3.15	3.13	3.15	2.20	-	-
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3190	3760	3200	3556	3190	3700

หมายเหตุ: “I, V” หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ตามลำดับ

“FH” หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ข

“FA” หมายถึง เถ้าลอยต่างประเทศชนิด 2ก

ตารางที่ 3-8 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

งานวิจัย	รหัส	วัสดุ			w/b	f/b	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ระยะเวลาแช่น้ำ (วัน)	ความเข้มข้นคลอไรด์ที่ใช้ผสม (%)
		ชนิดของปูนซีเมนต์	ชนิดของตัวอย่าง	ชนิดของเถ้าลอย					
ภูมินทร์ กิตติศักดิ์ บวร และวสุ วิทย์ เขตปลา (2549)	OPC	I	Cement paste	-	0.40, 0.50	-	7	91	2.8
	OPC	V	Cement paste	-	0.40, 0.50	-	7	91	2.8
ณรงค์ฤทธิ์ เขื่อน อารมณี และเกษศสุดา เลอาารีกิจ(2548)	OPC	I	Cement paste	-	0.30, 0.50	-	3	28	2
	OPC	I	Cement paste	-	0.40	-	3	28, 140	2
	FH	I	Cement paste	High CaO	0.30, 0.50	0.20, 0.40	3	28	2
	FH	I	Cement paste	High CaO	0.40	0.20, 0.40	3	28, 140	2
Maruya (1995)	OPC	I	Mortar	-	0.50	-	28	28, 91, 182	0.94
	FA	I	Mortar	Low CaO	0.50	0.20	28	28, 91, 182	0.94

หมายเหตุ: "I, V" หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ตามลำดับ

"FH" หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด 2ข

"FA" หมายถึง เถ้าลอยต่างประเทศชนิด 2ก

## แบบจำลองการดึงคูคิออนคลอไรด์

แบบจำลองการดึงคูคิออนคลอไรด์ถูกปรับปรุงต่อจากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) สาเหตุที่ทำการพัฒนาแบบจำลองนี้ เนื่องจากเมื่อตรวจสอบผลที่ได้จากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) กับผลการทดลองที่ทำการขยายขอบเขต พบว่า ผลที่ได้ให้ค่าไม่สอดคล้องกัน โดยผลการทดลองที่นำมาตรวจสอบนี้มีขอบเขตของข้อมูลอยู่นอกช่วงกับผลการทดลองที่ใช้พัฒนาแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) ดังตารางที่ 3-9 ที่แสดงขอบเขตของข้อมูลที่ใช้พัฒนาแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนา

ตารางที่ 3-9 ขอบเขตของข้อมูลที่ใช้พัฒนาแบบจำลองการดึงคูคิออนคลอไรด์  
ของ Sumranwanich (2004) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนา

ตัวแปรที่มีผลกระทบ	ขอบเขตของตัวแปร	
	Sumranwanich (2004)	แบบจำลองที่ถูกพัฒนา
w/b	0.50	0.30, 0.40, 0.50
f/b	0.20	0.20, 0.30, 0.50
$F_c(\text{cm}^2/\text{g})$	3190	3190-3480
$F_f(\text{cm}^2/\text{g})$	3700	2460-3510
ชนิดของปูนซีเมนต์	I	I, V
ชนิดของเถ้าลอย	2ก	2ก, 2ข
ความเข้มข้นคลอไรด์ภายนอกที่ ตัวอย่างเผชิญ ( $Cl_{ex}$ ), (%)	1.82	1.82, 3, 5

หมายเหตุ : เถ้าลอยถูกแบ่งตาม มอก. 2135-2545 โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

“2ก” หมายถึง เถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ก เป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าร้อยละ 10

“2ข” หมายถึง เถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ข เป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่าร้อยละ 10

โดยแบบจำลองถูกขยายฐานข้อมูลผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต (Chloride penetration test) ของสุรชาติ ฤกษ์โหรา (2556); เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต (2555), Sary and Chheat (2010) นุสรรา ขยันกิจ และเทอดไกร ไชยมาตร (2552); Maruya (1995) ที่คำนึงถึงผลกระทบของปริมาณวัสดุประสาน (B) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรคอนกรีต ( $R_p$ ) ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีต ( $m(t)$ ) ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ( $F_c$ ) ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ชั้นที่ 1 ( $C_{free}(1,t)$ ) และค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงช่องว่างของคอนกรีต ( $d_{ave}(t)$ ) นอกจากนี้ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน ( $f/b$ ) ถูกพิจารณาเพิ่มในแบบจำลองด้วย เนื่องจากอัตราการคั่งคู่อิออนคลอไรด์ในมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์และคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย กล่าวคือ ประจุบวกที่ผนังโพรงช่องว่างของวัสดุประสานมีค่าต่ำลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน (Maruya, Tangtermsirikul & Matsuoka, 1998) โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ดังตารางที่ 3-10 และส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลอง ดังตารางที่ 3-11

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์สามารถแสดงโดยฟลักซ์ของคลอไรด์เนื่องจากกลไกการคั่งคู่อิออน (Flux of ion adsorption) รวมกับฟลักซ์ของคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion) ที่ระยะ 1 เซนติเมตรเท่านั้น ทำนองเดียวกับ Sumranwanich, Tangtermsirikul and Maruya (2004) โดยฟลักซ์ของคลอไรด์เนื่องจากกลไกการคั่งคู่อิออนถูกคำนวณย้อนกลับจากผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (Chloride penetration test) ซึ่งแบบจำลองการคั่งคู่อิออนคลอไรด์ถูกแสดงดังสมการที่ 3-15 และ สมการที่ 3-16 สำหรับคอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตามลำดับ

การคั่งคู่อิออนคลอไรด์: สำหรับคอนกรีตล้วนที่ชั้นที่ 1

$$F_{ad}(1,t) = \left( \frac{2.25 \times 10^{-7}}{(0.081) + \text{EXP}((-5.791) \times w/b)} \right) \times B^{0.190} \times (3.2 \times R_p^{0.620}) \times \left( \frac{0.760}{0.650 + e^{(-5.960) \times (m(t)/100)}} \right) \times \left( 0.480 + 0.500 \times \left( \frac{F_c}{3028} \right)^{-0.900} \right) \times (-18.145 \times (C_{free}(1,t))^{0.018} + 18.997) \times \left( \frac{d_{ave}(t)}{57.5} \right)^{0.160} \quad (3-15)$$

การดึงคูคือนคลอไรด์ : สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ชั้นที่ 1

$$\begin{aligned}
 F_{ad}(1,t) &= ((4 \times 10^{-7}) / ((0.170) + \text{EXP}((-3.807) \times w/b))) \times B^{0.190} \times (3.2 \times R_p^{0.620}) \\
 &\times \left( \frac{0.760}{0.650 + e^{(-5.960) \times (n(t)/100)}} \right) \times \left( 0.480 + 0.500 \times \left( \frac{F_c}{3028} \right)^{-0.900} \right) \\
 &\times (-18.145 \times (C_{free}(1,t))^{0.018} + 18.997) \times \left( \frac{d_{ave}(t)}{57.5} \right)^{0.160} \times (6.950 \times (f/b)^3 - 3.989 \times (f/b) + 1.851) \quad (3-16)
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $F_{ad}(1,t)$  คือ อัตราการดึงคูคือนคลอไรด์ที่ชั้นที่ 1 จากผิวคอนกรีต ที่เวลา  $t$  ใด ๆ

(โมล/ ซม<sup>2</sup>/ วัน)

$w/b$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

$B$  คือ ปริมาณวัสดุประสาน (กก./ ม<sup>3</sup>)

$R_p$  คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรคอนกรีต

$n(t)$  คือ ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีตที่ระยะเวลา  $t$  ใด ๆ (%)

$F_c$  คือ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ (ซม<sup>2</sup>/ กรัม)

$C_{free}(1,t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ชั้นที่ 1 ที่ระยะเวลา  $t$  ใด ๆ

(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

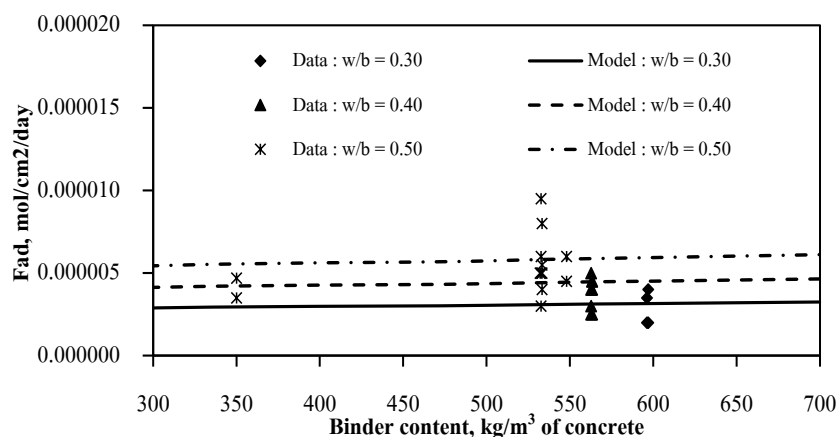
$d_{ave}(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างของคอนกรีต ที่ระยะเวลา  $t$  ใด ๆ

(นาโนเมตร)

$f/b$  คือ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

เมื่อนำแบบจำลองมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดึงคูคือนคลอไรด์

กับปริมาณวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ของคอนกรีตล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย พบว่า เมื่อคอนกรีตใช้ปริมาณวัสดุประสานสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการดึงคูคือนคลอไรด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณวัสดุประสาน ทำให้คอนกรีตมีประจุบวกจากวัสดุเพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการดึงคูคือนคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทำให้อัตราการดึงคูคือนคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงทำให้เกิดโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตทำให้มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณผนังของโพรงช่องว่างมากขึ้น ดังภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-15 อัตราการดึงคู่ออนคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์

ตารางที่ 3-10 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย  
ที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองการดึงคู่ออนคลอไรด์

งานวิจัย	สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2556)						เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต (2555)		
	I	FAN	FAA	FAB	FAC	FAD	I	V	FH
ชนิดของวัสดุ ประสาน									
Chemical compositions									
SiO <sub>2</sub> (%)	19.87	39.76	34.76	27.12	39.76	39.76	20.80	21.52	36.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.87	18.59	18.42	12.24	18.59	18.59	5.50	3.56	19.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.55	12.54	17.78	14.94	12.54	12.54	3.16	4.51	15.10
CaO (%)	65.03	18.50	22.67	30.63	20.85	21.90	64.97	66.70	17.40
SO <sub>3</sub> (%)	0.73	3.61	3.80	6.91	3.61	3.61	2.96	2.11	0.77
LOI (%)	2.26	0.71	0.22	0.37	0.17	0.17	2.89	1.74	2.81
Physical properties									
Specific gravity	3.11	2.08	2.14	2.06	2.08	2.08	-	-	2.27
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3480	2740	3173	3084	2740	2740	-	-	2460

ตารางที่ 3-10 (ต่อ)

งานวิจัย	Sary and Chheat (2010)					นุสรราชัยนกิจ และ เทอดไกร ไชยมาตร (2552)			Maruya (1995)	
	I	FAA	FAB	FAC	FAD	I	V	FH	I	FA
ชนิดของ วัสดุ ประสาน										
Chemical compositions										
SiO <sub>2</sub> (%)	20.20	34.76	27.12	39.43	38.95	20.20	20.97	36.10	20.50	55.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.70	18.42	12.24	18.44	18.21	4.70	3.49	19.40	5.00	5.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.73	17.78	14.94	0.37	0.36	3.73	4.34	15.10	3.00	2.20
CaO (%)	63.40	22.67	30.63	12.44	12.29	63.40	62.86	17.40	63.40	6.90
SO <sub>3</sub> (%)	1.22	3.80	6.91	3.58	3.54	1.22	2.12	0.77	2.00	0.50
LOI (%)	2.72	0.22	0.37	0.17	7.00	2.72	2.30	2.81	1.80	1.00
Physical properties										
Specific gravity	-	2.14	2.06	-	-	-	-	-	-	-
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	-	3173	3084	-	-	-	-	-	3190	3700

ตารางที่ 3-11 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองการดึงคูดิออนคลอไรด์

งานวิจัย	รหัส	วัสดุ			w/b	f/b	ระยะเวลา บ่ม (วัน)	ระยะเวลา เผชิญคลอไรด์ (วัน)	ความเข้มข้น คลอไรด์ที่ (%)
		ชนิดของ ปูนซีเมนต์	ชนิดของ ตัวอย่าง	ชนิดของ เถ้าลอย					
สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2556)	OPC	I	Mortar	-	0.50	-	28	91	5
	FAN	I	Mortar	High CaO	0.50	0.30, 0.50	28	91	5
	FAA	I	Mortar	High CaO	0.50	0.30, 0.50	28	91	5
	FAB	I	Mortar	High CaO	0.50	0.30, 0.50	28	91	5
	FAC	I	Mortar	High CaO	0.50	0.30, 0.50	28	91	5
	FAD	I	Mortar	High CaO	0.50	0.30, 0.50	28	91	5
เอกศักดิ์ ฤกษ์มหา ลิขิต (2555)	OPC	I, V	Mortar	-	0.40, 0.50	-	27	35, 91, 182	5
	FH	I	Mortar	High CaO	0.40, 0.50	0.30	27	35, 91, 182	5
Sary and Chheat (2010)	OPC	I	Mortar	-	0.50	-	28	91	3
	FAA	I	Mortar	High CaO	0.50	0.30, 0.50	28	91	3
	FAB	I	Mortar	High CaO	0.50	0.30, 0.50	28	91	3
	FAC	I	Mortar	High CaO	0.50	0.30, 0.50	28	91	3
	FAD	I	Mortar	High CaO	0.50	0.30, 0.50	28	91	3



ตารางที่ 3-11 (ต่อ)

งานวิจัย	รหัส	วัสดุ			w/b	f/b	ระยะเวลา บ่ม (วัน)	ระยะเวลา เผชิญคลอรีน (วัน)	ความเข้มข้น คลอรีนที่	
		ชนิดของ ปูนซีเมนต์	ชนิดของ ตัวอย่าง	ชนิดของ เถ้าลอย						
นุสรราชันกิจ และ เทอดไกร ไชยมาตร (2552)	OPC	I, V	Mortar	-	0.30,	-	28	35, 91, 182	3	
	FH	I	Mortar	High CaO	0.40, 0.50	0.30	28		3	
Maruya (1995)	OPM	I	Mortar	-	0.50	-	28	28, 91, 182,	1.82	
	OPC	I	Concrete	-	0.50	-	28		1.82	
	OPC	I	Concrete*	-	0.50	-	28		365	1.82
	OFM	I	Mortar	Low CaO	0.50	0.20	28		1.82	

หมายเหตุ: “I, V, FH” หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 และเถ้าลอยแม่เมาะ ชนิด 2x ตามลำดับ

“FAN” หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะที่มีปริมาณปูนขาวอิสระ (CaO) สูงน้อยกว่า 2%

“FAA” หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะที่มีปริมาณปูนขาวอิสระ (CaO) สูงมากกว่า 2% แต่น้อยกว่า 2.5%

“FAB” หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะที่มีปริมาณปูนขาวอิสระ (CaO) สูงมากกว่า 2.5% แต่น้อยกว่า 3.40%

“FAC” หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด N ที่เติมปริมาณปูนขาวอิสระ (CaO) ให้มากกว่า 2% แต่น้อยกว่า 2.5%

“FAD” หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิด N ที่เติมปริมาณปูนขาวอิสระ (CaO) ให้มากกว่า 2.5% แต่น้อยกว่า 3.40%

“Concrete\*” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ทำนaylorแทรกซึมคลอรีนในสภาวะเปียกสลับบ้าง

## บทที่ 4

### การตรวจสอบแบบจำลอง

#### การตรวจสอบแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์

แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ถูกตรวจสอบกับผลการทดลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยของ สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2556); เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต (2555); ณรงค์เกียรติ สุนันทวิริยาภรณ์ (2553); ลิตาภรณ์ อภาศรีทองสกุล (2553); ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บวร และวสุ วิทย์เขตปภา (2549); Sumranwanich (2004) โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ ดังตารางที่ 3-2 และส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ ดังตารางที่ 3-3 และแบบจำลองยังถูกตรวจสอบกับงานวิจัยของ Maruya (1995); Hussain, Rasheeduzzafar and Al-Gahtani (1994);

Rasheeduzzafar, Hussain and Al-Saadoun (1991); Arya, Buenfeld and Newman (1990) ด้วยซึ่งองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย แสดงดังตารางที่ 4-1 และส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 4-2

โดยความสามารถกักเก็บคลอไรด์ในระบบวัสดุประสาน แบ่งกระบวนการยึดจับคลอไรด์ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การยึดจับคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมี (Chemical binding) และการยึดจับคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ (Physical binding) ดังสมการที่ 4-1

$$C_{\text{fix}}(t_s, t_e) = C_{\text{fix, chem}}(t_s, t_e) + C_{\text{fix, phy}}(t_e) \quad (4-1)$$

เมื่อ  $C_{\text{fix}}(t_s, t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{fix, chem}}(t_s, t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางเคมีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{fix, phy}}(t_e)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$t_s, t_e$  คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มและสิ้นสุดการเผชิญคลอไรด์ (วัน)

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ของนักวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับ  
ตรวจสอบแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์

งานวิจัย	Maruya (1995)		Hussain, Rasheeduzzafar and Al-Gahtani (1994)		
	I	FA	PC1	PC2	PC3
ชนิดของวัสดุ ประสาน					
Chemical compositions					
SiO <sub>2</sub> (%)	20.50	55.00	21.90	20.90	19.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.00	5.60	3.98	5.26	6.54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.00	2.20	4.80	3.75	2.09
CaO (%)	63.40	6.90	64.20	65.03	64.70
SO <sub>3</sub> (%)	2.00	0.50	1.71	2.54	2.61
LOI (%)	1.80	1.00	1.10	-	1.10
Bogue's potential compound compositions					
C <sub>3</sub> S (%)	58.60	-	54.30	55.83	54.50
C <sub>2</sub> S (%)	14.60	-	21.80	17.80	16.00
C <sub>3</sub> A (%)	8.20	-	2.43	7.59	14.00
C <sub>4</sub> AF (%)	9.10	-	14.61	11.41	6.50

**หมายเหตุ:** รหัสด้านผสมของ Hussain, Rasheeduzzafar and Al-Gahtani (1994)

“PC1” หมายถึง ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C<sub>3</sub>A = 2.43%, SO<sub>3</sub> = 1.7 – 8.0 %

“PC2” หมายถึง ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C<sub>3</sub>A = 7.59%, SO<sub>3</sub> = 2.5 – 8.0 %

“PC3” หมายถึง ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C<sub>3</sub>A = 14.00%, SO<sub>3</sub> = 2.6 – 8.0 %

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

งานวิจัย	Rasheeduzzafar, Hussain and Al-Saadoun (1991)				Arya, Buenfeld and Newman (1990)
	PC1	PC2	PC3	PC4	I
ชนิดของวัสดุ ประสาน					
Chemical compositions					
SiO <sub>2</sub> (%)	21.90	20.76	20.90	19.92	19.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.98	4.73	5.00	6.54	5.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.80	2.40	3.05	2.09	3.10
CaO (%)	64.20	63.92	64.50	64.70	65.20
SO <sub>3</sub> (%)	1.71	3.00	3.21	2.61	3.00
LOI (%)	1.10	0.71	2.15	1.10	1.50
Bogue's potential compound compositions					
C <sub>3</sub> S (%)	54.30	57.17	57.80	54.50	55.20
C <sub>2</sub> S (%)	21.80	16.53	16.50	16.00	14.80
C <sub>3</sub> A (%)	2.43	7.37	9.10	14.00	9.90
C <sub>4</sub> AF (%)	14.61	9.27	7.40	6.50	9.70

**หมายเหตุ:** รหัสด้านผสมของ Rasheeduzzafar, Hussain and Al-Saadoun (1991)

“PC1” หมายถึง ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C<sub>3</sub>A = 2.43%

“PC2” หมายถึง ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C<sub>3</sub>A = 7.37%

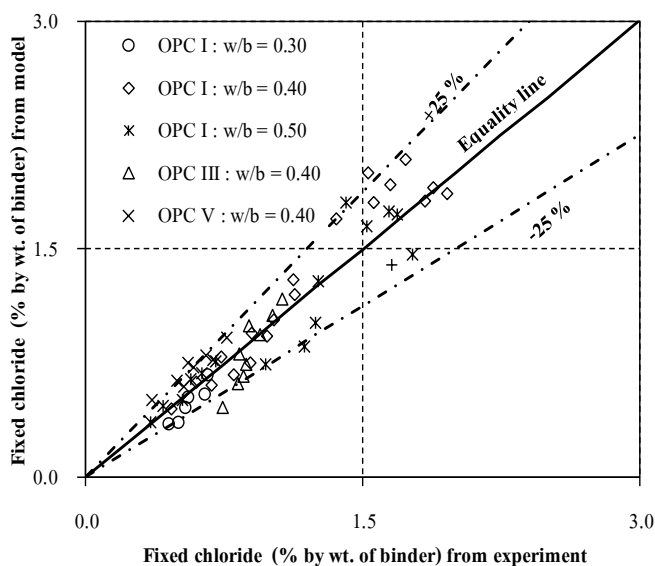
“PC3” หมายถึง ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C<sub>3</sub>A = 9.10%

“PC3” หมายถึง ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C<sub>3</sub>A = 14.00%

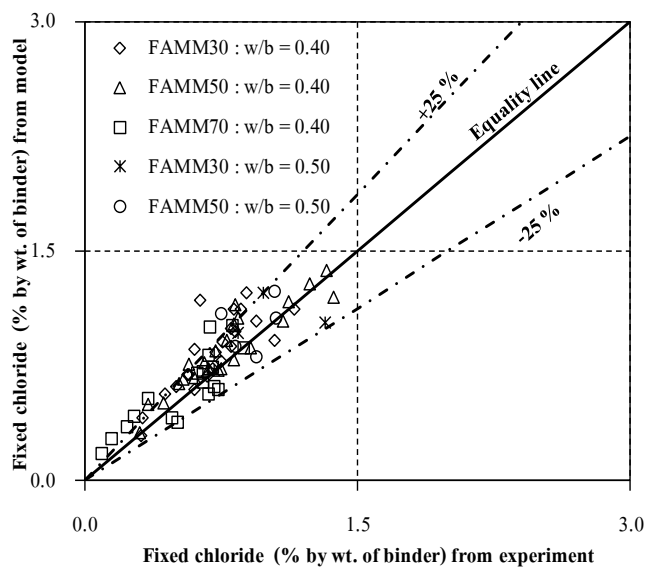
ตารางที่ 4-2 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองของนักวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับตรวจสอบแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์

งานวิจัย	รหัส	วัสดุ			w/b	f/b	ระยะเวลา		
		ชนิดของปูนซีเมนต์	ชนิดของตัวอย่าง	ชนิดของถ้ำลอย			ระยะเวลาดบ่ม (วัน)	เผชิญคลอไรด์ (วัน)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (%)
Maruya (1995)	OPC	I	Mortar,	-	0.50	-	28	28, 91,	1.10
	FA	I	Concrete	High CaO	0.50	0.20	28	182, 365	
Hussain, Rasheeduzzafar and Al-Gahtani (1994)	OPC	I	Cement paste	-	0.60	-	0	180	0.60, 1.20
Rasheeduzzafar, Hussain and Al-Saadoun (1991)	OPC	I	Cement paste	-	0.60	-	0	60, 70, 180	0.30, 0.60, 1.20
Arya, Buenfeld and Newman (1990)	OPC	I	Cement paste	-	0.50	-	2, 28, 84	28, 56, 84	0.75

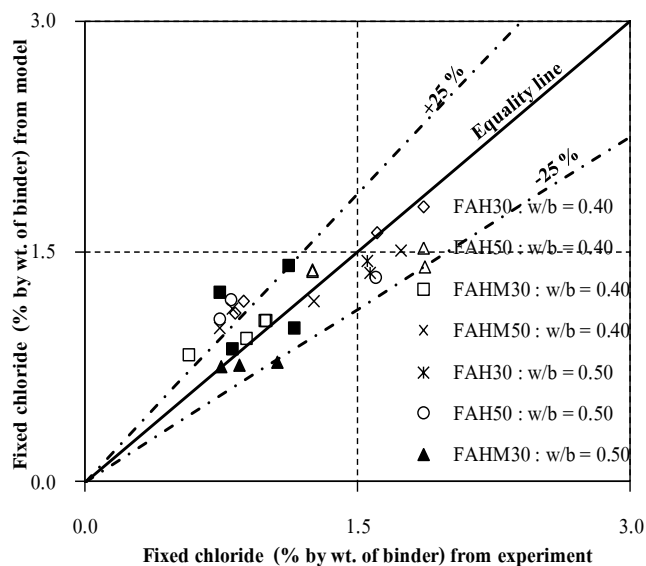
แบบจำลองถูกปรับปรุงต่อจากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) โดยมุ่งปรับปรุงเฉพาะแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ ด้วยการขยายฐานข้อมูลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และความละเอียดของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังเพิ่มผลกระทบของความละเอียดของเถ้าลอย และความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญเข้าไปในแบบจำลองด้วย เมื่อทำการตรวจสอบผลที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-1 ภาพที่ 4-2 ภาพที่ 4-3 และภาพที่ 4-4 สำหรับซีเมนต์เพสต์สี่วัน ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยจังหวัดระยอง ชนิด FAH และ FAHM และซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยจังหวัดระยอง ชนิด FAB และ FABM ตามลำดับพบว่า แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 25\%$  ทั้งนี้แบบจำลองสามารถใช้คำนวณความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยได้ทั้งเถ้าลอยแม่เมาะ (FAMM) ที่มีทั้งชนิด 2ก และ 2ข และเถ้าลอยจังหวัดระยอง ที่แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอยบิฑูมินัส Hunter valley (FAH) เถ้าลอยบิฑูมินัส Hunter valley and Melawan (FAHM) เถ้าลอยบิฑูมินัส Blair athol (FAB) และเถ้าลอยบิฑูมินัส Blair athol and Melawan (FABM) ที่เป็นชนิด 2ก



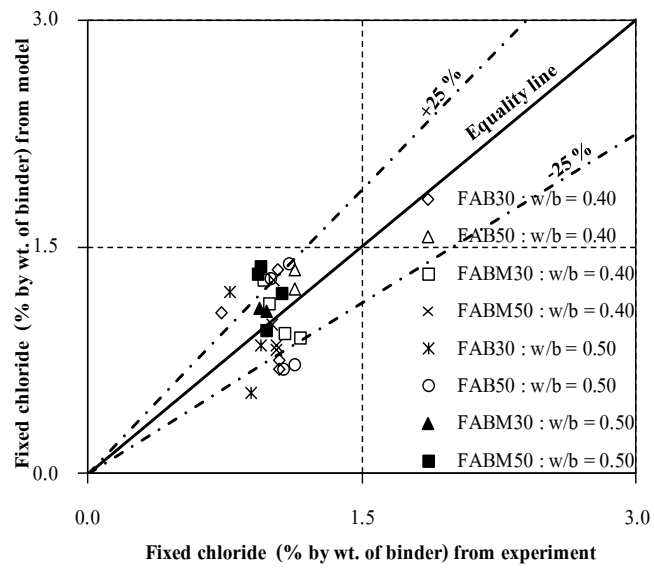
ภาพที่ 4-1 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองของซีเมนต์เพสต์สี่วัน



ภาพที่ 4-2 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (เถ้าลอยชนิด 2ก และ 2ข)



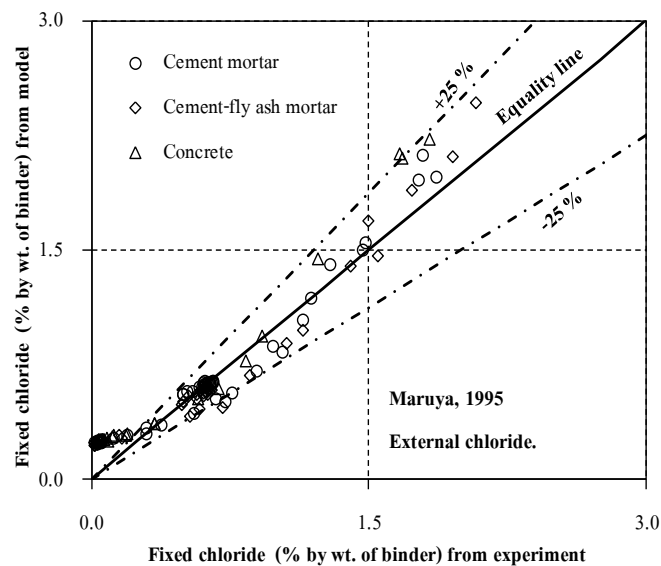
ภาพที่ 4-3 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยจังหวัดระยองชนิด FAH และ FAHM (เถ้าลอยชนิด 2ก)



ภาพที่ 4-4 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยจังหวัดระยองชนิด FAB และ FABM (เถ้าลอยชนิด 2ก)

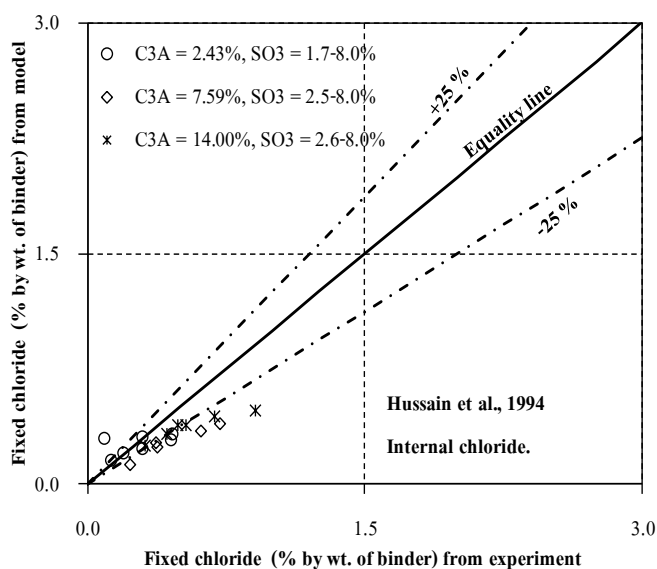


Maruya (1995) ทดลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของมอร์ตาร์ และคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ซึ่งตัวอย่างถูกบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน และนำไปแช่ในสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.10 เป็นเวลา 28, 91, 182 และ 365 วัน จากการตรวจสอบความสามารถกักเก็บคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-5



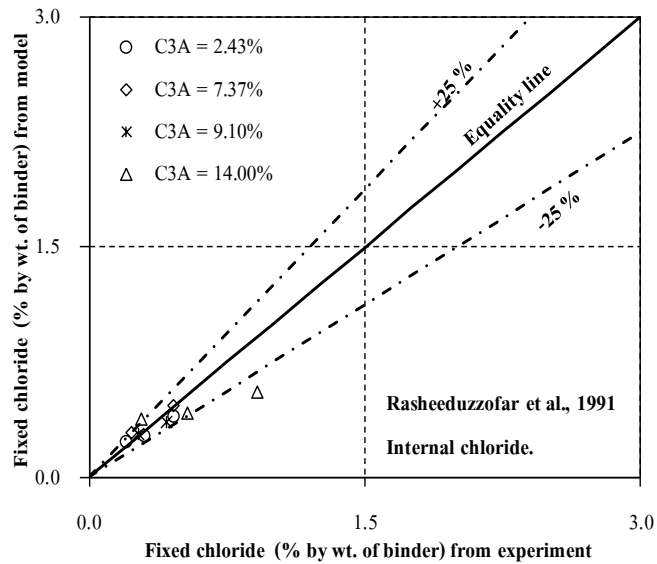
ภาพที่ 4-5 การตรวจสอบความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของ Maruya (1995)

Hussain, Rasheeduzzafar and Al-Gahtani (1994) ทำการทดลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 และทำการผสมสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.60 และ 1.20 ในตัวอย่าง เป็นเวลา 180 วัน จากการตรวจสอบความสามารถกักเก็บคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-6



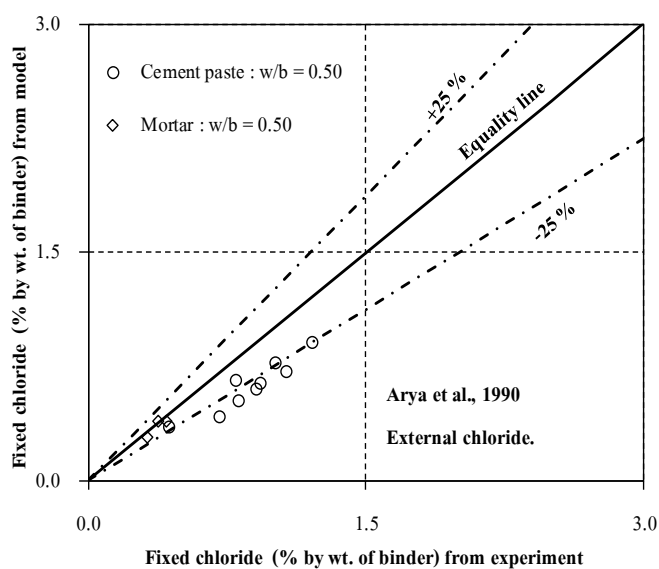
ภาพที่ 4-6 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของ Hussain, Rasheeduzzafar and Al-Gahtani (1994)

