



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเพื่อทำนายอายุการใช้งานของ  
โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก  
(A study of chloride penetration of concrete for predicting the service-life of  
reinforced concrete structure)

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้  
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558  
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 177154  
สัญญาเลขที่ 113/2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเพื่อทำนายอายุการใช้งานของ  
โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก  
(A study of chloride penetration of concrete for predicting the service-life of  
reinforced concrete structure)

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มีนาคม 2560

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 113/2558

## Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 113/2558)

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก โดยแต่ละแบบจำลองประกอบด้วยแบบจำลองหลัก 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และแบบจำลองการดึงดูดไอออนคลอไรด์ และในแต่ละแบบจำลองหลักของแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดได้คำนึงถึงผลกระทบของอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณวัสดุประสานและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ส่วนแบบจำลองหลักของแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกได้คำนึงถึงผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาบ่มน้ำ และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ในแบบจำลอง

จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองทั้งสองที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกได้ที่ส่วนผสมคอนกรีตและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่าง ๆ และผลที่ได้จากการคำนวณมีความถูกต้องที่น่าพอใจกับผลการทดลอง นอกจากนี้แบบจำลองยังสามารถใช้ทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยบำรุงรักษาซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลได้เมื่อทราบค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเพื่อต้านทานต่อการทำลายของเกลือคลอไรด์ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลได้



## Abstract

This research aims to develop the model for determining chloride penetration profile in concrete with ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) and the model for determining chloride penetration profile in concrete with crystalline material. Each model consists of 3 main models, which are chloride binding capacity model, chloride diffusion coefficient model, and chloride ion adsorption model. The effect of GGBFS to binder ratio, water to binder ratio, binder content and chloride exposure period were considered in the models of concrete with GGBFS. For the models of concrete with crystalline material, the effect of fly ash to binder ratio, water to binder ratio, crystalline material to binder ratio, curing and chloride exposure periods, were considered.

From the study, it was found that both developed models can determine the chloride penetration profile of various concrete mixtures at different chloride exposure periods. The determination results of chloride penetration profile have been found in satisfactory agreement with the experimental results. Moreover, the models can predict the repair-free service life of reinforced concrete structures exposed to marine environment when the threshold chloride values of concrete are known. Thus, the models can be applied in the design of concrete mixtures for resisting the chloride attack under marine environment.

## สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญเรื่อง.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของการศึกษา.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์.....	4
แหล่งที่มาและประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต.....	6
การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์จากภายนอกเข้าสู่เนื้อคอนกรีต.....	7
ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต.....	9
ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต.....	9
การวัดค่าระดับคลอไรด์วิกฤต.....	12
การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤต.....	13
ตะกรันเตาถลุงเหล็ก.....	15
กระบวนการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็ก.....	16
องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก.....	16
ข้อกำหนดสำหรับตะกรันเตาถลุงเหล็ก.....	16
ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตสด.....	17
ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว.....	17
วัสดุสร้างผลึก.....	20

## สารบัญเรื่อง (ต่อ)

บทที่	หน้า
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
3 การพัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต.....	30
แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสม	
ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด.....	31
แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์.....	31
แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์.....	37
แบบจำลองการคั่งคูคิออน.....	41
แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก.....	44
แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์.....	44
แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์.....	51
แบบจำลองการคั่งคูคิออน.....	54
การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและ	
คอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก.....	56
4 การตรวจสอบแบบจำลองกับผลการทดลอง.....	59
แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสม	
ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด.....	59
การตรวจสอบแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์.....	59
การตรวจสอบแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการคั่งคูคิออน...	61
แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก.....	89
การตรวจสอบแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์.....	89
การตรวจสอบแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการคั่งคูคิออน...	91

## สารบัญเรื่อง (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผล.....	122
สรุปผล.....	122
ข้อเสนอแนะ.....	123
ผลผลิต (Output)	
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	
ประวัตินักวิจัย	

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่รายงานจากนักวิจัยต่าง ๆ ที่สภาพการทดสอบต่าง ๆ.....	11
3-1 ส่วนผสมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและเงื่อนไขการทดลอง.....	32
3-2 ส่วนผสมของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกและเงื่อนไขการทดลอง .....	45
4-1 ส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด.....	59
4-2 ส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด.....	85
4-3 ส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย.....	89
4-4 ส่วนผสมของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกและเงื่อนไขการทดลอง.....	91
4-5 ส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย.....	117

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	แผนภาพแสดงกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต..... 4
2-2	แผนภาพแสดงแนวทางการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต..... 5
2-3	แผนภาพแสดงประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต..... 7
2-4	กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120, 100 และ 80 ตามมาตรฐาน ASTM C 989 ผสมอยู่ร้อยละ 50 เปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน..... 19
2-5	ผลกระทบเนื่องจากปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์..... 19
3-1	ตัวอย่างการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m <sup>3</sup> และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน..... 33
3-2	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน..... 34
3-3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระและอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ..... 35
3-4	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต..... 36
3-5	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน..... 39
3-6	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และปริมาณวัสดุประสานของคอนกรีต..... 40
3-7	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต..... 40
3-8	กลไกการดึงคูลอออนคลอไรด์..... 42
3-9	ตัวอย่างการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วนและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน..... 46

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-10 ตัวอย่างการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมวัสดุสร้างผลึกที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน.....	47
3-11 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน.....	48
3-12 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระและอัตราส่วนแก้วลอยต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน.....	49
3-13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระและอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน.....	50
3-14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์.....	50
3-15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และอัตราส่วนแก้วลอยต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ.....	52
3-16 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน.....	53
3-17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และระยะเวลาบ่มน้ำ.....	53
3-18 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์.....	54
3-19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและความชื้นสัมพัทธ์ในโพรงของคอนกรีต.....	56
3-20 แผนผังการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต.....	57
4-1 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน.....	60
4-2 การทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต.....	61
4-3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m <sup>3</sup> และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40.....	62

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-4 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.20.....	63
4-5 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.50.....	64
4-6 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.60.....	65
4-7 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.70.....	66
4-8 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m <sup>3</sup> และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	67
4-9 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg /m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.20.....	68
4-10 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.50.....	69
4-11 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.60.....	70
4-12 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.70.....	71



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-13 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m <sup>3</sup> และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40.....	72
4-14 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.20.....	73
4-15 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.50.....	74
4-16 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.60.....	75
4-17 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.70.....	76
4-18 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m <sup>3</sup> และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	77
4-19 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.20.....	78
4-20 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.50.....	79
4-21 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.60.....	80

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-22 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m <sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ต่อวัสดุประสาน 0.70.....	81
4-23 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.42 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 6 เดือน .....	83
4-24 ปรากฏการณ์เปียกสลับแห้ง (Cyclic wetting and drying).....	84
4-25 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	87
4-26 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.50.....	88
4-27 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์จากแบบจำลองกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วน แก้ลดยต่อวัสดุประสานต่าง ๆ.....	90
4-28 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน.....	92
4-29 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ อัตราส่วนแก้ลดยต่อวัสดุประสาน 0.30 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน.....	93
4-30 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ อัตราส่วนแก้ลดยต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน.....	94
4-31 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน.....	95
4-32 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราส่วน แก้ลดยต่อวัสดุประสาน 0.30 อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน.....	96
4-33 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราส่วน แก้ลดยต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน.....	97
4-34 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน.....	98



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-46 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน .....	111
4-47 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน.....	112
4-48 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน.....	113
4-49 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน.....	114
4-50 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.47 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 6 เดือน.....	116
4-51 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	119
4-52 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30.....	120

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญสภาพแวดล้อมทะเล หรือสภาวะที่ต้องเผชิญเกลือคลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ถือเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ โดยโครงสร้างคอนกรีตจะสูญเสียความสามารถในการรับกำลังและเกิดการหลุดร่อนเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีที่ขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษหาแนวทางป้องกันการแทรกซึมคลอไรด์ เช่น การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพและช่วยให้มีอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตยาวนาน และเป็นแนวทางที่ประหยัดที่สุด ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถทำนายหาปริมาณคลอไรด์ของส่วนผสมของคอนกรีต จึงมีความสำคัญยิ่ง เนื่องจากช่วยประหยัดงบประมาณในการทำการทดลองและเวลา นอกจากนี้เมื่อมีแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตได้ก็ จะสามารถใช้ทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตได้เช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถวางมาตรการในการซ่อมแซมและการบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสมตามเวลาที่กำหนดได้

ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต มีหลายงานวิจัยที่ได้เสนอแบบจำลองโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) เช่น แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และถั่วลอย แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดภายใต้สภาพแวดล้อมรุนแรง และแบบจำลองการทำนายความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมถั่วลอย อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานเสนอแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก โดยพิจารณาทั้งผลของความสามารถเก็บกักคลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการดึงดูดอออนคลอไรด์ของคอนกรีตไว้ในแบบจำลองด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกโดยมุ่งศึกษาถึงความสามารถเก็บกักคลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และการดึงดูดอออนคลอไรด์โดยคำนึงถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนถั่วลอยต่อ

วัสดุประสาน อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน และปริมาณวัสดุประสาน โดยได้พิจารณา ทั้งระยะเวลาบ่มน้ำและระยะเวลาเผชิญคลอรีนด้วย และทำการเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอรีน ของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลอง

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอรีนของคอนกรีตที่ผสม ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกโดยพิจารณาถึงความสามารถเก็บกัก คลอรีน สัมประสิทธิ์การแพร่คลอรีน และการดึงดูดอออนคลอรีนในคอนกรีต
2. เพื่อคำนวณและทำนายการแทรกซึมคลอรีนของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก บด และคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก
3. เพื่อทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซมของคอนกรีตผสมตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก

### ขอบเขตของการศึกษา

ทำการพัฒนาแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอรีนของคอนกรีตที่ผสมตะกรัน เตาถลุงเหล็กบด และคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก ซึ่งประกอบด้วย 3 แบบจำลองหลัก ได้แก่ ความสามารถเก็บกักคลอรีน สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอรีน และการดึงดูดอออนคลอรีนของ คอนกรีต ซึ่งมีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1. แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอรีนของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดโดยคำนึงถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน ปริมาณวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญคลอรีนของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาน  $320 \text{ kg/m}^3$  และ  $400 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.20, 0.50, 0.60 และ 0.70 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 บ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน และแช่ในสารละลายเกลือคลอรีนเข้มข้นคลอรีนร้อยละ 3.0 เป็นเวลา 28 วัน 91 วัน และ 365 วัน
2. แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอรีนของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก โดย คำนึงถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย อัตราส่วน วัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาบ่มน้ำ และระยะเวลาเผชิญคลอรีนของคอนกรีตที่ใช้ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และ 0.50 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วน

น้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 บ่มน้ำเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน และแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5.0 เป็นเวลา 91 วัน 182 วัน และ 365 วัน

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

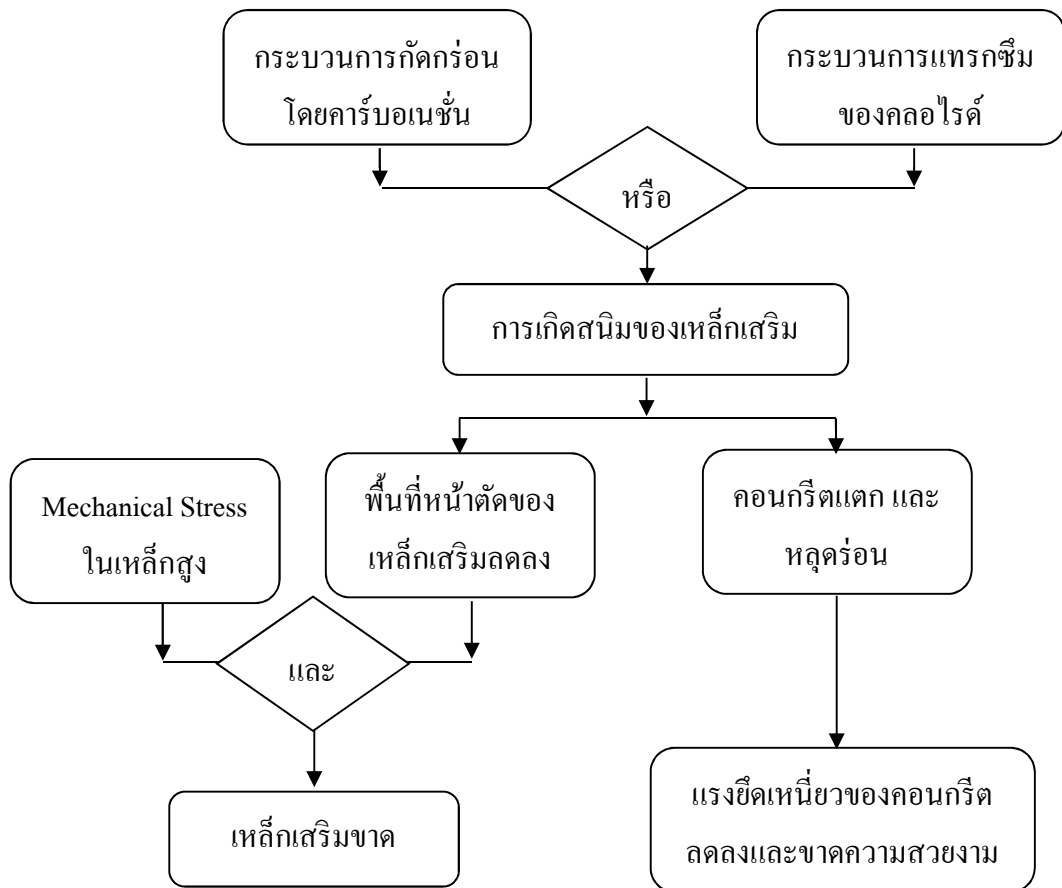
1. ทำให้ได้แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกโดยพิจารณาถึงความสามารถเก็บกักคลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ และการดึงดูดอินในคอนกรีต
2. ทำให้สามารถคำนวณและทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก
3. ทำให้สามารถทำนายอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาซ่อมแซมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกได้ เมื่อทราบค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์

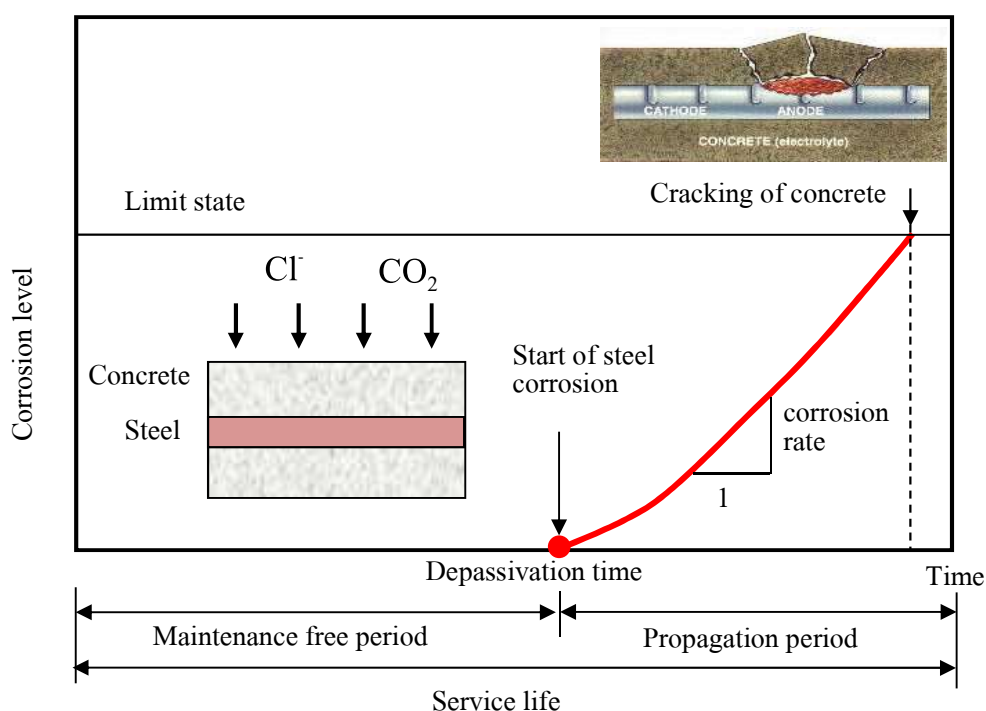
การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเป็นปัญหาสำคัญต่อความคงทน และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลรวมไปถึงโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่น้ำกร่อยด้วย ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการทำลายเนื่องจากการเกิดคาร์บอนเนชั่น และการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 แผนภาพแสดงกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต



โดยปกติแล้ว คอนกรีตจะมีความเป็นด่างสูง และสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยจะเกิดฟิล์มออกไซด์ (Protective passivity layer) บาง ๆ เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) เคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งเป็นผลผลิตจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ อย่างไรก็ตามถ้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ในอากาศทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีต จะทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง และเมื่อใดก็ตาม หากเกลือคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมและสะสมจนมีปริมาณถึงค่าคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) ชั้นฟิล์มออกไซด์นี้จะถูกทำลาย ซึ่งเรียกว่าเกิดการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และหากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และความชื้น ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ในปริมาณที่เพียงพอ เหล็กเสริมจะเริ่มเกิดสนิม และขยายการเกิดสนิมอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งคอนกรีตเกิดความเสียหาย ซึ่งต้องใช้งบประมาณเป็นจำนวนมากในการซ่อมบำรุงดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 แผนภาพแสดงแนวทางการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

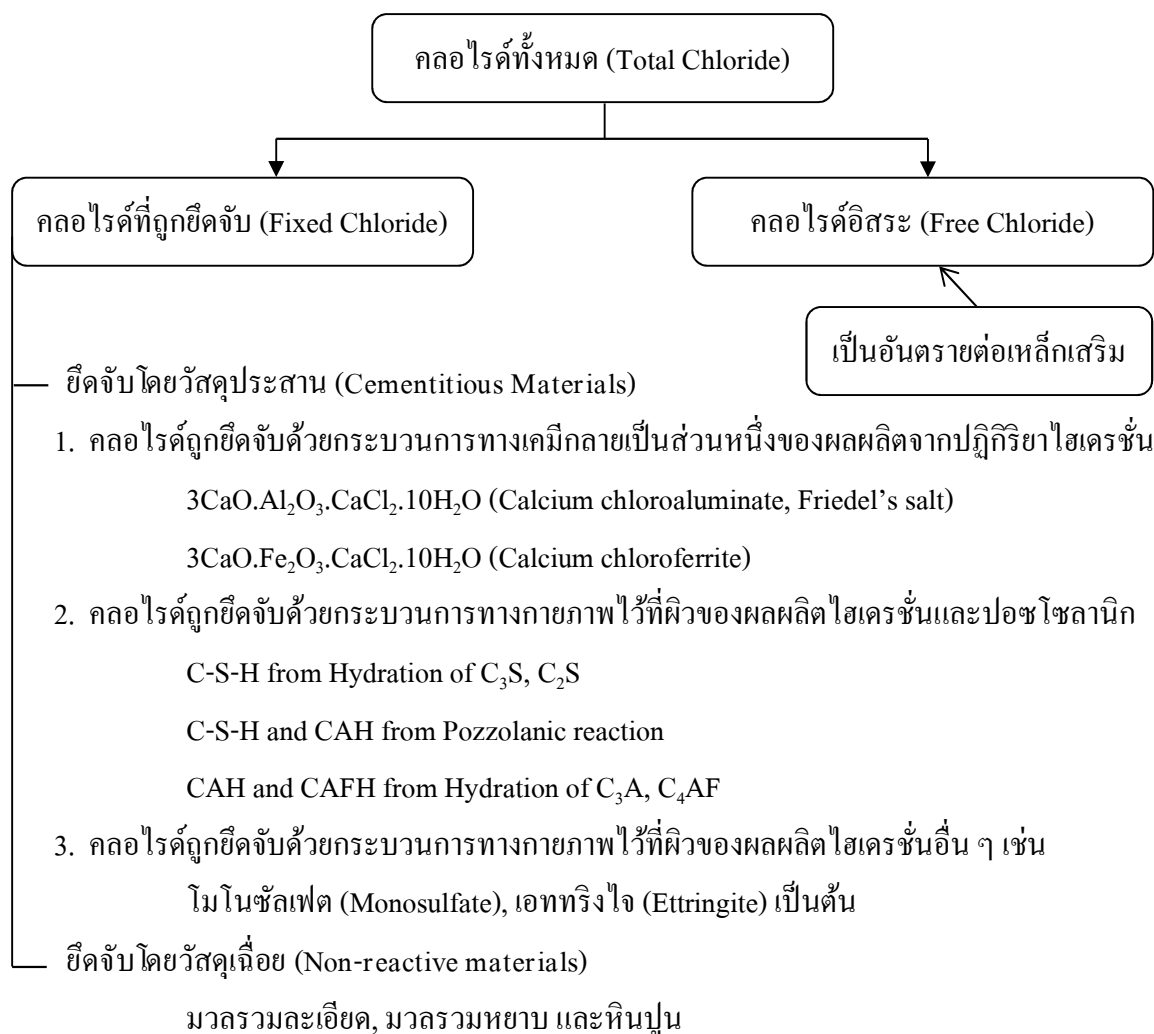
## แหล่งที่มาและประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