Rasheeduzzafar, Hussain and Al-Saadoun (1991) ทำการทดลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 และทำการผสมสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.30, 0.60 และ 1.20 ในตัวอย่าง เป็นเวลา 60, 70 และ 180 วัน จากการตรวจสอบ พบว่า แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-7



ภาพที่ 4-7 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของ Rasheeduzzafar, Hussain and Al-Saadoun (1991)

Arya, Buenfeld and Newman (1990) ทำการทดลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ซึ่งตัวอย่างถูกบ่มในน้ำเป็นเวลา 2, 28 และ 84 วัน และนำไปแช่ในสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.75 เป็นเวลา 28, 56 และ 84 วัน จากการตรวจสอบความสามารถกักเก็บคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองพบว่า แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-8

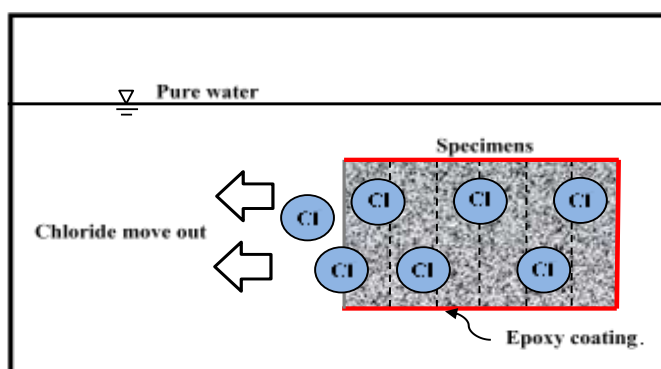


ภาพที่ 4-8 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของ Arya, Buenfeld and Newman (1990)

## การตรวจสอบแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

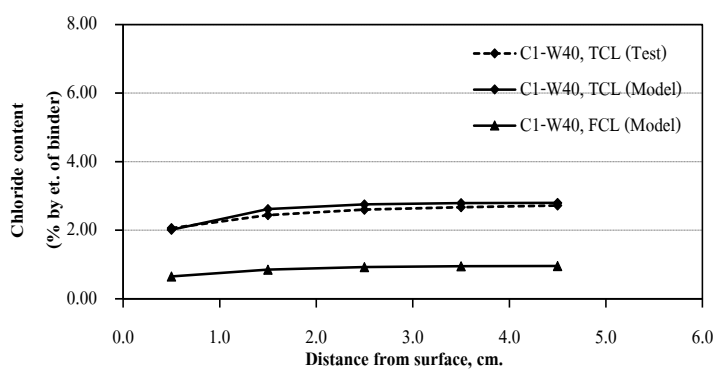
แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ถูกปรับปรุงต่อจากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) โดยทำการขยายฐานข้อมูลการทดลองการแพร่ออกของคลอไรด์ สาเหตุที่ใช้การทดลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในการพัฒนาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ เพราะคลอไรด์ที่แพร่ออกเกิดจากกระบวนการแพร่เพียงกระบวนการเดียวเท่านั้น โดยคลอไรด์ถูกผสมรวมกับน้ำที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างตั้งแต่ต้น จากนั้นเคลือบผิวด้านข้างและด้านล่างของตัวอย่าง เพื่อควบคุมให้การแพร่ของคลอไรด์ออกจากตัวอย่างได้เพียงทิศทางเดียว จากนั้นนำตัวอย่างบ่มในอากาศ และแช่ในน้ำปะปาตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อให้คลอไรด์แพร่ออก ดังภาพภาพที่ 4-9 ซึ่งการทดลองนี้จึงถูกเลือกให้นำมาพิจารณาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ โดยการคำนวณการแพร่ออกของคลอไรด์ จะรวมทั้งแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ และแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

ซึ่งแบบจำลองที่ทำการพัฒนาถูกตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดลองการแพร่ออกของคลอไรด์ของ ภูมิินทร์ กิตติศักดิ์บวร และวสุ วิทย์เขตปภา (2549); ณรงค์ฤทธิ์ เย็นอารมณ์ และเกษตรดา เลอาวริกิจ (2548); Maruya (1995) โดยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย แสดงดังตารางที่ 3-5 และส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองการแพร่ออกของคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 3-6

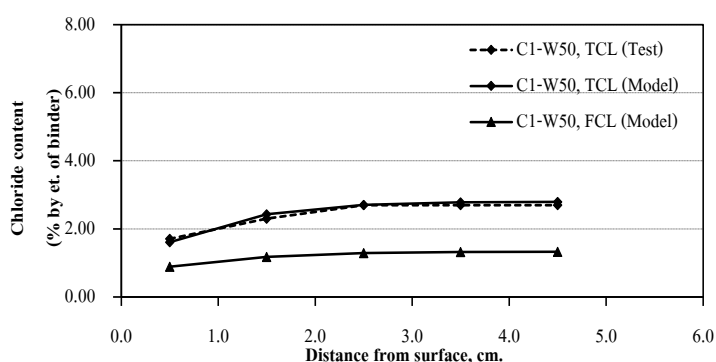


ภาพที่ 4-9 การทดลองการแพร่ออกของคลอไรด์ (Sumranwanich, 2004)

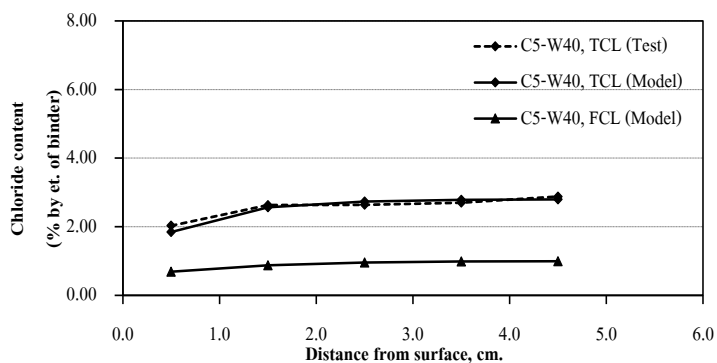
ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บวร และวสุ วิทย์เขตปลา (2549) ทำการทดลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และ 5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้เท่ากับ 0.40 และ 0.50 จากนั้นทำการผสมสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2.80 ในตัวอย่าง และบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำตัวอย่างแช่ในน้ำเพื่อให้คลอไรด์แพร่ออกเป็นเวลา 91 วัน จากการตรวจสอบแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-10 ภาพที่ 4-11 ภาพที่ 4-12 และภาพที่ 4-13 พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง



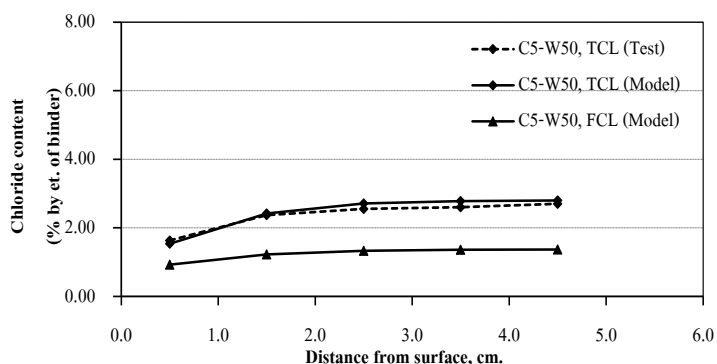
ภาพที่ 4-10 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1)



ภาพที่ 4-11 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1)

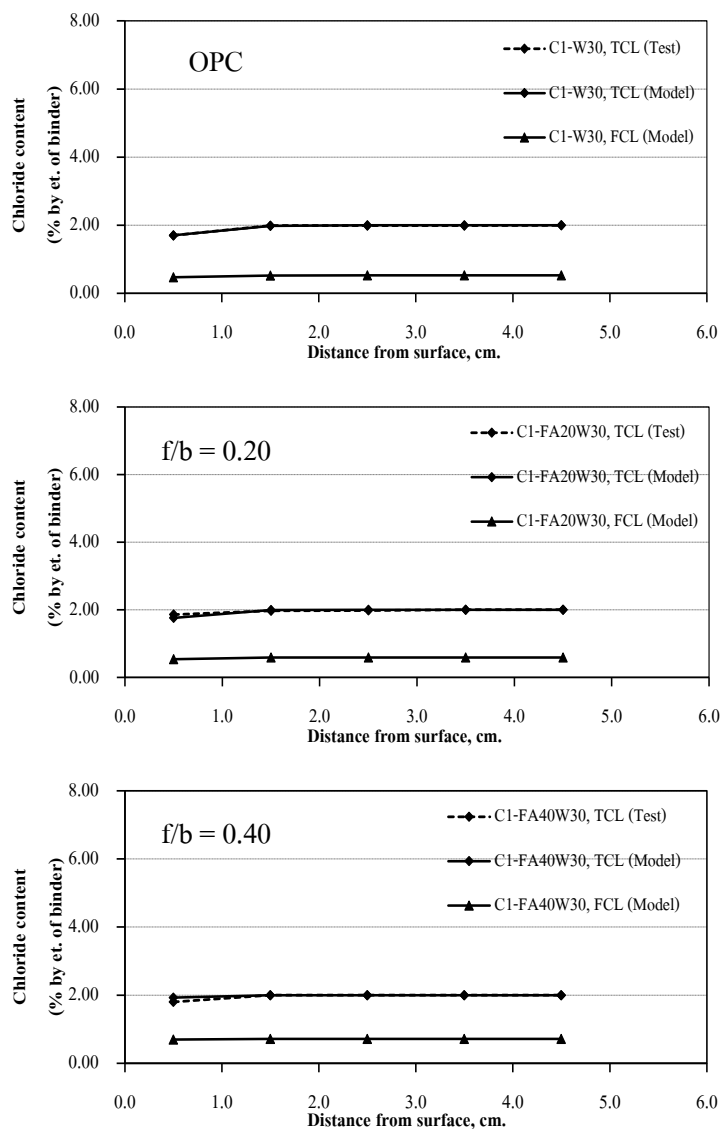


ภาพที่ 4-12 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ล้วน  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5)



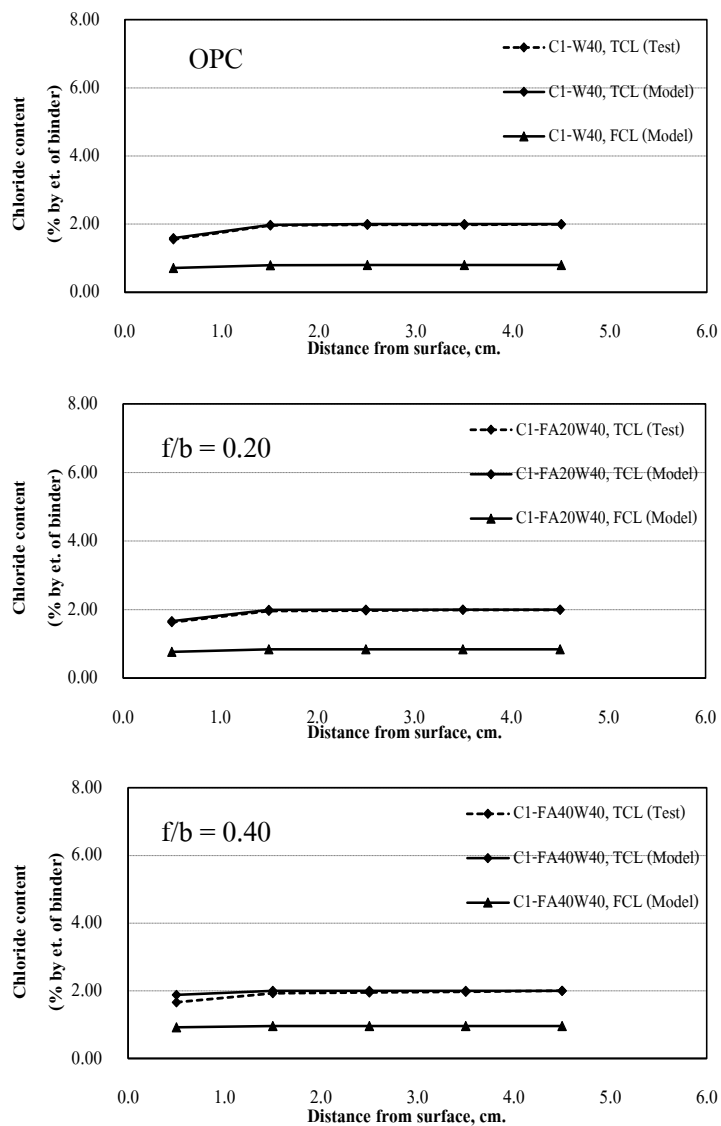
ภาพที่ 4-13 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ล้วน  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5)

ณรงค์ฤทธิ์ เย็นอารมณ์ และเกศสุดา เลอาวริกิจ (2548) ทำการทดลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมเกลือ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30, 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนเกลือต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 และ 0.40 จากนั้นผสมสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 ในตัวอย่าง และบ่มเป็นเวลา 3 วัน ก่อนแช่ในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ซึ่งเงื่อนไขข้างต้นใช้ในตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 และ 0.50 ส่วนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ถูกแช่ในน้ำเพื่อให้คลอไรด์แพร่ออกเป็นเวลา 28 และ 140 วัน จากการตรวจสอบแบบจำลอง พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-14 ภาพที่ 4-15 ภาพที่ 4-16 และภาพที่ 4-17

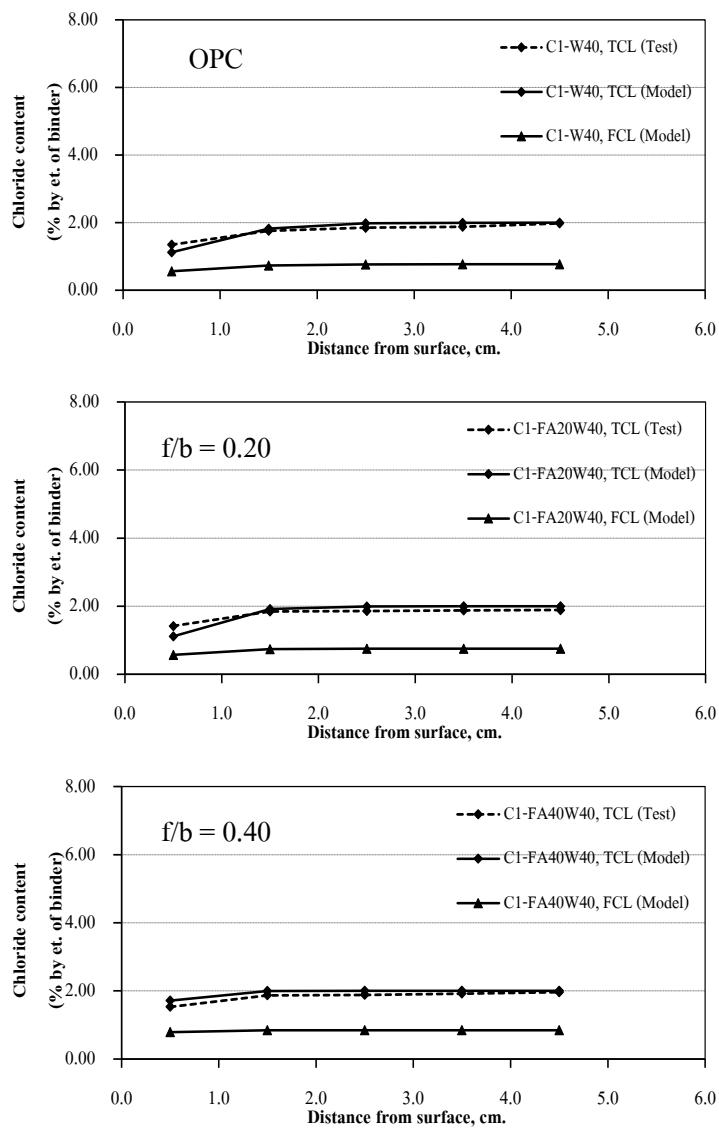


ภาพที่ 4-14 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์พอสต์ผสมเถ้าลอย  
 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20  
 และ 0.40 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน และระยะเวลาแช่ในน้ำประปา 28 วัน

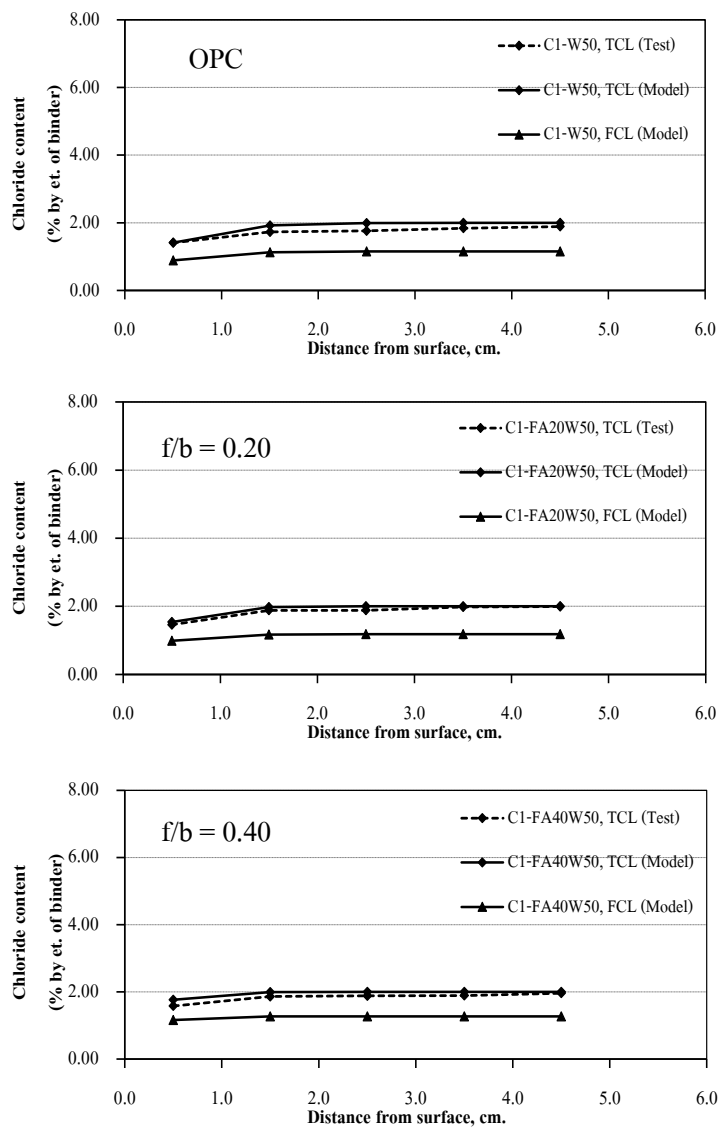




ภาพที่ 4-15 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์พอสต์ผสมเถ้าลอย  
 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20  
 และ 0.40 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน และระยะเวลาแช่ในน้ำประปา 28 วัน

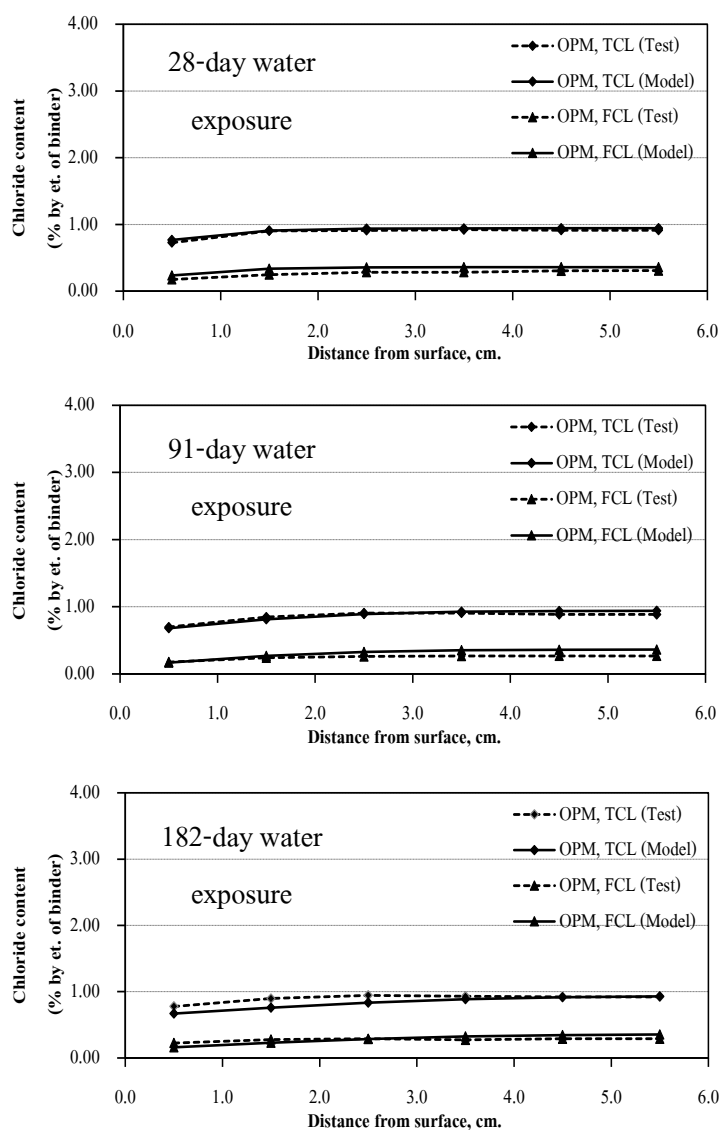


ภาพที่ 4-16 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย  
 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20  
 และ 0.40 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน และระยะเวลาแช่ในน้ำประปา 140 วัน

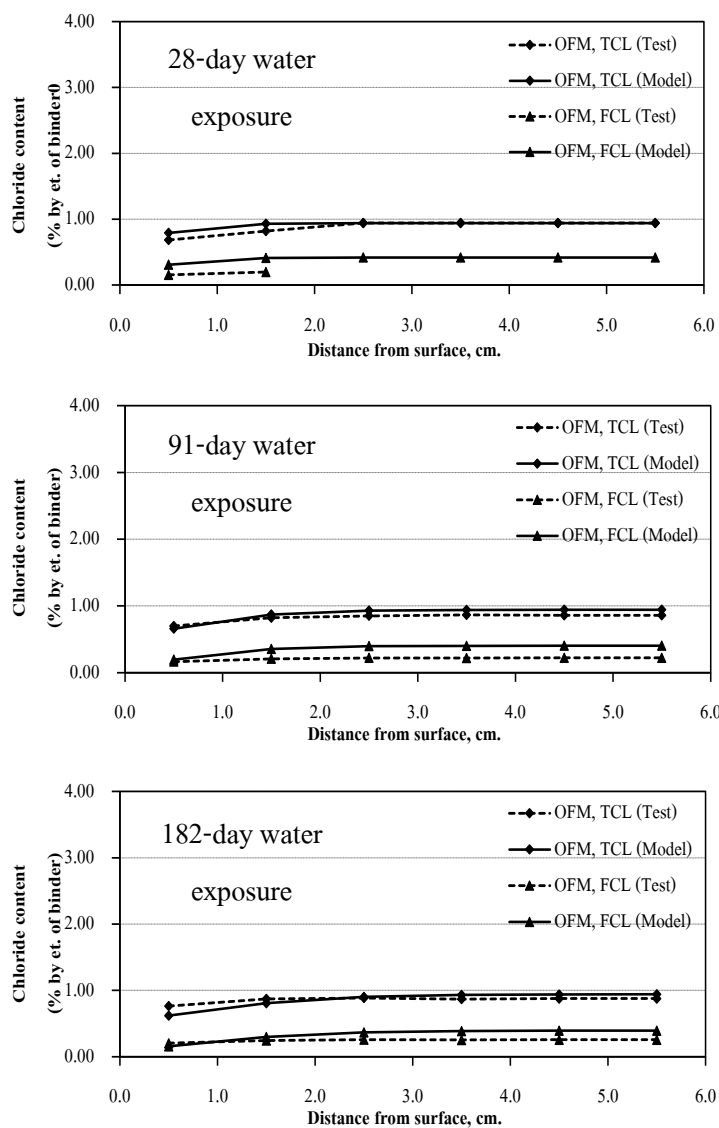


ภาพที่ 4-17 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในซีเมนต์พอสต์ผสมเถ้าลอย  
 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20  
 และ 0.40 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน และระยะเวลาแช่ในน้ำประปา 28 วัน

Maruya (1995) ทดลองการแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้เท่ากับ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 จากนั้นผสมสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.94 ในตัวอย่าง และบ่มเป็นเวลา 28 วัน ก่อนแช่ในน้ำเป็นเวลา 28, 91 และ 182 วัน จากการตรวจสอบแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-18 และ ภาพที่ 4-19



ภาพที่ 4-18 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



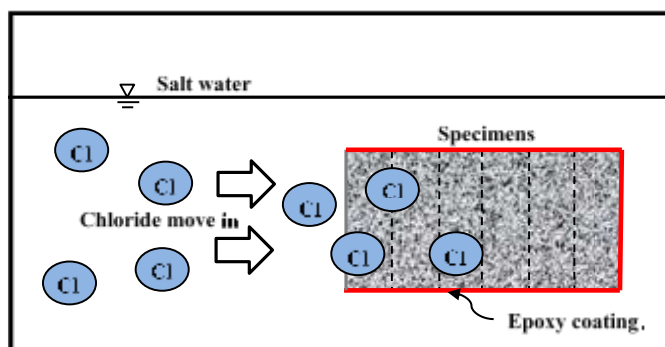
ภาพที่ 4-19 การตรวจสอบแบบจำลองการแพร่ออกของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเกล็ดขย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

## การตรวจสอบแบบจำลองการดึงดูดอออนคลอไรด์

### 1. เงื่อนไขการเผชิญคลอไรด์แบบแช่สารละลาย

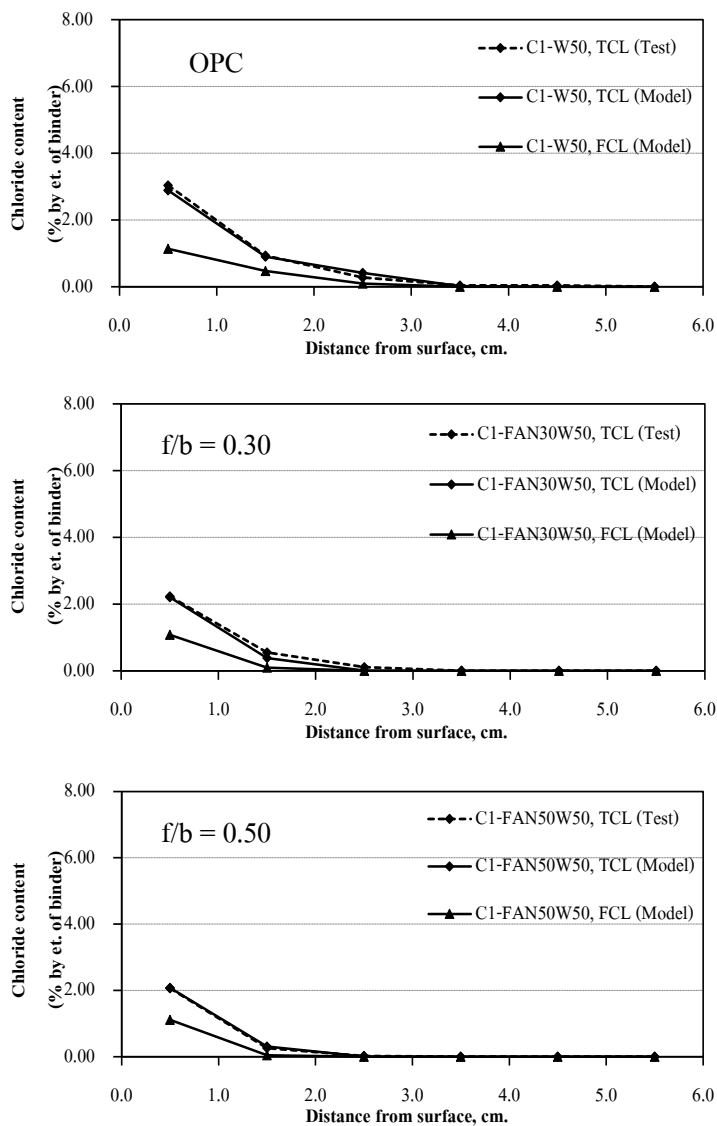
แบบจำลองการดึงดูดอออนคลอไรด์ถูกปรับปรุงต่อจากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) โดยทำการขยายฐานข้อมูลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต สาเหตุที่ใช้ผลการทดลองการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต เพราะคลอไรด์จะแทรกซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีต ทั้งกระบวนการแพร่ และกระบวนการดึงดูดอออนคลอไรด์ ดังภาพที่ 4-20 แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ไปแล้ว โดยอาศัยผลการทดลองการแพร่ออกคลอไรด์ ดังนั้นการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตจึงใช้พิจารณาเพียงกระบวนการดึงดูดอออนคลอไรด์ เท่านั้น ทั้งนี้แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ และแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ถูกรวมเพื่อนำมาคิดผลของการดึงดูดอออนคลอไรด์ด้วย

ซึ่งแบบจำลองที่ทำการพัฒนาถูกตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตของ สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2556); เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต (2555), Sary and Chheat (2010); นุสรุา ชัยนิกิจ และเทอด ไกร ไชยมาตร (2552); Maruya (1995) โดยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย แสดงดังตารางที่ 3-10 และส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 3-11

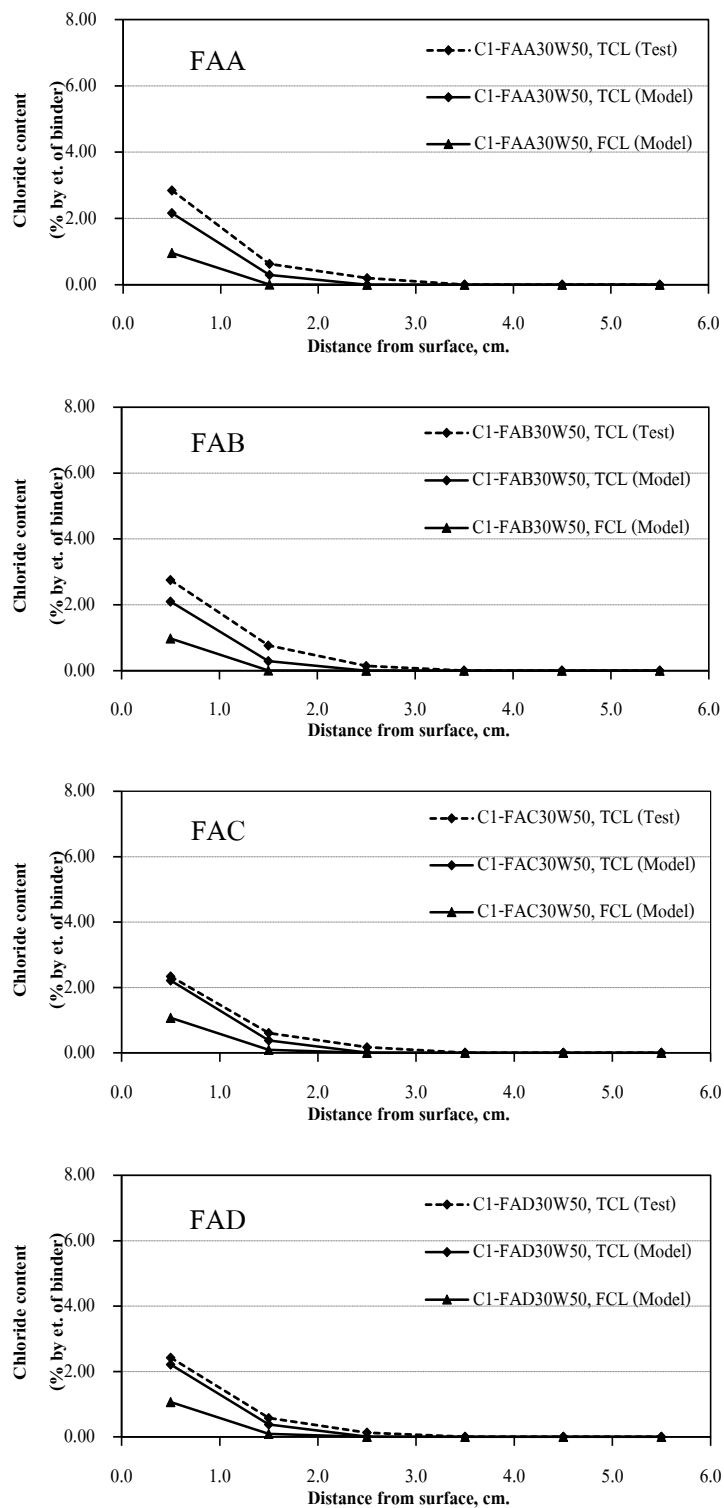


ภาพที่ 4-20 การทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ (Sumranwanich, 2004)

สุรชาติ ฤกษ์โหรา (2556) ทำการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 และ 0.50 จากนั้นนำตัวอย่างบ่มเป็นเวลา 28 วัน และแช่สารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 91 วัน จากการตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยพบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-21 และภาพที่ 4-23

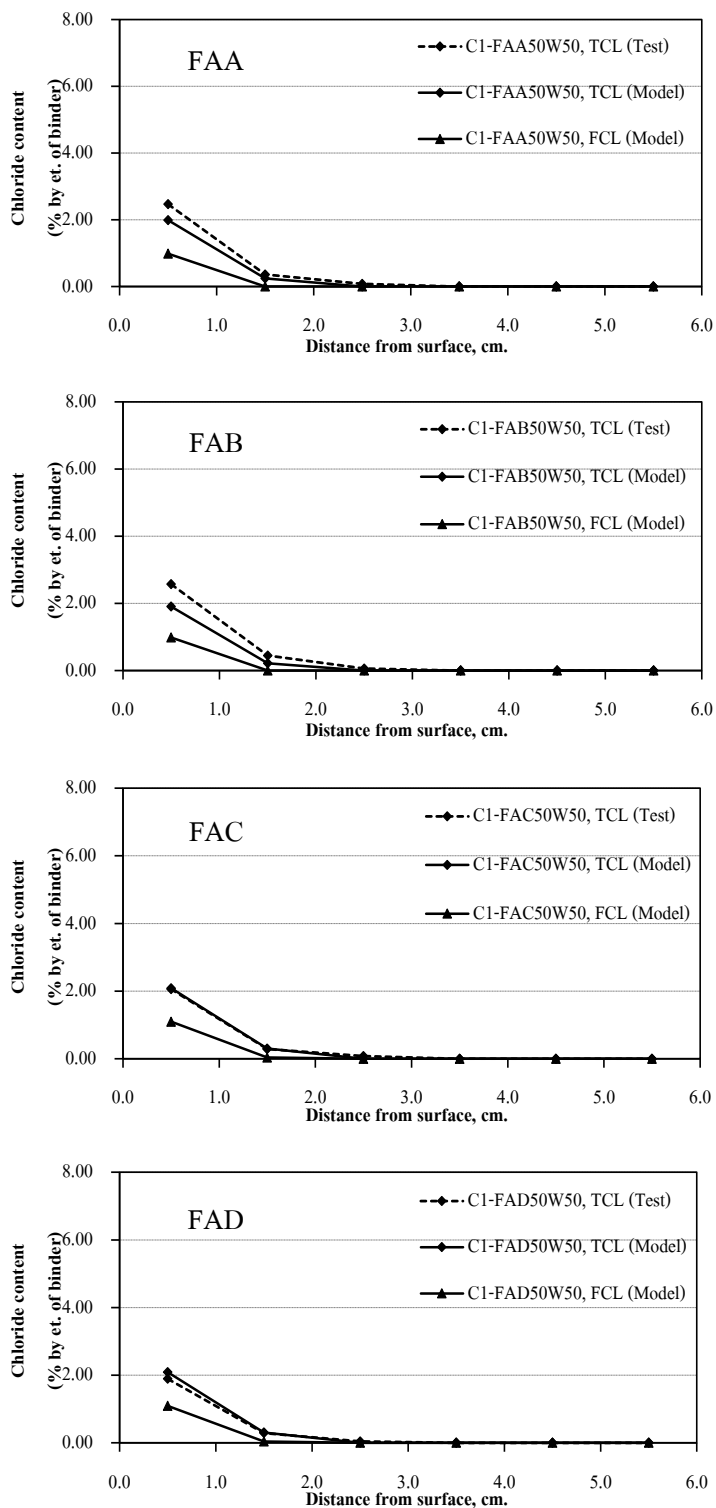


ภาพที่ 4-21 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (FAN) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



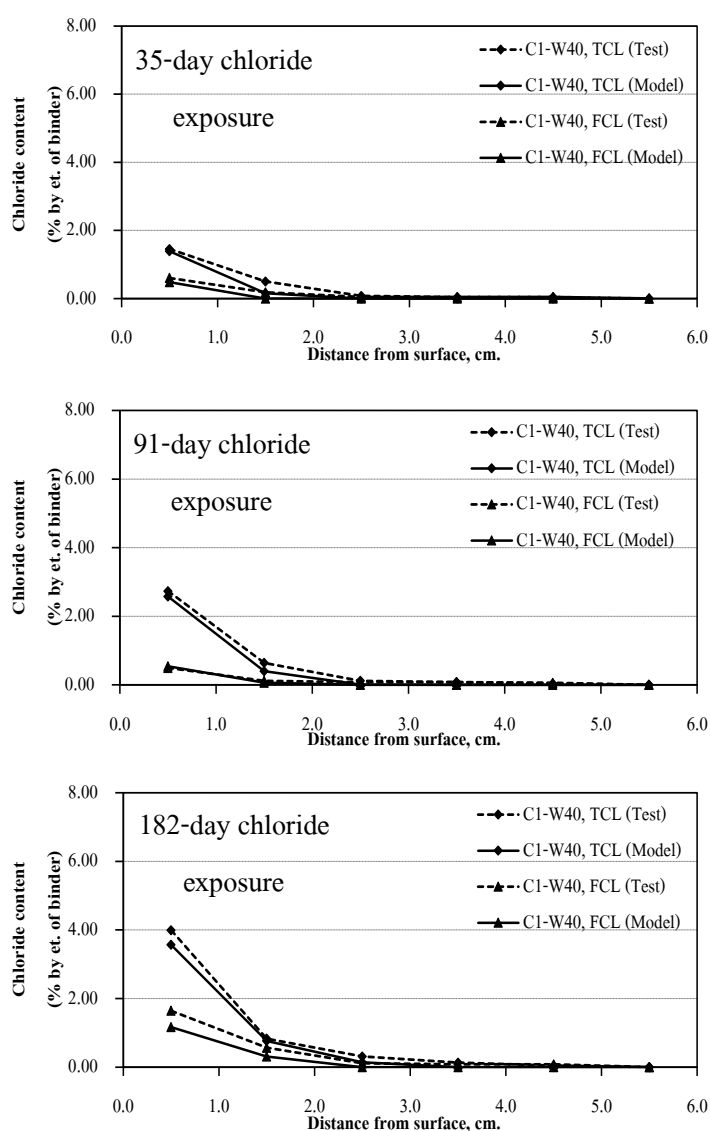
ภาพที่ 4-22 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30



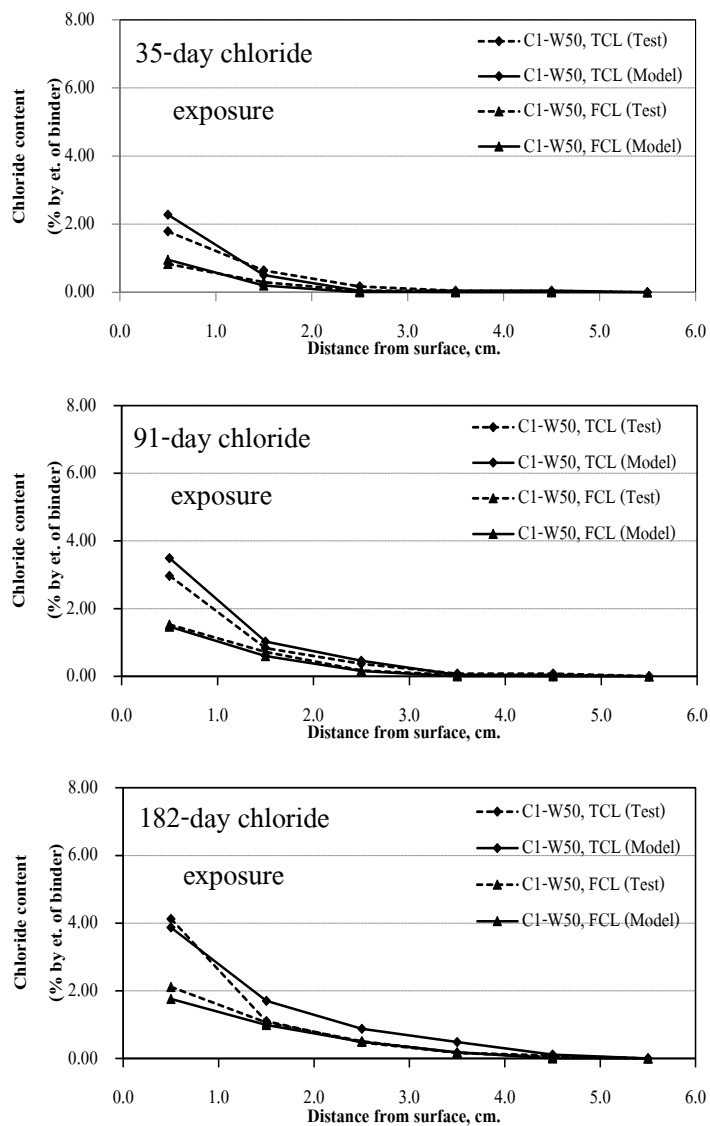


ภาพที่ 4-23 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50

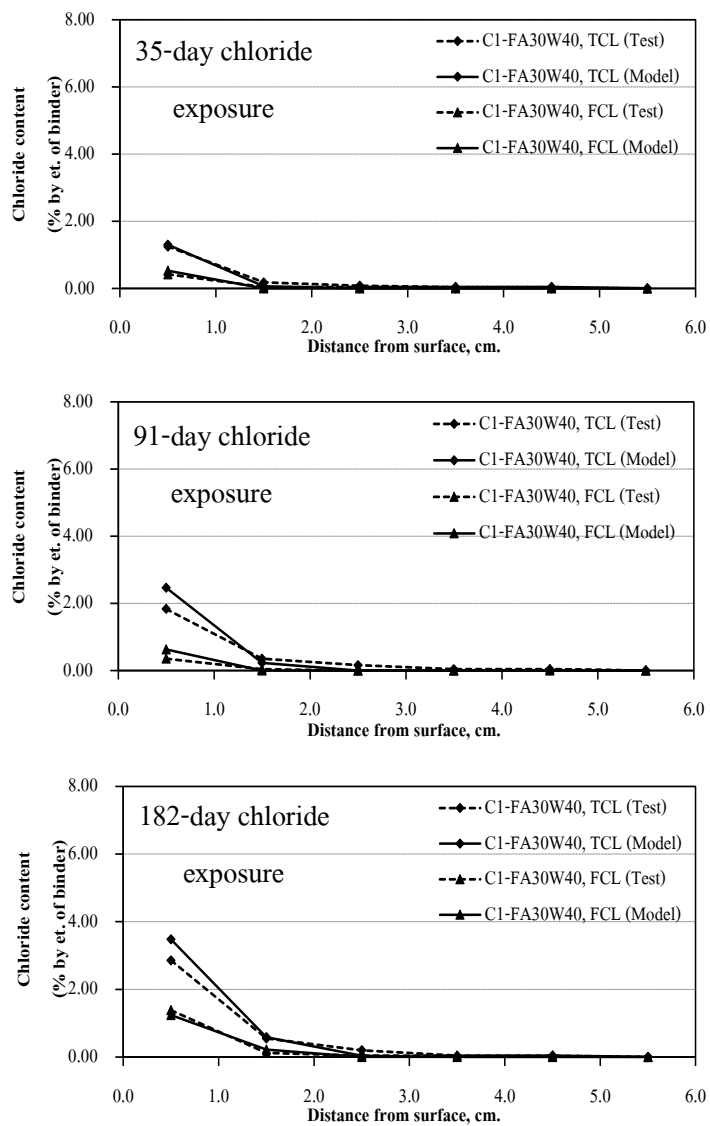
เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต (2555) ทำการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 จากนั้นนำตัวอย่างบ่มเป็นเวลา 27 วัน และนำไปแช่สารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 35, 91 และ 182 วัน จากการตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยพบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-24 และภาพที่ 4-29



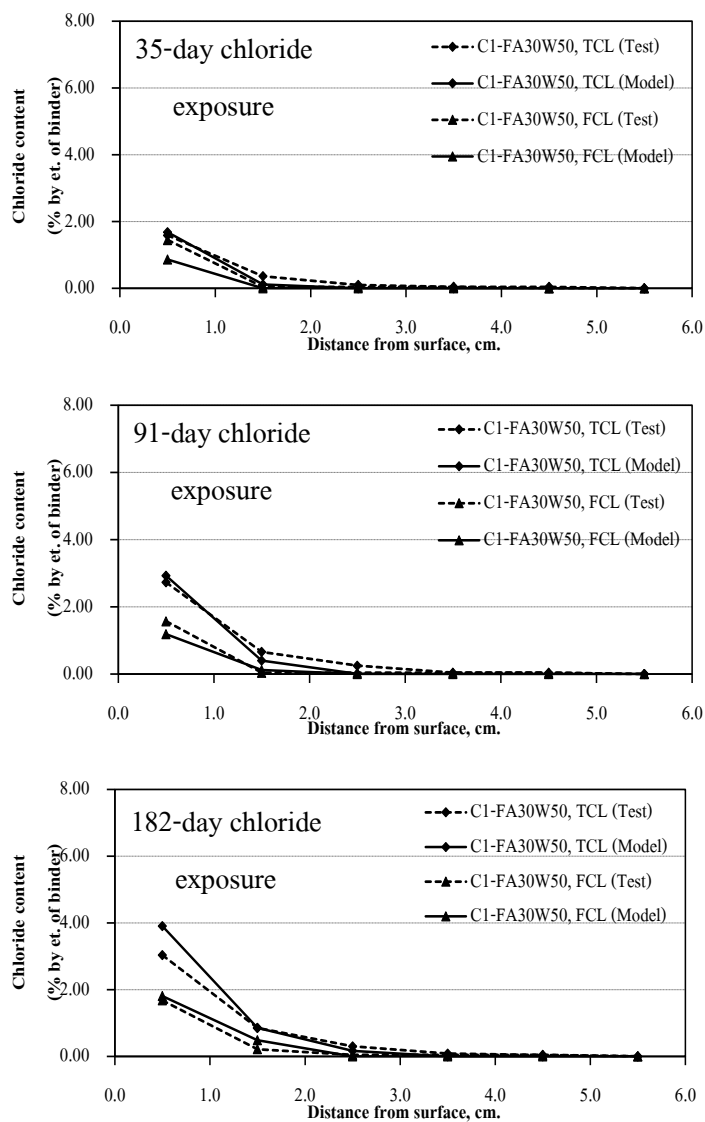
ภาพที่ 4-24 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



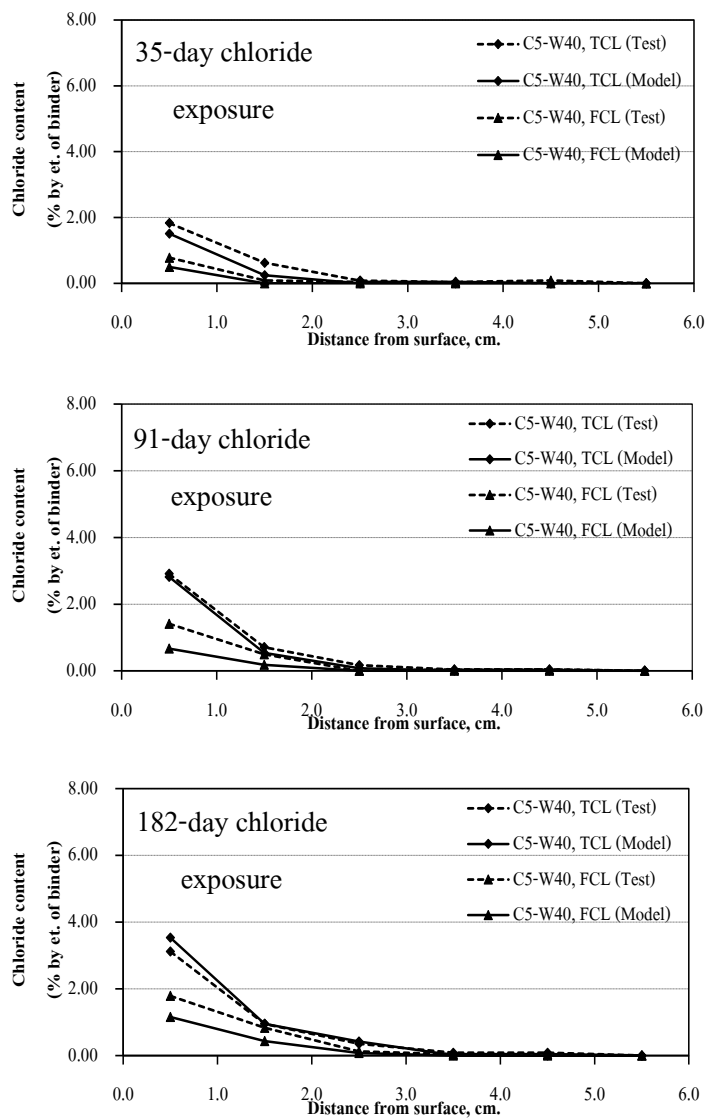
ภาพที่ 4-25 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ต้าร์ล้วน  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



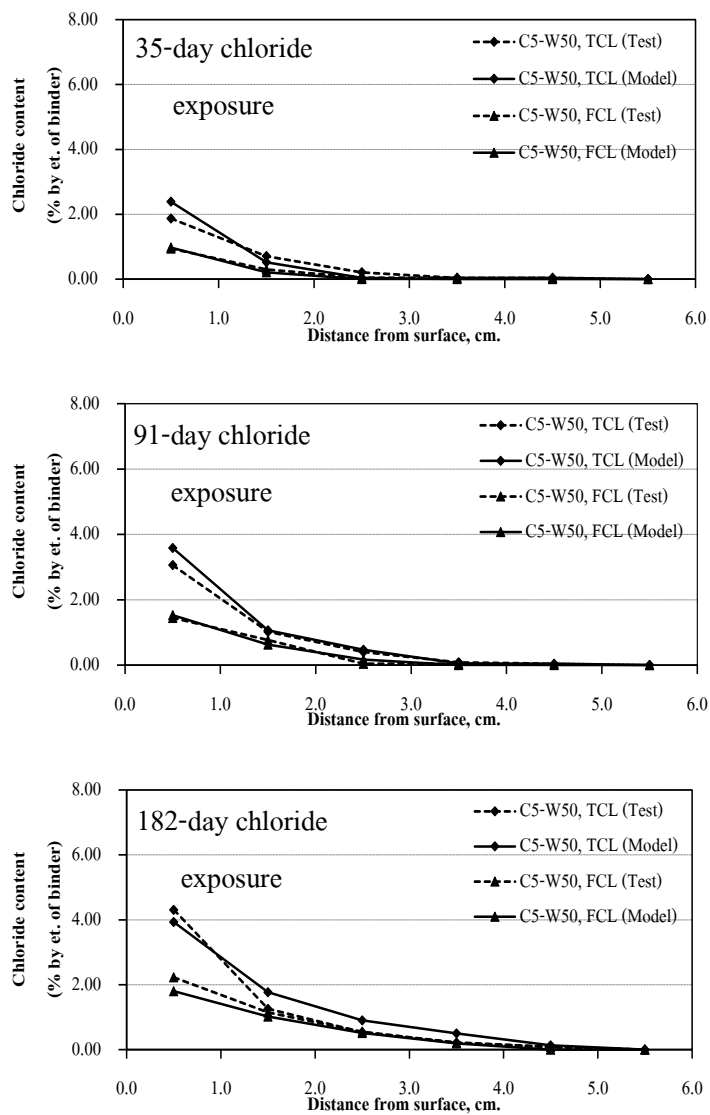
ภาพที่ 4-26 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ภาพที่ 4-27 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

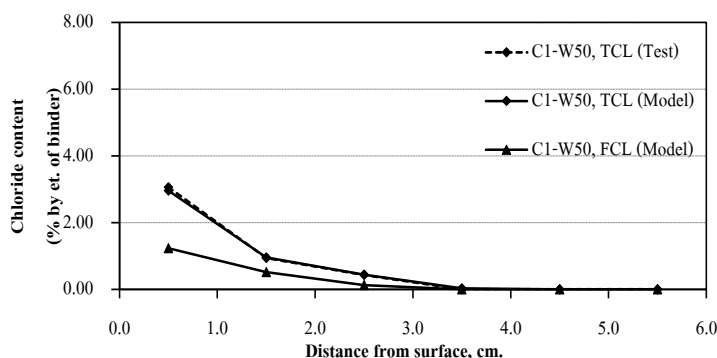


ภาพที่ 4-28 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



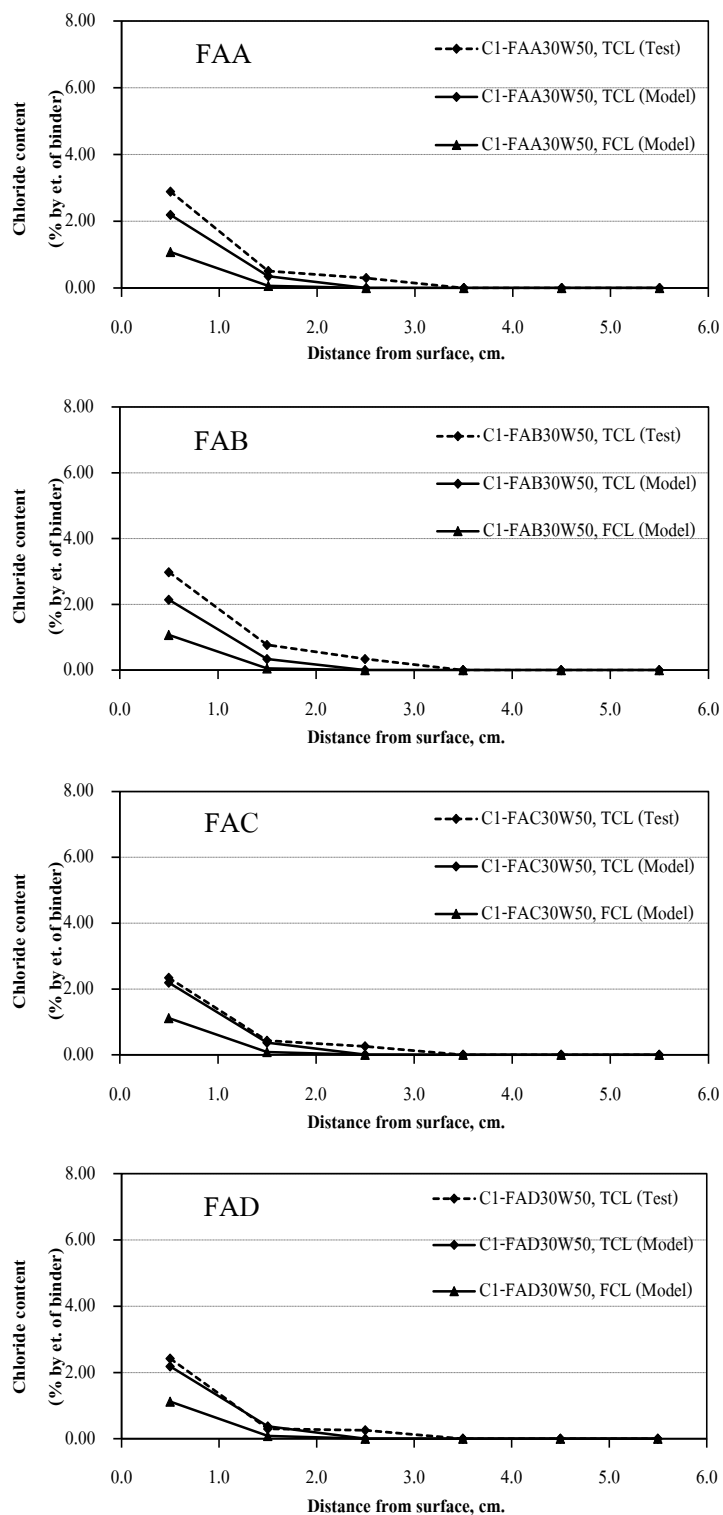
ภาพที่ 4-29 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

Sary and Chheat (2010) ทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 และ 0.50 ซึ่งชนิดของเถ้าลอยที่ใช้คือ FAA (เถ้าลอยแม่เมาะที่มีปริมาณปูนขาวอิสระสูงมากกว่า 2% แต่ต่ำกว่า 2.5%) FAB (เถ้าลอยแม่เมาะที่มีปริมาณปูนขาวอิสระสูงมากกว่า 2.5%) FAC (เถ้าลอยแม่เมาะชนิด N ที่เติมปริมาณปูนขาวอิสระให้มากกว่า 2% แต่ต่ำกว่า 2.5%) และ FAD (เถ้าลอยแม่เมาะชนิด N ที่เติมปริมาณปูนขาวอิสระให้มากกว่า 2.5%) จากนั้นนำตัวอย่างบ่มเป็นเวลา 28 วัน และนำไปแช่สารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 91 วัน จากการตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลอง มีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-30 และภาพที่ 4-32

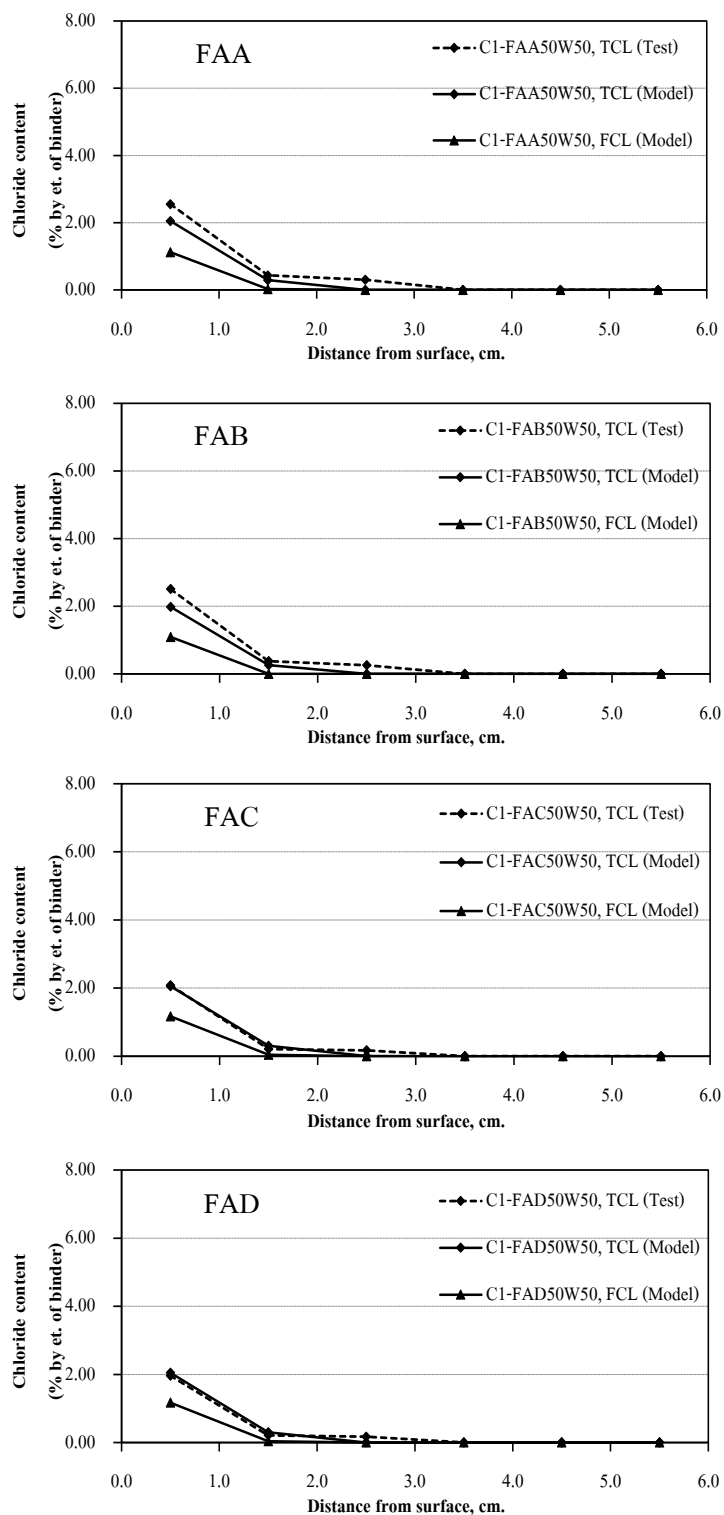


ภาพที่ 4-30 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



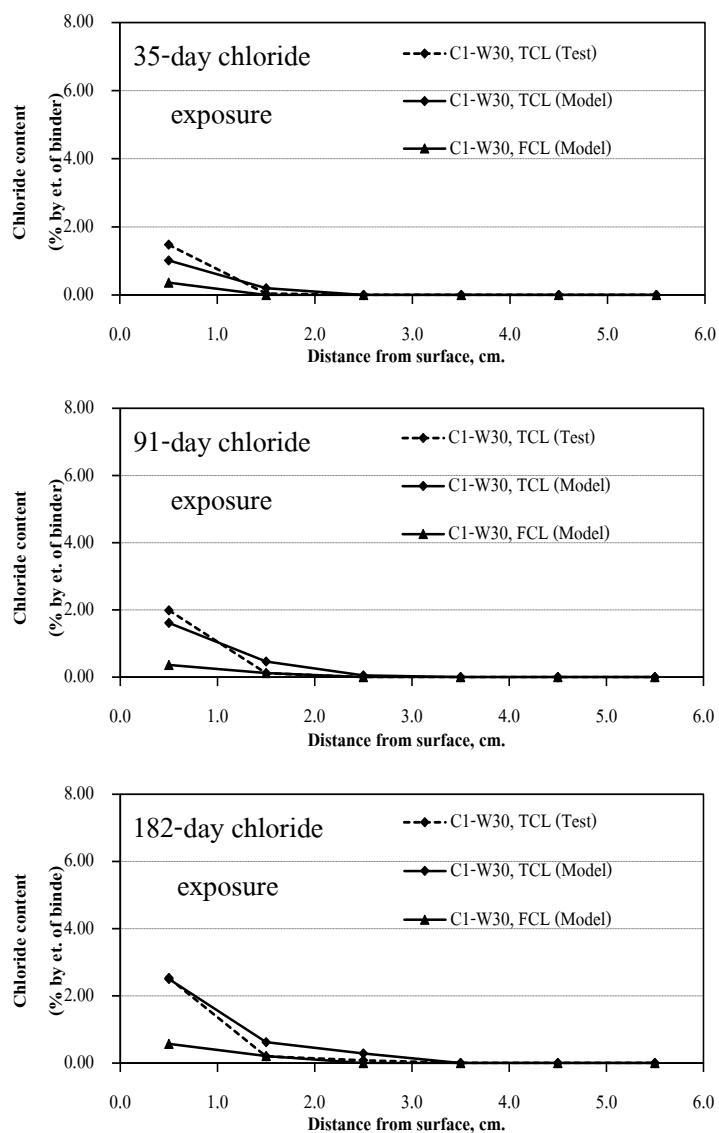


ภาพที่ 4-31 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30

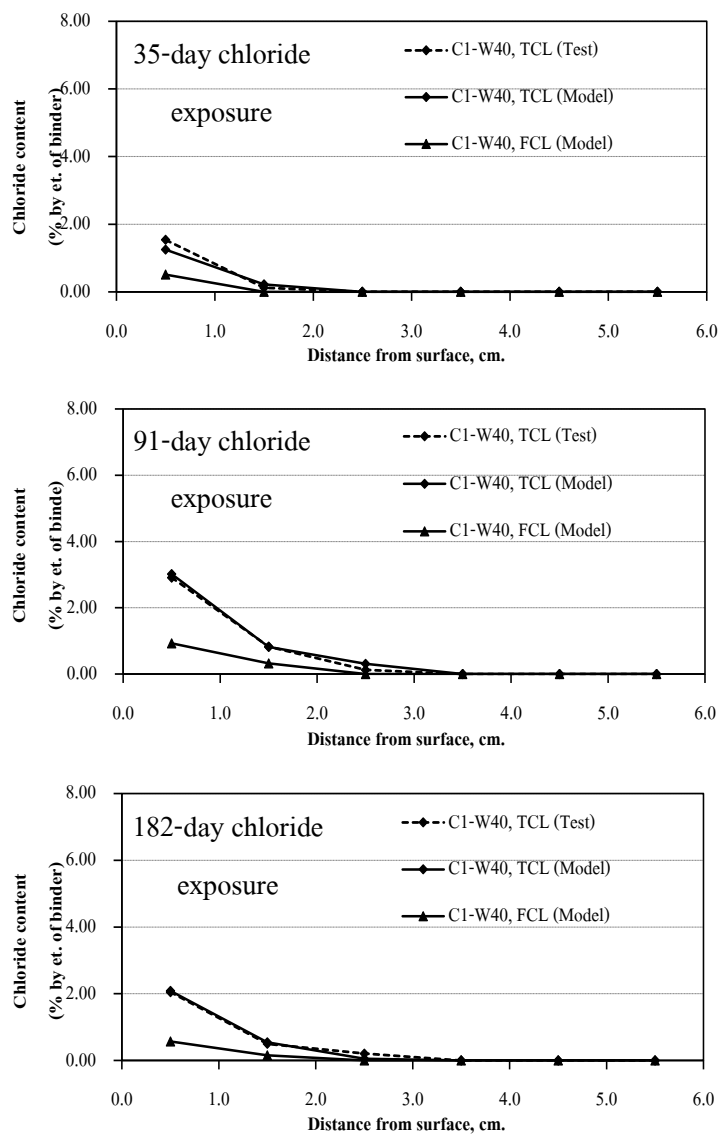


ภาพที่ 4-32 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50

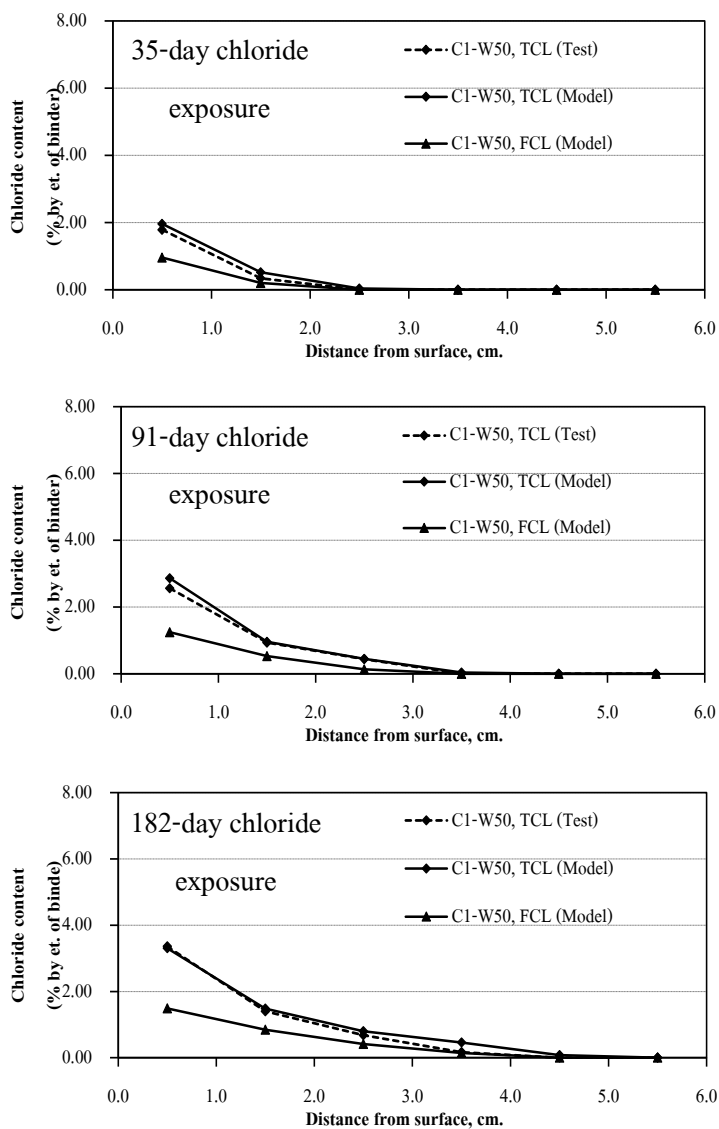
นุสรรา ขยันกิจ และเทอดไกร ไชยมาตร (2552) ทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30, 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 และ 0.50 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และ 5 จากนั้นนำตัวอย่างบ่มเป็นเวลา 28 วัน และแซ่สารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 35, 91 และ 182 วัน จากการตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-33 และภาพที่ 4-41