เกลือคลอไรด์ (Chloride) อาจมีอยู่ในเนื้อคอนกรีตตั้งแต่แรกเริ่ม โดยมีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ในหินและทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายที่มาจากแหล่งใกล้ทะเล หรือในน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น สารเร่งการก่อตัวจำพวกแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) เป็นต้น แต่ปัญหาของเกลือคลอไรด์ที่ส่งผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้างส่วนมากจะเข้ามาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งานโครงสร้างไปแล้ว เช่น มาจากน้ำทะเล ดิน หรือเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็ง (De-icing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้ในน้ำทะเลจะประกอบไปด้วย สารประกอบซัลเฟตและคลอไรด์ของโซเดียมและแมกนีเซียมเป็นส่วนใหญ่ โดยเกลือคลอไรด์ถือเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเล โดยทั่วไปมีปริมาณประมาณร้อยละ 1.8 โดยน้ำหนักของน้ำทะเล

เกลือคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปอยู่ในเนื้อคอนกรีตทั้งหมดถูกเรียกว่า เกลือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ซึ่งเป็นผลรวมของเกลือคลอไรด์ 2 ประเภทได้แก่ เกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) และเกลือคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ดังภาพที่ 2-3

1. เกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) หมายถึง เกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยปฏิกิริยาและเปลี่ยนไปในรูปของสารประกอบ Calcium chloroaluminate hydrate (Friedel's salt) และ Calcium chloroferrite หรือถูกยึดจับด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น C-S-H และ C-A-H ไวท์ผิว และบางส่วนอาจถูกยึดจับไวท์ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic products) ด้วย ซึ่งเกลือคลอไรด์ประเภทนี้ไม่มีผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคอนกรีต

2. เกลือคลอไรด์อิสระ (Free chloride) หมายถึง เกลือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในสารละลายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) ซึ่งเกลือคลอไรด์ประเภทนี้ถ้ามีปริมาณที่มากพอจะสามารถทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมขึ้นได้



ภาพที่ 2-3 แผนภาพแสดงประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต (ทวิชัย สำราญวานิช, 2553)

การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์จากภายนอกเข้าสู่เนื้อคอนกรีต

การเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์จากภายนอกเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตถือเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้โครงสร้างเสื่อมสภาพ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับคอนกรีตซึ่งมีผลต่อความคงทนของคอนกรีตทั้งทางตรงและทางอ้อม และนำไปสู่การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ เรียกว่า การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ (Chloride penetration) ซึ่งเกิดขึ้นจากกลไกต่าง ๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ประจุไฟฟ้า และแรงดันน้ำ นอกจากนั้นยังอาจเกิดขึ้นจากแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนผ่านด้วย ดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไกหลัก ๆ ดังนี้

1. การแพร่ (Diffusion) กลไกนี้มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์เข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อิมมัลว แรงขับเคลื่อนของเกลือคลอไรด์ ในกลไกนี้เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ กล่าวคือ เกลือคลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อสองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางและเวลา ดังสมการที่ 2-1

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

เมื่อ  $C_t(x, t)$  = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง  $x$  จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา  $t$   
(โมล/ ลิตร)

$C_f(x, t)$  = ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง  $x$  จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา  $t$   
(โมล/ ลิตร)

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

$x$  = ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)

$t$  = ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

2. การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลหรือเปียกอยู่ตลอดเวลาพบว่า ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ที่อยู่บริเวณผิวหน้าของโครงสร้างจะมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล ปฏิกิริยานี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เนื่องจากการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ภายในคอนกรีตเท่ากับสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนสามารถทำให้ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวหน้าสูงขึ้นได้เพราะที่ผิวของโพรงช่องว่างเล็ก ๆ ในคอนกรีตมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกจะดึงดูดเกลือคลอไรด์ ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่บริเวณนั้นให้สูงขึ้นได้

3. การดึงดูดคาพิลลารี (Capillary suction) สามารถดึงน้ำเกลือคลอไรด์ผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตได้ โดยทั่วไปโครงสร้างส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้อเปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงดูดเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ด้วยกลไกการดึงดูดคาพิลลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและใช้เวลาสั้น

4. แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) สำหรับโครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน เขื่อน อุโมงค์ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำเกลือ ซึ่งมีเกลือคลอไรด์

เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยังคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำกว่าได้

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยเกลือคลอไรด์จะแพร่จากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูงกว่าไปสู่เนื้อคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำกว่า และเมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตแล้วคลอไรด์ก็จะเริ่มกลไกการแพร่จากที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูงไปสู่ที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำกว่า จึงทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปในเนื้อของคอนกรีต

### ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต

ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ (Chloride binding capacity) ของคอนกรีต หมายถึง ความสามารถของคอนกรีตในการยึดจับคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีตให้เป็นคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตนั้น ซึ่งการยึดจับคลอไรด์อาจเกิดจากการยึดจับทางเคมี (Chemical binding) โดยคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ของปูนซีเมนต์เกิดเป็นสารประกอบ  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Friedel's salt) และ  $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Calcium chloroferrite) ตามลำดับ หรือคลอไรด์อาจถูกยึดจับทางกายภาพ (Physical binding) ก็ได้ โดยคลอไรด์ถูกยึดจับด้วยแรงยึดเหนี่ยวไว้ที่ผิว (Surface force) ของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดจับไว้ที่ผิวของวัสดุเนื้อที่ไม่มีปฏิกิริยาในคอนกรีต เช่น ทราช หิน หรือผงหินปูน ได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม ทั้งนี้คอนกรีตแต่ละส่วนผสมจะมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ ปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อายุการบ่ม และระยะเวลาเผชิญเกลือคลอไรด์ด้วย เป็นต้น หากคอนกรีตชนิดใดมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ได้สูงจะส่งผลดีต่อคอนกรีตในการป้องกันปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์เนื่องจากจะลดปริมาณคลอไรด์อิสระที่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตให้น้อยลง

### ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) ของคอนกรีต หมายถึง ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระดับผิวเหล็กเสริมที่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการสูญเสียชั้นฟิล์มต้านทานการเกิดสนิมเฉพาะที่ (Local passive film) และทำให้กระบวนการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปอาจแสดงในเทอมของอัตราส่วนระหว่างคลอไรด์อิสระต่อ

ไฮดรอกซิลไอออน (Ratio of chloride hydroxyl ions) หรือปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) หรือปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) เทียบเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสาน

มีงานวิจัยจำนวนมากพยายามมุ่งหาปริมาณระดับคลอไรด์วิกฤตที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม แต่ค่าที่วัดออกมาได้พบว่าการกระจายตัวค่อนข้างมาก ดังตารางที่ 2-1 ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากวิธีการวัดค่าระดับคลอไรด์วิกฤต วิธีการแสดงผลค่าระดับเกลือคลอไรด์วิกฤต สภาพของรอยต่อระหว่างเหล็กกับคอนกรีต และส่วนผสมคอนกรีต รวมทั้งอิทธิพลของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้นสัมพัทธ์และปริมาณก๊าซออกซิเจนในอากาศ เป็นต้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าคอนกรีตแต่ละชนิดจะมีปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่แตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน โครงสร้างคอนกรีตของประเทศญี่ปุ่น (Japan Society of Civil Engineer for standard specifications for concrete structures) ได้กำหนดค่าระดับคลอไรด์วิกฤตไว้ที่ 1.2 กิโลกรัมต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2-1 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่รายงานจากนักวิจัยต่าง ๆ ที่สภาพการทดสอบต่าง ๆ (Ann & Song, 2007)

สภาพการทดสอบ	ปริมาณคลอไรด์วิกฤต			วิธีการหา	อ้างอิง
	คลอไรด์ทั้งหมด (% โดยน้ำหนักของซีเมนต์)	คลอไรด์อิสระ (% โดยน้ำหนักของซีเมนต์)	[Cl <sup>-</sup> ]/[OH <sup>-</sup> ]		
สารละลายในคอนกรีต (Pore solution)			0.6	ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	Hausmann (1967)
ตัวอย่างที่ผสมคลอไรด์เข้าไปข้างใน (Internal chloride)			0.3	โพลาริเซชัน	Gouda (1970)
			8-63	โพลาริเซชัน	Yonesawa et al. (1988)
	0.5-2.0			กระแสมาโครเซลล์	Schiessl and Raupach (1990)
	0.079-0.19			AC impedance	Hope and Ip (1989)
	0.32-1.9			การสูญเสียน้ำหนัก	Treadaway et al. (1989)
	0.78-0.93	0.11-0.12	0.16-0.26	ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	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		
ตัวอย่างที่เผชิญคลอไรด์จากภายนอก (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	Alonso et al. (2002)
	0.5-1.5			ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	Bamforth (1999)
	0.70 (OPC)			การสูญเสียน้ำหนัก	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)
	0.6-1.4			มาโครเซลล์	Hansson and Sorensen (1988)
โครงสร้างคอนกรีต	0.2-1.5		การสูญเสียน้ำหนัก	Vassie (1984)	

หมายเหตุ: SRPC = Sulfate resistant Portland cement, PFA = Pulverized fly ash, GGBS = Ground granulated blast furnace slag, OPC = Ordinary Portland cement

## 1. การวัดค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

### 1.1 การเริ่มเกิดการผุกร่อน (Corrosion initiation)

ในการหาค่าระดับคลอไรด์วิกฤตนั้นจำเป็นต้องทราบระยะเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อนพอดีแล้วค่อยหาปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ระดับผิวเหล็กเสริมที่เริ่มผุกร่อนนั้น การหาว่าเหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อนพอดีสามารถหาได้จากการตรวจสอบการไหลของกระแสมาโครเซลล์ (Macrocell current) ระหว่างขั้วแอโนด (Anode) และคาโทด (Cathode) โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) หรือการวัดอัตราการผุกร่อน (Corrosion rate) ด้วยเทคนิคโพลาไรเซชัน (Polarization technique) หรือวิธี AC impedance เป็นต้น

อุปกรณ์มาโครเซลล์เป็นที่นิยมใช้ในการตรวจวัดความเสี่ยงของการผุกร่อน โดยการผุกร่อนเกิดเมื่อกระแสมาโครเซลล์สูงขึ้น โดยพื้นที่ มาโครเซลล์ประกอบด้วยเหล็กขั้วแอโนด และขั้วคาโทดที่ทำจากตาข่ายไทเทเนียม แกรไฟท์หรือเหล็กสแตนเลส ทั้งหมดถูกฝังในคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมไว้ ทั้งนี้การวัดกระแสมาโครเซลล์ไม่ได้ให้อัตราการผุกร่อนโดยตรง และอาจให้ค่าที่ผิดพลาดได้เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นวิธีการที่เป็นที่ยอมรับในการวัดความเสี่ยงของการผุกร่อนของเหล็กเสริม โดยในทางปฏิบัติจะทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าหลาย ๆ จุดบนผิวหน้าคอนกรีตตามแนวของเหล็กเสริมแล้วสร้างเป็นแผนที่ศักย์ไฟฟ้า (Potential map) ขึ้น พื้นที่ตรงบริเวณที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงบ่งบอกถึงมีความเสี่ยงสูงในการเกิดการผุกร่อนของเหล็กเสริม แต่อย่างไรก็ตามค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ขึ้นอยู่กับสภาพของคอนกรีต เช่น ระดับความชื้น ระดับของการเกิดคาร์บอนขึ้น และการตกผลึกของเกลือ ซึ่งมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้และนำไปสู่การแปลผลที่ผิดพลาดได้

การวัดอัตราการผุกร่อนด้วยเทคนิคโพลาไรเซชัน (Polarization technique) หรือวิธี AC impedance เป็นวิธีการที่ให้ข้อมูลที่ถูกต้องที่สุดสำหรับการผุกร่อนของเหล็ก โดยให้อัตราการผุกร่อนโดยตรง แต่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผุกร่อนและการเริ่มเกิดการผุกร่อนยังไม่ชัดเจน มีความแปรเปลี่ยนค่อนข้างมากซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำของระดับคลอไรด์วิกฤต อัตราการผุกร่อนของเหล็กเสริมเริ่มมีนัยสำคัญเมื่อมีค่าเกินกว่า  $1-2 \text{ mA/m}^2$  อีกทั้งความไม่แน่นอนรอบ ๆ บริเวณที่สูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมด้วย เนื่องจากการผุกร่อนของเหล็กเสริมไม่สามารถสังเกตด้วยตาเปล่า ต้องใช้เวลานานเพียงพอที่จะเห็นสีออกไซด์ของเหล็กที่เกิดสนิมขึ้น

การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากการผุกร่อนสามารถใช้ในการหาระดับคลอไรด์วิกฤตได้แม้ว่าจะไม่ได้ให้เวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อนก็ตาม การสูญเสียน้ำหนักคำนวณจากผลต่างน้ำหนักแห้งเหล็กก่อนฝังลงในคอนกรีต และเมื่อเวลาผ่านไปช่วงระยะหนึ่งก็



กะเทาะคอนกรีตเอาแท่งเหล็กออกมาทำความสะอาดเนื้อสนิมออกไปแล้ววัดน้ำหนักอีกครั้ง วิธีการนี้จะใช้ได้เมื่อการเกิดสนิมเกิดขึ้นไปได้ระยะหนึ่งจนสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่วิธีการนี้ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพสำหรับการวัดการผุกร่อนหลุมลึก (Pitting corrosion) หากมีการสูญเสียน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

## 1.2 ปริมาณคลอไรด์ (Chloride content)

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

การเก็บตัวอย่างเกี่ยวข้องกับการเจาะคอนกรีตแล้วเก็บเอาฝุ่นคอนกรีตที่ระดับความลึกจากผิวหน้าต่าง ๆ ซึ่งต้องพยายามให้มีส่วนที่เป็นเนื้อซีเมนต์เพสต์ในแต่ละตัวอย่างเท่า ๆ กันโดยประมาณด้วย โดยเทียบกับเนื้อคอนกรีตนั้น เพราะหากเก็บตัวอย่างที่มีส่วนที่เป็นมวลรวมมาก ๆ อาจทำให้การวิเคราะห์ผลคลาดเคลื่อนได้

การวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์อิสระ (Free chloride) หรือคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water soluble) จากสารละลายของตัวอย่างฝุ่นผงคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ในน้ำด้วยการต้ม โดยความเข้มข้นของคลอไรด์สามารถหาได้โดยวิธี Potentiometry หรือใช้วัดคลอไรด์ไอออนและแสดงค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของซีเมนต์หรือคอนกรีต คลอไรด์อิสระที่วัดด้วยการใช้น้ำละลายออกมาขึ้นอยู่กับความละเอียดของฝุ่นผงที่บด ปริมาณน้ำที่เติม อุณหภูมิ วิธีการกวนและเวลาที่ปล่อยให้ชะออกมา ส่วนการใช้วิธีการกดเอาสารละลายในโพรงช่องว่างออกมาจากซีเมนต์เพสต์ด้วยความดันสูงนั้น (Pore press method) ให้ค่าคลอไรด์อิสระได้ถูกต้องมากกว่าวิธีการใช้น้ำละลายออกมา อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะทำให้คลอไรด์ที่ถูกยึดจับอาจกลายเป็นคลอไรด์อิสระได้ ซึ่งทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงกว่าความจริงได้

วิธีการที่ยอมรับกันกว้างขวาง คือ การวัดคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ด้วยการใช้กรดละลายออกมา โดยตั้งสมมติฐานว่าทั้งคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและคลอไรด์อิสระจะละลายออกมาด้วยกรด การวัดคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid soluble) หรือคลอไรด์ทั้งหมดนี้อาจทำได้ด้วยการใช้ขี้วัดคลอไรด์ไอออน หรือการไตเตรทขึ้น

## 2. การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตสะท้อนให้เห็นถึงปริมาณคลอไรด์ไอออนที่เป็นอันตราย (Aggressive chloride content) และคุณสมบัติยับยั้งของเนื้อประสานจากซีเมนต์ (Inhibitive properties of cement matrix) คลอไรด์ที่ถูกแยกออกมาจากสารละลายในคอนกรีตด้วยเนื้อประสานส่วนที่เป็นของแข็ง (คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ) จะไม่เคลื่อนที่และไม่สามารถเคลื่อนที่ลึกเข้าไปที่ผิวเหล็ก

เสริม ดังนั้นตามทฤษฎีแล้วปริมาณคลอไรด์อิสระ (คลอไรด์ที่ละลายในน้ำ) จึงนิยมใช้แสดงในค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

## 2.1 การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ

งานวิจัยในอดีตได้แนะนำว่าเฉพาะคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) เท่านั้นที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผุกร่อน ดังนั้นปริมาณคลอไรด์อิสระจึงถูกพิจารณาว่าเหมาะสมในการแสดงค่าความเสี่ยงของการผุกร่อน อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีแนวความคิดเกี่ยวกับ 1) คลอไรด์ที่ถูกยึดจับที่ระดับผิวเหล็กเสริมจะถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อค่า pH ลดลงเนื่องจากการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และ 2) ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถต้านทานการลดลงของ pH ได้ ด้วยเหตุผลสองประการข้างต้น จึงทำให้มาตรฐานและแนวทางต่าง ๆ ไม่ใช้ปริมาณคลอไรด์อิสระในการบอกความเสี่ยงของการผุกร่อน แต่หากใช้ปริมาณคลอไรด์อิสระให้แสดงในรูปแบบของอัตราส่วนความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่อไฮดรอกซิลไอออน ( $[Cl^-]/[OH^-]$ ) ของสารละลายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต

สำหรับการแสดงผลแบบนี้ค่าคลอไรด์ที่ถูกยึดจับถูกสมมติว่าไม่มีผลต่อความเสี่ยงของการผุกร่อนเลย และความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนบ่งบอกถึงปริมาณสารยับยั้งของสิ่งแวดล้อมด้วยการที่สารละลายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีค่า pH สูงมาก งานวิจัยในอดีตจึงใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่อความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออน ( $[Cl^-]/[OH^-]$ ) ในการแสดงค่าของระดับคลอไรด์วิกฤต ทั้งนี้อัตราส่วนของ  $[Cl^-]/[OH^-]$  บอกระดับความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนซึ่งสะท้อนถึงปริมาณสารยับยั้งของสารละลายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต นั่นก็คือ อัตราส่วนของสารที่เป็นอันตรายต่อสารยับยั้งที่ทำให้เกิดการผุกร่อนในสารละลายในโพรงช่องว่าง

อัตราส่วนของ  $[Cl^-]/[OH^-]$  ถูกพิจารณาว่าเหมาะสมในการใช้บอกระดับคลอไรด์วิกฤต เพราะไม่ได้สะท้อนถึงความเสี่ยงที่เกิดจากคลอไรด์เพียงอย่างเดียว แต่ยังบอกถึงความเสี่ยงที่เกิดจากคลอไรด์และคาร์บอนเนชั่นร่วมกันอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของ  $[Cl^-]/[OH^-]$  ไม่สามารถแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตได้คืบคั้น เพราะไม่รวมผลการยับยั้งของเนื้อวัสดุประสานจากซีเมนต์เข้ามาด้วย ซึ่งอาจมีขึ้นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่แน่นบริเวณรอบผิวเหล็กเสริม การตกผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เกิดชั้นฟิล์มต่อเนื่องบนผิวเหล็กเสริมที่ต้านทานการลดลงของค่า pH ได้ นอกจากนี้อัตราส่วนของ  $[Cl^-]/[OH^-]$  ไม่ได้เกี่ยวเนื่องกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนต่าง ๆ

## 2.2 การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตด้วยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตด้วยค่าคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) เป็นวิธีการที่ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุด และถูกใช้ในมาตรฐานต่าง ๆ ด้วย การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตในรูปแบบของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในรูปแบบร้อยละโดยน้ำหนักของซีเมนต์เป็นที่นิยม เพราะว่าง่ายในการคำนวณและครอบคลุมความเสี่ยงของการฟุกร่อนของคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและผลการยับยั้งเนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย

### ตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ACI 116 ให้คำจำกัดความของตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast-furnace slag) คือ ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วย ซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและอื่น ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะหลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็กนอกจากนี้ยังให้คำจำกัดความของเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Granulated blast-furnace slag) หมายถึง เม็ดวัสดุที่ไม่เป็นผลึกซึ่งได้จากการทำตะกรันที่หลอมเหลวในเตาถลุงเหล็กให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดเพื่อให้ตะกรันเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulated blast-furnace slag) เริ่มตั้งแต่ ค.ศ. 1774 โดยใช้ทามอร์ตาร์ ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับปูนขาวและทราย หลังจากนั้นได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ เรื่อยมา จนในปัจจุบันนี้สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างดี เช่น ในประเทศเยอรมันได้มีการผลิตปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมปูนขาวขายในปี ค.ศ. 1865 ประเทศฝรั่งเศสใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กในปี ค.ศ. 1889 เพื่อก่อสร้างระบบใต้ดินในกรุงปารีส และใน ค.ศ. 1981 มีรายงานว่าร้อยละ 20 ของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในทวีปยุโรปเป็นปูนซีเมนต์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมอยู่ ตะกรันเตาถลุงเหล็กนอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้วยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว อิมตัว (hydrated lime) ยิปซัม หรือ แอนไฮไดรต์ (anhydrite) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีตมีข้อดี 2 ประการ คือ สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และสามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้เนื่องจากในปัจจุบันมีการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็กในประเทศไทย ดังนั้นจึงขอให้รายละเอียดเกี่ยวกับตะกรันเตาถลุงเหล็กเพื่อเป็นวัสดุอีกทางเลือกหนึ่งในส่วนผสมของคอนกรีต

### 1. กระบวนการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ในกระบวนการถลุงเหล็ก โรงงานจะใส่สินแร่เหล็กเข้าในเตาถลุงรวมทั้งใส่สารที่เป็นฟลักซ์ (flux) ซึ่งได้แก่ หินปูนและหิน โดโลไมต์ เพื่อลดอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวลงเพื่อประหยัดพลังงาน การเผาจะใช้ถ่าน โค้ก (ถ่าน โค้ก คือ ถ่านหินที่เผาจนหมดควัน) เป็นเชื้อเพลิง หลังจากเผาจนอุณหภูมิสูงประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ 2 อย่างเกิดขึ้นในเตาเผาพร้อมกัน คือ เหล็กที่หลอมจนเหลวซึ่งตกอยู่ก้นเตาและตะกรันเหลวซึ่งลอยอยู่บนผิวเหล็กเหลว การทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็วช่วยป้องกันการเกิดผลึกในตะกรันเตาถลุงเหล็ก และทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นเม็ดที่มีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่า 4.75 มม. จึงเรียกว่าเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก ในทางตรงกันข้ามถ้าปล่อยให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ออกจากเตาเผาเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ จะทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กอยู่ในรูปที่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่และไม่มีคุณสมบัติทางวัสดุประสาน กระบวนการทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อไม่ให้เป็นผลึก ทำได้โดยการฉีดน้ำที่มีความเร็วสูง ไปกระทบกับตะกรันเตาถลุงเหล็กเหลวที่ยังร้อนอยู่ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อตะกรันเตาถลุงเหล็กประมาณ 10 : 1 โดยมวล ซึ่งทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นเม็ดและอยู่ในรูปไม่เป็นผลึกสูงมากภายหลังที่ได้เม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กจึงทำให้แห้งและบดให้ละเอียดโดยใช้วิธีการเดียวกับการบดเม็ดปูนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในช่วงก่อนและระหว่างการบดเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กจะนำแม่เหล็กมาดูดแร่เหล็กที่ยังติดมาหรือตกค้างอยู่ออกก่อนเพื่อนำแร่เหล็กกลับไปใช้ใหม่ ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะบดให้ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์เพราะการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นตามความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กเพิ่มขึ้น

### 2. องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วย ออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก ซึ่งปนมากับสินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูนและหิน โดโลไมต์ องค์ประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่าร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่น ๆ ที่ติดมา เช่น  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{MnO}$  อยู่เล็กน้อย แต่ถ้าพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแต่ละ โรงงานจะพบว่ามีความแตกต่างกันไม่มากการที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป) จึงทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ

### 3. ข้อกำหนดสำหรับตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ASTM C989 ได้กำหนดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 80, 100 และ 120 ซึ่งแต่ละชั้นคุณภาพจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (Slag

activity index) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มีชั้นคุณภาพสูงจะค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันสูง โดย ค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันหาได้จาก

$$\text{ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ)} = [\text{SP/P}] \times 100 \quad (2-2)$$

เมื่อ SP = ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมอยู่ร้อยละ 50

P = ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน

#### 4. ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตสด

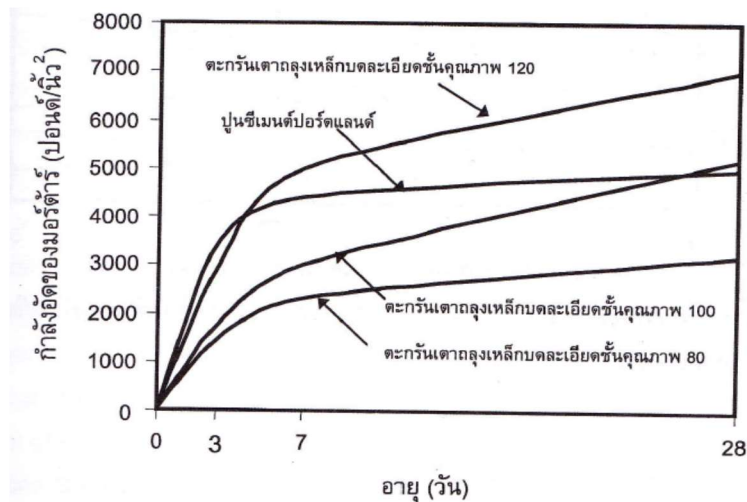
โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีความสามารถในการเท และเขย่าหรือทำให้แน่นได้ง่ายกว่าคอนกรีตธรรมดา การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะยืดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตออกไปในกรณีที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ เวลาการก่อตัวที่ยืดออกไปจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคอนกรีตปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปเวลาการก่อตัวจะยืดออกไปราว ½ ถึง 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา การใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อเร่งการก่อตัวของคอนกรีตจะสามารถชดเชยผลกระทบของการก่อตัวที่ยืดออกไปได้ดีการเย็นน้ำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด กล่าวคือ ถ้าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้การเย็นน้ำลดลง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์การเย็นน้ำของคอนกรีตจะสูงขึ้น อัตราการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันหรือลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

#### 5. ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

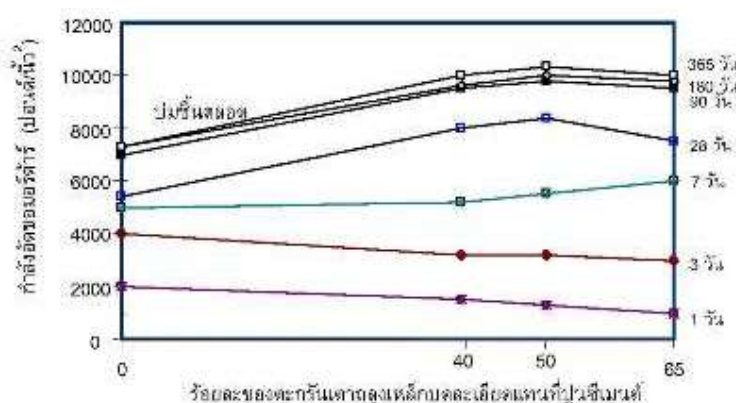
การบ่มคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพเพราะคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะมีปัญหาเรื่องการสูญเสียกำลังหากหยุดบ่มภายหลังจากหล่อ 3 วันไปแล้ว ซึ่งจะคล้ายกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 และอัตราการสูญเสียกำลังของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสูงกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป มีแนวโน้มที่จะเสียอันตรายมากกว่าคอนกรีตธรรมดาในกรณีที่ไม่มีการบ่มที่ดี

การพัฒนากำลังคอนกรีตของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับคุณภาพ กล่าวคือ การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120 จะทำให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาเล็กน้อยในช่วงอายุ 1 ถึง 3 วัน และให้กำลังอัดสูงกว่าเมื่ออายุเกิน 7 วันไปแล้ว แต่การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 80 และ 100 จะให้กำลังที่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นส่วนใหญ่ ดังภาพที่ 2-4 และภาพที่ 2-5 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตมีผลต่อกำลังอัดอย่างมาก กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่อายุต่ำกว่า 28 วันจะลดลงเมื่อปริมาณตะกรันถลุงเหล็กบดละเอียดเพิ่มขึ้น แต่หลังจากอายุ 28 วันการพัฒนากำลังของส่วนผสมที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่สูงจะพัฒนาได้ดีกว่า โดยกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมตะกรันถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 จะให้กำลังสูงสุด การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดอุณหภูมิของคอนกรีตได้ เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลง และทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำขึ้นและการซึมผ่านน้ำจะลดลงอย่างมากตามอายุที่เพิ่มขึ้นยิ่ง ปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากจะยิ่งลดการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตได้มากขึ้นเพราะ โครงสร้างของโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีแนวโน้มที่บ่มน้ำมากกว่ากรณีของซีเมนต์เพสต์ล้วน

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์และซัลเฟตได้ดี การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมี  $C_3A$  ถึงร้อยละ 12 ให้ผลการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ( $C_3A$  ไม่เกินร้อยละ 5) ซึ่งความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเนื่องมาจากคอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำ การที่  $Ca(OH)_2$  และอัลคาไลทำปฏิกิริยากับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดได้เป็น C-S-H จึงเหลืออัลคาไลและ  $Ca(OH)_2$  น้อยลงในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟต การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาของอัลคาไลซิลิกา แต่มักต้องใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณสูงถึงร้อยละ 40 ถึง 65 ของวัสดุประสานจึงจะสามารถลดปัญหานี้ได้ดี



ภาพที่ 2-4 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120, 100 และ 80 ตามมาตรฐาน ASTM C 989 ผสมอยู่ร้อยละ 50 เปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน



ภาพที่ 2-5 ผลกระทบเนื่องจากปริมาณตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและการต้านทานสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลัดกันของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียด พบว่า มีความสามารถเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป แต่การคืบและการหดตัวมีแนวโน้มว่าคอนกรีตที่มีตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียดจะมีค่าสูงกว่าของคอนกรีตธรรมดา ตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียดมีสีจางกว่าสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นเมื่อหล่อเป็นคอนกรีตแล้วจึงอาจมีสีออกปาทางเขียวอ่อนได้

นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีของกำมะถันจากซัลไฟด์กับส่วนผสมอื่น ๆ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปรับปรุงด้วยตะกรันหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก Type IS ถือว่าเป็นปูนซีเมนต์เทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C595 ดังนั้นจึงสามารถใช้กับงานทุกประเภทที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยกเว้นในกรณีที่ต้องการกำลังสูงในช่วงอายุต้นของคอนกรีตนอกจากนี้ยังสามารถใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมกับปูนซีเมนต์ในขณะที่ผสมคอนกรีตก็ได้โดยปริมาณและอัตราส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดขึ้นอยู่กับชนิดของงานคอนกรีตแต่ละงาน

### วัสดุสร้างผลึก (Crystalline materials)

วัสดุสร้างผลึกถูกใช้ผสมโดยตรงกับคอนกรีตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกันซึมและความทนทานของคอนกรีตโดยการสร้างผลึกที่มีความต้านทานสูงและไม่ละลายน้ำ ซึ่งผลึกกันซึมเหล่านั้นจะเข้าไปอุดโพรง รอยร้าว และช่องว่างอื่น ๆ ในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตที่บ่มน้ำมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปวัสดุสร้างผลึกสามารถใช้ผสมกับคอนกรีตในปริมาณร้อยละ 0.8-1.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

Yodmalai (2011) ได้ทำการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุสร้างผลึกร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากการศึกษาพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุสร้างผลึกมีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วน

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sumranwanich (2004) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่ ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ขึ้นอยู่กับเวลา สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ขึ้นอยู่กับเวลา และการดึงดูดอออนขึ้นอยู่กับเวลา โดยคำนึงถึงระยะเวลาการบ่ม และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต สำหรับแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ขึ้นอยู่กับเวลาโดยพิจารณาถึงการยึดจับคลอไรด์ด้วยการยึดจับทางเคมีและทางกายภาพ ในขณะที่แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ขึ้นอยู่กับเวลาโดยคำนึงถึงการพัฒนาของโพรงช่องว่างในคอนกรีต และแบบจำลองการดึงดูดอออนขึ้นอยู่กับเวลาโดยคำนึงถึงการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีต จากการเปรียบเทียบผลการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลอง พบว่า การแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทำนายมีความถูกต้องที่น่าพอใจกับผลการทดลอง



### 1. แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมแล้วจะประกอบด้วยปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและปริมาณคลอไรด์อิสระ ดังสมการที่ 2-4

$$C_{\text{tot}}(t_s, t_e) = C_{\text{fix}}(t_s, t_e) + C_{\text{free}}(t_s, t_e) \quad (2-4)$$

เมื่อ  $t_s$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มเผชิญกับเกลือคลอไรด์ (วัน)

$t_e$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเผชิญกับเกลือคลอไรด์ (วัน)

$C_{\text{tot}}(t_s, t_e)$  = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{fix}}(t_s, t_e)$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีต  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{free}}(t_s, t_e)$  = ปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีต  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

ในแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ในระบบวัสดุประสานของซีเมนต์เพสต์ผสมแล้วจะพิจารณาทั้งกระบวนการยึดจับทางเคมี และทางกายภาพดังสมการที่ 2-5 โดยเฟสของอลูมินา ( $C_3A$ ) และอลูมินาเฟอไรต์ ( $C_4AF$ ) จะถูกพิจารณาในการยึดจับคลอไรด์ด้วยกระบวนการทางเคมี ในขณะที่ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของแล้วได้แก่ C-S-H, C-A-H, C-A-F-H, ยิปซัม และ โมโนซัลเฟต จะถูกพิจารณาในกระบวนการยึดจับทางกายภาพ ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมแล้วมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับเวลา ทั้งอายุเมื่อเริ่มเผชิญกับคลอไรด์ และอายุเมื่อเผชิญกับคลอไรด์

$$C_{\text{fix}}(t_s, t_e) = C_{\text{fix, chem}}(t_s, t_e) + C_{\text{fix, phy}}(t_e) \quad (2-5)$$

เมื่อ  $t_s$  = อายุของซีเมนต์เพสต์เมื่อเริ่มเผชิญกับเกลือคลอไรด์ (วัน)

$t_e$  = อายุของซีเมนต์เพสต์เมื่อเผชิญกับเกลือคลอไรด์ (วัน)

$C_{\text{fix}}(t_s, t_e)$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ผสมแล้ว  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{fix, chem}}(t_s, t_e)$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ผสมแล้ว (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{fix, phy}}(t_c)$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์ผสมแก้าลอย (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

## 2. แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

การแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากกลไกการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ได้แก่ การแพร่ การซึมผ่าน และการดึงดูดคาปิลารี เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่เผชิญกับความดันของน้ำ การแพร่คลอไรด์จะเป็นกระบวนการหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อการแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต การแพร่คลอไรด์เกิดจากความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่างกัน กล่าวคือ คลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อสองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion)

ดั่งสมการที่ 2-6

$$\frac{\partial C_t(x, t)}{\partial t} = -D_{Cl}(x, t) \frac{\partial^2 C_t(x, t)}{\partial x^2} \quad (2-6)$$

เมื่อ  $C_t(x, t)$  = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง  $x$  จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา  $t$   
(โมล/ลิตร)

$C_r(x, t)$  = ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง  $x$  จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา  $t$   
(โมล/ลิตร)

$D_{Cl}(t)$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ระยะเวลา  $t$  (ซม.<sup>2</sup>/วัน)

$x$  = ระยะทางจากผิวหน้าของคอนกรีต (ซม.)

$t$  = ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (วัน)

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาขึ้นอยู่กับการพัฒนาของโพรง อัตราส่วนของเพสต์ (Paste ratio) และปริมาณน้ำในคอนกรีต สำหรับโพรงในโครงสร้างคอนกรีตสามารถหาได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเฉลี่ย และความพรุนทั้งหมด เมื่อเพสต์ที่บีบน้ำทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเฉลี่ย และความพรุนทั้งหมดลดลง ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเพสต์ และปริมาณน้ำในคอนกรีตเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของเพสต์ หมายถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต ส่วนปริมาณน้ำหมายถึงปริมาณน้ำในโพรงของคอนกรีต

โครงสร้างโพรงในระบบวัสดุประสานจะถูกตรวจสอบโดยใช้วิธี Mercury intrusion porosimetry (MIP) ซึ่งวิธีนี้สามารถคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเฉลี่ย และความพรุนทั้งหมดในระบบวัสดุประสานได้โดยใช้สมการของ Washburn

สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตมีค่าแตกต่างจากชั้นด้านในของคอนกรีต โดยปกติที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์สูงกว่าชั้นด้านในของคอนกรีต ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตสามารถหาได้จากสมการที่ 2-7 และสมการที่ 2-8 ตามลำดับ

สำหรับชั้นผิวหน้า

$$D_{CL}(1, t) = \frac{0.000012}{-0.0197 \times \left( 200 \times d_{ave}^{1.5}(t) \times \left( \frac{n(t)}{100} \right)^{3.5} \right)} \times (R_p^3 + 0.375) \times \left( 0.25 \times \left( \frac{f}{b} \right) + 1 \right) \times \left( \frac{C_w(1, t)}{100} \right) \quad (2-7)$$

สำหรับชั้นด้านใน

$$D_{CL}(x, t) = \frac{0.000010}{0.00039 + e^{-0.0184 \times \left( 200 \times d_{ave}^{1.5}(t) \times \left( \frac{n(t)}{100} \right)^{3.5} \right)}} \times (R_p^3 + 0.375) \times \left( 0.25 \times \left( \frac{f}{b} \right) + 1 \right) \times \left( \frac{C_w(1, t)}{100} \right) \quad (2-8)$$

เมื่อ  $D_{CL}(1, t)$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของชั้นที่ 1 ที่ระยะเวลา  $t$

$D_{CL}(x, t)$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของชั้นที่  $x$  ที่ระยะเวลา  $t$

$d_{ave}(t)$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ยที่ระยะเวลา  $t$  (mm)

$n(t)$  = ความพรุนทั้งหมดของคอนกรีตที่ระยะเวลา (%) โดยปริมาตรของเพสต์

$R_p$  = อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต

$C_w(1, t)$  = ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในโพรงที่ชั้นที่ 1 ที่ระยะเวลา  $t$  (%)

$C_w(x, t)$  = ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในโพรงที่ชั้นที่  $x$  ที่ระยะเวลา  $t$  (%)

### 3. แบบจำลองการดึงดูคอออน

จากการพัฒนาแบบจำลองการดึงดูคอออนได้สมมติให้การดึงดูคอออนของคอนกรีตเกิดขึ้นที่ชั้นผิวหน้าเท่านั้น โดยการเคลื่อนที่ของคลอไรด์แสดงด้วยการเปลี่ยนฟลักซ์คลอไรด์ เนื่องจากกลไกการดึงดูคอออนและถูกรวมกับการเปลี่ยนฟลักซ์คลอไรด์ที่เกิดจากกระบวนการแพร่ซึ่งฟลักซ์ของการดึงดูคอออนคลอไรด์หาได้จากสมการที่ 2-9 และสมการที่ 2-10

สำหรับคอนกรีตล้วน

$$F_{ad}(1,t) = (0.000025 \times B^{0.1}) \times R_p^{0.05} \times \left( \frac{0.001}{0.0002 + e^{-0.202 \times n(t)}} \right) \times \left( 1 - 0.006 \times \left( \frac{F_c}{3200} \right)^7 \right) \\ \times \left( \frac{0.0036}{0.0017 + e^{-12.28 \times (w/b)}} \right) \times (-0.35 \times C_{free}^{0.5}(1,t) + 1) \times e^{-C_{free}(1,t)} \quad (2-9)$$

สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย

$$F_{ad}(1,t) = (0.000025 \times B^{0.1}) \times R_p^{0.05} \times \left( \frac{0.001}{0.0002 + e^{-0.202 \times n(t)}} \right) \times \left( 1 - 0.006 \times \left( \frac{F_c}{3200} \right)^7 \right) \\ \times \left( \frac{0.0036}{0.0017 + e^{-12.28 \times (w/b)}} \right) \times (-0.35 \times C_{free}^{0.5}(1,t) + 1) \times e^{-C_{free}(1,t)} \times \left( \frac{d_{ave}(1,t)}{30} \right)^3 \quad (2-10)$$

เมื่อ  $F_{ad}(1, t)$  = การดึงดูดฟลักซ์ของคลอไรด์ที่ชั้นที่ 1 จากผิวของคอนกรีตที่ระยะเวลา  $t$   
(mol/ cm<sup>2</sup>/ day)

$B$  = ปริมาณของวัสดุประสาน (kg/ m<sup>3</sup>)

$R_p$  = อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของคอนกรีต

$n(t)$  = ความพรุนทั้งหมดของเพสต์ภายในคอนกรีตที่ระยะเวลา  $t$  ใด ๆ  
(% โดยปริมาตรของเพสต์ในคอนกรีต)

$F_c$  = ความละเอียดของปูนซีเมนต์ (cm<sup>2</sup>/ g)

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

$d_{ave}(1, t)$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย ที่ชั้นที่ 1 จากผิวหน้าของคอนกรีตที่  
ระยะเวลา  $t$  (nm)

$t$  = อายุของคอนกรีต (วัน)

$w/b$  = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

Florea and Brouwers (2014) ได้เสนอแบบจำลองการยึดจับคลอไรด์ด้วยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ผสมตะกั่วเหล็กโดยคำนึงถึงตัวแปรที่มีผลโดยตรงหรือทางอ้อมต่อการยึดจับคลอไรด์ดังนี้ องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ ปริมาณตะกั่วเหล็ก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อายุการบ่ม และความเข้มข้นคลอไรด์อิสระ จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองนี้สามารถหาความสามารถยึดจับคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมตะกั่วเหล็กได้

Tamimi, Abdalla, and Sakka (2008) ได้เสนอแบบจำลองการทำนายการแพร่คลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดในอัตราส่วน 0.40 โดยใช้คำตอบ (Error function solution) ของกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ 2-11 จากการเปรียบเทียบผลการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลองพบว่า การแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทำนายมีแนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง

$$C_{xt} = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}}\right) \quad (2-11)$$

เมื่อ  $C_{xt}$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะทาง  $x$  และระยะเวลา  $t$   
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_s$  = ปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_i$  = ปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตตั้งแต่แรก  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$D_c$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ( $\text{ม.}^2/\text{วินาที}$ )

$x$  = ระยะทางจากผิวหน้าของคอนกรีต (ม.)

$t$  = ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (วินาที)

Thomas and Bamforth (1999) ได้พัฒนาแบบจำลองการแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน 0.30 และคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดในอัตราส่วน 0.70 โดยใช้คำตอบ (Error function solution) ของกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ 2-12 และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับเวลา ดังสมการที่ 2-13 จากการเปรียบเทียบผลการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลองพบว่า การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ได้จากการทำนายมีแนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง

$$C_{x,t} = C_s \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}\right)\right) \quad (2-12)$$

เมื่อ  $C_{x,t}$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะทาง  $x$  และระยะเวลา  $t$   
 $C_s$  = ปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต  
 $D_a$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์  
 $x$  = ระยะทางจากผิวหน้าของคอนกรีต  
 $t$  = ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์

$$D_t = D_{28} \left( \frac{t_{28}}{t} \right)^m \quad (2-13)$$

เมื่อ  $D_t$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ระยะเวลา  $t$   
 $D_{28}$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ระยะเวลา 28 วัน  
 $t_{28}$  = 28 (วัน)  
 $m$  = ค่าคงที่

Pack, Jung, Song, Kim, and Ann (2010) ได้เสนอแบบจำลองการทำนายการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ขึ้นอยู่กับเวลาของโครงสร้างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้คำตอบของกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ในการพัฒนาแบบจำลองดังสมการที่ 2-14

$$C(x,t) = C_s \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (2-14)$$

เมื่อ  $C(x,t)$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะทาง  $x$  และระยะเวลา  $t$   
 $C_s$  = ปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต  
 $D$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์  
 $x$  = ระยะทางจากผิวหน้าของคอนกรีต  
 $t$  = ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์

สำหรับการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ของคอนกรีตสามารถหาได้จากสมการที่ 2-15

$$C(x,t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{D_m(t) \cdot t}}} C_s \left( t - \frac{x^2}{4D_m(t) \cdot \omega^2} \right) \times e^{-\omega^2 \cdot t} \cdot \omega \quad (2-15)$$

เมื่อ  $D_m(t)$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์เฉลี่ยที่ระยะเวลา  $t$

จากการเปรียบเทียบผลการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลองพบว่า การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายมีแนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง

Chalee, Jaturapitakkul, and Chindapasirt (2009) ได้เสนอแบบจำลองการทำนาย การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สอง ของฟิกส์เพื่อสร้างสมการเชิงทดลอง (Empirical formula) เพื่อทำนายปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีต ดังสมการที่ 2-16 โดยคำนึงถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ ระยะจากผิวหน้า และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ จากแบบจำลองการทำนายการแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่สร้างขึ้นพบว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสม เถ้าลอยได้

$$C_{x,t} = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{\frac{(31,536,00t)^{1-\beta}}{1-\beta}}} \right) \right] \quad (2-16)$$

เมื่อ  $C_t(x, t)$  = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ  $x$  ที่ระยะเวลา  $t$   
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_0$  = ปริมาณคลอไรด์บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$x$  = ระยะทางจากผิวหน้าของคอนกรีต (มม.)

$t$  = ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

$\beta$  = สัมประสิทธิ์เชิงทดลอง (Empirical coefficient)

Oh and Jang (2007) ได้พัฒนาแบบจำลองการทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ส่วนและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน 0.20 โดยคำนึงถึงผลกระทบของการยึดจับคลอไรด์ การดึงดูดออสโมติกคลอไรด์อย่างรวดเร็วด้วยการเคลื่อนที่ของความชื้น และสัมประสิทธิ์การแพร่ คลอไรด์ โดยสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และความชื้น สัมพัทธ์ดังสมการที่ 2-17 สำหรับการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ของคอนกรีตในหนึ่งทิศทาง (Mass balance equation) ดังสมการที่ 2-18 จากการเปรียบเทียบผลการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จาก การทำนายกับผลการทดลองพบว่า การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายมี แนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง

$$D_c = D_c^R \cdot f_T(T) \cdot f_t(t) \cdot f_h(h) \quad (2-17)$$

- เมื่อ  $D_c$  = สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ( $m^2/s$ )  
 $D_c^R$  = สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่วัดได้  
 $f_T(T)$  = ตัวแปรที่แสดงผลกระทบของอุณหภูมิ T  
 $f_t(t)$  = ตัวแปรที่แสดงผลกระทบของเวลา t  
 $f_h(h)$  = ตัวแปรที่แสดงผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ h

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{D_c}{\gamma} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial (\bar{u}C)}{\partial x} \quad (2-18)$$

- เมื่อ C = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)  
 $\gamma$  = ค่าคงที่  
 $\bar{u}$  = ความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของความชื้น ( $m/s$ )

Petcherdchoo (2013) ได้เสนอแบบจำลองการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยโดยคำนึงถึงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ขึ้นอยู่กับเวลาและปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าขึ้นอยู่กับเวลาโดยใช้กฎข้อที่สองของฟิคส์ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวได้พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และร้อยละการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าขึ้นอยู่กับเวลาหาได้จากสมการที่ 2-19 และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ขึ้นอยู่กับเวลาหาได้จากสมการที่ 2-20

$$C_s(t) = 10^{[0.814(w/b) - 0.213]} + 2.11\sqrt{t} \quad (2-19)$$

- เมื่อ  $C_s(t)$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าที่ระยะเวลา t (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)  
 $w/b$  = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน  
 $t$  = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

$$D_a = \frac{D_{28}}{1-m} \left[ \left( 1 + \frac{28}{365t} \right)^{1-m} - \left( \frac{28}{365t} \right)^{1-m} \right] \cdot \left( \frac{28}{365t} \right)^{1-m} \quad (2-20)$$

- เมื่อ  $D_a$  = สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ระยะเวลา t ( $mm^2/year$ )  
 $m$  = ตัวแปรที่มีผลต่อเวลา



สำหรับการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยหาได้จากสมการที่ 2-21

$$C(x,t) = C_0 \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + k\sqrt{t} \cdot \left[ e^{-\frac{x^2}{4D_a t}} - \left( \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D_a t}} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (2-21)$$

เมื่อ  $C(x,t)$  = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ  $x$  ที่ระยะเวลา  $t$

(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_0$  = ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นที่ผิวหน้าของคอนกรีต

(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$x$  = ระยะจากผิวหน้าของคอนกรีต (mm)

จากการเปรียบเทียบผลการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลองพบว่า การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายมีความถูกต้องที่น่าพอใจกับผลการทดลอง

### บทที่ 3

#### การพัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอแบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก ซึ่งประกอบไปด้วย 3 แบบจำลองหลัก ได้แก่ ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการดึงดูดอออนคลอไรด์ โดยคำนึงถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน ปริมาณวัสดุประสาน ระยะเวลาบ่มน้ำและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ โดยความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตจะดักจับอออนคลอไรด์ไม่ให้เคลื่อนที่ด้วยผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุประสาน ซึ่งการยึดจับคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถลดปริมาณคลอไรด์อิสระได้ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของการแพร่คลอไรด์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาขึ้นอยู่กับการพัฒนาโครงสร้างโพรงช่องว่างในคอนกรีต โดยคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและเถ้าลอยที่อายุต้นมีการแพร่คลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่อายุยาวนาน เนื่องจากที่อายุต้นคอนกรีตจะมีปริมาณโพรงช่องว่างมากกว่า เพราะว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังไม่มากในช่วงอายุต้น แต่จะค่อย ๆ พัฒนาการเกิดปฏิกิริยาได้ในเวลาต่อมา การแพร่จึงค่อย ๆ ลดลงสำหรับกลไกการดึงดูดอออนคลอไรด์จะเกิดที่ผนังโพรงช่องว่างในเพศ์ของคอนกรีต โดยมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ซึ่งสามารถดึงดูดอออนคลอไรด์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบจากภายนอกเข้ามาในคอนกรีตได้

แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกจะพัฒนาขึ้นด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Finite difference method ของระยะทาง  $x$  และระยะเวลา  $t$  โดยเขียนด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Basic ทั้งนี้สมการของแบบจำลองต่าง ๆ ที่ใช้ในโปรแกรมนี้ได้จากการสร้างสมการคณิตศาสตร์ด้วย โปรแกรม Statistica

แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

### 1. แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์

ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ (Chloride binding capacity) ของคอนกรีต หมายถึง ความสามารถของคอนกรีตในการยึดจับคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีตให้เป็นคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ในคอนกรีตนั้น

Sumranwanich (2004) ได้เสนอแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าขึ้นอยู่กับดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานโดยคำนึงถึงองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุประสาน แต่ในงานวิจัยนี้แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดจะถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีแบบง่าย (Simplify method) โดยคำนึงถึงอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ของคอนกรีตจะประกอบด้วยปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ดังสมการที่ 3-1

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

เมื่อ  $t$  = ระยะเวลาที่คอนกรีตเผชิญกับเกลือคลอไรด์ (ปี)

$C_{\text{tot}}(t)$  = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{fix}}(t)$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีต  
(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_{\text{free}}(t)$  = ปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

จากสมการที่ 3-1 ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับเท่ากับผลต่างระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตดังสมการที่ 3-2

$$C_{\text{fix}}(t) = C_{\text{tot}}(t) - C_{\text{free}}(t) \quad (3-2)$$

#### 1.1 อัตราส่วนคลอไรด์อิสระ (Free chloride ratio)

ในแบบจำลองเพื่อคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดโดยใช้ผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดของ Prak and Sumranwanich (2013); Prak (2014) โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10 cm x 20 cm ที่มี

อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน (s/b) 0.20, 0.50, 0.60 และ 0.70 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 และ 0.50 และปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m<sup>3</sup> และ 400 kg/ m<sup>3</sup> หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำครบกำหนด 28 วัน จึงทำการเคลือบผิวคอนกรีตทุกหน้าด้วยอีพ็อกซี ยกเว้นหน้าตัดด้านเดียว แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้นคลอไรด์ร้อยละ 3.0 เป็นเวลา 28 วัน 91 วัน และ 365 วัน เมื่อครบกำหนดการแช่แล้ว จึงนำตัวอย่างมาตัดและบดให้ละเอียด และนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 และหาปริมาณคลอไรด์อิสระตามมาตรฐาน ASTM C1218 สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตและเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 3-1 และจากผลการทดลองสามารถแสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดดังตัวอย่างในภาพที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ส่วนผสมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและเงื่อนไขการทดลอง

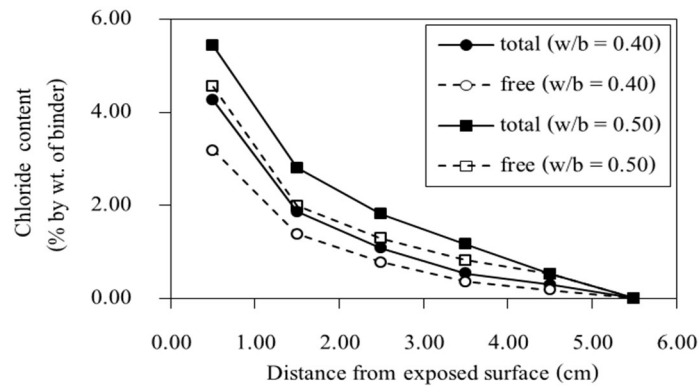
(Prak & Sumranwanich, 2013; Prak, 2014)

รหัสส่วนผสม	ปริมาณวัสดุ			ระยะเวลา	ระยะเวลา
	ประสาน (kg/ m <sup>3</sup> )	w/b	s/b	บ่มน้ำ (วัน)	เผชิญคลอไรด์ (วัน)
OPC	320, 400	0.40, 0.50	0.00	28	28, 91, 365
GGBFS20	320, 400	0.40, 0.50	0.20	28	28, 91, 365
GGBFS50	320, 400	0.40, 0.50	0.50	28	28, 91, 365
GGBFS60	320, 400	0.40, 0.50	0.60	28	28, 91, 365
GGBFS70	320, 400	0.40, 0.50	0.70	28	28, 91, 365

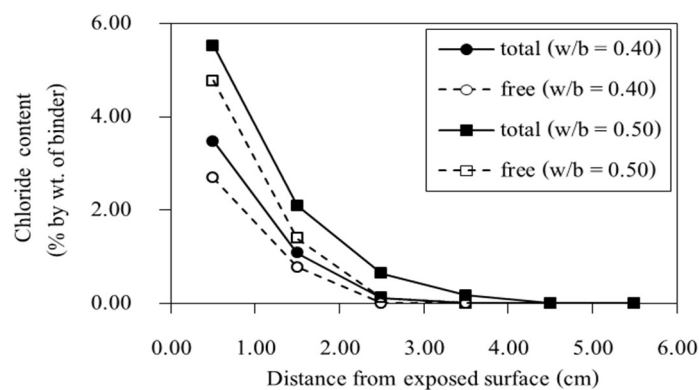
หมายเหตุ: ความหมายของสัญลักษณ์

“OPC” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

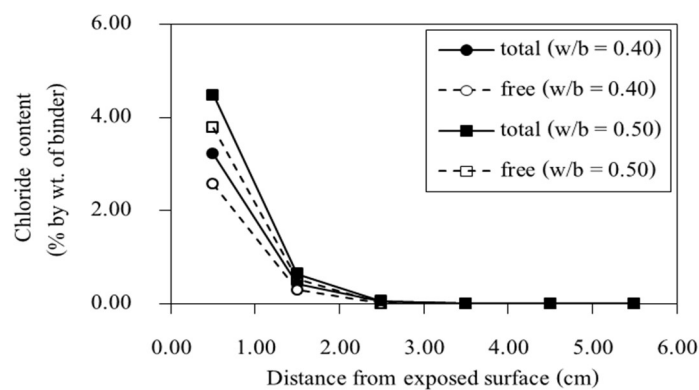
“GGBFS20” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.20



ก. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



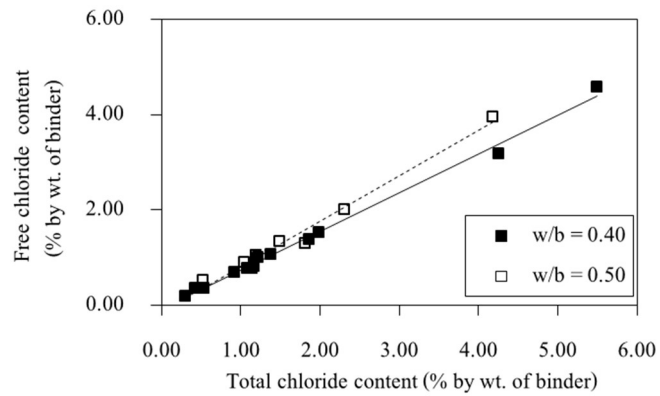
ข. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.20



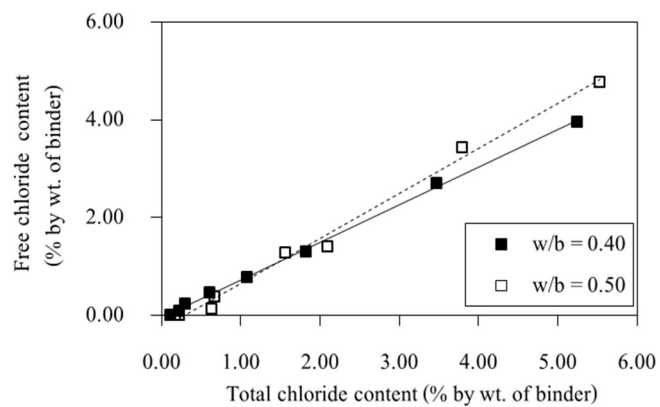
ค. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.50

ภาพที่ 3-1 ตัวอย่างการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาน  $400 \text{ kg/m}^3$  และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน

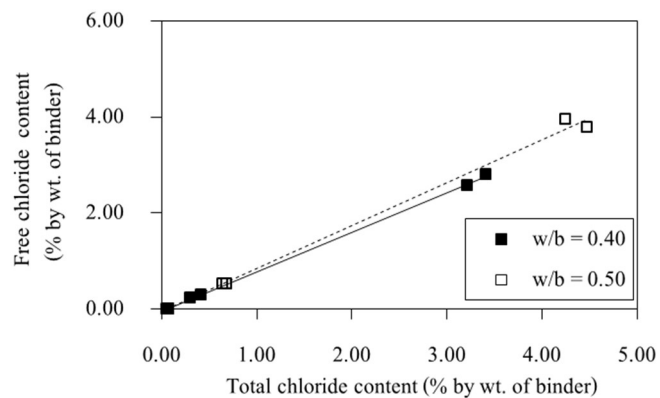
นำผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดดังตัวอย่างในภาพที่ 3-1 ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมดังตัวอย่างในภาพที่ 3-2



ก. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



ข. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.20



ค. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.50

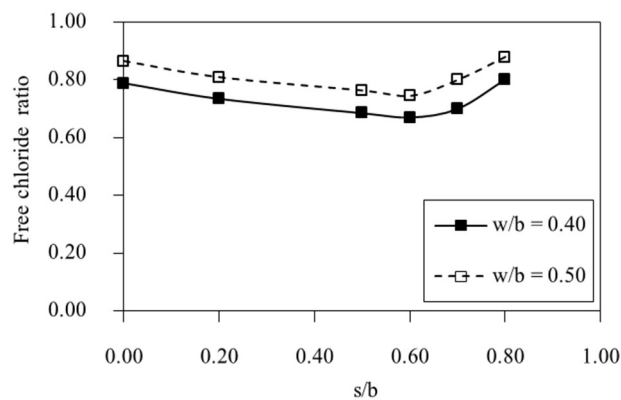
ภาพที่ 3-2 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน

จากภาพที่ 3-2 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดคังสมการที่ 3-3

$$C_{\text{free}}(t) = \alpha_{\text{free}}(t) \times C_{\text{tot}}(t) \quad (3-3)$$