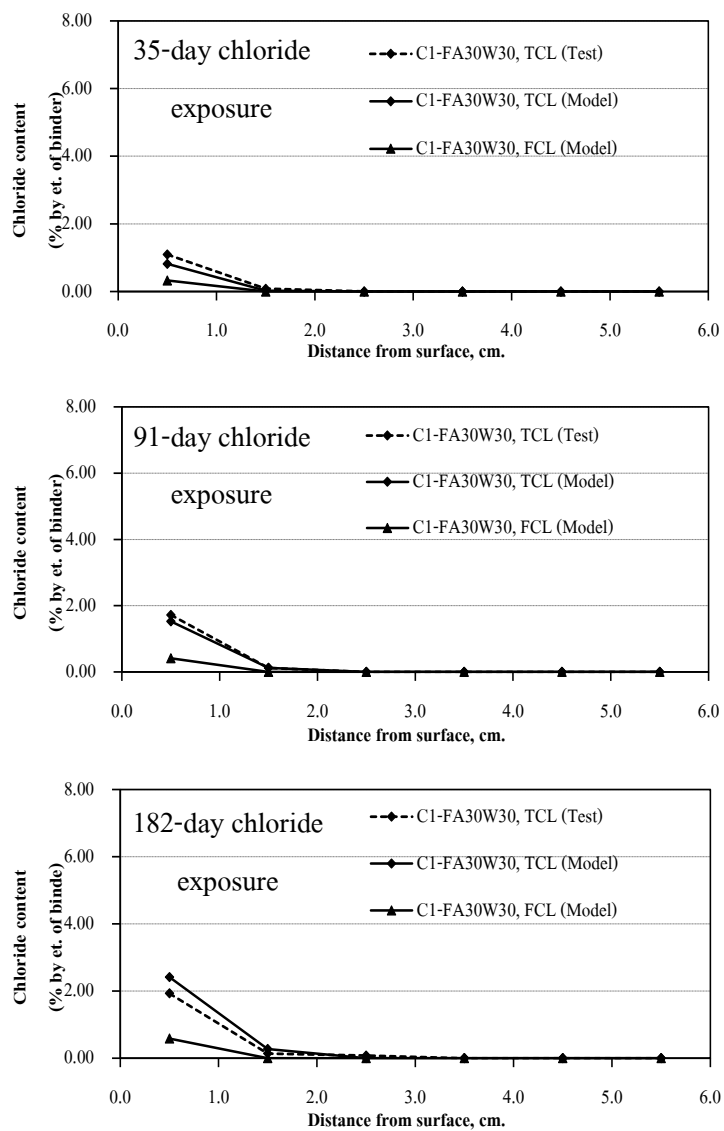
ภาพที่ 4-33 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



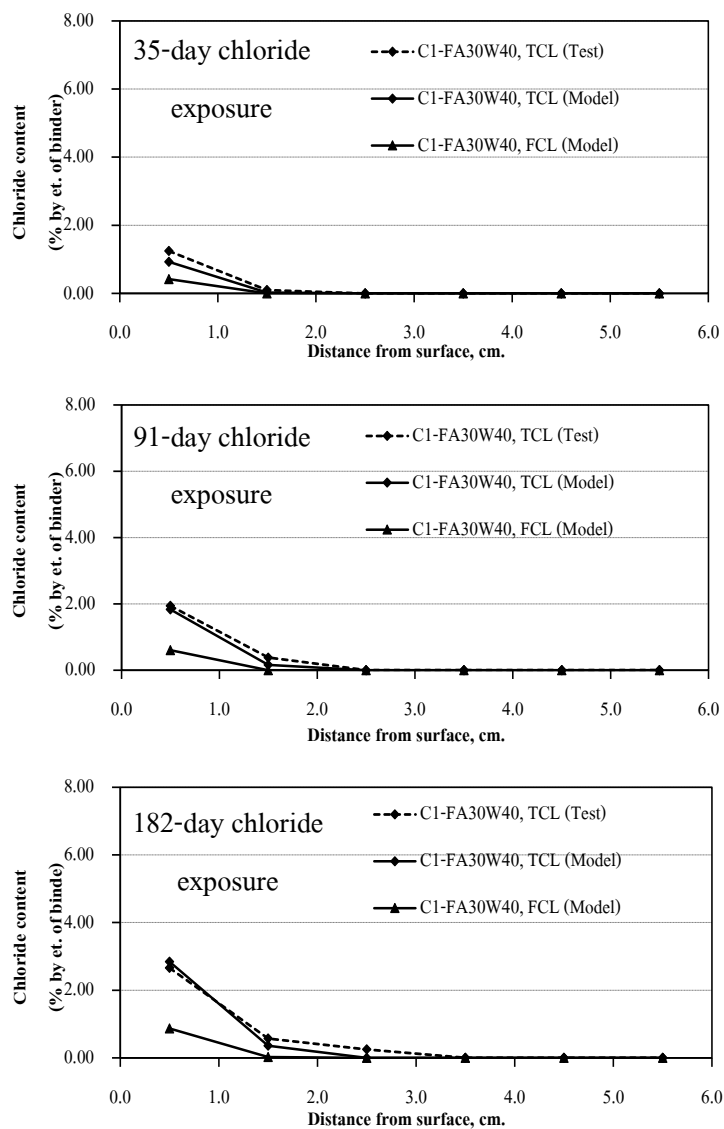
ภาพที่ 4-34 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



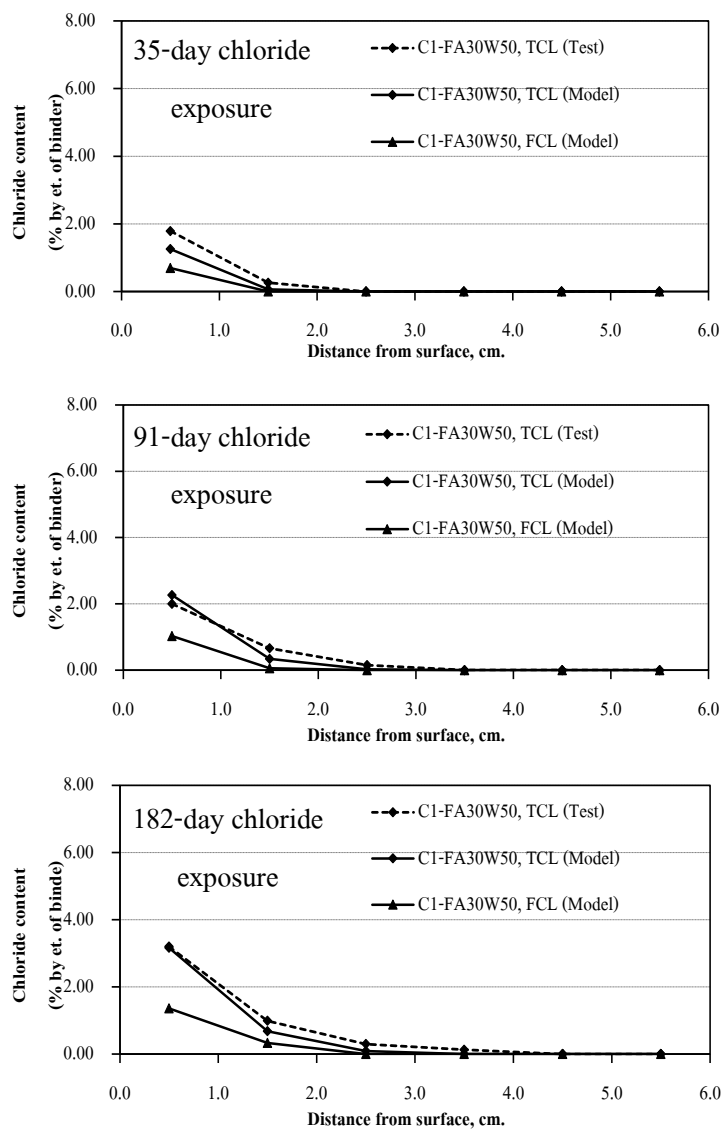
ภาพที่ 4-35 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ภาพที่ 4-36 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

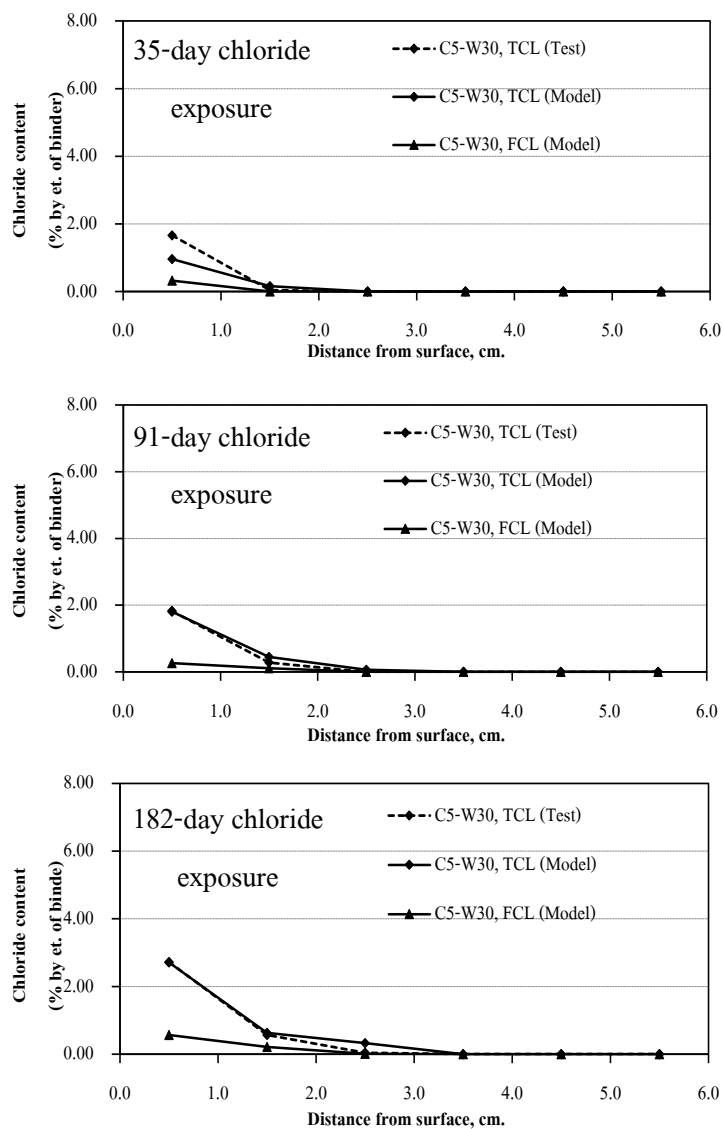


ภาพที่ 4-37 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

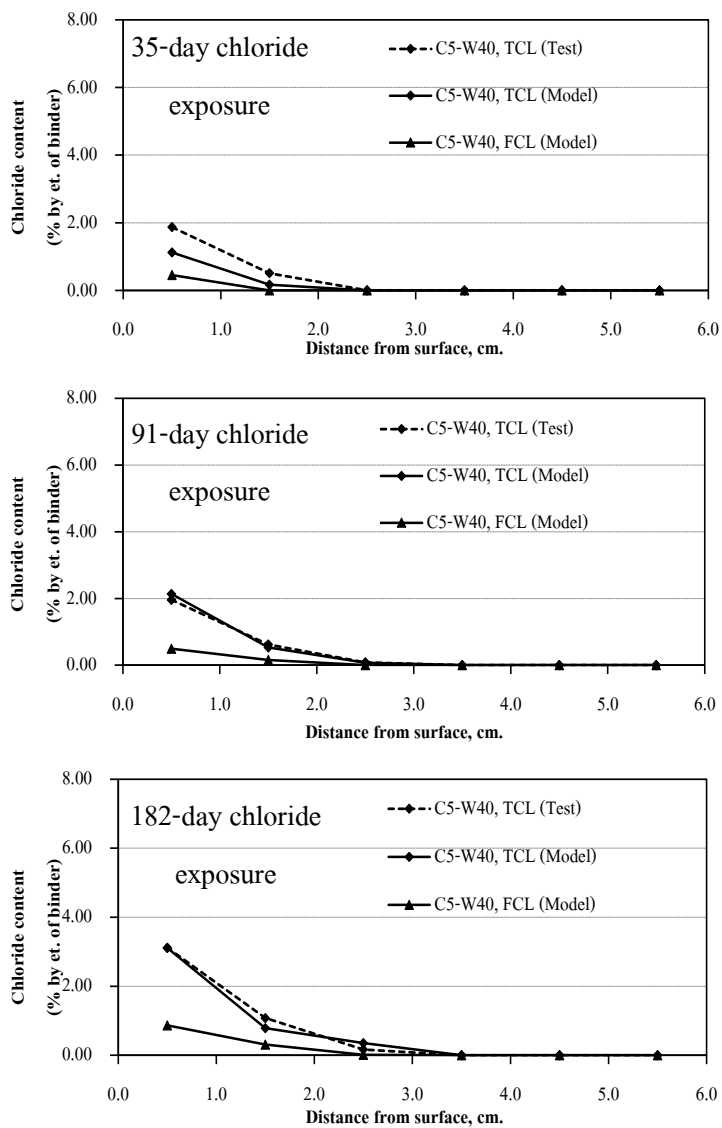


ภาพที่ 4-38 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

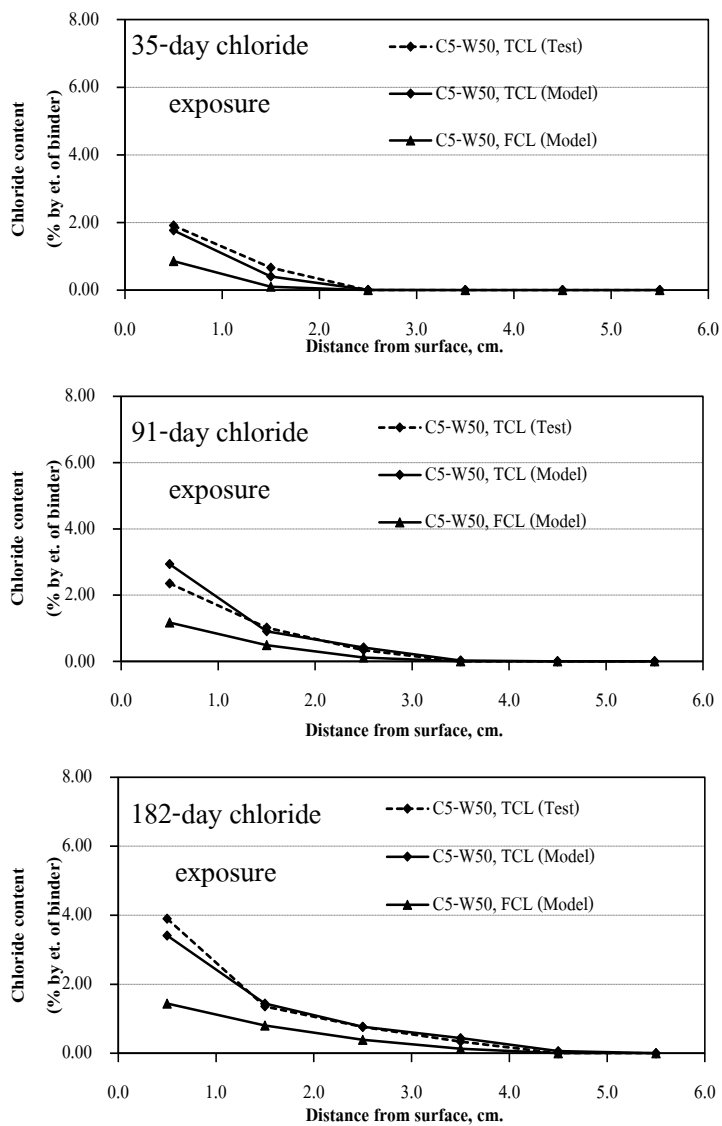




ภาพที่ 4-39 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

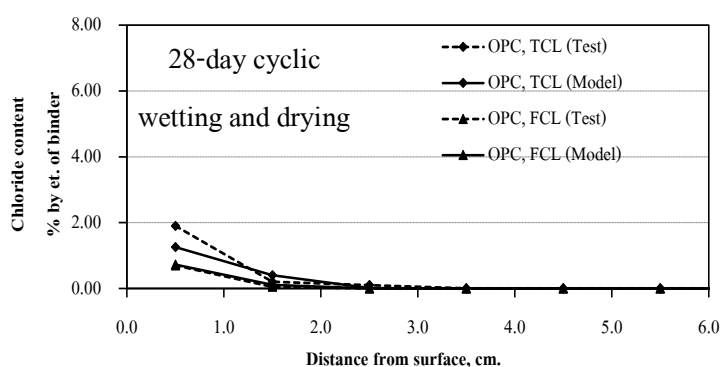


ภาพที่ 4-40 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

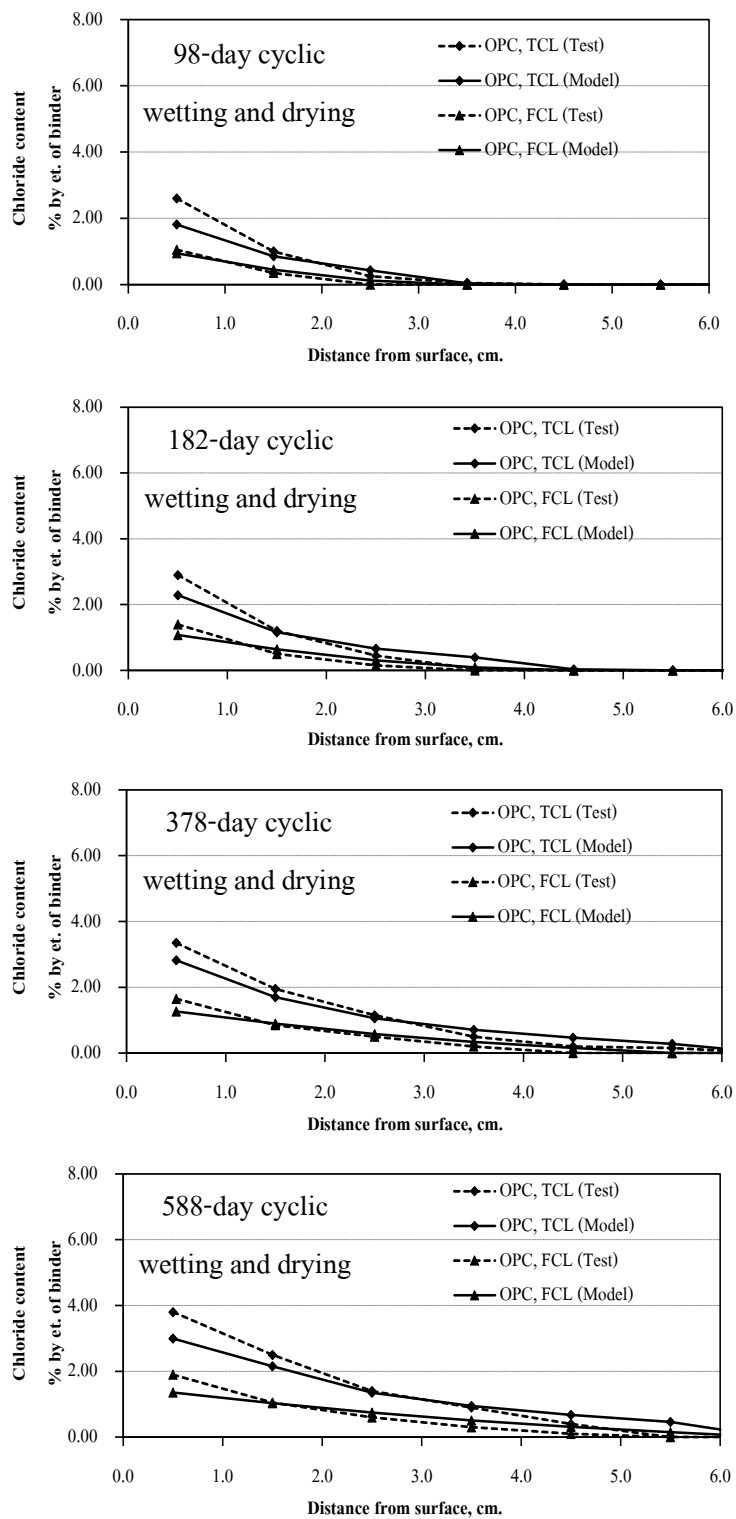


ภาพที่ 4-41 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ส่วน น้ำต่วัตถุประสาน 0.50 และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

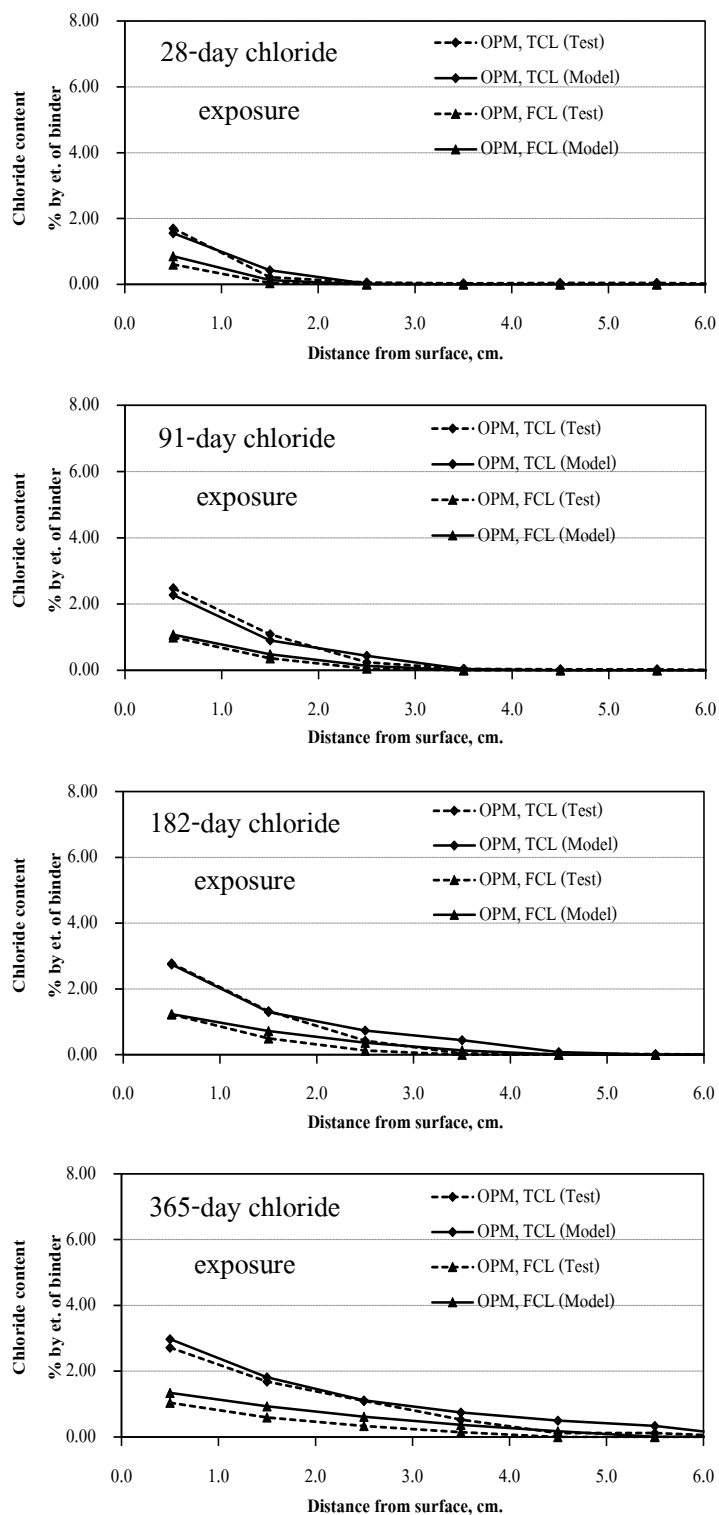
Maruya (1995) ทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จากนั้นนำตัวอย่างบ่มเป็นเวลา 28 วัน และนำไปแช่สารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.82 เป็นเวลา 28, 98, 182, 378 และ 588 วัน ของวัฏจักรเปียกสลับแห้ง โดยหนึ่งวัฏจักรเท่ากับ 14 วัน ซึ่งตัวอย่างเผชิญวัฏจักรเปียก 7 วัน และเผชิญวัฏจักรแห้ง 7 วัน จากการตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์ พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-42 และภาพที่ 4-43 โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของวัฏจักรเปียกสลับแห้ง เนื่องจาก ระยะเวลาที่ตัวอย่างอยู่ในช่วงวัฏจักรแห้ง น้ำภายในตัวอย่างจะระเหยออกจากตัวอย่าง ทำให้ผลึกเกลือคลอไรด์เกิดการตกค้างอยู่ภายในตัวอย่าง และเมื่อวัฏจักรเปียกดำเนินมาอีกครั้ง เกลือคลอไรด์จากสภาวะแวดล้อมภายนอกจะเข้าสู่ภายในเนื้อตัวอย่างและรวมกับผลึกเกลือคลอไรด์ที่ตกค้างในช่วงของวัฏจักรแห้ง ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอไรด์อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ Maruya (1995) ทำการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 จากนั้นนำตัวอย่างบ่มเป็นเวลา 28 วัน และนำไปแช่สารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.82 เป็นเวลา 28, 91, 182 และ 365 วัน จากการตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์ พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-44 และภาพที่ 4-46



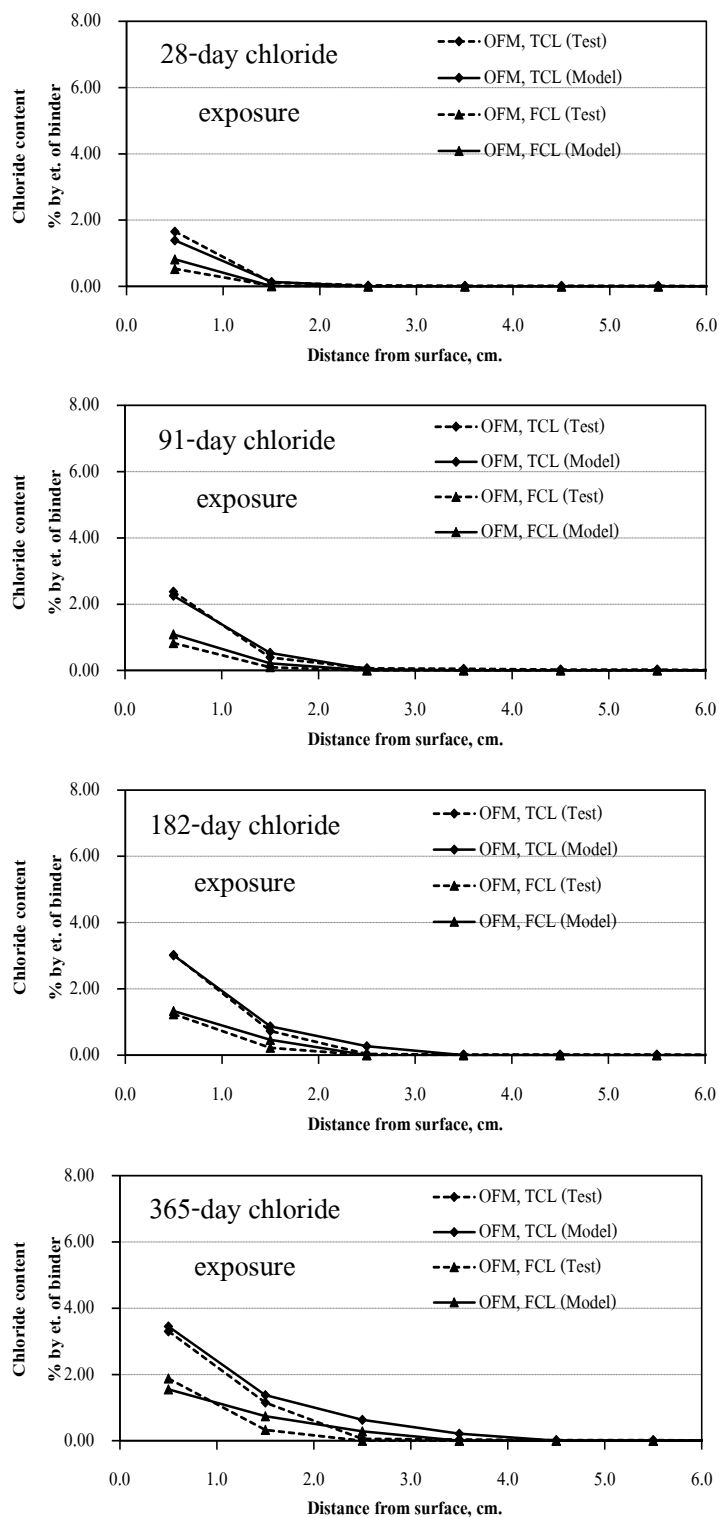
ภาพที่ 4-42 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วน ภายใต้วัฏจักรเปียกสลับแห้ง ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