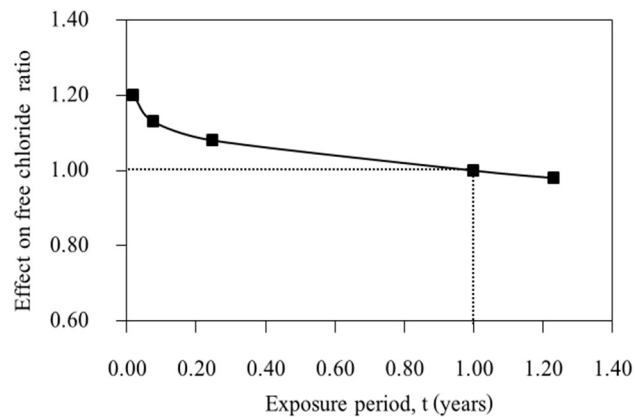
เมื่อ  $\alpha_{\text{free}}(t)$  = อัตราส่วนคลอไรด์อิสระ (Free chloride ratio)

หลังจากที่ได้อัตราส่วนคลอไรด์อิสระของคอนกรีตแต่ละส่วนผสม จึงทำการศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน (s/b) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่ออัตราส่วนคลอไรด์อิสระดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระและอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ

อัตราส่วนคลอไรด์อิสระมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอายุของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีอายุนานขึ้น อัตราส่วนคลอไรด์อิสระของคอนกรีตจะมีแนวโน้มลดลงดังภาพที่ 3-4 เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานขึ้น จึงส่งผลให้คลอไรด์ถูกยึดจับได้มากขึ้น



ภาพที่ 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต

จากภาพที่ 3-3 และภาพที่ 3-4 สามารถหาอัตราส่วนคลอไรด์อิสระของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดโดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ได้ดังสมการที่ 3-4

$$\alpha_{\text{free}}(t) = \left( \left( -0.27 \times \frac{w}{b} + 1.155 \right) \times \left( \frac{s}{b} \right)^{7.5} + \left( 0.18 \times \frac{w}{b} - 0.298 \right) \times \frac{s}{b} + \left( 0.74 \times \frac{w}{b} + 0.49 \right) \right) \times \frac{1}{t^{0.048}} \quad (3-4)$$

เมื่อ  $w/b$  = อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต

$s/b$  = อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน

$t$  = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

1.2 อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride ratio)

อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตดังสมการที่ 3-5

$$\alpha_{\text{fix}}(t) = 1 - \alpha_{\text{free}}(t) \quad (3-5)$$

เมื่อ  $\alpha_{\text{fix}}(t)$  = อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride ratio)

ดังนั้น ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดดังสมการที่ 3-6

$$C_{\text{fix}}(t) = C_{\text{tot}}(t) \times \alpha_{\text{fix}}(t) \quad (3-6)$$



ในงานวิจัยนี้ อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบของระยะเวลาการบ่มของคอนกรีต

## 2. แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากกลไกการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ได้แก่ การแพร่ การซึมผ่าน และการดึงดูดคาปิลารี เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตอิ่มตัวด้วยน้ำ และไม่เผชิญกับความดันของน้ำ การแพร่ของคลอไรด์จะถูกพิจารณาเป็นกระบวนการหลัก ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต การแพร่คลอไรด์เกิดจากความแตกต่างความเข้มข้นของคลอไรด์ กล่าวคือ คลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อที่หนึ่งของฟิคส์ (Fick's first law of diffusion) ดังสมการที่ 3-7

$$F_{Cl}(x, t) = -D_{Cl}(x, t) \frac{\partial C_{free}(x, t)}{\partial x} \quad (3-7)$$

เมื่อ  $F_{Cl}(x, t)$  = ฟลักซ์ของคลอไรด์ที่ระยะ  $x$  จากผิวด้านนอกที่เวลา  $t$  ใด ๆ  
(โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวัน)

$D_{Cl}(x, t)$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ระยะ  $x$  จากผิวนอกที่เวลา  $t$  ใด ๆ  
(ตารางเซนติเมตรต่อวัน)

$C_{free}(x, t)$  = ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะ  $x$  จากผิวด้านนอกที่เวลา  $t$  ใด ๆ  
(โมลต่อลิตร)

$x$  = ระยะจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (เซนติเมตร)

$t$  = ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (วัน)

สำหรับสมการการรักษาสมดุลของมวลคลอไรด์ (Chloride mass conservation) ในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำแสดงดังสมการที่ 3-8

$$\frac{\partial C_{tot}(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial F_{Cl}(x, t)}{\partial x} \quad (3-8)$$

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

แทนสมการที่ 3-7 ในสมการที่ 3-8 ได้สมการของกลไกการแพร่คลอไรด์ในคอนกรีต เรียกว่า กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ 3-9

$$\frac{\partial C_{\text{tot}}(x,t)}{\partial t} = -D_{\text{Cl}}(x,t) \frac{\partial^2 C_{\text{free}}(x,t)}{\partial x^2} \quad (3-9)$$

จากสมการที่ 3-9 ได้คำตอบ (Error function solution) ดังสมการที่ 3-10

$$C(x,t) = (C_s - C_i) \left[ 1 - \text{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{\text{Cl}}t}} \right) \right] + C_i \quad (3-10)$$

เมื่อ  $C(x, t)$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะ  $x$  และที่ระยะเวลา  $t$

(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$D_{\text{Cl}}$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (ตารางเซนติเมตรต่อปี)

$C_s$  = ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

$C_i$  = ปริมาณคลอไรด์ที่มีในคอนกรีตตั้งแต่ต้น

(% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

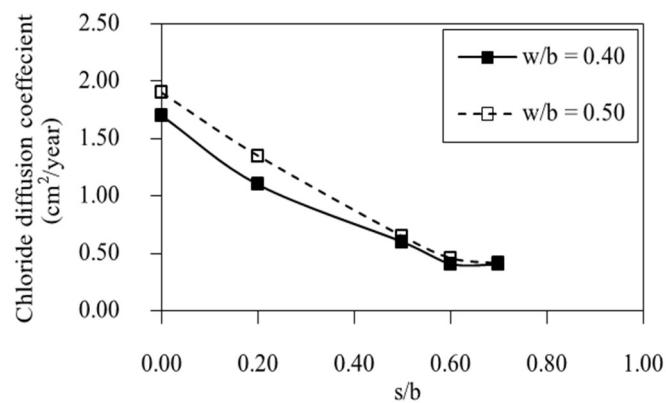
$x$  = ระยะจากผิวหน้าของคอนกรีต (เซนติเมตร)

$t$  = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

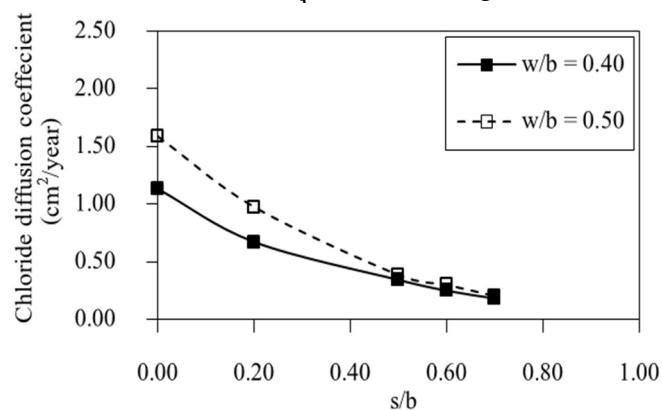
Sumranwanich (2004) รายงานว่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับการพัฒนาโครงสร้างโพรงช่องว่างและปริมาณความพรุนในคอนกรีต แต่ในแบบจำลองนี้ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดจะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณวัสดุประสานและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต

ในการพัฒนาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด จะหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตจากสมการที่ 3-10 โดยใช้ผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดของ Prak and Sumranwanich (2013); Prak (2014) หลังจากที่ได้อ่านค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต จึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ดังภาพที่ 3-5

Prak (2014) ได้รายงานว่า สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานีกระหว่างตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำให้เกิดสารประกอบ C-S-H เพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มการยึดประสานของคอนกรีต คอนกรีตจึงมีความพรุนน้อยลงส่งผลให้เกิดคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้น้อย



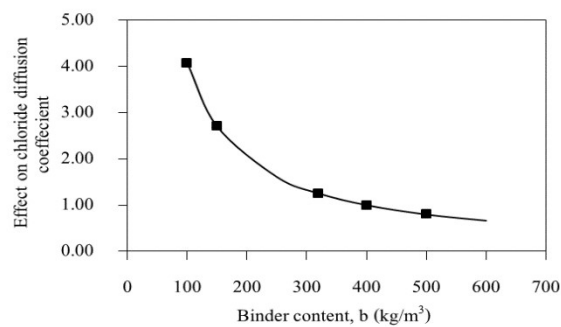
ก. ปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m<sup>3</sup>



ข. ปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m<sup>3</sup>

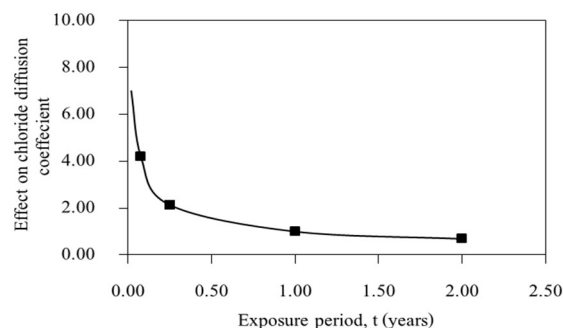
ภาพที่ 3-5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน

คอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน (b) ที่แตกต่างกัน จะมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ โดยคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสานมากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสานน้อย เนื่องจากคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสานมากจะทำให้ปริมาณโพรงช่องว่างในคอนกรีตน้อยลง ส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น เกลือคลอไรด์จึงแพร่เข้าไปในคอนกรีตได้น้อยกว่าคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสานน้อย ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และปริมาณวัสดุประสานของคอนกรีต

สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต โดยเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีตนานขึ้น คอนกรีตจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุประสานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานส่งผลให้เนื้อของคอนกรีตแน่นขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์จึงมีแนวโน้มลดลง



ภาพที่ 3-7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และระยะเวลาเผชิญกับคลอไรด์ของคอนกรีต

จากภาพที่ 3-5 ถึงภาพที่ 3-7 สามารถหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดโดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณวัสดุประสานและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ได้จากสมการที่ 3-11

$$D_{Cl}(x, t) = \left( \left( 6.462 \times \frac{w}{b} - 1.135 \right) \times \left( \frac{s}{b} \right)^2 - \left( 11.01 \times \frac{w}{b} - 2.109 \right) \times \frac{s}{b} + \left( 4.683 \times \left( \frac{w}{b} \right) - 0.759 \right) \right) \times \frac{43.5}{t^{0.547} \times b^{1.014}} \quad (3-11)$$

เมื่อ  $D_{Cl}(x, t)$  = สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ( $\text{cm}^2/\text{year}$ )

$s/b$  = อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน

$w/b$  = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

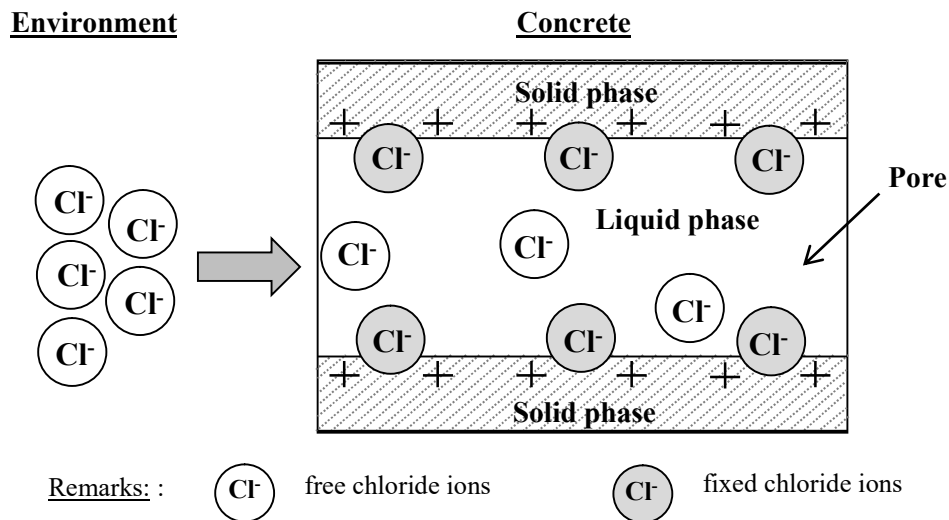
$t$  = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

$b$  = ปริมาณของวัสดุประสาน ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบของระยะเวลาการบ่มของคอนกรีต

### 3. แบบจำลองการดึงดูคอิออน

Maruya, Tangtermsirikul, and Matsuoka (1998) พบว่า ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่ในบริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตที่อยู่น้ำทะเลตลอดเวลาจะมีความเข้มข้นคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูคอิออนจะเกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีตมีประจุไฟฟ้าบวก จะดึงดูคอิออนคลอไรด์ ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 กลไกการดึงดูดไอออนคลอไรด์ (Sumranwanich, 2004)

Sumranwanich (2004) ได้เสนอว่า การดึงดูดไอออนคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับปริมาณความพรุนของคอนกรีต แต่ในแบบจำลองนี้การดึงดูดไอออนคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดจะถูกคิดด้วยวิธีแบบง่ายโดยคำนึงถึงอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ได้สมมติให้การดึงดูดไอออนคลอไรด์ของคอนกรีตเกิดขึ้นที่ระยะ 1.0 cm เท่านั้น ทำนองเดียวกับ Sumranwanich, Tangtermsirikul, and Maruya (2004) โดยผลกระทบของการดึงดูดไอออนต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์สามารถแสดงโดยฟังก์ชันของคลอไรด์เนื่องจากกลไกการดึงดูดไอออน (Flux of ion adsorption) ซึ่งฟังก์ชันนี้จะถูกร่วมกับฟังก์ชันของความแตกต่างของความเข้มข้นคลอไรด์ เนื่องจากกระบวนการแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion) ซึ่งจากการคำนวณกลับของผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Prak & Sumranwanich, 2013; Prak, 2014) ฟังก์ชันการดึงดูดไอออนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-12

$$F_{ad}(1, t) = \left(0.92 \times \frac{w}{b} - 0.141\right) \times 10^{-5} \times e^{-2.1 \times \left(\frac{s}{b}\right)} \times \frac{0.0153}{t^{0.331} \times (0.015 + e^{-(0.02 \times b)})} \quad (3-12)$$

เมื่อ  $F_{ad}(1, t) =$  ฟลักซ์ของการดึงดูดอออนคลอไรด์ที่ชั้นที่ 1 จากผิวของคอนกรีต  
ที่เวลา  $t$  ใด ๆ (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวัน)

$s/b$  = อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

$w/b$  = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

$t$  = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

$b$  = ปริมาณวัสดุประสาน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ในงานวิจัยนี้ การดึงดูดอออนคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดไม่ได้  
คำนึงถึงผลกระทบของระยะเวลาการบ่มของคอนกรีต

## แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก

### 1. แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์

ทำนองเดียวกับแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกั่วแดงตามกลไกการดูดซับ ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเนื้อเยื่อต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาบ่มน้ำ และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต

#### 1.1 อัตราส่วนคลอไรด์อิสระ (Free chloride ratio)

ในแบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกจะใช้ผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกของ Our, Chour, and Prak (2012) โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10 cm x 20 cm ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 อัตราส่วนเนื้อเยื่อต่อวัสดุประสาน 0.30 และ 0.50 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำครบกำหนด 7 วัน และ 28 วัน จึงทำการเคลือบผิวคอนกรีตทุกหน้าด้วยอีพ็อกซี ยกเว้นหน้าตัดด้านเดียว แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้นคลอไรด์ร้อยละ 5.0 เป็นเวลา 91 วัน 182 วัน และ 365 วัน เมื่อครบกำหนดการแช่แล้ว จึงนำตัวอย่างมาตัดและบดให้ละเอียด และนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 และหาปริมาณคลอไรด์อิสระตามมาตรฐาน ASTM C1218 สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3-2 และจากผลการทดลองสามารถแสดงการแทรกซึมคลอไรด์ดังตัวอย่างในภาพที่ 3-9 และภาพที่ 3-10



ตารางที่ 3-2 ส่วนผสมของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกและเงื่อนไขการทดลอง

รหัสส่วนผสม	CM/b	w/b	f/b	ระยะเวลาบ่มน้ำ	ระยะเวลาเผชิญคลอรีน
				(วัน)	(วัน)
OPC	0	0.50	0	7,28	91, 182, 365
FA30	0	0.50	0.30	7,28	91, 182, 365
FA50	0	0.50	0.50	7,28	91, 182, 365
OPC-CM1	0.01	0.50	0	7,28	91, 182, 365
FA30-CM1	0.01	0.50	0.30	7,28	91, 182, 365
FA50-CM1	0.01	0.50	0.50	7,28	91, 182, 365
OPC	0	0.60	0	28	91, 182, 365
FA30	0	0.60	0.30	28	91, 182, 365
FA50	0	0.60	0.50	28	91, 182, 365
OPC-CM1	0.01	0.60	0	28	91, 182, 365
FA30-CM1	0.01	0.60	0.30	28	91, 182, 365
FA50-CM1	0.01	0.60	0.50	28	91, 182, 365

หมายเหตุ: ความหมายของสัญลักษณ์

“OPC” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

“FA30” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30

“CM1” หมายถึง อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01

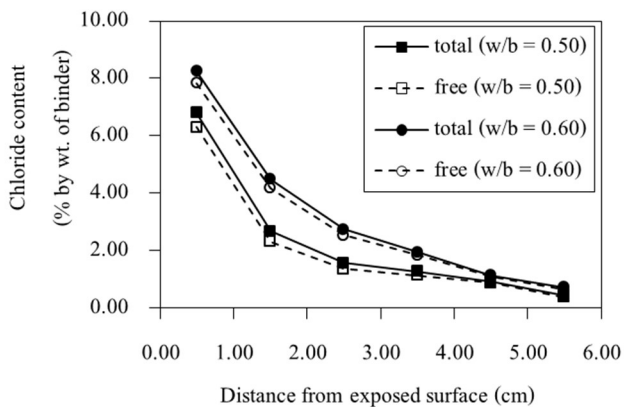
“FA30-CM1” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30

และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01

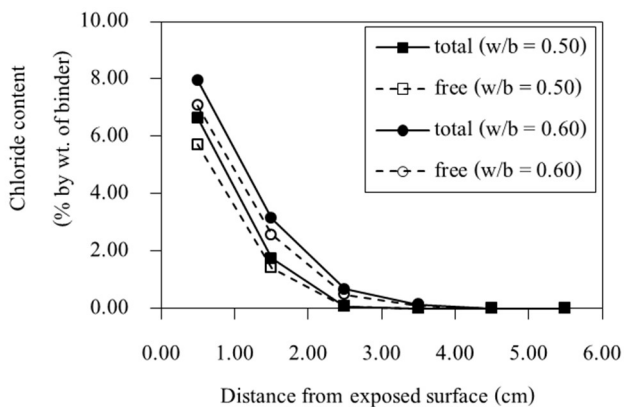
“w/b” หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

“f/b” หมายถึง อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

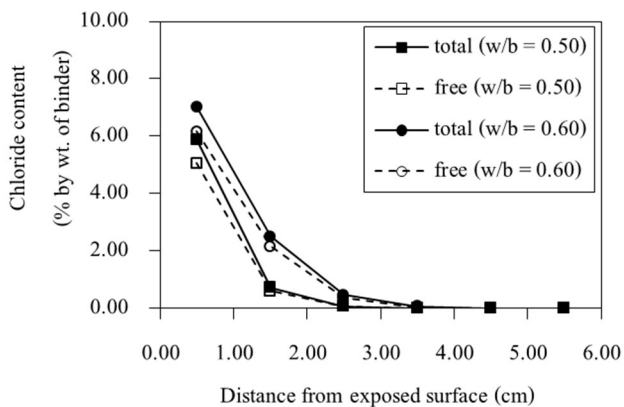
“CM/b” หมายถึง อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน



ก. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

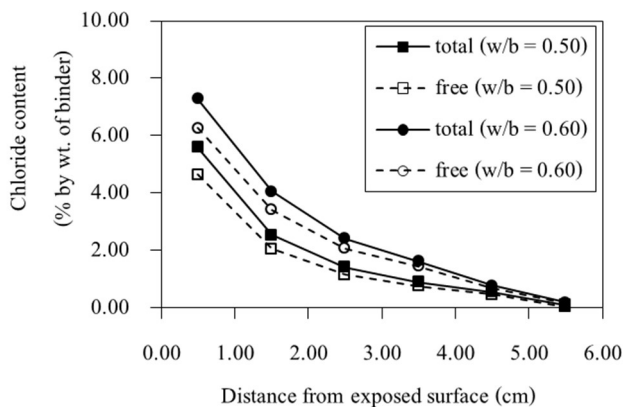


ข. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30

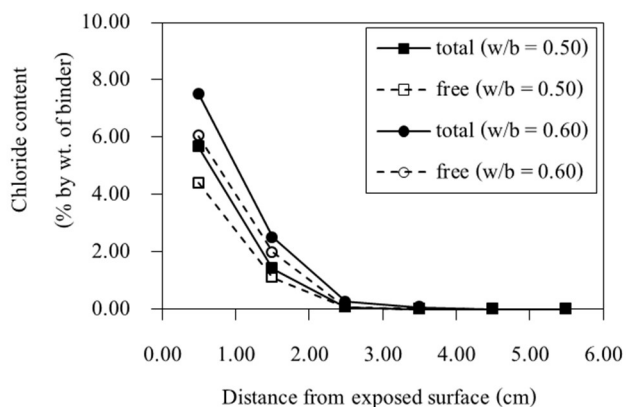


ค. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50

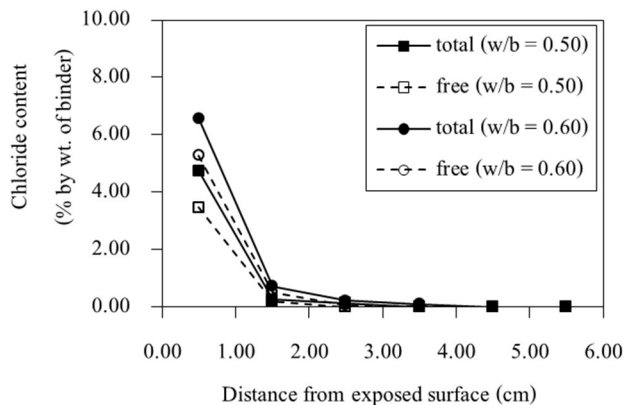
ภาพที่ 3-9 ตัวอย่างการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตล้วนและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน



ก. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



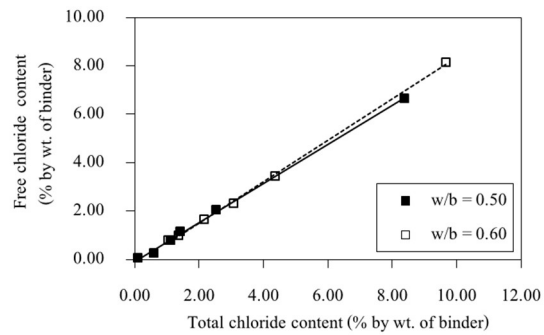
ข. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30



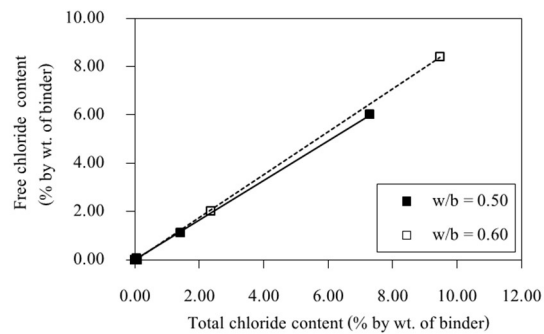
ค. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50

ภาพที่ 3-10 ตัวอย่างการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมวัสดุสร้างผลึกที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน

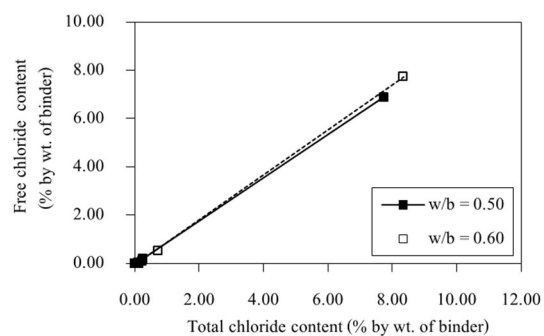
นำผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมดังตัวอย่างในภาพที่ 3-11



ก. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



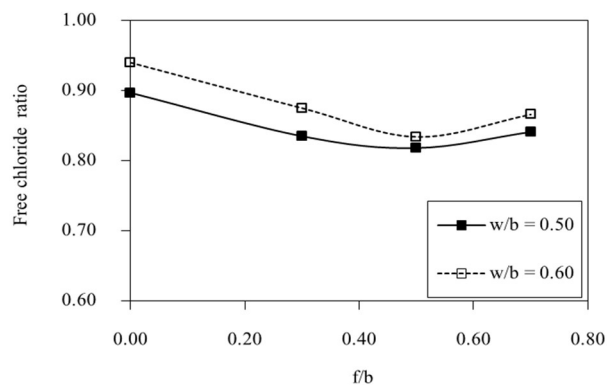
ข. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30



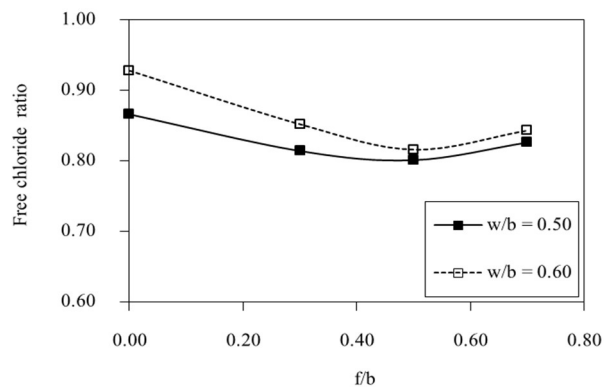
ค. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50

ภาพที่ 3-11 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน

หลังจากที่ได้อัตราส่วนคลอไรด์อิสระของคอนกรีต จึงหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระ และอัตราส่วนเกลือต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ดังภาพที่ 3-12



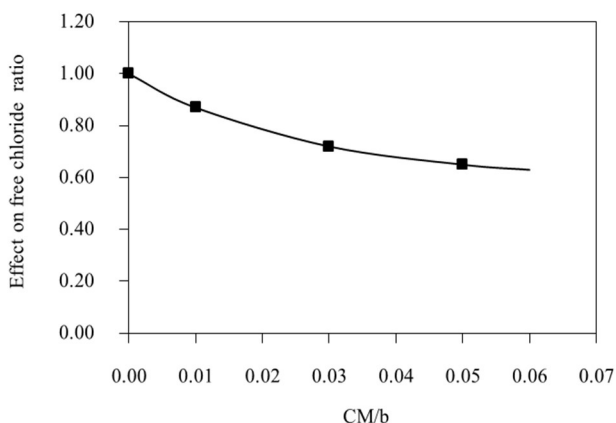
ก. คอนกรีตที่ไม่ผสมวัสดุสร้างผลึก



ข. คอนกรีตที่ผสมวัสดุสร้างผลึก

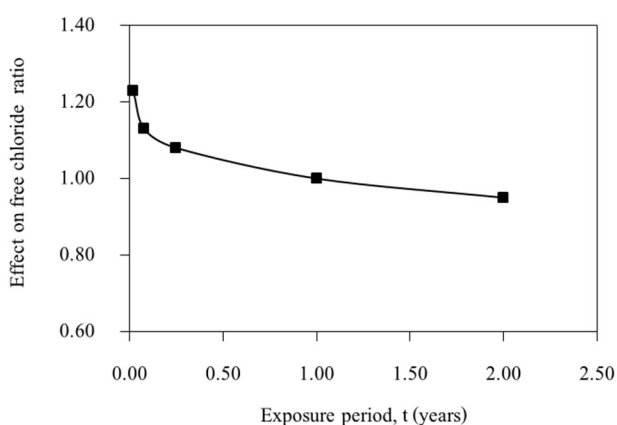
ภาพที่ 3-12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระและอัตราส่วนเกลือต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน

วัสดุสร้างผลึกที่ผสมเข้าไปในคอนกรีตตั้งแต่ต้นจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติในด้านความคงทนต่อการแทรกซึมคลอไรด์ให้กับคอนกรีต เนื่องจากปริมาณวัสดุสร้างผลึกจะทำปฏิกิริยากับความชื้นในคอนกรีตขณะผสมรวมทั้งทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยาของคอนกรีตเองก่อให้เกิดผลึกที่บ่มน้ำในเนื้อของคอนกรีต โดยผลึกจะเข้าไปอุดโพรงเล็ก ๆ จนเต็มทำให้การแทรกซึมคลอไรด์มีค่าลดลง ส่งผลให้อัตราส่วนคลอไรด์อิสระมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วยดังภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระและอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วนคลอไรด์อิสระมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอายุของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีอายุนานขึ้น อัตราส่วนคลอไรด์อิสระของคอนกรีตจะมีแนวโน้มลดลงดังภาพที่ 3-14 เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุปอซโซลานิกเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานขึ้น ซึ่งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกสามารถยึดจับคลอไรด์ด้วยการยึดจับทางกายภาพ (Physical binding) ได้มากขึ้น



ภาพที่ 3-14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลอไรด์อิสระ และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์

จากความสัมพันธ์ที่ได้จากภาพที่ 3-9 ถึงภาพที่ 3-14 สามารถหาอัตราส่วนคลอไรด์อิสระของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสานและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ได้ดังสมการที่ 3-13

$$\alpha_{\text{free}}(t) = \left( \left( -0.22 \times \frac{w}{b} + 0.431 \right) \times \left( \frac{f}{b} \right)^3 - \left( 0.2 \times \frac{w}{b} + 0.138 \right) \times \frac{f}{b} + \left( 0.74 \times \frac{w}{b} + 0.49 \right) \right) \times \frac{1}{t^{0.048}} \times \left( 102 \times \left( \frac{CM}{b} \right)^2 - 12 \times \frac{CM}{b} + 1.0 \right) \quad (3-13)$$

เมื่อ  $\alpha_{\text{free}}(t)$  = อัตราส่วนคลอไรด์อิสระ  
 $w/b$  = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน  
 $f/b$  = อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน  
 $CM/b$  = อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน  
 $t$  = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

## 1.2 อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ

จากสมการที่ 3-2 สมการที่ 3-3 และสมการที่ 3-13 อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกดังสมการที่ 3-14

$$\alpha_{\text{fix}}(t) = 1 - \alpha_{\text{free}}(t) \quad (3-14)$$

เมื่อ  $\alpha_{\text{fix}}(t)$  = อัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ  
 ดังนั้นปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตที่มีวัสดุสร้างผลึกดังสมการที่ 3-15

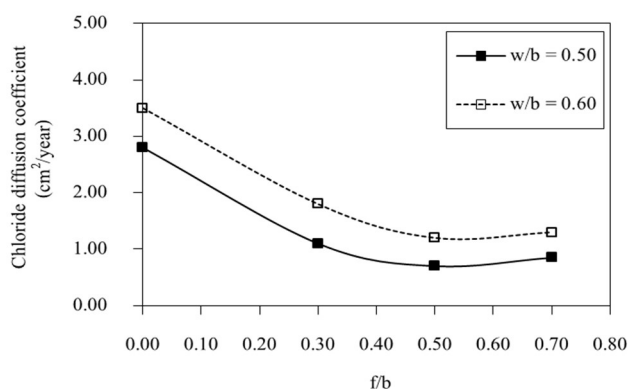
$$C_{\text{fix}}(t) = C_{\text{tot}}(t) \times \alpha_{\text{fix}}(t) \quad (3-15)$$

## 2. แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

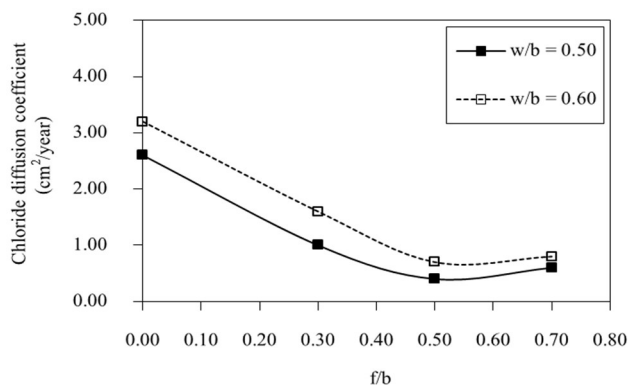
ทำนองเดียวกับแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกั่วแดงกลูกลีกบด สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาบ่มน้ำ และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต

ในการพัฒนาแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่มีวัสดุสร้างผลึก จะหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตจากสมการที่ 3-11 โดยใช้ผลการทดลอง การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีวัสดุสร้างผลึกของ Our, Chour and Prak (2012)

หลังจากที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต จึงหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และอัตราส่วนเนื้อลอมต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานต่าง ๆ ดังภาพที่ 3-15



ก. คอนกรีตที่ไม่ผสมวัสดุสร้างผลึก

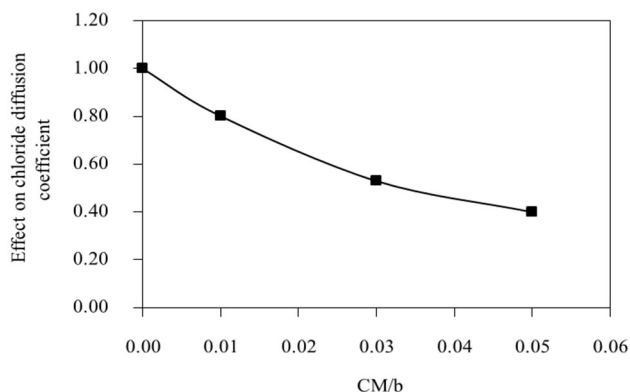


ข. คอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก

ภาพที่ 3-15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และอัตราส่วนเนื้อลอมต่อ วัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ

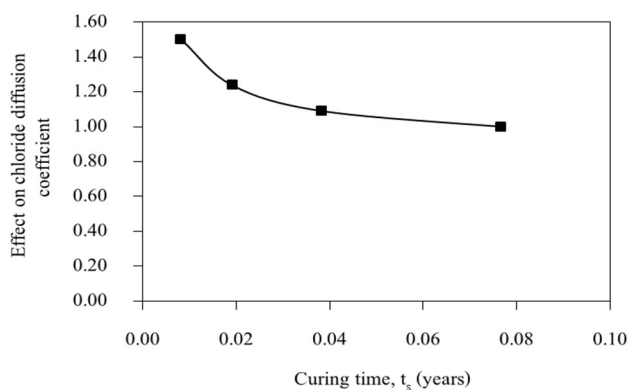
ในทำนองเดียวกัน วัสดุสร้างผลึกที่ผสมเข้าไปในคอนกรีตตั้งแต่ต้นจะสร้างผลึกที่บใน เนื้อของคอนกรีตโดยผลึกจะเข้าไปอุดโพรงเล็ก ๆ ทำให้การแทรกซึมคลอไรด์มีค่าลดลง ส่งผลให้ คอนกรีตจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ลดลงดังภาพที่ 3-16



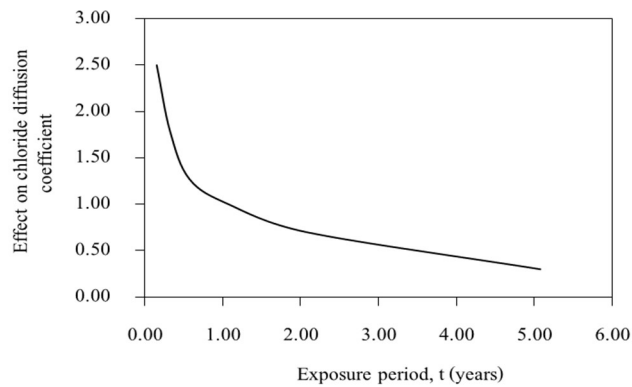


ภาพที่ 3-16 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน

คอนกรีตที่มีระยะเวลาการบ่มน้ำที่แตกต่างกันมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์โดยคอนกรีตที่มีระยะเวลาการบ่มน้ำที่นานขึ้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่มีระยะเวลาการบ่มน้ำที่สั้นกว่า และอายุของคอนกรีตก็มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ เมื่ออายุนานขึ้น คอนกรีตจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อเนื่องเป็นเวลานานกว่า ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลดลง เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ลดลงดังภาพที่ 3-17 และภาพที่ 3-18 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และระยะเวลาบ่มน้ำ



ภาพที่ 3-18 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์

จากภาพที่ 3-15 ถึงภาพที่ 3-18 สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่มีวัสดุสร้างผลึกตั้งสมการที่ 3-16

$$D_{Cl}(x, t) = \left( \left( 13 \times \frac{w}{b} + 0.9 \right) \times \left( \frac{f}{b} \right)^2 - \left( 10.58 \times \frac{w}{b} + 2.6 \right) \times \frac{f}{b} + \left( \frac{1.524}{\left( \frac{w}{b} \right)^{0.222}} \right) \left( 4.683 \times \frac{w}{b} - 0.759 \right) \right) \times \frac{0.706}{t_s^{0.15} \times t^{0.465}} \times \left( 188 \times \left( \frac{CM}{b} \right)^2 - 21.4 \times \frac{CM}{b} + 1.0 \right) \quad (3-16)$$

เมื่อ  $D_{Cl}(x, t)$  = สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต (ตารางเซนติเมตรต่อปี)

$f/b$  = อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

$w/b$  = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

$CM/b$  = อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน

$t$  = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

$t_s$  = ระยะเวลาบ่มน้ำของคอนกรีต (ปี)

### 3. แบบจำลองการคั้งคูดอออน

ในการทำงานเดียวกันกับแบบจำลองการคั้งคูดอออนของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด การคั้งคูดอออนคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเ้าลยต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาบ่มน้ำ และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีต

ในแบบจำลองการดึงดูคอออนของคอนกรีตที่มีวัสดุสร้างผลึกก็ได้สมมติให้การดึงดูคอออนคลอไรด์ของคอนกรีตเกิดขึ้นที่ระยะ 1.0 cm เท่านั้น โดยการเคลื่อนที่ของคลอไรด์แสดงด้วยการเปลี่ยนฟลักซ์คลอไรด์เนื่องจากกลไกการดึงดูคอออน และถูกรวมกับการเปลี่ยนฟลักซ์คลอไรด์ที่เกิดจากกระบวนการแพร่ ซึ่งจากการคำนวณกลับของผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกของ Our, Chour, and Prak (2012) ฟลักซ์การดึงดูคอออนคลอไรด์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-17

$$F_{ad}(1, t) = \left(1.5 \times \frac{w}{b} - 0.407\right) \times 10^{-5} \times e^{-2.2 \times \left(\frac{f}{b}\right)} \times \frac{0.799}{t_s^{0.1} \times t^{0.44}} \times \left(175 \times \left(\frac{CM}{b}\right)^2 - 24 \times \frac{CM}{b} + 1.0\right) \quad (3-17)$$

เมื่อ  $F_{ad}(1, t)$  = ฟลักซ์ของการดึงดูคอออนคลอไรด์ที่ชั้นที่ 1 จากผิวของคอนกรีต  
ที่เวลา  $t$  ใด ๆ (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวัน)

$f/b$  = อัตราส่วนเกลือต่อวัสดุประสาน

$w/b$  = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

$CM/b$  = อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน

$t$  = ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

$t_s$  = ระยะเวลาบ่มน้ำของคอนกรีต (ปี)

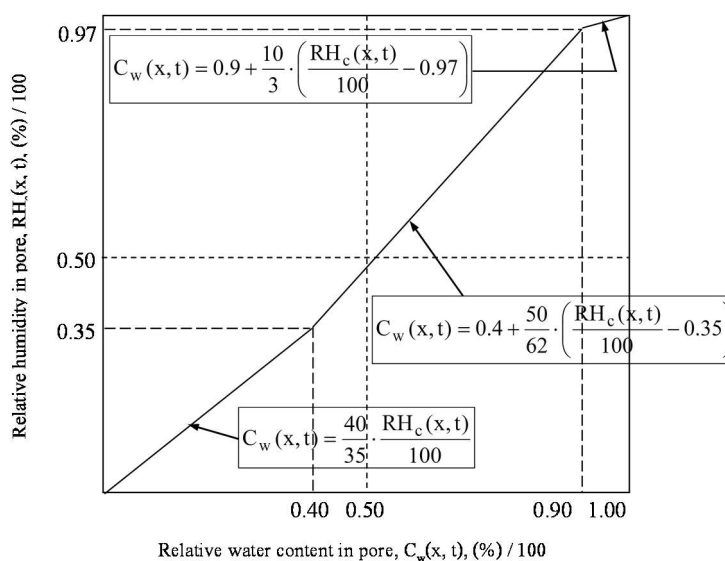
สำหรับวัสดุสร้างผลึกที่ใช้เพื่อคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก เป็นวัสดุสร้างผลึกชนิด XYPEX ADMIX C-1000NF เท่านั้น

การคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก

เพื่อคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ถูกรวมกับแบบจำลองหลัก อาทิเช่น แบบจำลองการระเหยของน้ำ (Khunthongkeaw & Tangtermsirikul, 2002) แบบจำลองปริมาณน้ำอิสระ (Tangtermsirikul & Saengsoy, 2002) ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณน้ำ (Maruya, Tangtermsirikul & Matsuoka, 1994) แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูดไอออนคลอไรด์

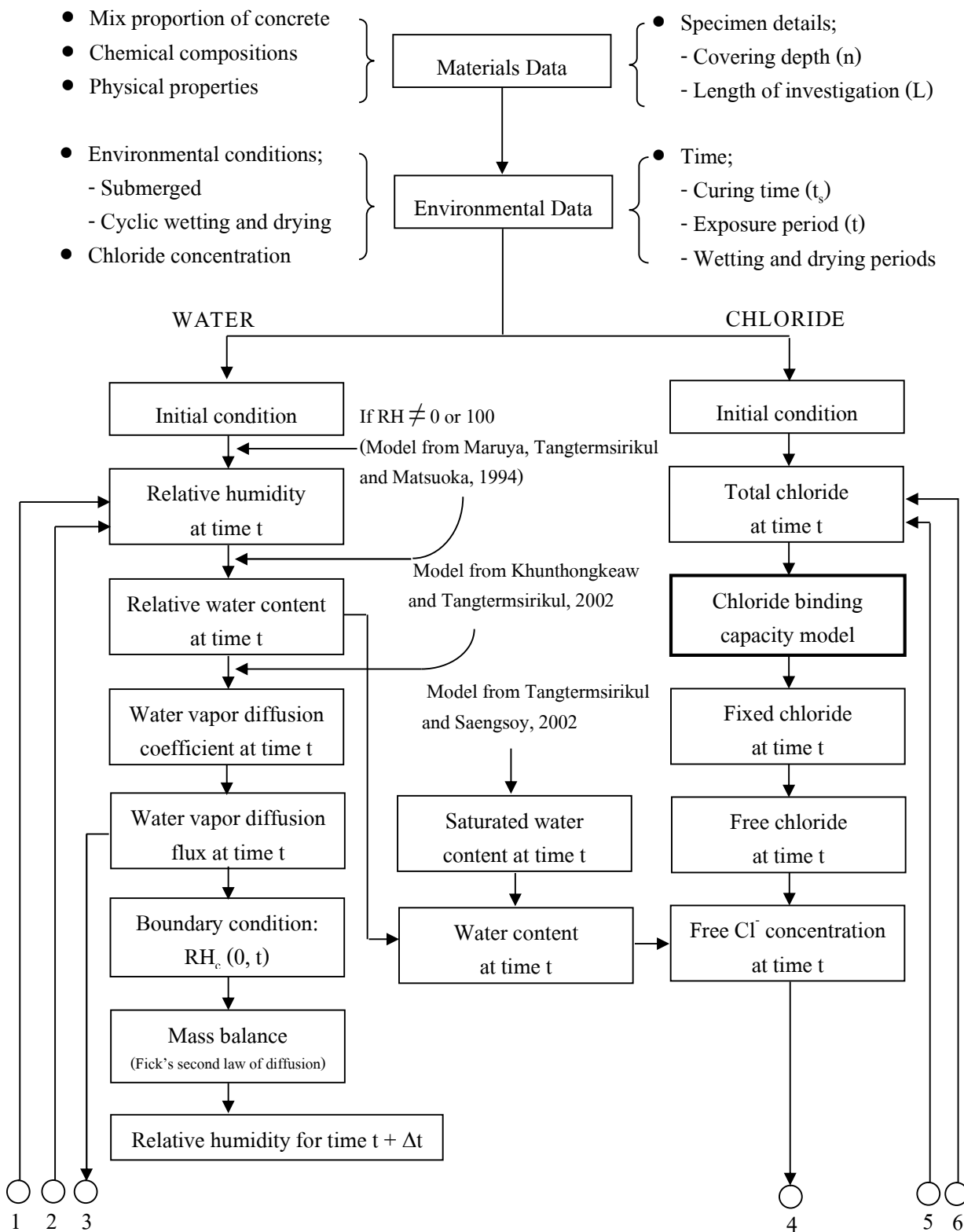
Tangtermsirikul and Saengsoy (2002) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อหาปริมาณน้ำอิสระในเพสต์ และได้พิจารณาผลกระทบของเถ้าลอยต่อปริมาณน้ำอิสระในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยด้วย

Maruya, Tangtermsirikul, and Matsuoka, (1994) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและความชื้นสัมพัทธ์ในโพรงดังภาพที่ 3-19

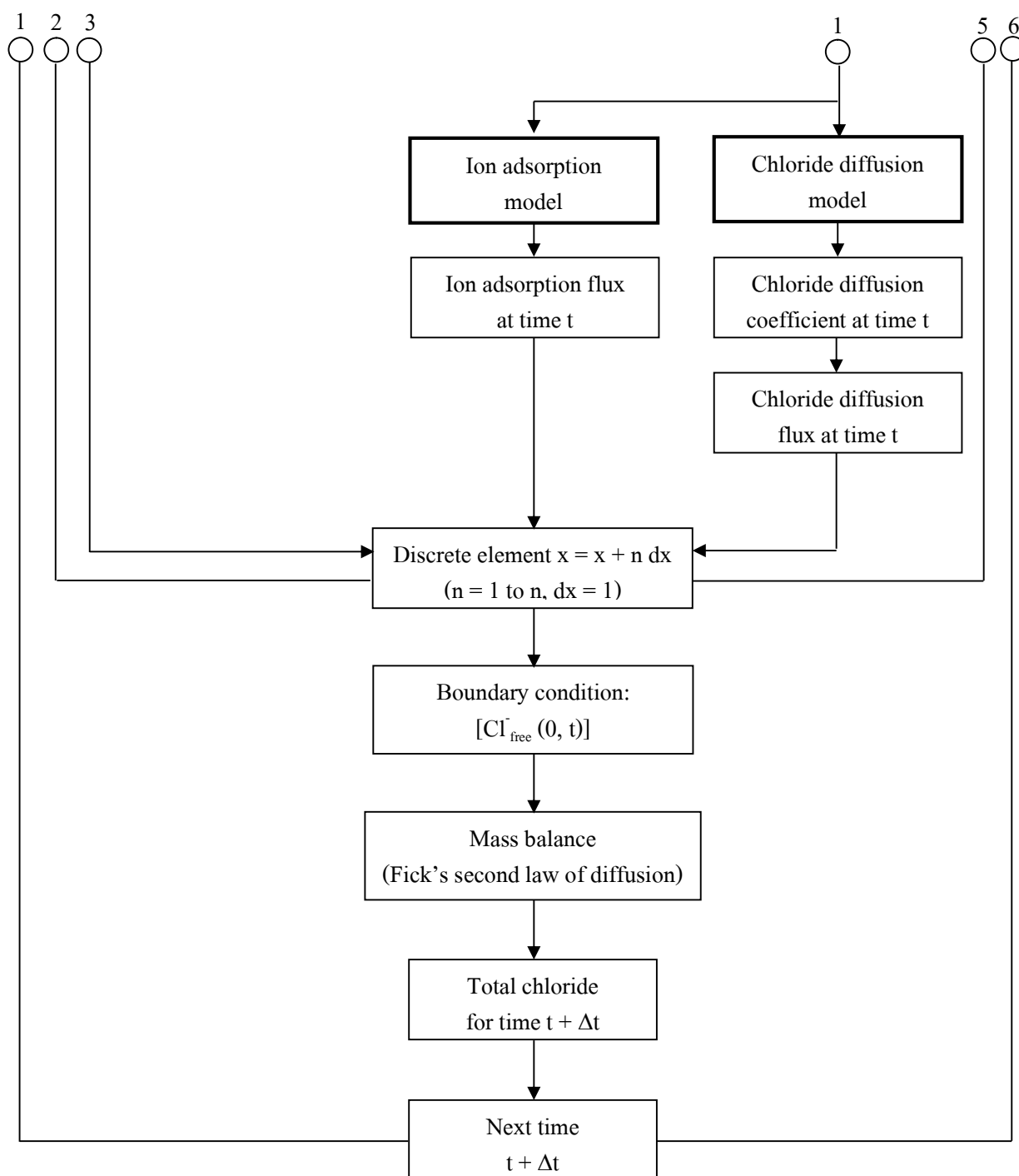


ภาพที่ 3-19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและความชื้นสัมพัทธ์ในโพรงของคอนกรีต

แผนผังการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกดังภาพที่ 3-20 ซึ่งในแต่ละแบบจำลองประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ ได้แก่ การคำนวณปริมาณน้ำ และการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ โดยปริมาณน้ำที่ได้จากการคำนวณปริมาณน้ำถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นคลอไรด์ของคอนกรีต



ภาพที่ 3-20 แผนผังการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต



ภาพที่ 3-20 (ต่อ)

## บทที่ 4

### การตรวจสอบแบบจำลองกับผลการทดลอง

แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

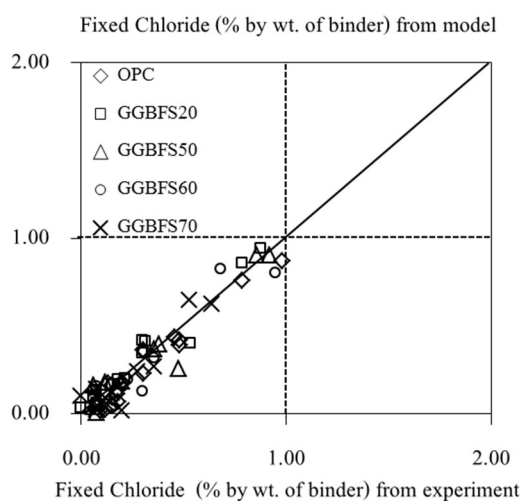
#### 1. การตรวจสอบแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์

แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่สร้างขึ้นจะถูกตรวจสอบกับผลการทดลองของ Prak and Sumranwanich (2013); Prak (2014) โดยส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดดังตารางที่ 4-1

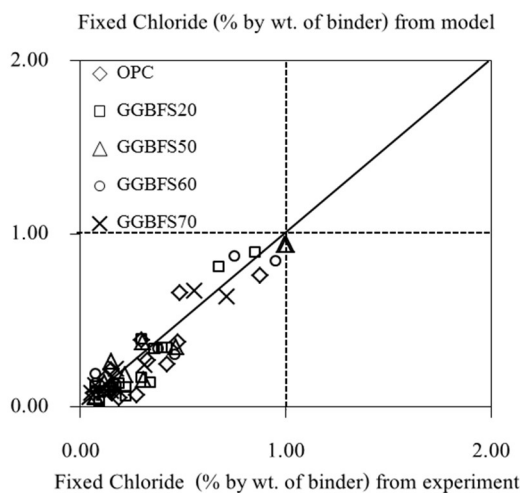
ตารางที่ 4-1 ส่วนผสมของคอนกรีต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

ประเภทตัวอย่าง	คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด	
w/b	0.40, 0.50	
s/b	0.20, 0.50, 0.60, 0.70	
ปริมาณวัสดุประสาน ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	320, 400	
ความเข้มข้นของคลอไรด์	3.0% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน	
ระยะเวลาบ่มน้ำ (วัน)	28	
ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)	28, 91, 365	
องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด
SiO <sub>2</sub> (%)	19.51	34.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.97	16.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.78	1.70
CaO (%)	65.38	36.05
SO <sub>3</sub> (%)	2.16	2.16
LOI (%)	2.27	1.09

ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดจะตรวจสอบกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน และระยะเวลาการเผชิญกับคลอไรด์ที่นานขึ้น ซึ่งจากการตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองนี้สามารถใช้เพื่อคำนวณหาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดได้ดังภาพที่ 4-1



ก. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ข. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

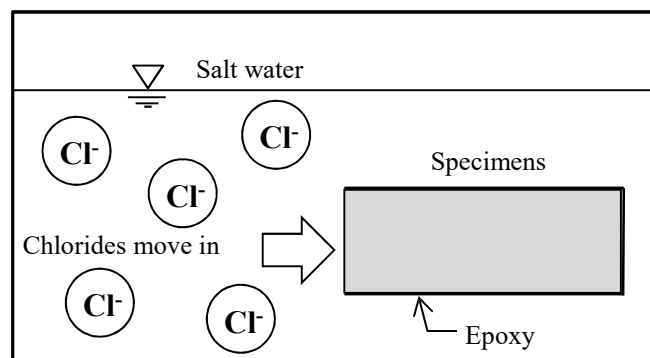
ภาพที่ 4-1 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน



## 2. การตรวจสอบแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และการดึงดูคอออน

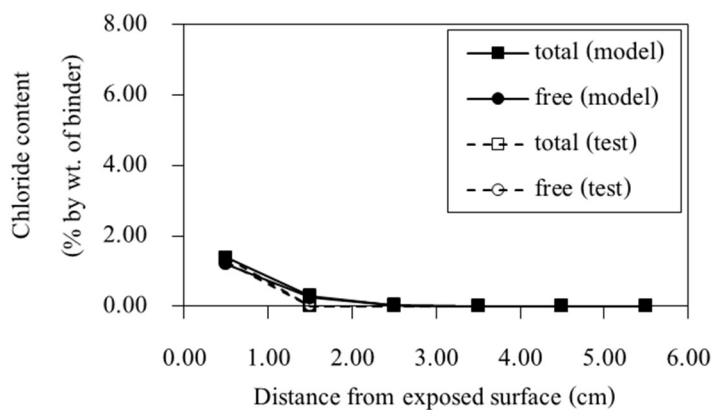
### 2.1 เงื่อนไขการเผชิญกับคลอไรด์แบบแอสารละลายคลอไรด์

จากแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูคอออนคลอไรด์สามารถใช้แบบจำลองทั้งสามเพื่อคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดได้ โดยเทียบกับผลการทดลองของ Prak and Sumranwanich (2013); Prak (2014) ซึ่งตัวอย่างคอนกรีตถูกหล่อขึ้นและบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นจึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาเคลือบผิวด้วยอีพ็อกซีที่ขึงไว้ด้านบนบนด้านเดียวแล้วนำไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ร้อยละ 3.0 เป็นเวลา 28 วัน 91 วัน และ 365 วัน ดังภาพที่ 4-2 เพื่อให้คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีต ซึ่งการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตเกิดขึ้นจากกระบวนการแพร่และการดึงดูคอออนคลอไรด์ สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ดังตารางที่ 4-1

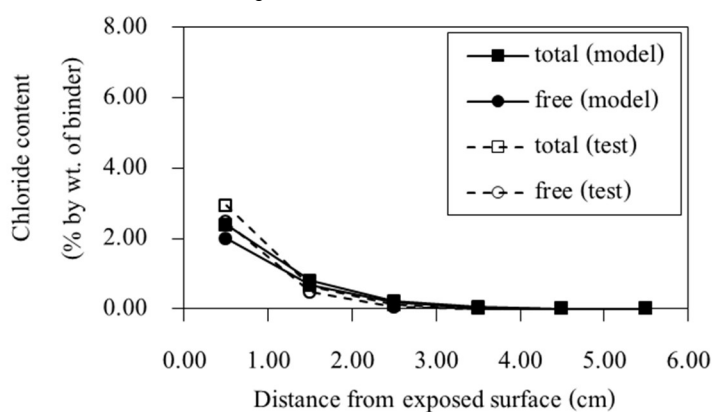


ภาพที่ 4-2 การทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

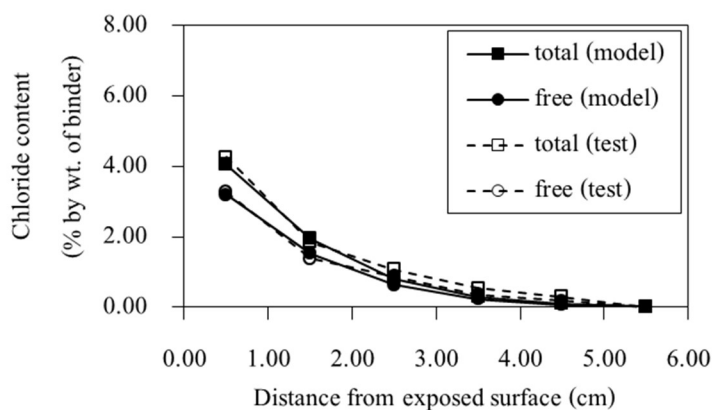
จากการตรวจสอบผลการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองดังภาพที่ 4-3 ถึงภาพที่ 4-22 พบว่า แบบจำลองสามารถคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดได้ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่าง ๆ ซึ่งผลการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทดลอง



ก. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลาด 28 วัน

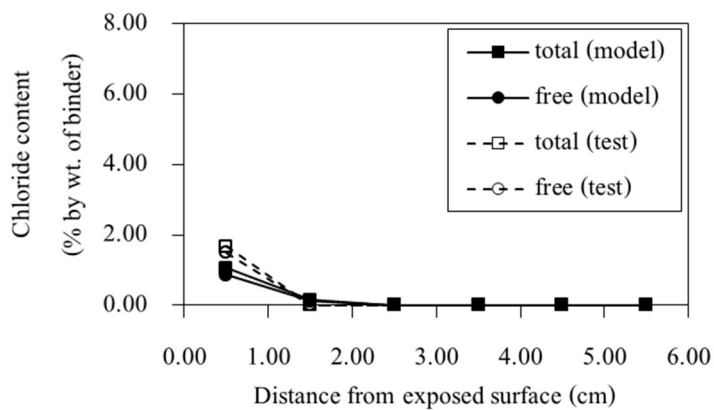


ข. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลาด 91 วัน

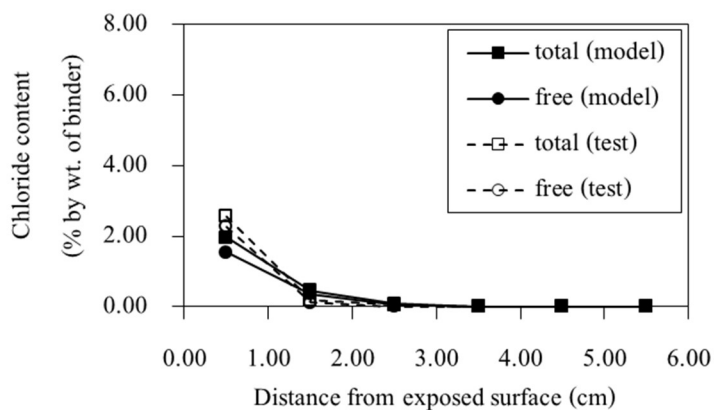


ค. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลาด 365 วัน

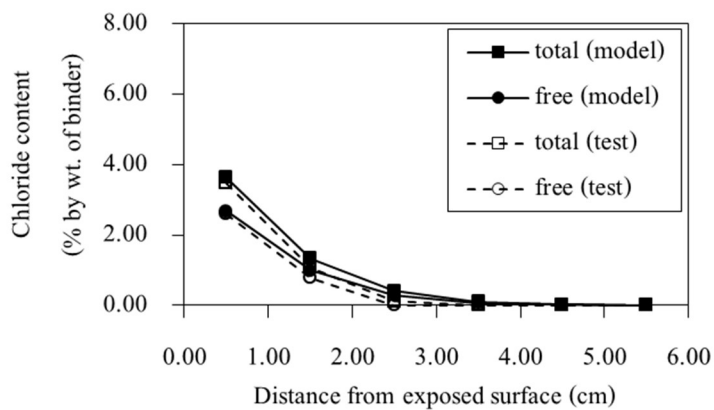
ภาพที่ 4-3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $400 \text{ kg/m}^3$  และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ก. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