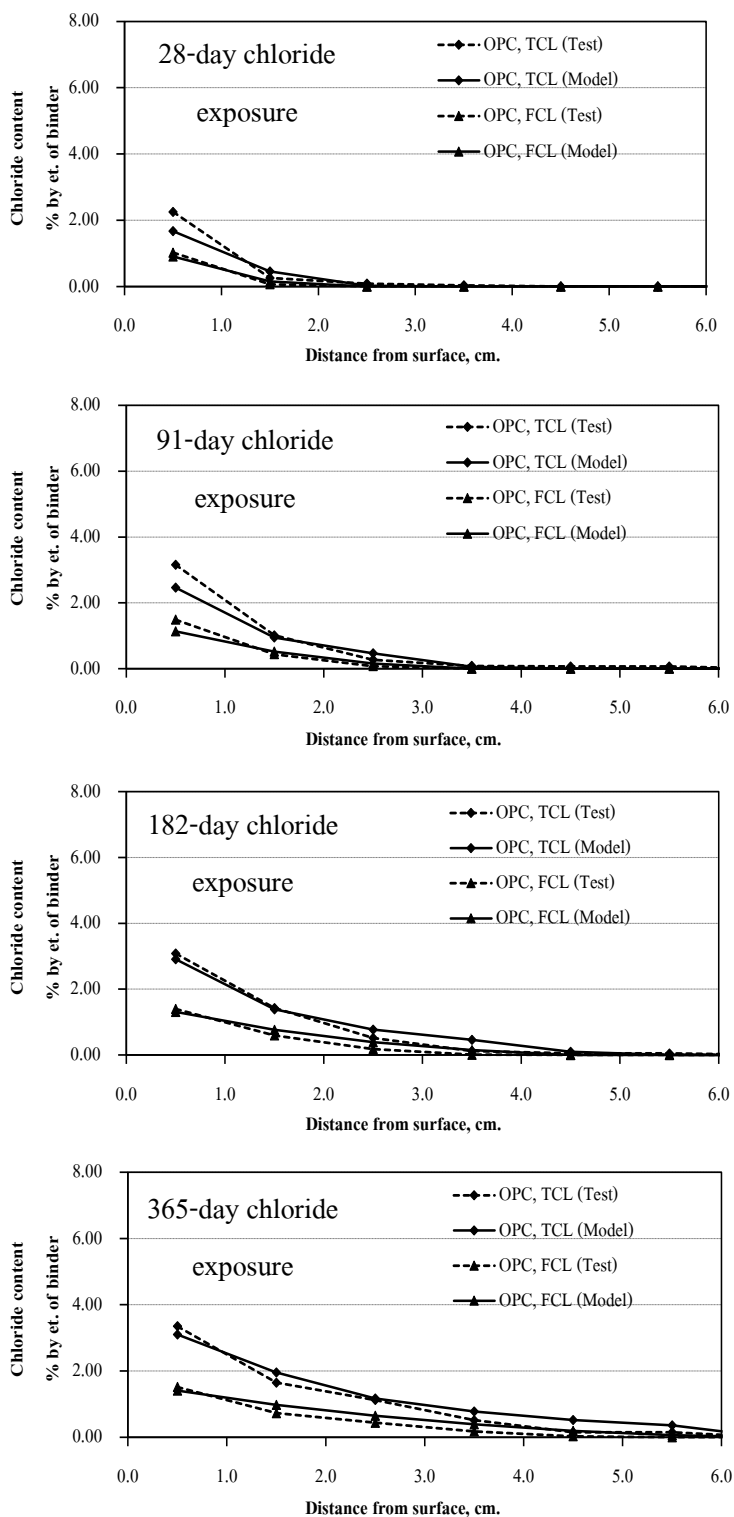
ภาพที่ 4-42 (ต่อ)



ภาพที่ 4-43 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ล้วน ที่อัตราส่วน  
น้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



ภาพที่ 4-44 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



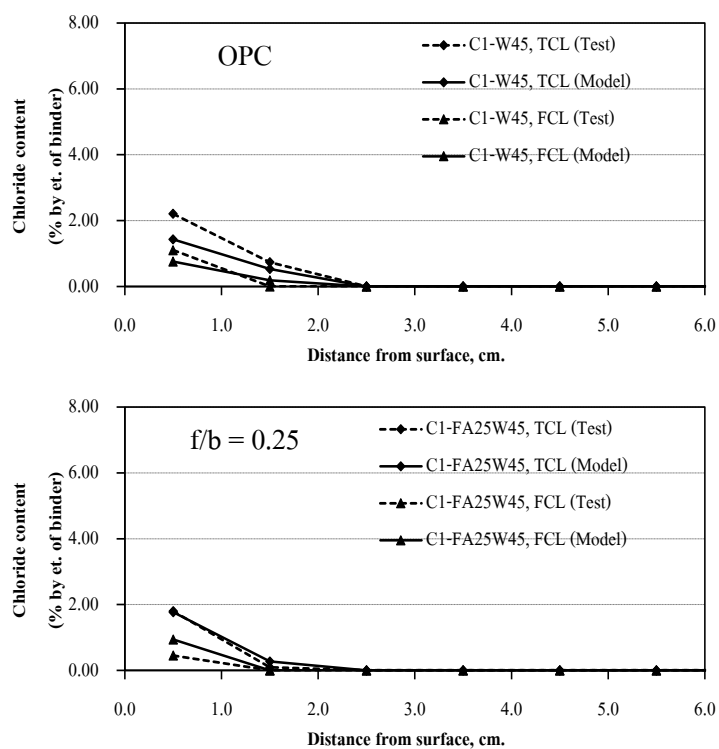
ภาพที่ 4-45 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วน  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



Loser, Lothenbach, Leemann and Tuchschnid (2010) ศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 63 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาแช่สารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.71 เป็นเวลา 50 วัน โดยผลการศึกษานี้แสดงทั้งค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระ สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 4-3 จากการตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์ พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-47

ตารางที่ 4-3 ส่วนผสมของคอนกรีต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย (Loser, Lothenbach, Leemann & Tuchschnid, 2010)

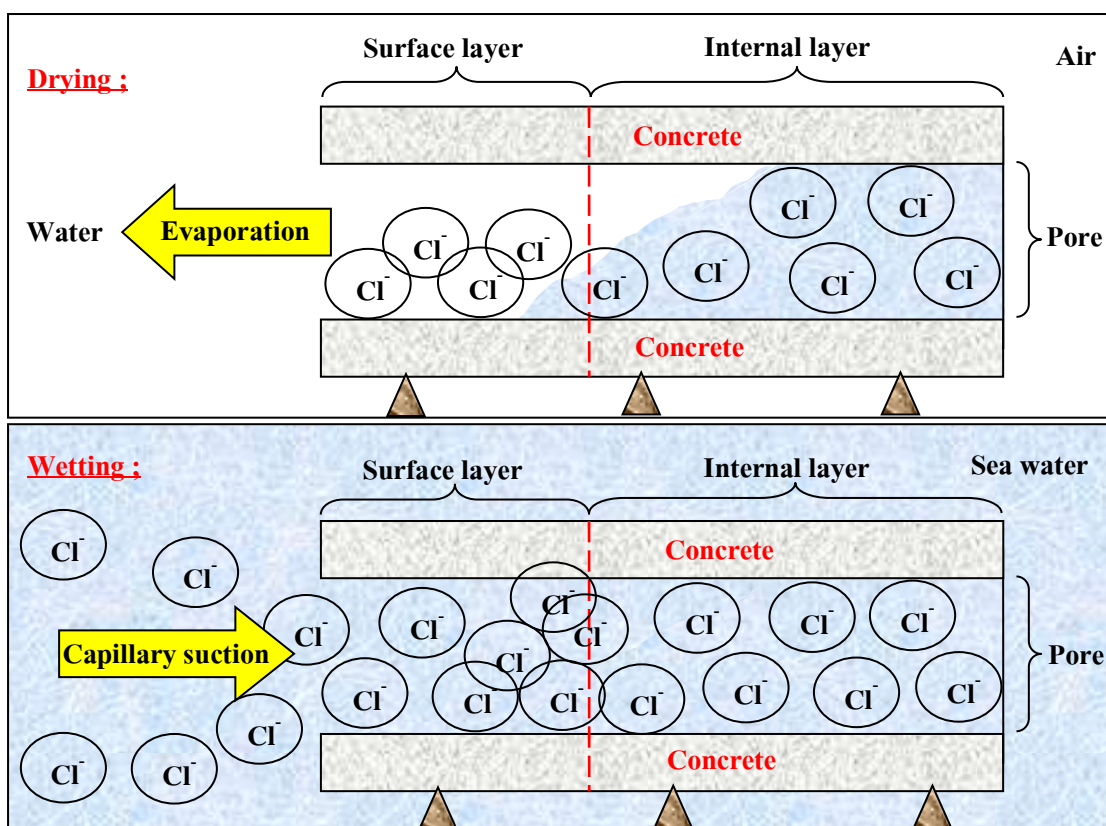
ประเภทตัวอย่าง	คอนกรีตล้วน	คอนกรีตผสมเถ้าลอย
w/b	0.45	0.45
f/b	0.00	0.25
ส่วนผสมคอนกรีต		
ปูนซีเมนต์ (kg/m <sup>3</sup> )	330	256
เถ้าลอย (kg/m <sup>3</sup> )	0	64
น้ำ (kg/m <sup>3</sup> )	149	144
ทราย (kg/m <sup>3</sup> )	1044	1044
หิน (kg/m <sup>3</sup> )	890	890
ความเข้มข้นของคลอไรด์	1.71% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน	
ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	63	
วัฏจักรเปียกสลับแห้ง (วัน)	50	
องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย
SiO <sub>2</sub> (%)	19.2	56.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.3	25.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.1	8.7
CaO (%)	60.9	1.9
SO <sub>3</sub> (%)	3.1	0.0



ภาพที่ 4-46 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 (Loser et al., 2010)

## 2. เงื่อนไขการเผชิญคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง

ภายใต้สภาพแวดล้อมทะเลจริง โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต้องเผชิญกับปรากฏการณ์เปียกสลับแห้ง (Cyclic Wetting and Drying) ณ บริเวณที่มีน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) และบริเวณที่สัมผัสกับละอองคลื่น (Splash zone) นอกจากนี้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ ณ บริเวณที่ห่างไกลจากทะเลสามารถเผชิญกับคลอไรด์ได้ เนื่องจากการสัมผัสกับไอทะเล โดยปรากฏการณ์เปียกสลับแห้งนี้ส่งผลต่อการเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาวะแวดล้อมอย่างมาก กล่าวคือ ในสภาวะเปียก น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยกลไกการดูดซับหรือการดึงดูดคาพิลลารี (Capillary suction) จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อิ่มตัว เมื่อสภาวะภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตระเหย (Evaporation) ออกไป ทิ้งคราบเกลือไว้ในโพรงช่องว่างของคอนกรีต เมื่ออยู่ในสภาวะเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่บริเวณผิวสูงขึ้น ดังนั้น อีออนคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้ง จะทำให้คลอไรด์ที่บริเวณผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นคลอไรด์ภายนอก ดังภาพที่ 4-48

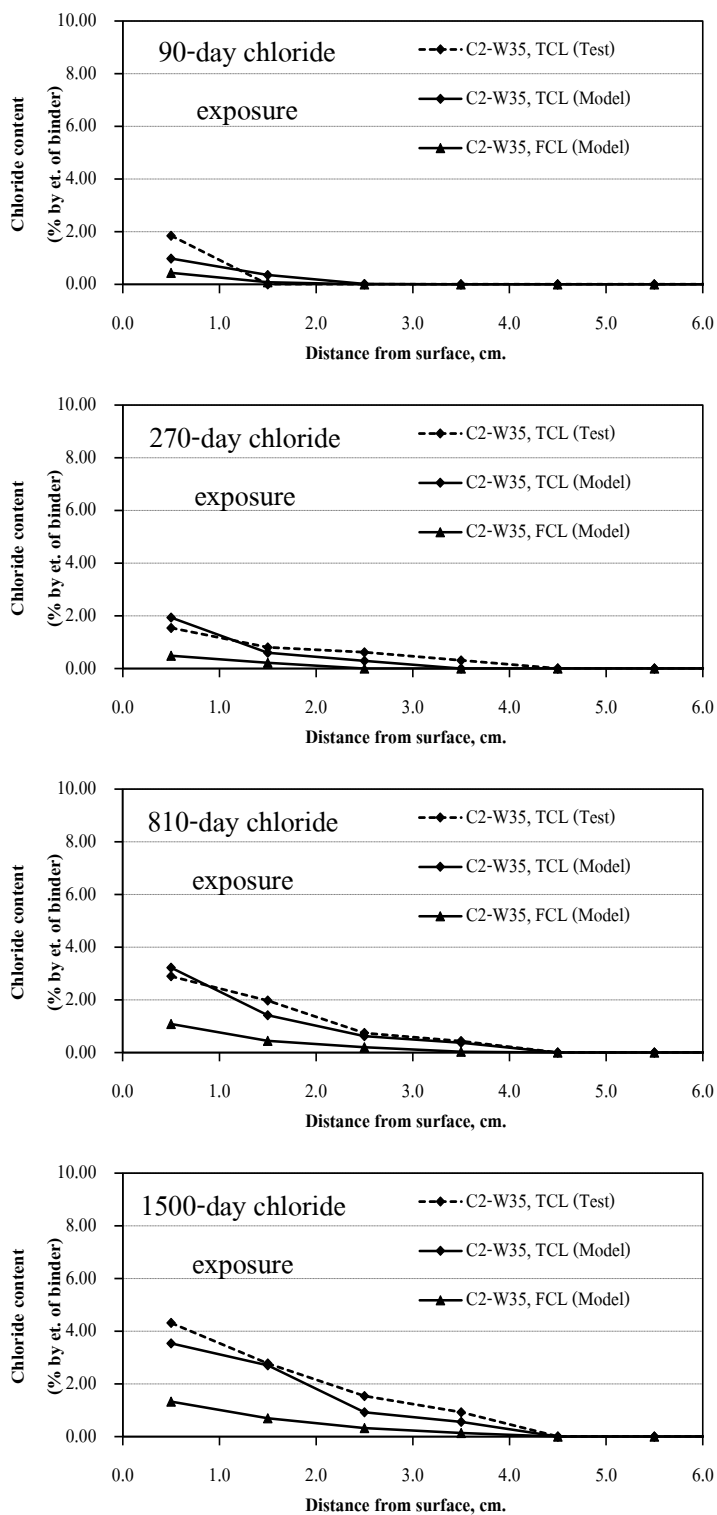


ภาพที่ 4-47 ปรากฏการณ์เปียกสลับแห้ง (Cyclic Wetting and Drying)

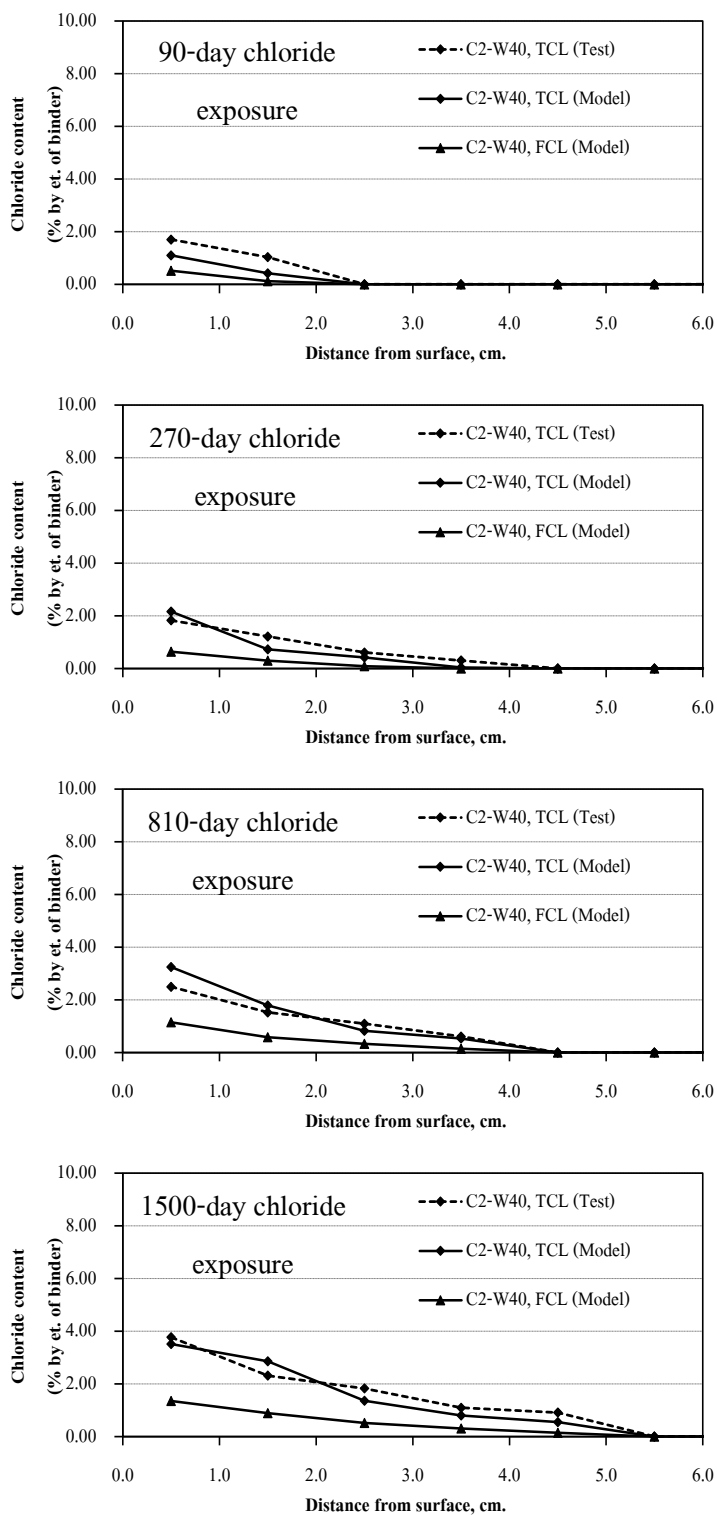
Hosein, Shekarchi and Tadoyon (2016) ศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้เงื่อนไขเป็ยกสลับแห้ง โดยทำการหล่อตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35, 0.40, 0.45 และ 0.50 โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 จากนั้นบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน และนำตัวอย่างคอนกรีตเผชิญกับสภาวะเป็ยกสลับแห้ง ณ บริเวณน้ำขึ้นน้ำลงที่เกาะ Qeshm อ่าวเปอร์เซีย เป็นระยะเวลา 90, 270, 810 และ 1500 วัน โดยผลการศึกษานี้แสดงเฉพาะค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 4-4 จากการตรวจสอบแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองดังภาพที่ 4-49 ถึงภาพที่ 4-52 พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง

ตารางที่ 4-4 ส่วนผสมของคอนกรีต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 (Hosein, Shekarchi & Tadoyon, 2016)

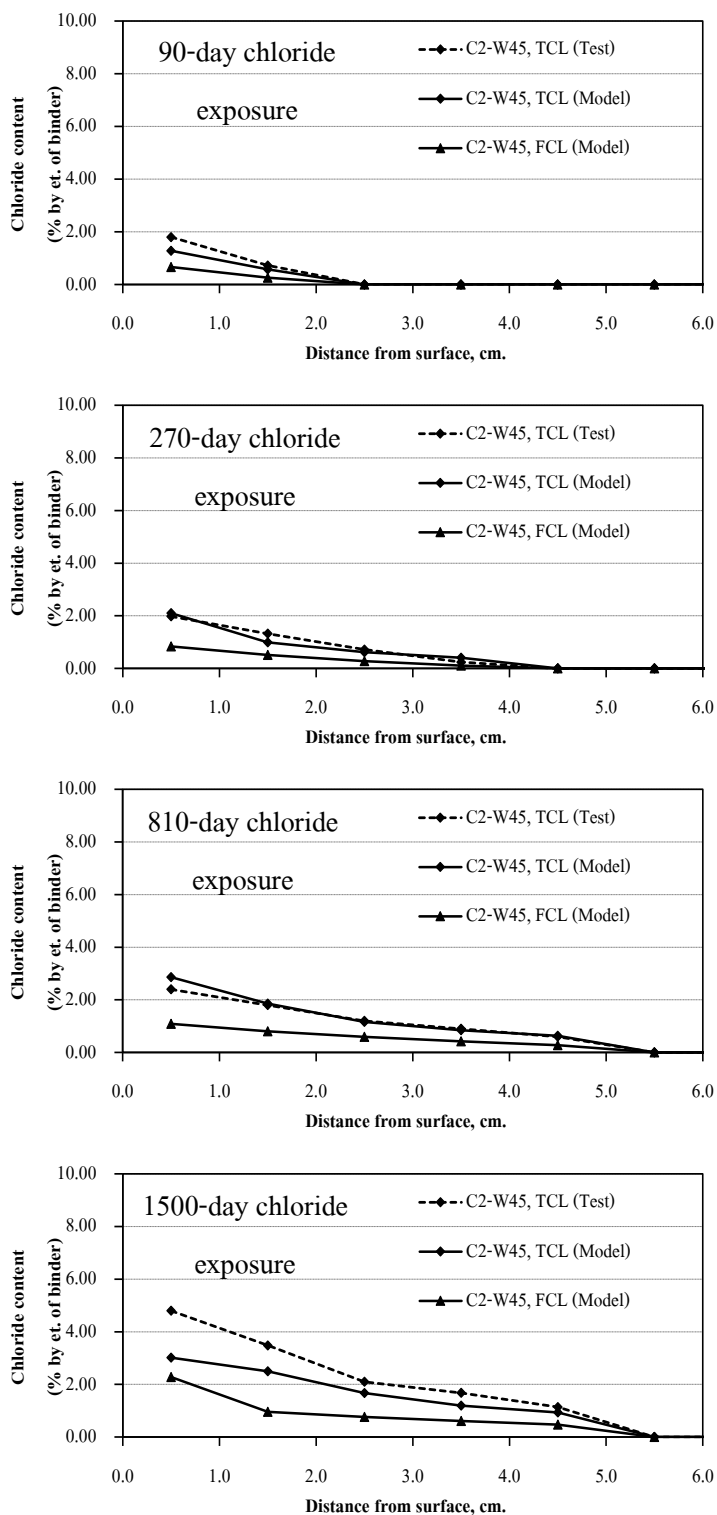
ประเภทตัวอย่าง	คอนกรีตล้วน			
w/b	0.35, 0.40, 0.45, 0.50			
ส่วนผสมคอนกรีต	0.35	0.40	0.45	0.50
ปูนซีเมนต์ (kg/m <sup>3</sup> )	400	400	400	400
น้ำ (kg/m <sup>3</sup> )	140	160	180	200
ทราย (kg/m <sup>3</sup> )	714	695	675	655
หิน (kg/m <sup>3</sup> )	1210	1177	1144	1110
ความเข้มข้นของคลอไรด์	2 % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน			
ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	28			
วัฏจักรเป็ยกสลับแห้ง (วัน)	90, 270, 810, 1,500			
องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 2			
SiO <sub>2</sub> (%)	21.0			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.0			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.5			
CaO (%)	63.0			
SO <sub>3</sub> (%)	1.6			
LOI (%)	2.0			



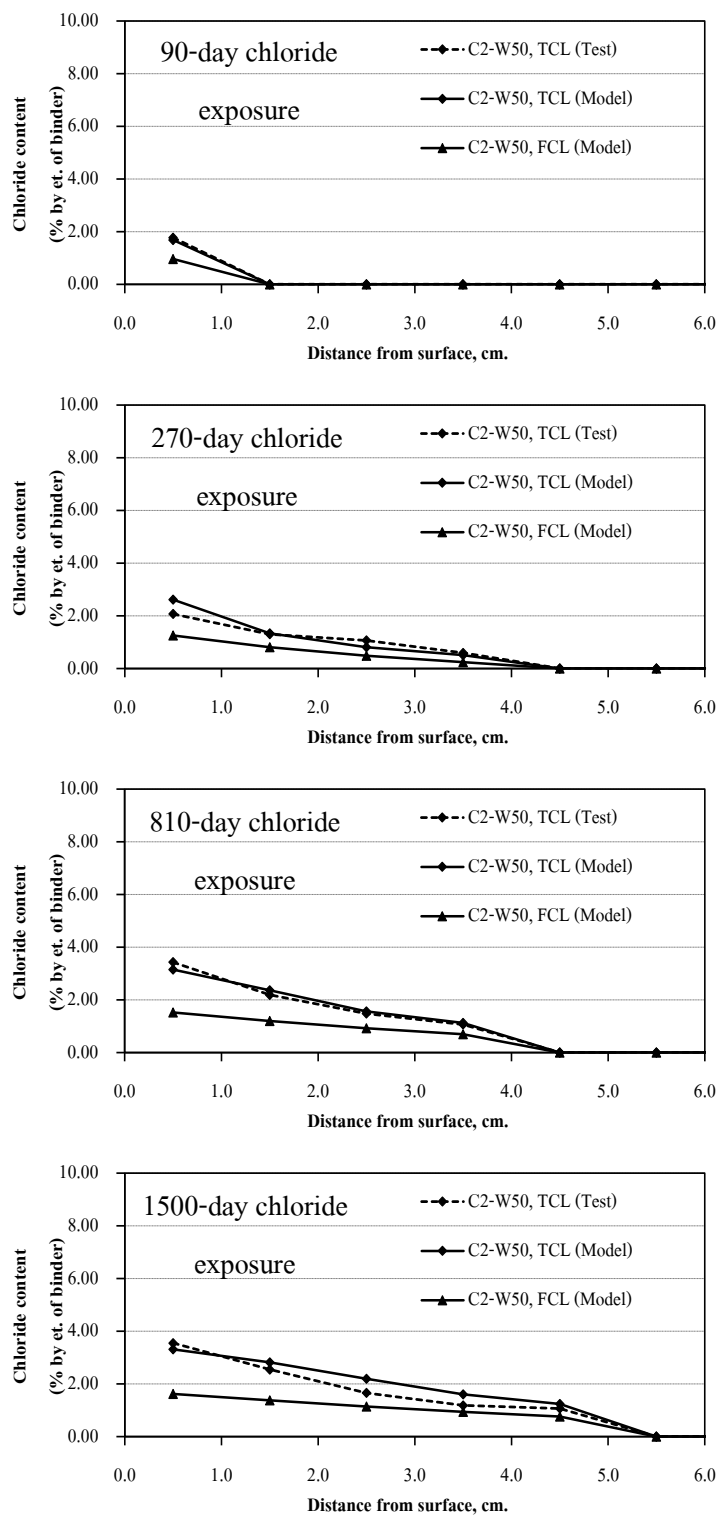
ภาพที่ 4-48 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วน  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 (Hosein et al., 2016)



ภาพที่ 4-49 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผิว  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 (Hosein et al., 2016)



ภาพที่ 4-50 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วน  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 (Hosein et al., 2016)



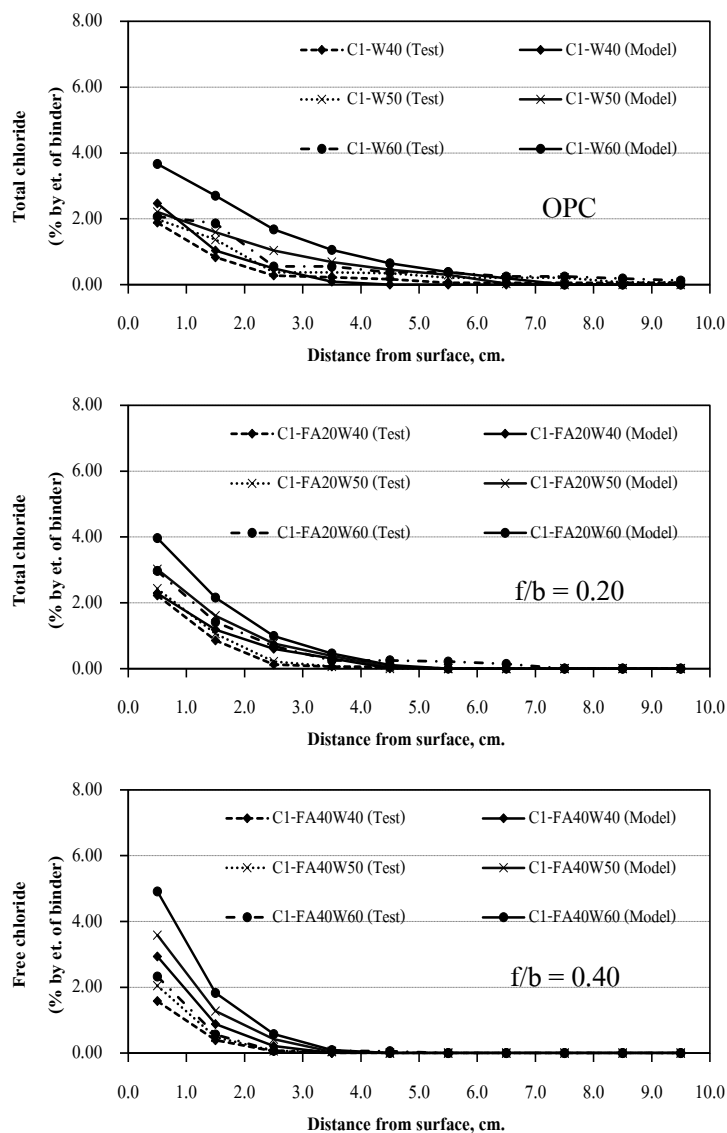
ภาพที่ 4-51 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผิว  
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 (Hosein et al., 2016)



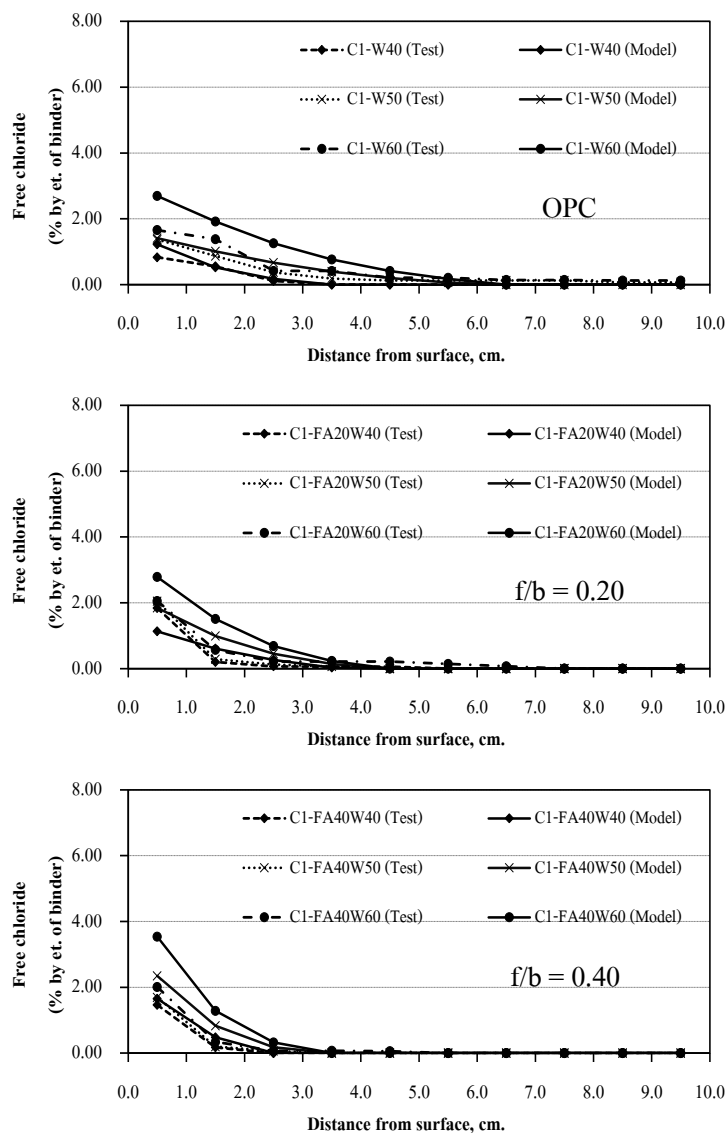
Construction and Maintenance Technology Research Center (2014) ศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้เงื่อนไขเปียกสลับแห้ง โดยคอนกรีตถูกนำมาเผชิญกับสภาวะแวดล้อมทะเลจริง ที่มีช่วงน้ำขึ้นครึ่งวันและน้ำลงครึ่งวัน ณ บริเวณวัดโกมุทร์ตำนาราม ต.อ่างศิลา อ.เมือง จ.ชลบุรี เป็นระยะเวลา 365, 730, 1,094, 1,460 และ 1,825 วัน ส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมี ถูกแสดงดังตารางที่ 4-5 การตรวจสอบแบบจำลอง แสดงดังภาพที่ 4-53 ถึงภาพที่ 4-62 พบว่า คลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระที่ได้จากการคำนวณ มีความคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองเล็กน้อย เนื่องจากในสภาวะแวดล้อมทะเลจริง ไม่สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของน้ำทะเล ที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล หรือการทำลายเนื่องจากซัลเฟต หรือคาร์บอนเนชั่น เป็นต้น จึงเป็นเหตุให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 4-5 ส่วนผสมของคอนกรีต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ เถ้าลอย (Construction and Maintenance Technology Research Center, 2014)

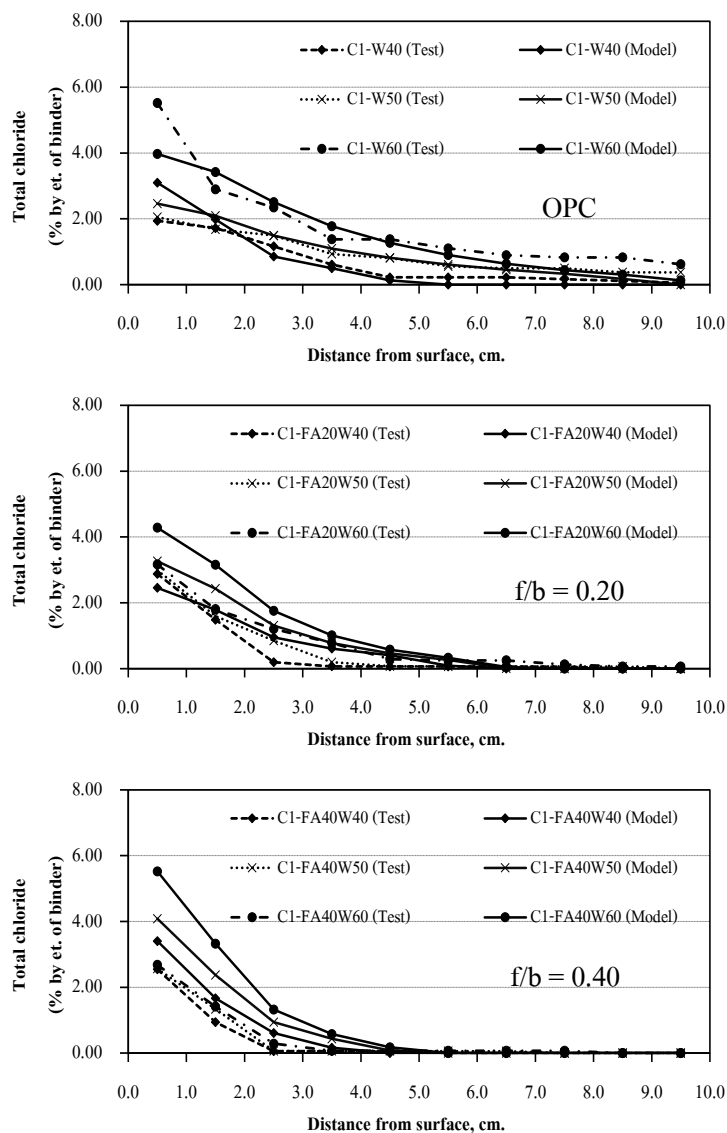
ประเภทตัวอย่าง	คอนกรีตล้วน			คอนกรีตผสมเถ้าลอย					
	0.40	0.50	0.60	0.40	0.50	0.60			
w/b	0.40	0.50	0.60	0.40	0.50	0.60			
f/b	-	-	-	0.20	0.40	0.20	0.40	0.20	0.40
ส่วนผสมคอนกรีต									
ปูนซีเมนต์ (kg/ m <sup>3</sup> )	435	382	340	335	242	295	215	264	193
เถ้าลอย (kg/ m <sup>3</sup> )	0	0	0	84	162	74	143	66	128
น้ำ (kg/ m <sup>3</sup> )	174	191	204	168	162	185	179	198	193
ทราย (kg/ m <sup>3</sup> )	776	776	776	776	776	776	776	776	776
หิน (kg/ m <sup>3</sup> )	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025
ความเข้มข้นของคลอไรด์	1% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน								
ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	28								
องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์			เถ้าลอย					
SiO <sub>2</sub> (%)	19.51			40.93					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.97			22.42					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.78			13.64					
CaO (%)	65.38			13.63					
SO <sub>3</sub> (%)	2.16			1.92					



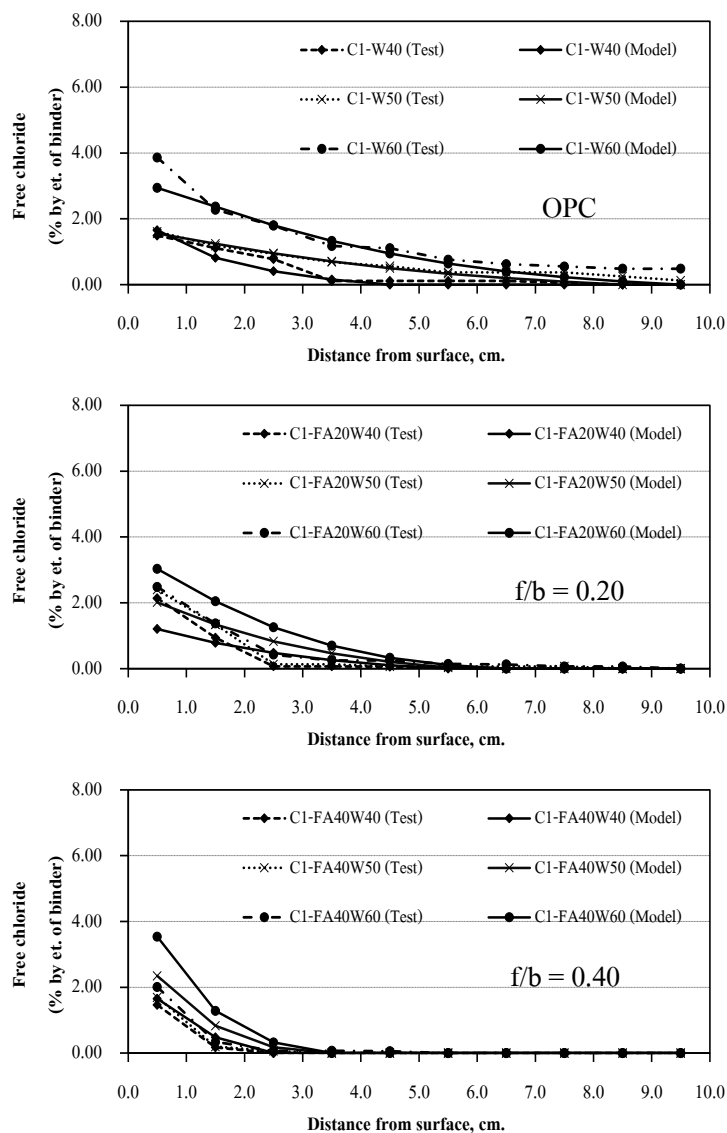
ภาพที่ 4-52 การตรวจสอบแบบจำลองปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60 (Construction and Maintenance Technology Research Center, 2014)



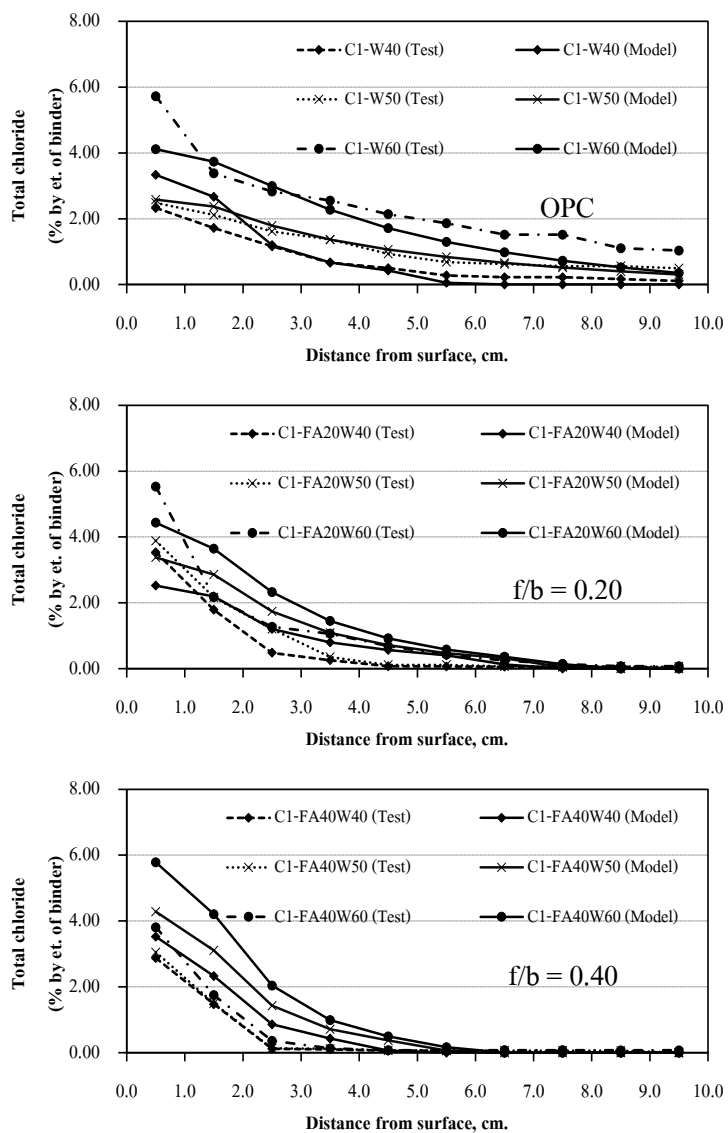
ภาพที่ 4-53 การตรวจสอบแบบจำลองปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะ  
เวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60  
(Construction and Maintenance Technology Research Center, 2014)



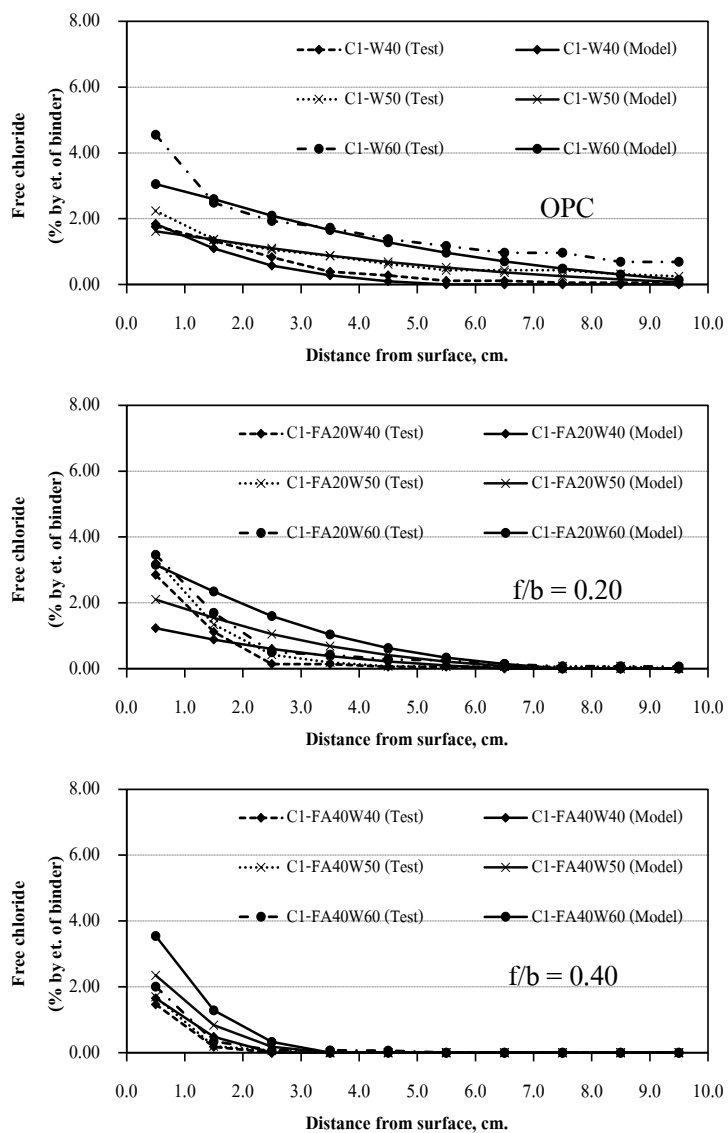
ภาพที่ 4-54 การตรวจสอบแบบจำลองปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 730 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60 (Construction and Maintenance Technology Research Center, 2014)



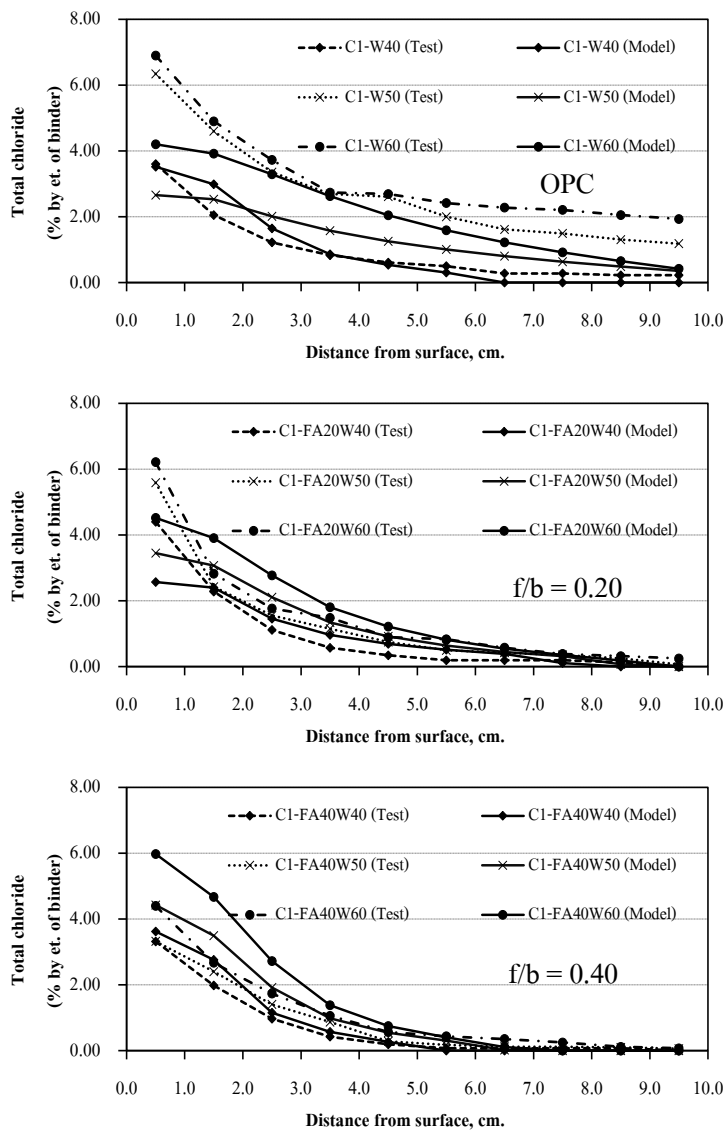
ภาพที่ 4-55 การตรวจสอบแบบจำลองปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะ  
เวลาเผชิญคลอไรด์ 730 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60  
(Construction and Maintenance Technology Research Center, 2014)



ภาพที่ 4-56 การตรวจสอบแบบจำลองปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 1,095 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60 (Construction and Maintenance Technology Research Center, 2014)

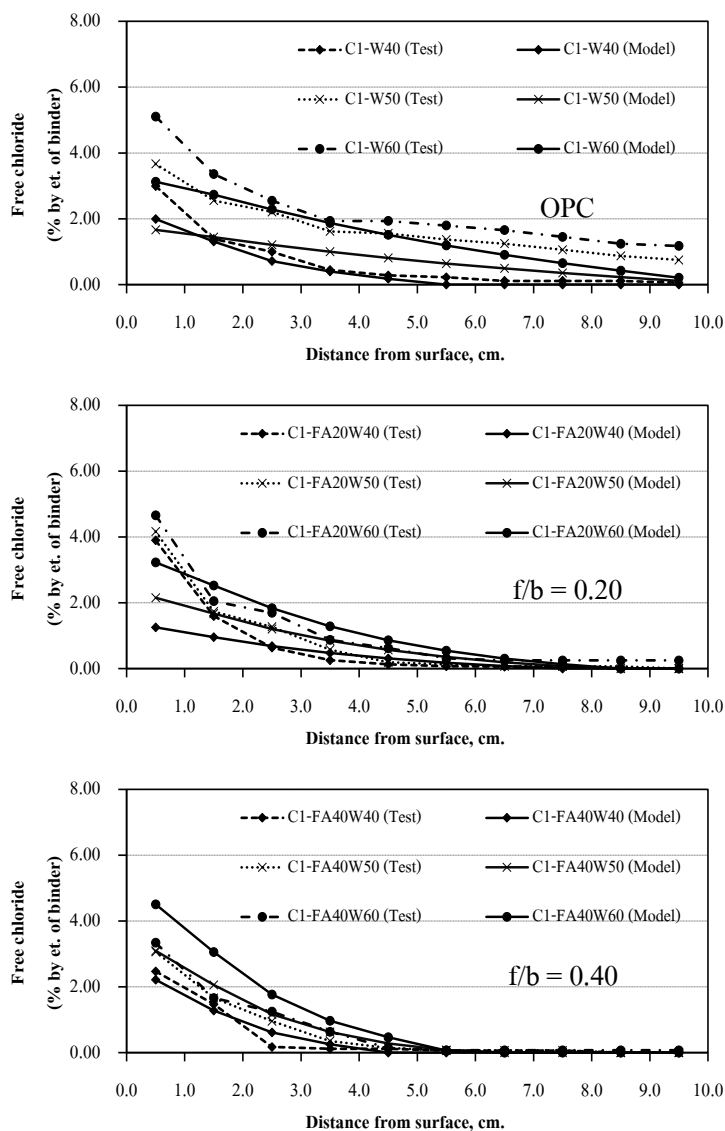


ภาพที่ 4-57 การตรวจสอบแบบจำลองปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะ  
เวลาเผชิญคลอไรด์ 1,095 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60  
(Construction and Maintenance Technology Research Center, 2014)

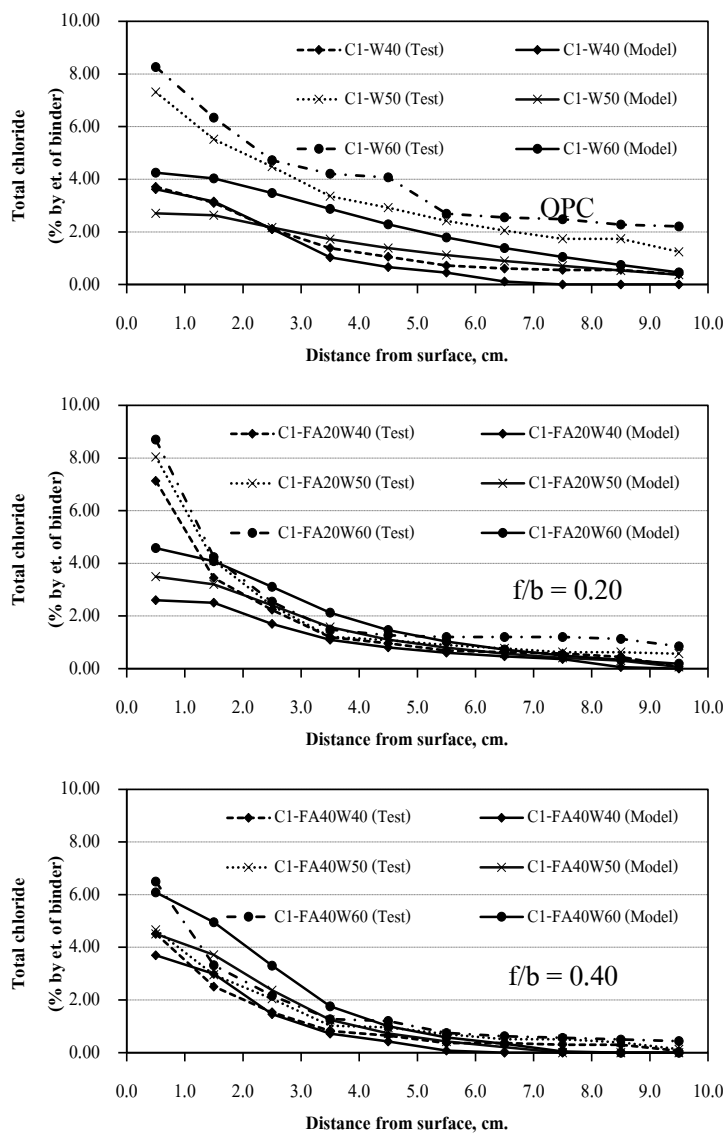


ภาพที่ 4-58 การตรวจสอบแบบจำลองปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 1,460 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60 (Construction and Maintenance Technology Research Center, 2014)

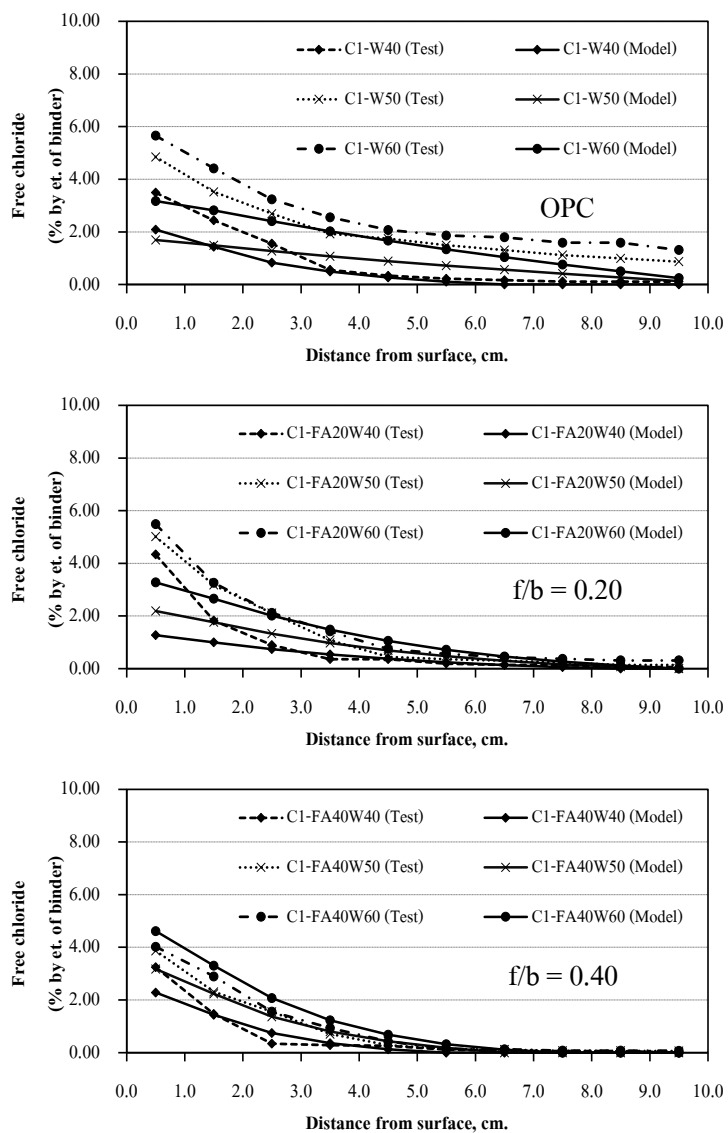




ภาพที่ 4-59 การตรวจสอบแบบจำลองปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 1,460 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60 (Construction and Maintenance Technology Research Center, 2014)



ภาพที่ 4-60 การตรวจสอบแบบจำลองปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 1,825 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60 (Construction and Maintenance Technology Research Center, 2014)

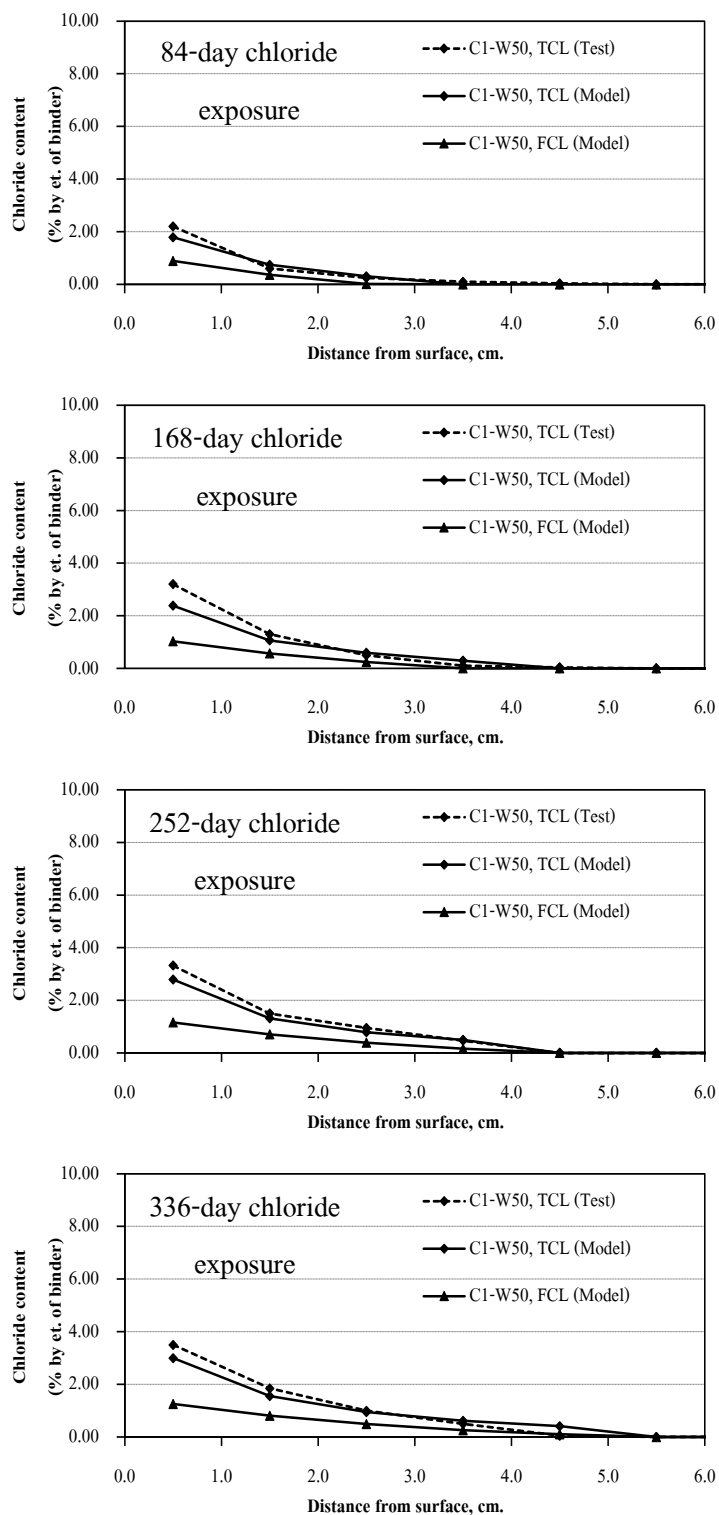


ภาพที่ 4-61 การตรวจสอบแบบจำลองปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะ เวลาเผชิญคลอไรด์ 1,825 วัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50, 0.60 (Construction and Maintenance Technology Research Center, 2014)

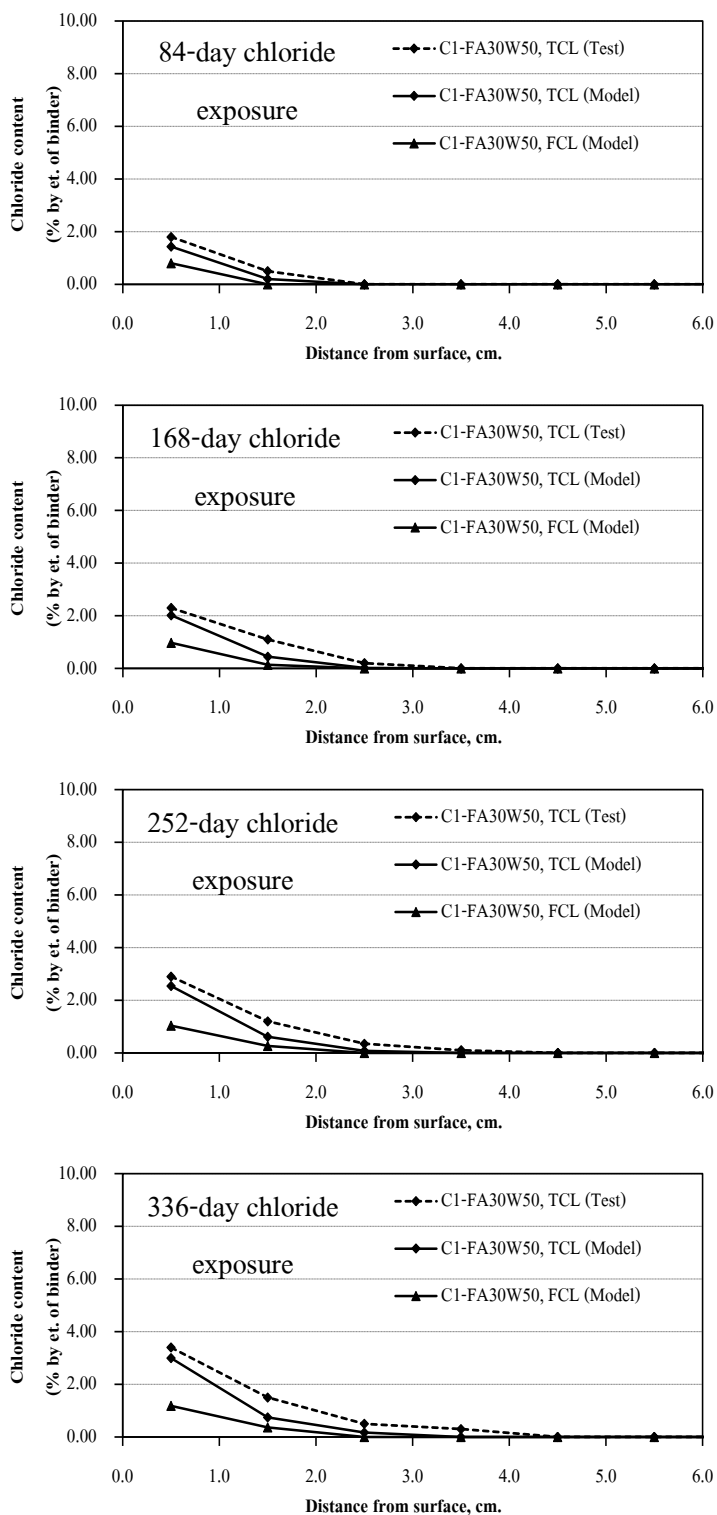
McPolin, Basheer, Long, Grattan and Sun (2005) ศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยภายใต้เงื่อนไขเปียกสลับแห้ง โดยแต่ละรอบมี 7 วัน คือ เปียก 1 วัน และแห้ง 6 วัน หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 3 วัน และนำมาบ่มด้วยการหุ้มแผ่นพลาสติกไว้จนตัวอย่างคอนกรีตครบอายุ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาเผชิญกับสารละลายเกลือคลอไรด์โดยวัฏจักรที่ต่างกัน โดยผลการศึกษานี้แสดงเฉพาะค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 4-6 จากการตรวจสอบแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองดังภาพที่ 4-63 ถึงภาพที่ 4-64 พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง

ตารางที่ 4-6 ส่วนผสมของคอนกรีต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย (McPolin, Basheer, Long, Grattan & Sun, 2005)

ประเภทตัวอย่าง	คอนกรีตล้วน	คอนกรีตผสมเถ้าลอย
w/b	0.50	0.50
f/b	0.00	0.30
ส่วนผสมคอนกรีต		
ปูนซีเมนต์ (kg/m <sup>3</sup> )	369	246
เถ้าลอย (kg/m <sup>3</sup> )	0	106
น้ำ (kg/m <sup>3</sup> )	185	176
ทราย (kg/m <sup>3</sup> )	922	880
หิน (kg/m <sup>3</sup> )	923	880
ความเข้มข้นของคลอไรด์	1.95% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน	
ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	28	
วัฏจักรเปียกสลับแห้ง (วัน)	84, 168, 252, 336	
องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย
SiO <sub>2</sub> (%)	21.0	59.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6.0	23.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.0	9.0
CaO (%)	64.0	2.0
SO <sub>3</sub> (%)	3.0	0.3



ภาพที่ 4-62 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 (McPolin et al., 2005)



ภาพที่ 4-63 การตรวจสอบแบบจำลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 (McPolin et al., 2005)

### การตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

จากการตรวจสอบแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูดอิออนคลอไรด์ ของ Sumranwanich (2004) พบว่า ให้ค่าไม่สอดคล้องกับข้อมูลที่ทำการขยายขอบเขต เนื่องจากขอบเขตข้อมูลที่ใช้พัฒนาแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) มีค่อนข้างจำกัดดังตารางที่ 3-1, 3-4 และ 3-9 ดังนั้นเพื่อให้การทำนายมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูดอิออนคลอไรด์ต่อจากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) ด้วยการขยายฐานข้อมูลและเพิ่มปัจจัยที่มีผลกระทบเข้าไปในแต่ละแบบจำลองด้วย ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ถูกพัฒนาแล้วพบว่า มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนลดลงจากแบบจำลองของ Sumranwanich (2004) ดังตารางที่ 4-7 ซึ่งเป็นการตรวจสอบกับผลการทดลองที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง

เมื่อนำแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูดอิออนคลอไรด์ รวมกันเพื่อคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ ในคอนกรีตกับงานวิจัยอื่น ๆ ได้แก่ Hosein, Shekarchi and Tadoyon (2016); Construction and Maintenance Technology Research Center (2014); Loser, Lothenbach, Leemann and Tuchschnid (2010); McPolin, Basheer, Long, Grattan and Sun (2005) พบว่า แบบจำลองมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเท่ากับ -11.93%, +20.95%, +2.52% และ -4.09% โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง -11.93% ถึง +20.95% กับผลการทดลองจากนักวิจัยอื่น ๆ

ตารางที่ 4-7 ความคลาดเคลื่อนของแต่ละแบบจำลองในงานวิจัยของ Sumranwanich (2004) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนา

แบบจำลอง	ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง (%)	
	Sumranwanich (2004)	แบบจำลองที่ถูกพัฒนา
ความสามารถกักเก็บคลอไรด์	-64.75 ถึง 59.17	-0.18 ถึง 9.02
สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์	2.64 ถึง 8.31	1.22 ถึง 2.70
การดึงดูดอิออนคลอไรด์	-65.44 ถึง 50.41	-15.88 ถึง 28.97

## บทที่ 5

### การศึกษาตัวแปรของแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์

#### แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย

บทนี้มุ่งเน้นทำการศึกษาค่าตัวแปรที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยใช้ข้อจำกัดประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ ดังตารางที่ 5-1 สำหรับส่วนผสมและเงื่อนไขการเผชิญคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 5-2 ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30, 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25, 0.30, 0.50 และ 0.70 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 1, 7 และ 28 วัน ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28, 91, 182 และ 365 วัน และความเข้มข้นของคลอไรด์ร้อยละ 1 ถูกนำมาใช้ในการศึกษาตัวแปรในบทนี้

ตารางที่ 5-1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ที่ใช้สำหรับการศึกษาค่าตัวแปรของแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย

วัสดุประสาน	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์			เถ้าลอย	
	I	III	V	2ก	2ข
ชนิดของวัสดุ ประสาน					
Chemical compositions					
SiO <sub>2</sub> (%)	18.46	20.73	20.97	45.88	37.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.64	4.49	3.49	26.20	19.49
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.29	3.32	4.34	0.00	13.39
CaO (%)	66.45	64.89	62.86	8.28	18.81
SO <sub>3</sub> (%)	2.70	2.76	2.12	0.00	3.46
LOI (%)	2.90	1.23	1.21	0.17	0.61
Physical properties					
Specific gravity	3.15	3.22	3.13	2.20	2.20
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3200	4770	-	3556	2860



ตารางที่ 5-2 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลอง ที่ใช้สำหรับการศึกษาตัวแปรของแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย

รหัส	วัสดุ			w/b	f/b	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (%)
	ชนิดของปูนซีเมนต์	ชนิดของตัวอย่าง	ชนิดของเถ้าลอย					
C1-W30	I	Concrete	-	0.30	-	28	28, 91, 182, 365	1
C1-W40	I	Concrete	-	0.40	-	28	28, 91, 182, 365	1
C3-W40	III	Concrete	-	0.40	-	28	28, 91, 182, 365	1
C5-W40	V	Concrete	-	0.40	-	28	28, 91, 182, 365	1
C1-W50	I	Concrete	-	0.50	-	1, 7, 28	28, 91, 182, 365	1
FA25W50	I	Concrete	2ข	0.50	0.25	28	28, 91, 182, 365	1
FA30W50	I	Concrete	2ข	0.50	0.30	28	28, 91, 182, 365	1
FA50W50	I	Concrete	2ก, 2ข	0.50	0.50	28	28, 91, 182, 365	1
FA70W50	I	Concrete	2ข	0.50	0.70	28	28, 91, 182, 365	1

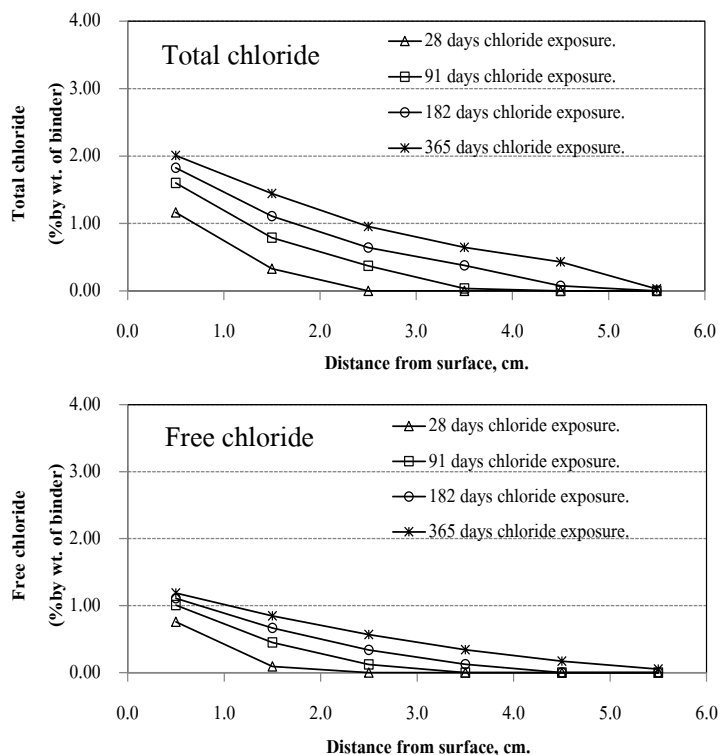
หมายเหตุ: สำหรับการแบ่งประเภทของเถ้าลอยถูกแบ่งตาม มอก. 2135-2545

“2ก.” หมายถึง เถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ก. ซึ่งเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าร้อยละ 10

“2ข.” หมายถึง เถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ข. ซึ่งเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่าร้อยละ 10

### 1. ผลกระทบของระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

จากภาพที่ 5-1 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระที่คำนวณได้ภายใต้ระยะเวลาบ่มน้ำที่เท่ากัน จากภาพพบว่า คอนกรีตที่มีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น ทำให้ของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระสูงกว่าคอนกรีตที่มีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์สั้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Simcic, Pejovnik, Schutter and Bosiljkov, (2015); Chalee, Jaturapitakkul and Chindaprasirt, (2009), Thomas and Matthews, (2004); Sumranwanich and Tangtermsirikul, (2004) ที่กล่าวว่า การแทรกซึมของคลอไรด์คอนกรีต มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ เนื่องจากการดึงดูดคาพิวลารี และการแพร่ กล่าวคือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ คลอไรด์จะถูกดึงดูดแบบคาพิวลารีเข้าสู่ภายในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว แต่เมื่ออิ่มตัวด้วยน้ำ คลอไรด์จะเกิดจากกระบวนการแพร่ ซึ่งจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ และมีการสะสมของปริมาณคลอไรด์จนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์

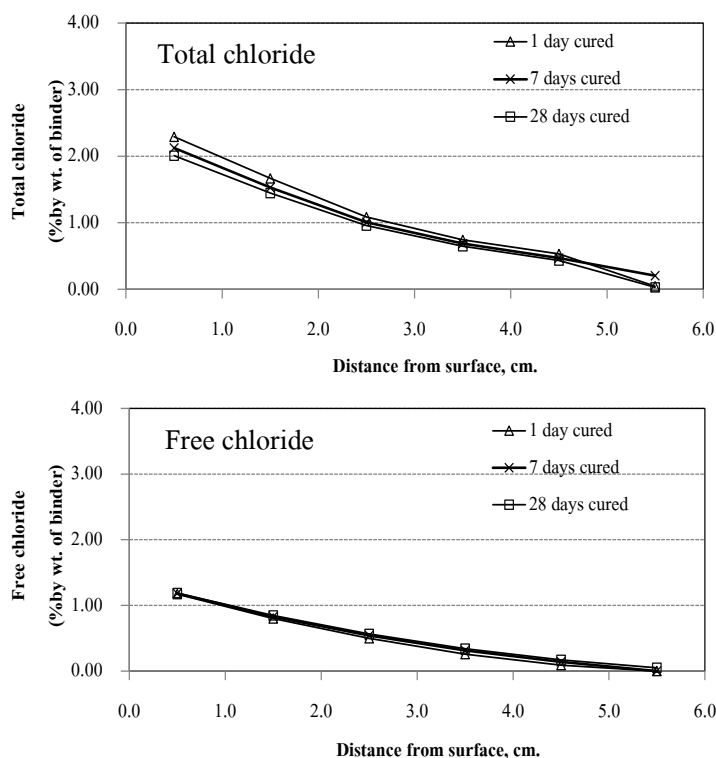


ภาพที่ 5-1 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่าง ๆ

(w/b = 0.50, ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน)

## 2. ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

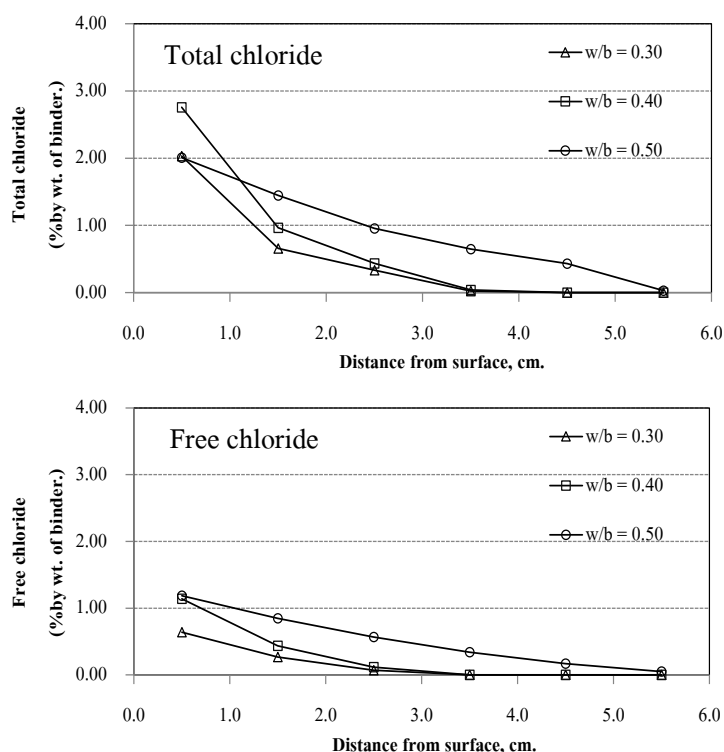
จากภาพที่ 5-2 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระที่คำนวณได้ ภายใต้ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่เท่ากัน จากภาพ พบว่า คอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น มีค่าของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระต่ำกว่าคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำสั้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Yoo, Oh, Park and Kim, (2010); Sumranwanich and Tangtermsirikul, (2004) ที่กล่าวว่า คอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มสั้นมีปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตสูงกว่า คอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มนาน เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มสั้น มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างใหญ่กว่าคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มนาน จึงให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยยังมีความสามารถต้านทานคลอไรด์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการระยะเวลาบ่มน้ำนาน ทำให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยา เช่น CSH, CAH และ CAHF เป็นต้น มีค่าเพิ่มขึ้น อันเป็นเหตุให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงตามไปด้วย



ภาพที่ 5-2 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ระยะเวลาบ่มน้ำต่าง ๆ

(w/b = 0.50 และ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน)

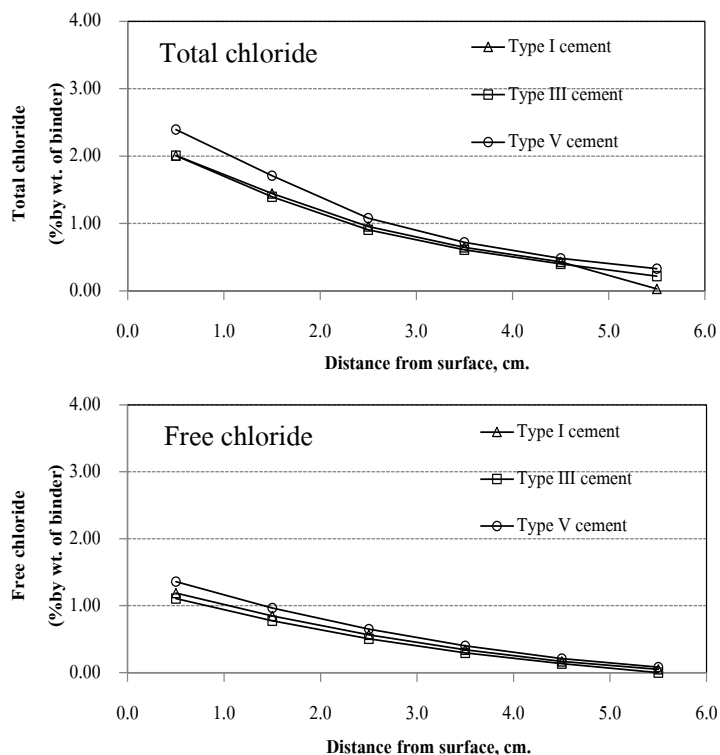
3. ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต จากภาพที่ 5-3 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระที่คำนวณได้ ภายใต้ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่ 365 วัน และระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน จากภาพพบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ทำให้คอนกรีตมีโครงสร้างโพรงช่องว่างมาก ดังนั้นการแพร่คลอไรด์จึงเกิดขึ้นได้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hosein, Shekarchi and Tadayon, (2016); Yoo, Oh, Park and Kim, (2010); Sumranwanich and Tangtermsirikul, (2004); Leng, Feng and Lu (2000) ที่กล่าวว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำสามารถปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตได้ เนื่องจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ส่งผลอย่างมากต่อการลดลงของสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ โดยสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลากับการพัฒนาโครงสร้างโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต เช่น ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่าง และความพรุนทั้งหมดภายในเนื้อ



ภาพที่ 5-3 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ (ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน)

#### 4. ผลกระทบของชนิดของปูนซีเมนต์ต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

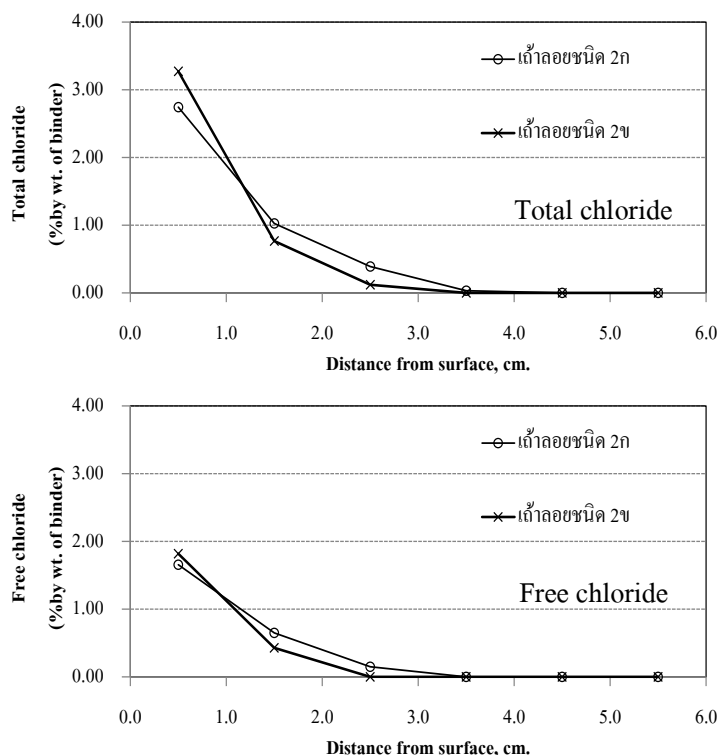
จากภาพที่ 5-4 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่แตกต่างกัน โดยใช้ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 3 และ 5 โดยมีระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน จากภาพพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3 มีการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 เพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นปูนซีเมนต์ประเภททนซัลเฟต ซึ่งจำเป็นต้องมีปริมาณของสารประกอบ  $C_3A$  ต่ำ เพื่อลดการทำปฏิกิริยาระหว่างซัลเฟต กับ  $C_3A$  ซึ่งเป็นเหตุให้โครงสร้างเกิดการขยายตัว ดังนั้นปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จึงมีความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางเคมีต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3 ทำให้คลอไรด์แทรกซึมในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3 เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Sumranwanich and Tangtermsirikul, (2004)



ภาพที่ 5-4 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ชนิดของปูนซีเมนต์ต่าง ๆ  
(w/b = 0.50, ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน)

### 5. ผลกระทบของชนิดของเถ้าลอยต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

จากภาพที่ 5-5 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้ชนิดของเถ้าลอยที่แตกต่างกัน โดยประเภทของเถ้าลอยที่ใช้มี 2 ชั้นคุณภาพ ได้แก่ เถ้าลอยชนิด 2ก และเถ้าลอยชนิด 2ข โดยมีระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน จากภาพพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยชนิด 2ข มีการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยชนิด 2ก เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยชนิด 2ข มีปริมาณของ CaO ในเถ้าลอยสูงกว่าเถ้าลอยชนิด 2ก โดย CaO ในเถ้าลอยส่วนหนึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้เช่นเดียวกับกับ CaO ในปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นส่วนช่วยเพิ่ม CH ให้มากขึ้น เมื่อ CH เพิ่มขึ้น การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกก็มีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นคอนกรีตจึงมีความทึบน้ำมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยชนิด 2ก เช่นเดียวกับกับงานวิจัยของ Simcic, Pejovnik, Schutter and Bosiljkov, (2015); Sumranwanich and Tangtermsirikul, (2004)

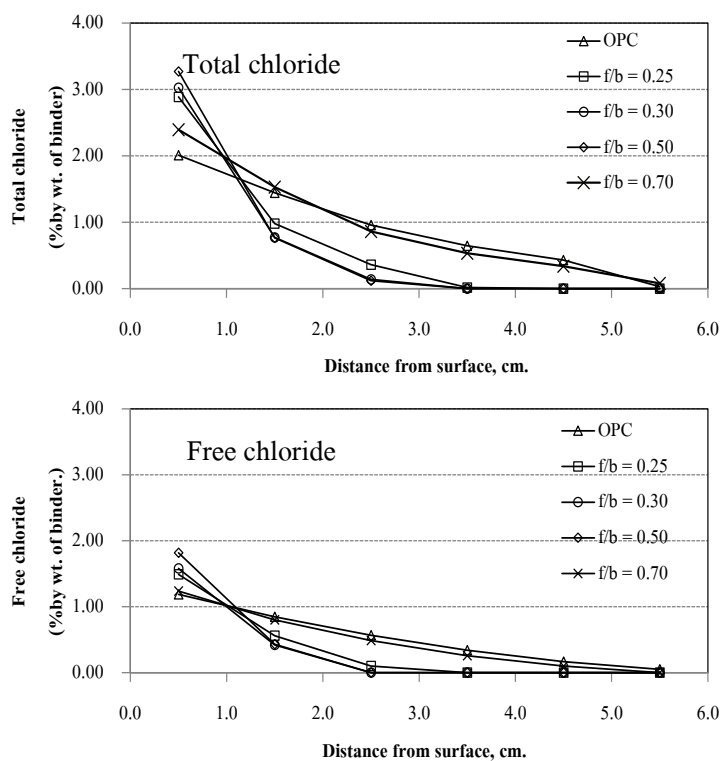


ภาพที่ 5-5 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ชนิดของเถ้าลอยต่าง ๆ

(w/b = 0.50, ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน)

## 6. ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

จากภาพที่ 5-6 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.25, 0.30, 0.50 และ 0.70 ภายใต้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จากภาพพบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50 มีปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตต่ำลง เช่นเดียวกับกับงานวิจัยของ Simcic, Pejovnik, Schutter and Bosiljkov, (2015); Thomas and Matthews, (2004); Leng, Feng and Lu (2000) แต่เมื่อเพิ่มการแทนที่ด้วยเถ้าลอยสูงกว่า 0.50 พบว่า การแทรกซึมคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เช่นเดียวกับกับงานวิจัยของ Yazici, (2008) เนื่องจากการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่สูงกว่าร้อยละ 50 เหลือปริมาณของปูนซีเมนต์น้อยลง ทำให้ปริมาณของ CH ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกลดลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นเหตุให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำต่ำลง การแทรกซึมคลอไรด์เป็นไปได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 5-6 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน

ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานต่าง ๆ และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน

7. ผลกระทบของวัฏจักรเป็ยกสลับแห่งต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต  
 การพิจารณาผลกระทบของวัฏจักรเป็ยกสลับแห่งต่อการแทรกซึมคลอไรด์  
 มีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ดังตารางที่ 5-1  
 สำหรับเงื่อนไขการเกิดวัฏจักรเป็ยกสลับแห่ง แสดงดังตารางที่ 5-2 โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำ  
 ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ  
 28 วัน และคอนกรีตเผชิญเกลือคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1

ตารางที่ 5-3 เงื่อนไขการทดลอง ที่ใช้สำหรับการศึกษาค่าแปรของแบบจำลอง สำหรับทำนาย  
 การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ภายใต้สภาวะเป็ยกสลับแห่ง

ลำดับที่	ระยะเวลา บ่ม (วัน)	วันต่อหนึ่งรอบวัฏจักร			จำนวนรอบ	ระยะเวลาเกิดวัฏจักร เป็ยกสลับแห่ง (วัน)
		เป็ยก	แห้ง	รวม		
1	28	1	6	7	8, 24, 56	56, 168, 392
2	28	2	5	7	8, 24, 56	56, 168, 392
3	28	3	4	7	8, 24, 56	56, 168, 392
4	28	4	3	7	8, 24, 56	56, 168, 392
5	28	5	2	7	8, 24, 56	56, 168, 392
6	28	6	1	7	8, 24, 56	56, 168, 392
7	28	1	1	2	28, 84, 196	56, 168, 392
8	28	4	4	8	7, 21, 49	56, 168, 392

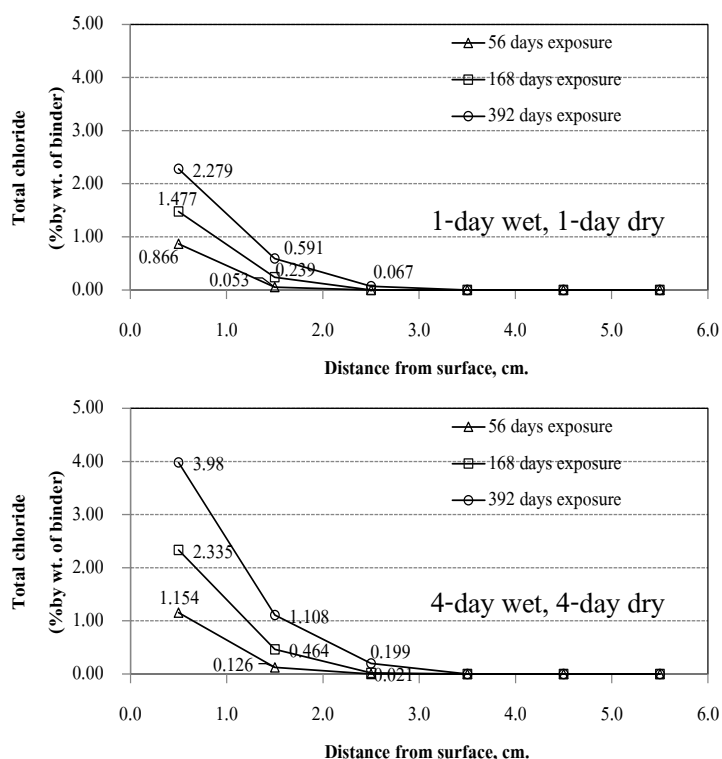
หมายเหตุ: ตัวอย่างใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ข.

#### 7.1 ผลกระทบของความถี่ของวัฏจักรเป็ยกสลับแห่ง

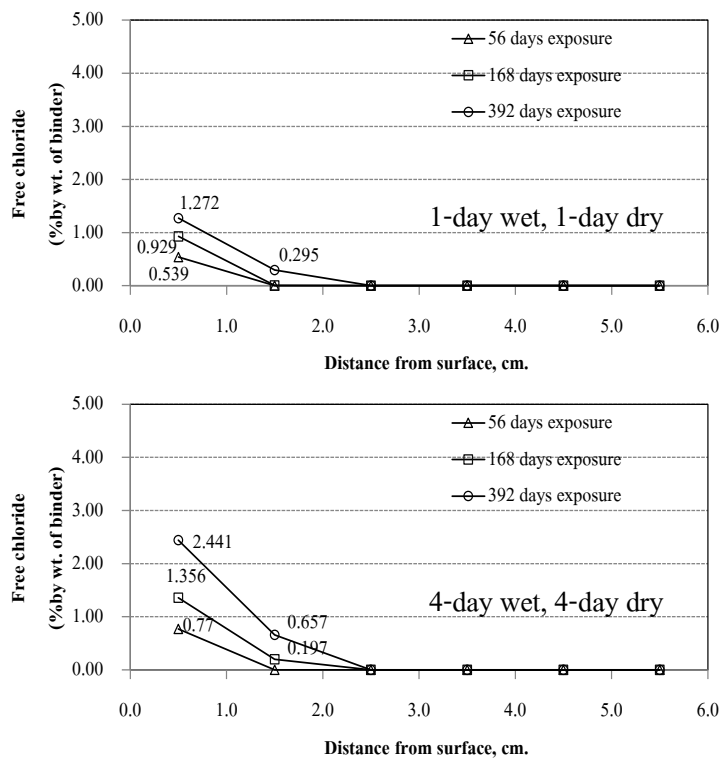
การพิจารณาผลกระทบของความถี่ของวัฏจักรเป็ยกสลับแห่งต่อการแทรกซึม  
 คลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ระยะเวลาการเกิดวัฏจักรเป็ยกสลับแห่งเท่ากัน คือ 56, 168 และ  
 392 วัน โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการเกิดวัฏจักรเป็ยก 1 วัน และแห้ง 1 วัน กับวัฏจักรเป็ยก  
 4 วัน และแห้ง 4 วัน ซึ่งมีความถี่ของรอบอยู่ที่ 28, 84 และ 196 รอบ กับ 7, 21 และ 49 รอบ  
 ตามลำดับ จากภาพที่ 5-7 และภาพที่ 5-8 พบว่า คอนกรีตที่เผชิญวัฏจักรเป็ยก 4 วัน และแห้ง 4 วัน  
 มีการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่เผชิญวัฏจักรเป็ยก 1 วัน และแห้ง 1 วัน เนื่องจากวัฏจักร  
 เป็ยก 4 วัน และแห้ง 4 วัน มีรอบของความถี่ต่ำกว่า วัฏจักรเป็ยก 1 วัน และแห้ง 1 วัน



ซึ่งหมายความว่า คอนกรีตที่มีรอบการเผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้งต่ำ น้ำภายในคอนกรีตสามารถระเหยออกสู่ภายนอกมากกว่าคอนกรีตที่มีรอบการเผชิญคลอไรด์สูง และเมื่อคอนกรีตเผชิญสภาวะเปียกอีกครั้ง น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยกลไกการดูดซับ หรือการดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว เมื่อสภาวะภายนอกที่คอนกรีตเผชิญเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำภายในคอนกรีตระเหย (Evaporation) ออกไป ทิ้งคราบเกลือไว้ ในโพรงช่องว่างของคอนกรีต เมื่ออยู่ในสภาวะเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของคลอไรด์สูงขึ้น ดังนั้นไอออนคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงจะแทรกซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตโดยการแพร่และเกิดการรวมตัวกันของคลอไรด์ที่แทรกซึมจากภายนอกกับคลอไรด์ที่ตกค้างอยู่ภายในคอนกรีต (Yazici, 2008; Thomas & Matthews, 2004; Maruya, Tangtermsirikul & Matsuoka, 1998) ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้ง จะทำให้คลอไรด์ที่ภายในเนื้อคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว



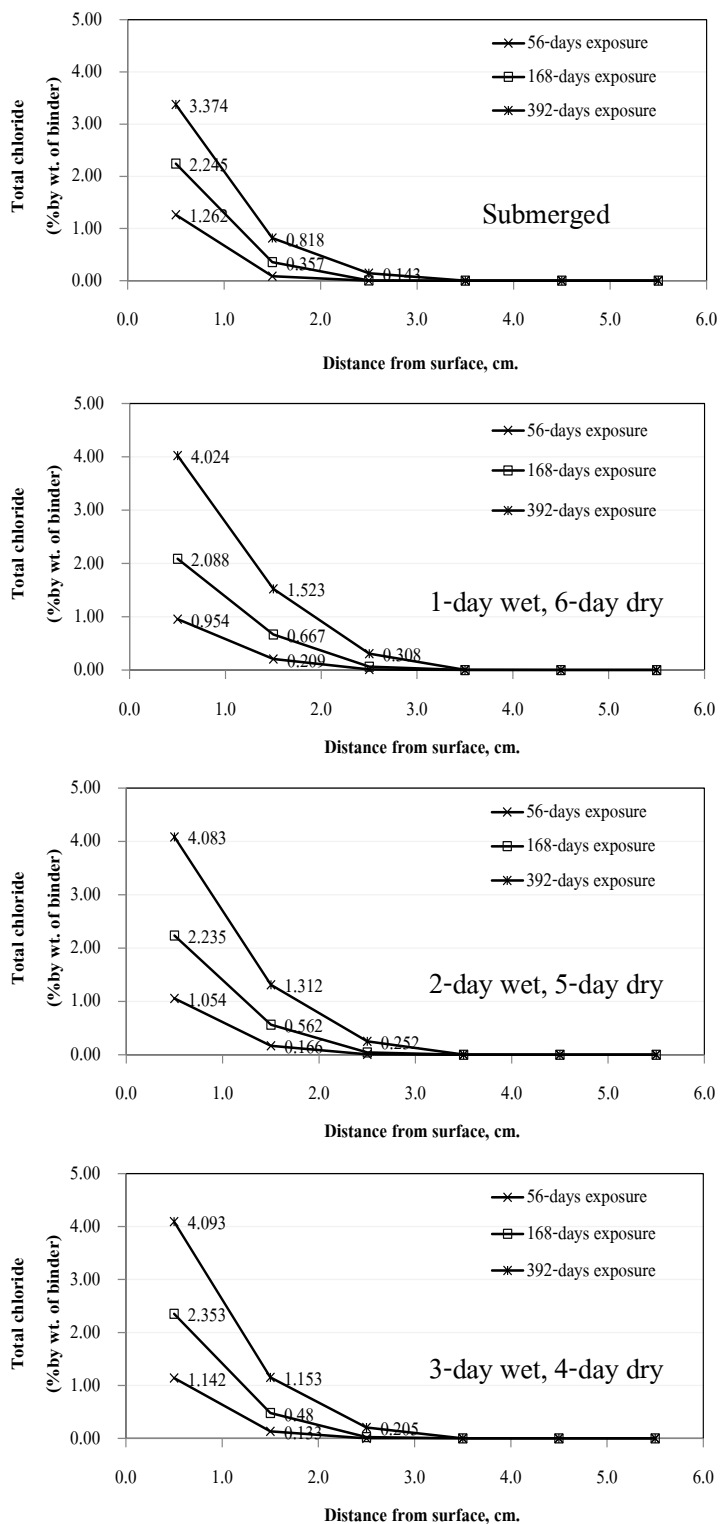
ภาพที่ 5-7 การคำนวณปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตผสมถั่วลอย ที่ความถี่ของวัฏจักรเปียกสลับแห้งต่าง ๆ



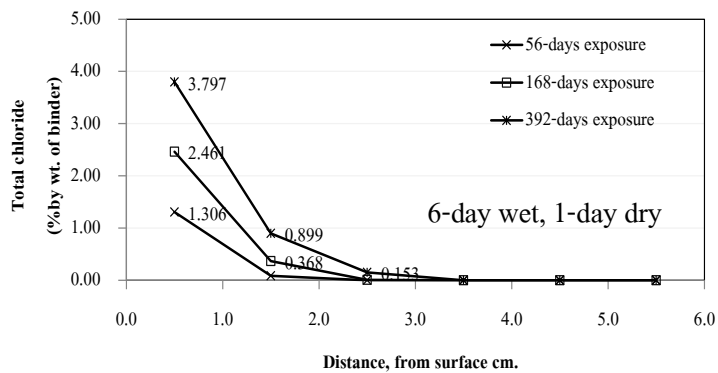
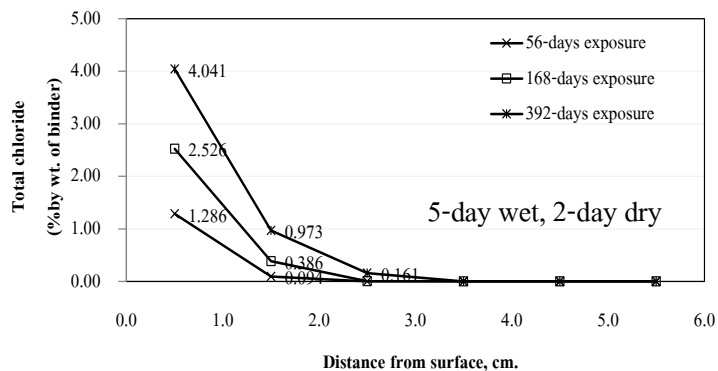
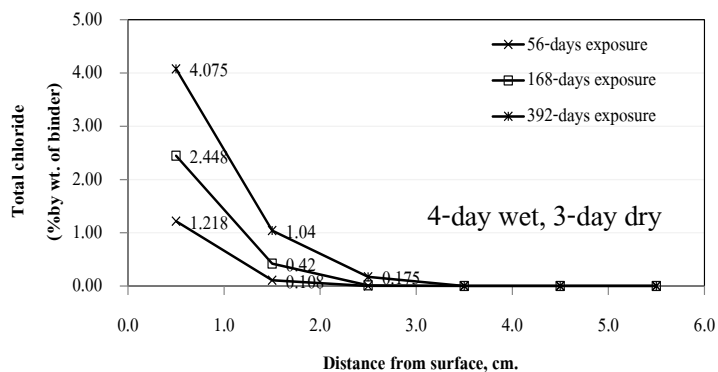
ภาพที่ 5-8 การคำนวณปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ความถี่ของวัฏจักรเปียกสลับแห้งต่าง ๆ

## 7.2 ผลกระทบของระยะเวลาเปียกและระยะเวลาแห้ง

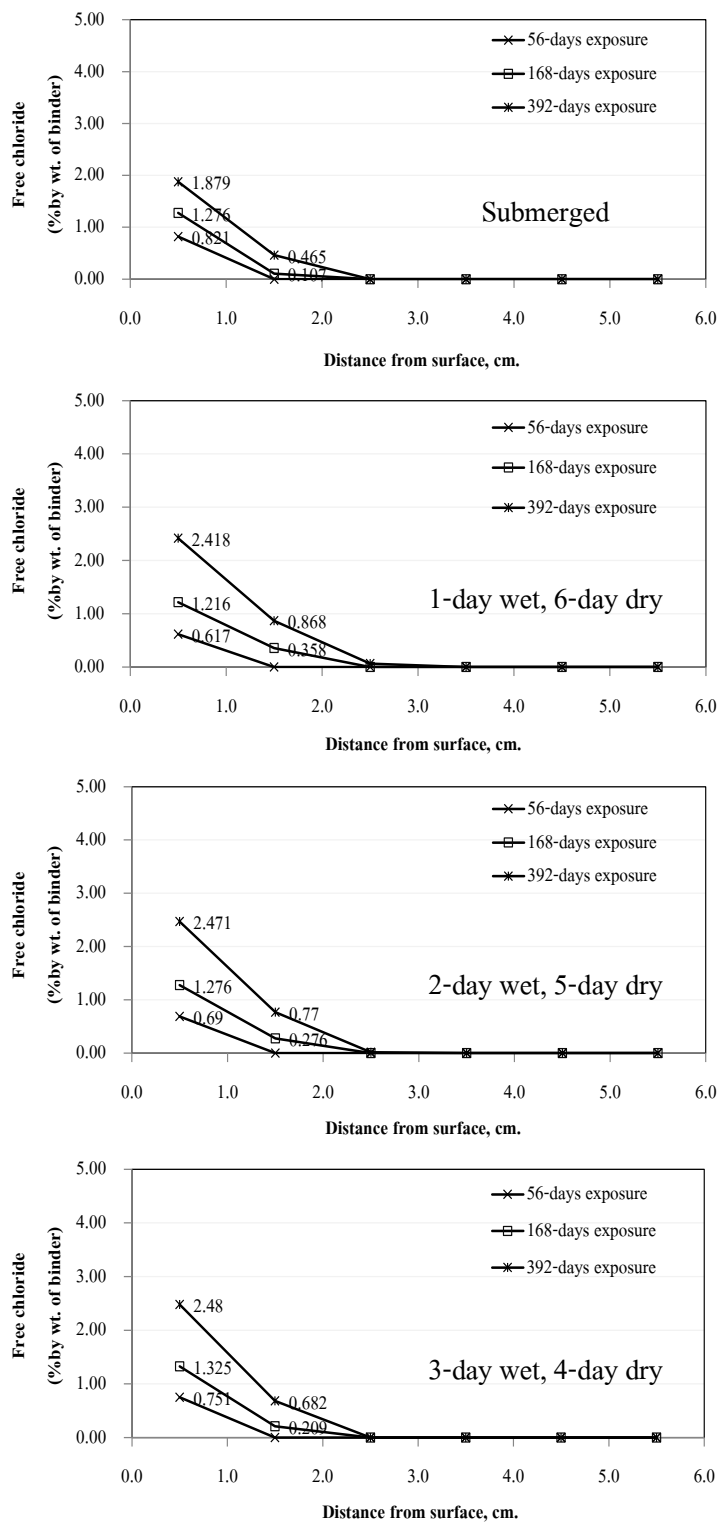
การพิจารณาผลกระทบของความถี่ของวัฏจักรเปียกสลับแห้งต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และเถ้าลอยชนิด 2x ถูกนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 มีระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาการเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งเท่ากัน คือ 56, 168 และ 392 วัน โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์แบบแช่ และเผชิญคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง ซึ่งวัฏจักรเปียกสลับแห้งที่ใช้ทั้งหมดมี 6 แบบ ดังนี้ วัฏจักรเปียก 1 วัน และแห้ง 1 วัน วัฏจักรเปียก 2 วัน และแห้ง 5 วัน วัฏจักรเปียก 3 วัน และแห้ง 4 วัน วัฏจักรเปียก 4 วัน และแห้ง 3 วัน วัฏจักรเปียก 5 วัน และแห้ง 2 วัน และวัฏจักรเปียก 6 วัน และแห้ง 1 วัน จากภาพที่ 5-9 และภาพที่ 5-10 พบว่า คอนกรีตที่เผชิญวัฏจักรเปียก 1 วัน และแห้ง 6 วัน มีแนวโน้มการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่เผชิญวัฏจักรเปียก และแห้งอื่น ๆ นอกจากนี้คอนกรีตที่เผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้งที่รอบการเผชิญต่าง ๆ มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์แบบแช่ เนื่องจากคอนกรีตที่เผชิญวัฏจักรแห้ง น้ำที่อยู่ภายในคอนกรีตสามารถระเหยออกสู่ภายนอก ทำให้เหลือราบเกลือทิ้งไว้ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตเผชิญสภาวะเปียกอีกครั้ง น้ำทะเลจะเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตทั้งกระบวนการแพร่และกระบวนการดูดซับ หรือการดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเกลือคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีตอย่างรวดเร็ว ซึ่งแตกต่างจากคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์แบบแช่ ที่น้ำไม่สามารถระเหยออกจากคอนกรีตได้ ทำให้คลอไรด์เข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตด้วยกระบวนการแพร่เพียงกระบวนการเดียวเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ คลอไรด์ในคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์แบบแช่จึงมีความเข้มข้นสูงน้อยกว่าคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง



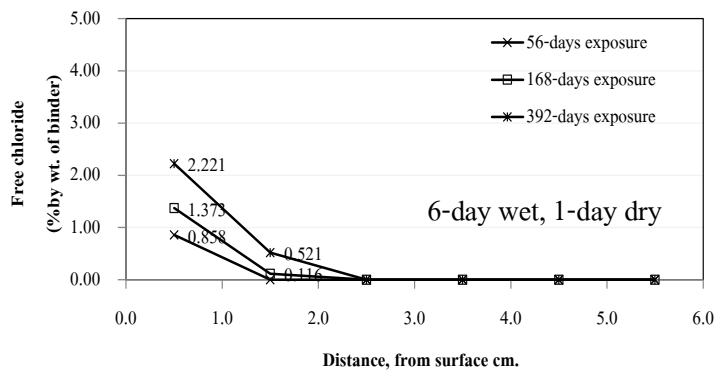
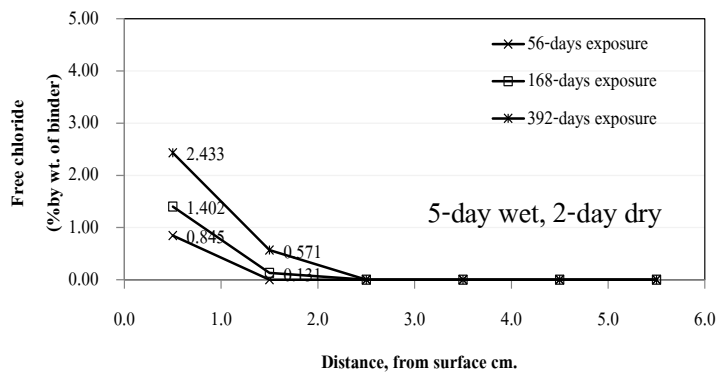
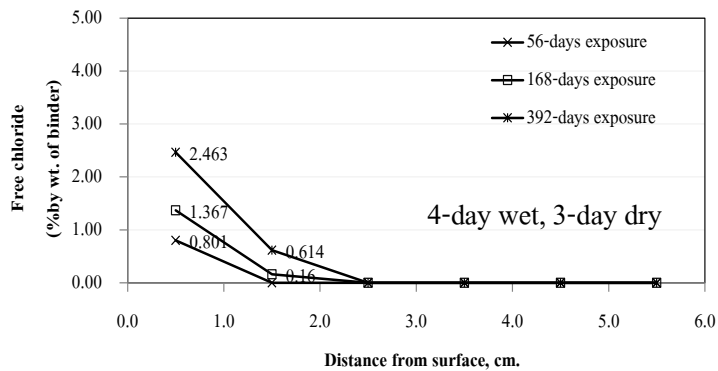
ภาพที่ 5-9 การคำนวณปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตผสมถ้ำลอย ที่ระยะเวลาเปียกและระยะเวลาแห้งต่าง ๆ



ภาพที่ 5-9 (ต่อ)



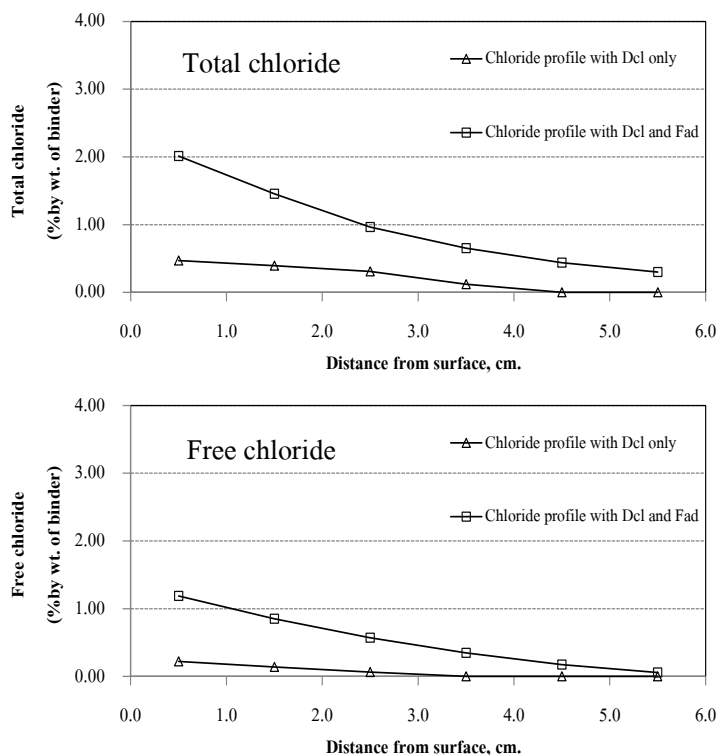
ภาพที่ 5-10 การคำนวณปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตผสมถั่วลย ที่ระยะเวลาเปียกและระยะเวลาแห้งต่าง ๆ



ภาพที่ 5-10 (ต่อ)

## 8. ผลกระทบของสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการดึงดูดอออนคลอไรด์ต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

จากภาพที่ 5-11 แสดงการเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่พิจารณาเฉพาะสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และพิจารณาทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการดึงดูดอออนคลอไรด์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน จากภาพพบว่า การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่พิจารณาทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการดึงดูดอออนคลอไรด์มีค่าสูงกว่าการพิจารณาเฉพาะสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจาก การพิจารณาเฉพาะสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์เพียงอย่างเดียว ทำให้ผลต่างความเข้มข้นต่ำกว่าการพิจารณาทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการดึงดูดอออนคลอไรด์ เพราะการดึงดูดอออนคลอไรด์ทำให้คลอไรด์ที่ชั้นผิวหน้ามีค่าสูงกว่าคลอไรด์ภายนอกที่ตัวอย่างเผชิญ ดังนั้นผลต่างความเข้มข้นคลอไรด์สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลต่างความเข้มข้นคลอไรด์นี้ส่งผลอย่างมากต่อการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต



ภาพที่ 5-11 การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่พิจารณาเฉพาะผลกระทบของสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และผลกระทบของสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์รวมกับการดึงดูดอออนคลอไรด์



### การคำนวณอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซม

การศึกษาอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทำการพิจารณาที่ระยะเวลาเหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ ดังตารางที่ 5-1 และส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลอง ดังตารางที่ 5-4 ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่นำมาพิจารณากำหนดตาม มยผ., (2555) ดังตารางที่ 5-5 ซึ่งพิจารณาปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ระยะหุ้มเหล็กเสริม 7 ซม.

ตารางที่ 5-4 ส่วนผสมและเงื่อนไขการทดลอง ที่ใช้สำหรับการศึกษาอายุการใช้งานของคอนกรีตที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซม

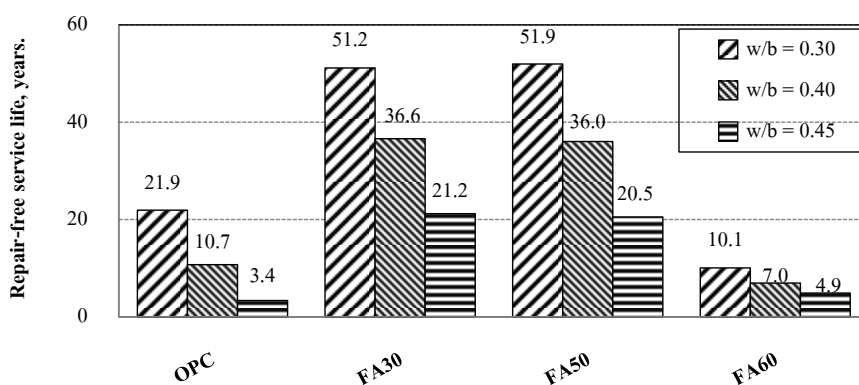
รหัสส่วนผสม	w/b	f/b	ระยะเวลา บ่มน้ำ (วัน)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (%)
OPC	0.30, 0.40, 0.45	-	28	1
FA30	0.30, 0.40, 0.45	0.30	28	1
FA50	0.30, 0.40, 0.45	0.50	28	1
FA60	0.30, 0.40, 0.45	0.60	28	1

หมายเหตุ: ตัวอย่างใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ข.

ตารางที่ 5-5 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตตาม มยผ. 1332-55, (มยผ., 2555)

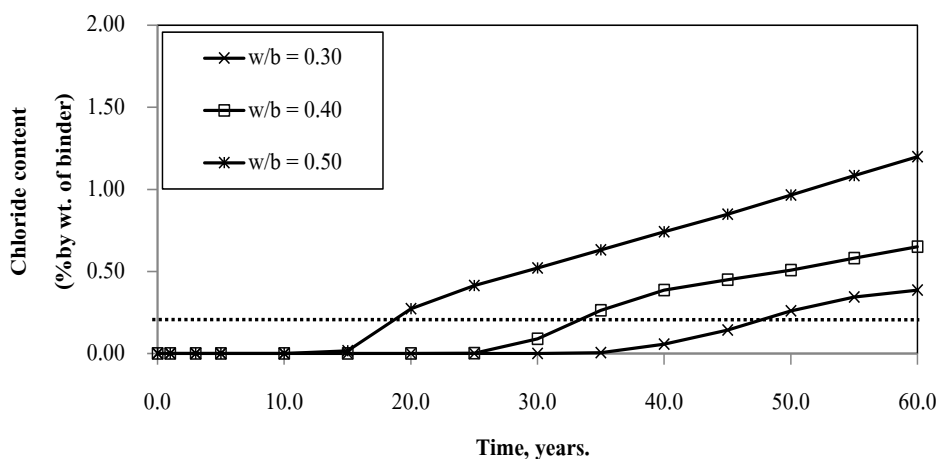
ส่วนผสมของคอนกรีต	ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
คอนกรีตล้วน	0.45
คอนกรีตผสมเถ้าลอยน้อยกว่า 15%	0.45
คอนกรีตผสมเถ้าลอยตั้งแต่ 15% แต่ไม่ถึง 35%	0.35
คอนกรีตผสมเถ้าลอยตั้งแต่ 35% แต่ไม่ถึง 50%	0.30

ภาพที่ 5-12 พิจารณาอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยพิจารณาที่ระยะเวลาเหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม ซึ่งใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยชนิด 2x ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30, 0.50 และ 0.60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30, 0.40 และ 0.45 และพิจารณาที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 7 ซม. จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 และ 0.50 มีอายุการใช้งานนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากการใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในสัดส่วนที่เหมาะสม เถ้าลอยสามารถปรับปรุงโครงสร้างขนาดเล็กของคอนกรีตให้มีความทึบน้ำมากยิ่งขึ้น เช่น การทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยทำให้เกิดผลผลิตเพิ่มมากขึ้นซึ่งช่วยให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ นอกจากนี้คอนกรีตสามารถยับยั้งคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางกายภาพได้เพิ่มขึ้นอีกด้วย แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 อายุการใช้งานของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีตล้วน เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณสูง ทำให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลงเป็นอย่างมาก ทำให้เกิด CH ที่เป็นสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกลดลง อันเป็นเหตุให้คอนกรีตมีความทึบน้ำต่ำ การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมากกว่าร้อยละ 60 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตล้วน และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากันพบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงซ่อมแซมนานกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง เนื่องจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ซึ่งน้ำส่วนที่เหลือนี้อาจเป็นช่องทางการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปภายในเนื้อคอนกรีต กล่าวคือคลอไรด์จะแพร่ตามปริมาณน้ำในโพรงช่องว่างของคอนกรีตเข้าสู่ผิวของเหล็กเสริม



ภาพที่ 5-12 อายุการใช้งานของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ปลอดการบำรุงรักษาซ่อมแซม

และเมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนแฉะลอมต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30, 0.40 และ 0.45 พิจารณาที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 7 ซม. ดังภาพที่ 5-13 พบว่า ปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีตผสมแฉะลอมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ และเมื่อพิจารณาอายุการใช้งาน พบว่า อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 มีค่ามากที่สุด คือ 51.9 ปี และอายุการใช้งานมีค่าเท่ากับ 36.0 และ 20.5 ปี สำหรับคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.45 ตามลำดับ ซึ่งการพิจารณาอายุการใช้งานกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤตเท่ากับ 0.30 % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (มยผ., 2555)



ภาพที่ 5-13 ปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตตลอดอายุการใช้งานของคอนกรีตผสมแฉะลอม

## บทที่ 6

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

#### สรุปผล

จากการศึกษาเพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1. แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์

1.1 แบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์ถูกพัฒนาเฉพาะแบบจำลองความสามารถกักเก็บคลอไรด์เนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ โดยการขยายฐานข้อมูลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และความละเอียดของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แบบจำลองถูกพิจารณาให้คำนึงถึงผลกระทบของความละเอียดของเถ้าลอย และความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญ เข้าไว้ในแบบจำลองด้วย เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $-0.18\%$  ถึง  $+9.02\%$  กับผลการทดลอง

1.2 ความละเอียดของเถ้าลอยสามารถปรับปรุงปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่งผลให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถกักเก็บคลอไรด์สูงขึ้น สำหรับความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ที่ตัวอย่างเผชิญสูงขึ้น ทำให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในซีเมนต์เพสต์สูงขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มโอกาสในการยึดเกาะคลอไรด์ทางกายภาพไว้ที่ผิวของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก

#### 2. แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

2.1 แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ถูกปรับปรุงโดยการขยายฐานข้อมูลของโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต อัตราส่วนของเพสต์ ปริมาณของน้ำในโพรงช่องว่างของคอนกรีต และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน โดยใช้ผลการทดลองการแพร่ออกของคลอไรด์

2.2 แบบจำลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต ประกอบด้วย 2 แบบจำลองย่อย ได้แก่ แบบจำลองค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่าง และแบบจำลองความพรุนทั้งหมด ถูกขยายฐานข้อมูลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประสาน ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอย ( $CaO$ ) นอกจากนี้ความละเอียด

ของแก้วลอมถูกพิจารณาเพิ่มเข้ามาในแบบจำลองด้วย

### 3. แบบจำลองการดึงคู่อิออนคลอไรด์

3.1 แบบจำลองการดึงคู่อิออนคลอไรด์ ถูกพัฒนาโดยการขยายฐานข้อมูลของ ปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของเพสต์ ความพรุนทั้งหมดของ คอนกรีต ( $n(t)$ ) ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ชั้นที่ 1 และค่าเฉลี่ย เส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างของคอนกรีต ( $d_{ave}(t)$ ) นอกจากนี้ผลกระทบของอัตราส่วนแก้วลอม ต่อวัสดุประสานถูกพิจารณาเพิ่มในแบบจำลองด้วย

3.2 การเพิ่มการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแก้วลอมทำให้อัตราการดึงคู่อิออนคลอไรด์ ในมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมแก้วลอมมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์และคอนกรีตที่ไม่ผสมแก้วลอม กล่าวคือ ประจุบวกที่ผนังโพรงช่องว่างของวัสดุประสานต่ำลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแก้วลอมต่อวัสดุประสาน

4. แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมแก้วลอมที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่ แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ แบบจำลอง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงคู่อิออนคลอไรด์ โดยแบบจำลองสามารถ คำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของมอร์ตาร์ มอร์ตาร์ผสมแก้วลอม คอนกรีต และคอนกรีตผสมแก้วลอม ที่เปลี่ยนแปลงระยะเวลาบ่มน้ำ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนแก้วลอมต่อวัสดุประสาน ชนิดของปูนซีเมนต์และแก้วลอม ได้ โดยแสดงผลทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระ และผลที่ได้จากการคำนวณ มีความถูกต้องที่น่าพอใจกับผลการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $-15.88\%$  ถึง  $+28.97\%$  สำหรับผลการทดลองที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง และมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $-11.93\%$  ถึง  $+20.95\%$  สำหรับผลการทดลองของนักวิจัยอื่น ๆ

5. แบบจำลองสำหรับการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมแก้วลอม สามารถใช้ทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยบำรุงรักษาซ่อมแซม (Repaired-free service life) ของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล (Marine environment) ได้ เมื่อทราบค่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Threshold chloride content) ของคอนกรีต ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้ แบบจำลองเพื่อการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีอายุการใช้งานและความคงทนต่อการทำลาย ของเกลือคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้

## ข้อเสนอแนะ

1. ปัจจุบันในงานคอนกรีตมีการใช้วัสดุผงละเอียด เช่น ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยวัสดุผงละเอียดทำหน้าที่เป็นสารเติมเต็มโพรงช่องว่าง (Filler) ภายในเนื้อคอนกรีตซึ่งมีส่วนช่วยในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองสามารถใช้กับวัสดุผสมเพิ่มมากยิ่งขึ้น จึงควรพิจารณาผลกระทบของวัสดุผงละเอียดไว้ในแบบจำลองด้วย

2. เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled coarse aggregate) และเถ้าก้นเตา (Bottom ash) แทนที่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในคอนกรีต เพื่อลดวัสดุเหลือทิ้งจากงานอุตสาหกรรม จากการศึกษาของนักวิจัยต่าง ๆ พบว่า การใช้มวลรวมรีไซเคิล และเถ้าก้นเตา มีทั้งผลดีและผลเสียต่อคอนกรีตที่ต้องเผชิญคลอไรด์ ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองมีความครอบคลุมกับการใช้วัสดุมากขึ้น ผลกระทบของมวลรวมรีไซเคิล และเถ้าก้นเตา จึงควรถูกนำมาพิจารณาไว้ในแบบจำลองด้วย

3. เนื่องจากวิศวกรให้ความสนใจต่อการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็น การซ่อมคอนกรีตเก่าด้วยคอนกรีตที่มีคุณภาพ หรือการใช้สารเคลือบผิว เคลือบผิวของคอนกรีต เพื่อยับยั้งการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เป็นเหตุให้เหล็กเสริมเกิดสนิม ดังนั้นจึงควรพิจารณาผลกระทบของความไม่ต่อเนื่องของโพรงช่องว่างระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ หรือคำนึงถึงการเสื่อมสภาพของวัสดุเคลือบผิวเนื่องจากรังสียูวี เป็นต้น เข้าไว้ในแบบจำลองด้วย

4. เพื่อให้แบบจำลองสามารถคำนวณอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซมที่อัตราส่วนเถ้าลอยและผงหินปูนต่าง ๆ ได้ละเอียดมากขึ้นกว่าการใช้ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตเป็นช่วงตามปริมาณการใช้ จึงควรพัฒนาแบบจำลองปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนด้วย

## บรรณานุกรม

- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543) *ความคงทนของ  
คอนกรีต*.
- ณรงค์เกียรติ สุนันท์วิริยาภรณ์. (2553). ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และโครงสร้างโพรงช่องว่าง  
ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยระยะของ. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรม  
โยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ณรงค์ฤทธิ์ เย็นอารมณ์ และ เกศสุดา เลอาวริกิจ. (2548). การใช้กากของเสียในงานคอนกรีต.  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์.  
มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ทวีชัย สำราญวานิช. (2553). การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์. *โยธา  
สาร วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์*, 22 (3), 79-85.
- นุสรรา ขันกิจ และ เทอดไกร ไชยมาตร. (2552). ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์  
ที่ผสมเถ้าลอย เถ้าแกลบ ฟูนผงหินปูน และสารขยายตัว. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต.  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บัว และ วสุ วิทย์เขตปลา. (2549). ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และการแพร่  
ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย สารขยายตัว ฟูนหินปูนและเส้นใย.  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์.  
มหาวิทยาลัยบูรพา.
- มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง. (2555). *มยผ-1332-55 มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณา  
ความคงทนและอายุการใช้งาน*.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2546). *มอก-2135-2545 เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสม  
คอนกรีต*.
- ลิตาภรณ์ อากาศีทองสกุล. (2553). ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย  
ระยะของ. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์.  
มหาวิทยาลัยบูรพา.
- วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน  
ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 เดือน  
มกราคม-มิถุนายน.

- วสุ วิทยเขตปภา, ทวีชัย สำราญวานิช, ภัควัฒน์ แสเนเจริญ และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. (2553). ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ*. ครั้งที่ 15, พฤษภาคม.
- สุรชาติ ฤกษ์โหรา. (2556). ความต้านทานคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของระบบวัสดุประสานที่ผสมเถ้าลอยที่มีปูนขาวอิสระสูง และเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัส. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต. (2555). ความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., Castro, P., Ant, Km., Progreso, Carr., & Me, C.P. (2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. *Cement and Concrete Research*, 30.
- Ann, K.Y. & Song, H.W. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science* 49, 4113-4133.
- Arya, C., Buenfeld, N.R., & Newman, J.B. (1990). Factors influencing chloride-binding in concrete. *Cement and Concrete Research*, 20, 291-300.
- ASTM C1152, Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. *Annual Book of ASTM Standard*, Volume 04.02.
- ASTM C1218, Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. *Annual Book of ASTM Standard*, Volume 04.02.
- ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 04.02.
- Bogue, R.H. (1955). *The chemistry of Portland cement*. New York: Reinhold Pub.



- Chalee, W. & Jaturapitakkul, C. (2009). Effects of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment. *Materials and Structures*, 42, 505-514.
- Chalee, W., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2009). Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. *Marine Structure*, 22, 341-353.
- Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., & Jaturapitakkul, C. (2007). Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment. *Construction and Building Materials*, 21, 965-971.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., & Sinsiri, T. (2007). Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 21, 1534-1541.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., & Sinsiri, T. (2007). Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 21, 1534-1541.
- Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C., & Chalee, W. (2013). Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete: 10-year results in marine site. *Materials and Structures*, 1501-1511.
- Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C., & Chalee, W. (2010). Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. *Construction and Building Materials*, 24, 1352-1357.
- Chour, S. (2014). แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกั่วดินเตาถลุง เหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Construction and Maintenance Technology Research Center (CONTEC). (2014). *SCG report of durability of marine concrete project*.
- Dhir, R. K. & Jones, M.R. (1999). Development of chloride-resisting concrete using fly ash. *Fuel*, 78, 137-142.
- Florea, M. & Brouwers, H. (2012). Chloride binding related to hydration products. *Cement and Concrete Research*, 42, 282-290.

- Hosein, M., Shekarchi, M., & Tadayon, M. (2016). Long-term field study of chloride ingress in concretes containing pozzolans exposed to severe marine tidal zone. *Construction and Building Materials*, 123, 611-616.
- Hussain, S.E., Rasheeduzzafar, & Al-Gahtani, A.S. (1994). Influence of sulfates on chloride binding in cements. *Cement and Concrete Research*, 24, 8-24.
- Ipavec, A., Vuk, T., Gabrovsek, R., & Kaucic, V. (2013). Chloride binding into hydrated blended cements: The influence of limestone and alkalinity. *Cement and Concrete Research*, 48, 74-85.
- Khatib, J. M., Mangat, P.S., & Wright, L. (2014). Pore size distribution of cement pastes containing fly ash-gypsum blends cured for 7 days. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18, 1091-1096.
- Khunthongkeaw, J. & Tangtermsirikul, S. (2002). A model for simulating carbonation of fly ash concrete. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering, Thailand*.
- Leng, F., Feng, N., & Lu, X. (2000). Experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 989-992.
- Loser, R., Lothenbach, B., Leemann, A., & Tuchschnid, M. (2010). Chloride resistance of concrete and its binding capacity - Comparison between experimental results and thermodynamic modeling. *Cement and Concrete Composites*, 32, 34-42.
- Manera, M. & Vennesland, L. (2008). Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume. *Corrosion Science*, 50, 554-560.
- Maruya T. (1995). Simulation of chloride ion movement in hardened concrete. *Doctoral dissertation, Department of civil engineering, University of Tokyo, Japan*.
- Maruya, T., Tangtermsirikul, S., & Matsuoka, Y. (1998). Modelling of chloride ion movement in the surface layer of hardened concrete. *Concrete Library of JSCE*, 32, 69-84.
- Maruya, T., Tangtermsirikul, S., & Matsuoka, Y. (1994). Simulation of chloride penetration into hardened concrete. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, France*, 519-538.

- McPolin, D., Basheer, P.A.M., Long, A.E., Grattan, K.T.V., & Sun, T. (2005). Obtaining progressive chloride profiles in cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 19, 666-673.
- Mindess, S. & Young, J.F. (1981). *Concrete*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Oh, B., Jang, S., & Shin, Y. (2003). Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structure. *Magazine of Concrete Research*.
- Petcherdchoo, A. (2013). Time dependent models of apparent diffusion coefficient and surface chloride for chloride transport in fly ash concrete. *Construction and Building Materials*. 38, 497-507.
- Rasheeduzzafar, Hussain, S.E., & Al-Saadoun, S.S. (1991). Effect of cement composition on chloride binding and corrosion of reinforcing steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 21, 777-794.
- Sary, S. & Chheat, C. (2010). ความต้านทานการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่มีปูนขาวอิสระสูง. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Sumranwanich, T. (2004). Chloride binding capacity of cement-fly ash paste and simulation of chloride profile in concrete. *Doctoral dissertation, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University*.
- Sumranwanich, T. & Tangtermsirikul, S. (2004). A model for predicting time-dependent chloride binding capacity of cement-fly ash cementitious system. *Materials and Structures*, 37, 387-396.
- Simcic, T., Pejovnik, S., Schutter, G. De., & Bosiljkov, V. B. (2015). Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting-drying cycles. *Construction and Building Materials*.
- Song, H., Lee, C., & Ann, K., (2008). Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. *Cement and Concrete Composites*, 30, 113-121.
- Tangtermsirikul S. (2003). *Durability and mix design of concrete*. Thailand: Printing House of Thammasat University.

- Tangtermsirikul, S. & Saengsoy, W. (2002). Simulation of free water content of paste with fly ash. *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand*, 13, 1-10.
- Tatong, S. (2001). Autogeneous shrinkage model for fly ash concrete considering effect of reactions, pore structure and aggregate restraint. *Master Thesis, Civil Engineering Program, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University*.
- Thomas, M. & Matthews, J. (2004). Performance of pfa concrete in a marine environment - 10-year results. *Cement and Concrete Composites*, 26, 5-20.
- Thomas, M. (1996). Chloride thresholds in marine concrete. *Cement and Concrete Research*, 26, 513-519.
- Weerdt, K. De, Colombo, A., Coppola, L., Justnes, H., & Geiker, M.R. (2015). Impact of the associated cation on chloride binding of Portland cement paste. *Cement and Concrete Research*, 68, 196-202.
- Yazici, H. (2008). The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22, 456-462.
- Yoo, J., Oh, B., Park, S., & Kim, S. (2010). Chloride penetration resistance properties of concrete containing mineral admixtures. *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structure*.
- Yuan, Q., Shi, C., Schutter, G. De., Audenaert, K., & Deng, D. (2009). Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review. *Construction and Building Materials*, 23, 1-13.
- Yu, Z. & Ye, G. (2013). The pore structure of cement paste blended with fly ash. *Construction and Building Materials*, 45, 30-35.