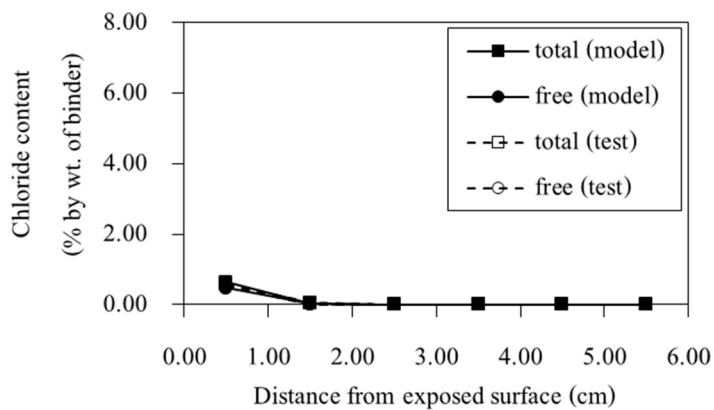


ข. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

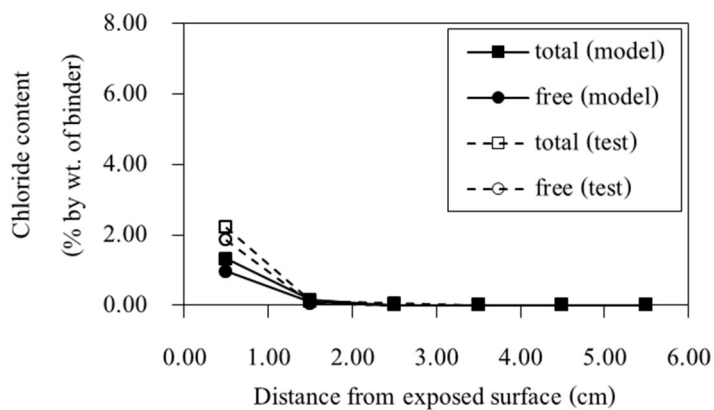


ค. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

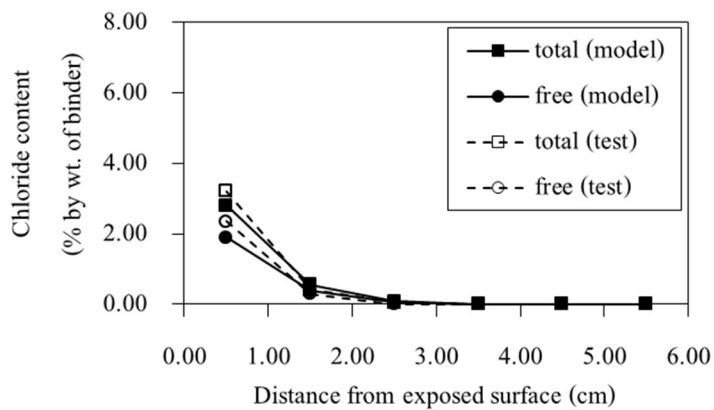
ภาพที่ 4-4 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $400 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.20



ก. เชนิยุคคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

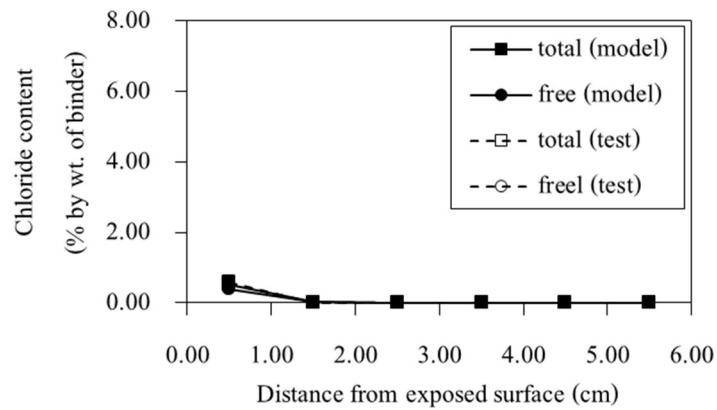


ข. เชนิยุคคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

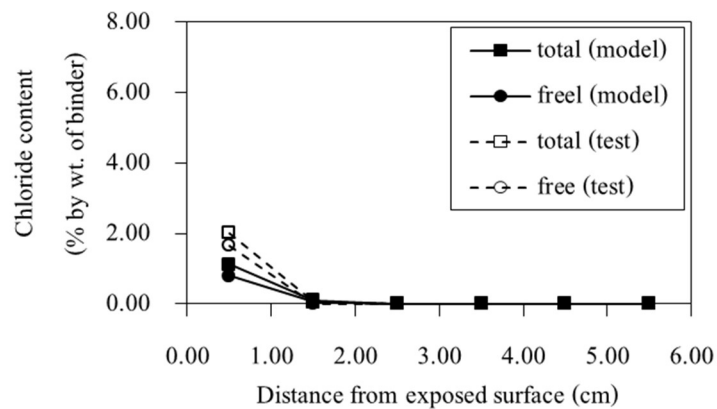


ค. เชนิยุคคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

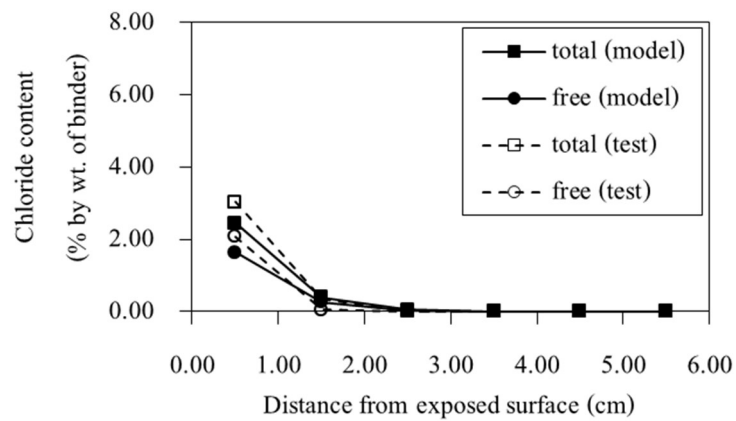
ภาพที่ 4-5 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $400 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาหลงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.50



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

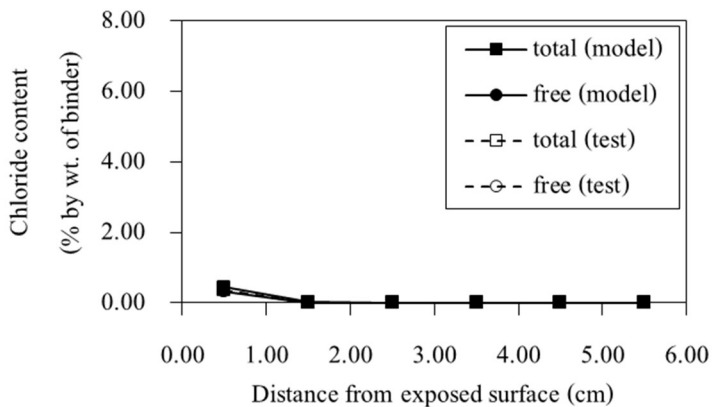


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

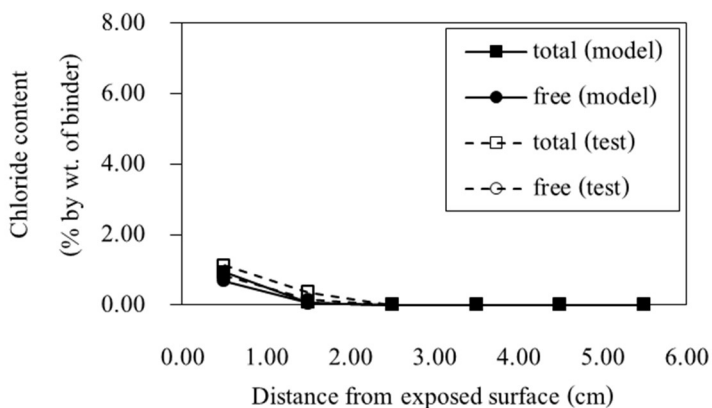


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

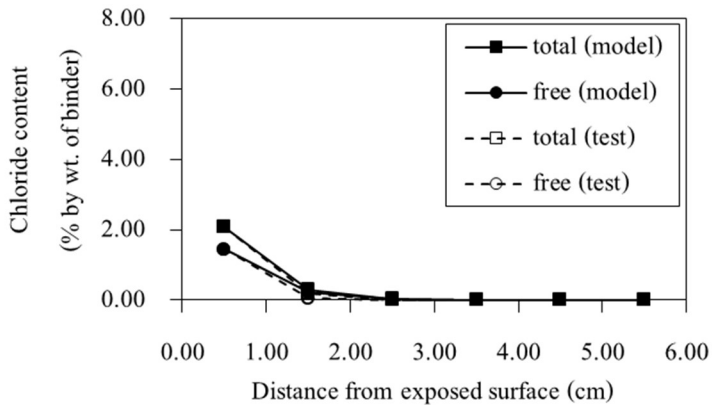
ภาพที่ 4-6 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $400 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.60



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

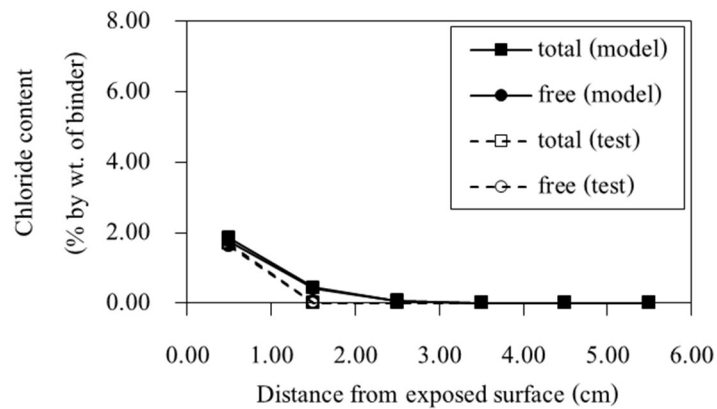


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

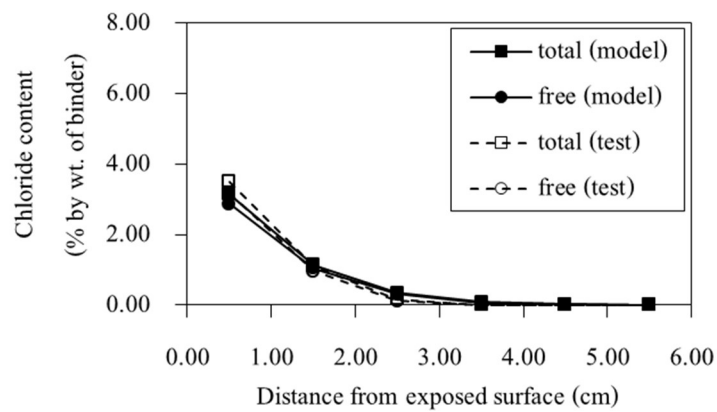


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

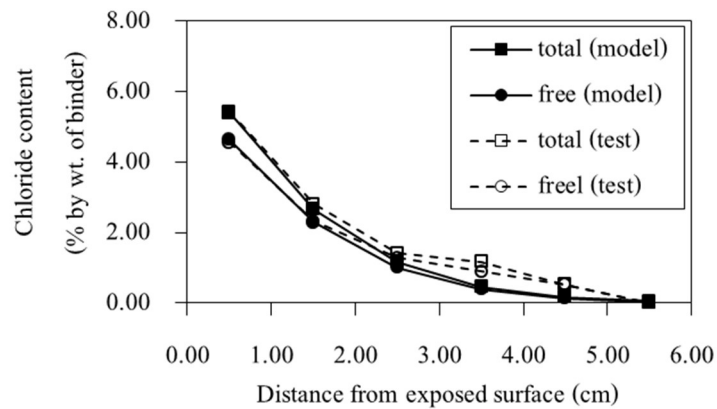
ภาพที่ 4-7 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m<sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.70



ก. เชนญคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

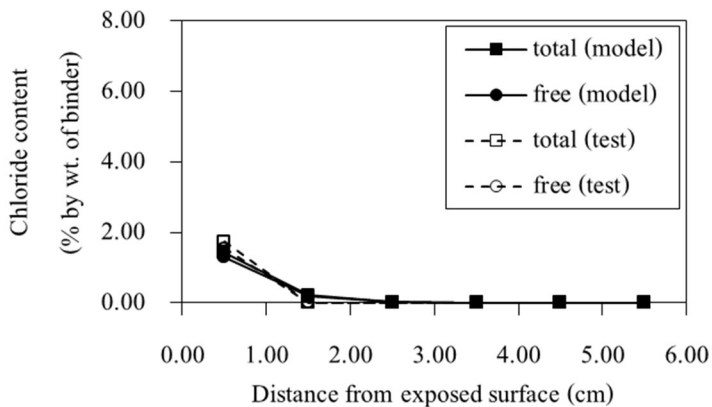


ข. เชนญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

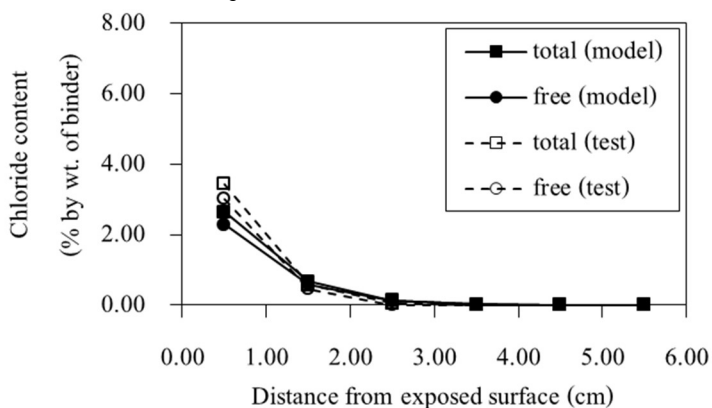


ค. เชนญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

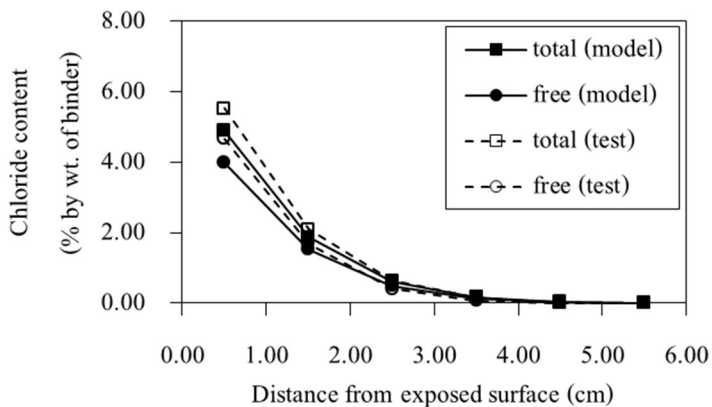
ภาพที่ 4-8 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $400 \text{ kg/m}^3$  และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน



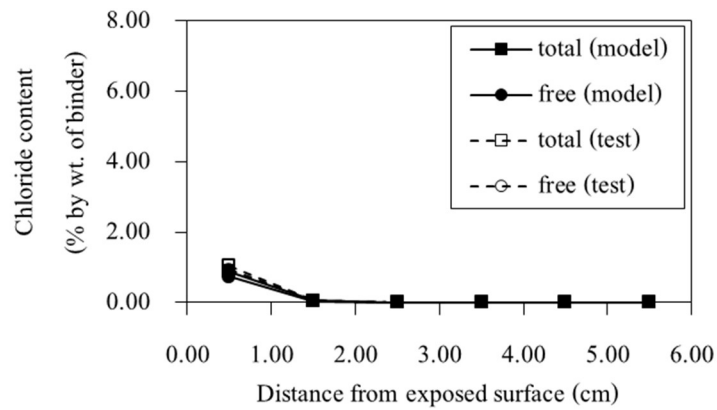
ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน



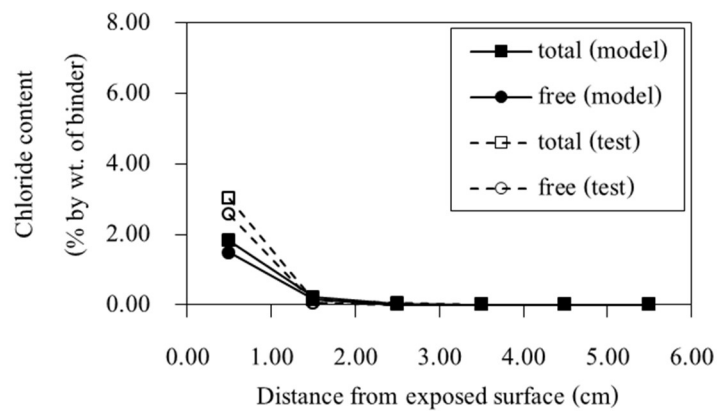
ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

ภาพที่ 4-9 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 kg/ m<sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.20

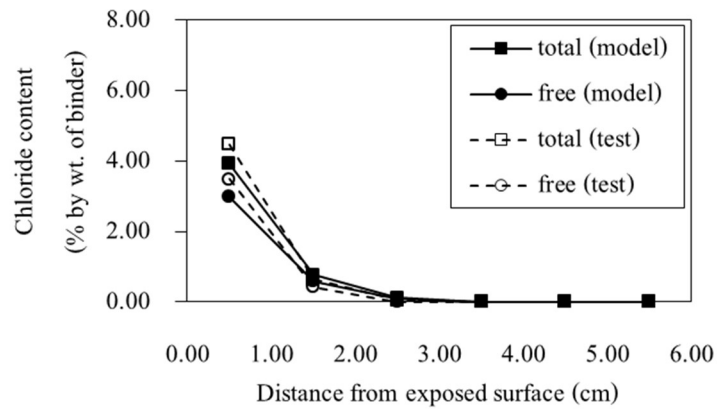




ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

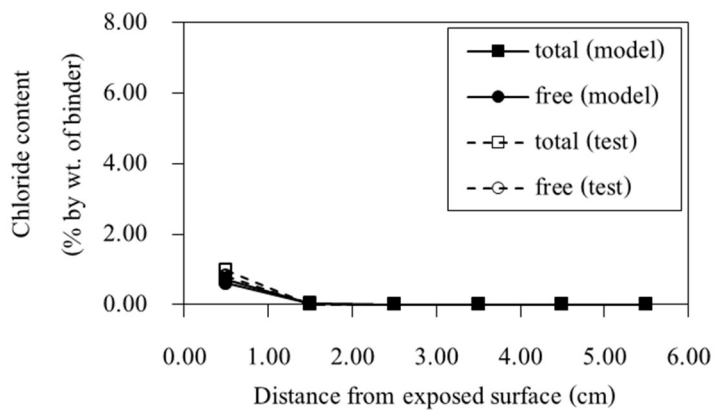


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

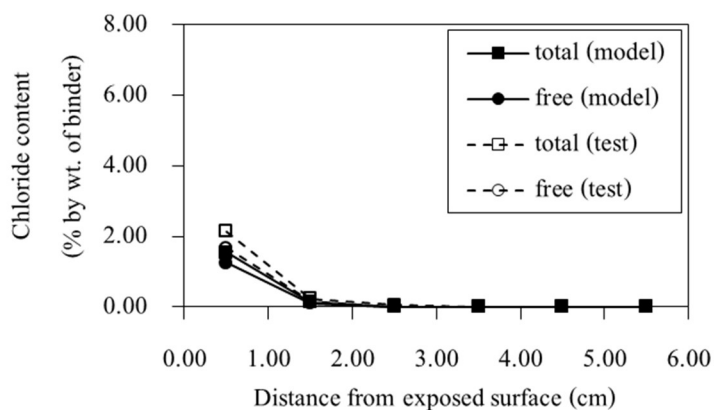


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

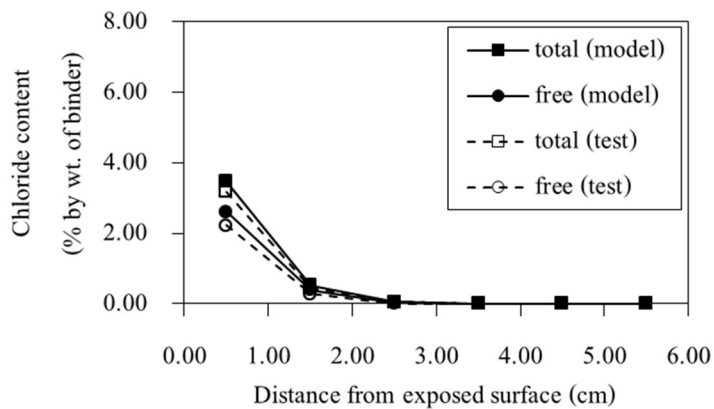
ภาพที่ 4-10 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $400 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.50



ก. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

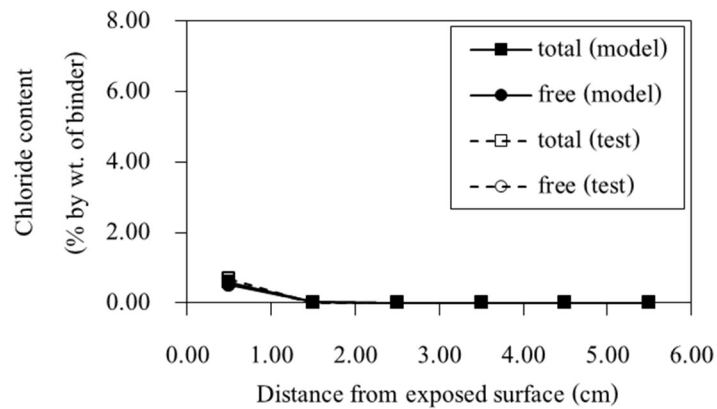


ข. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

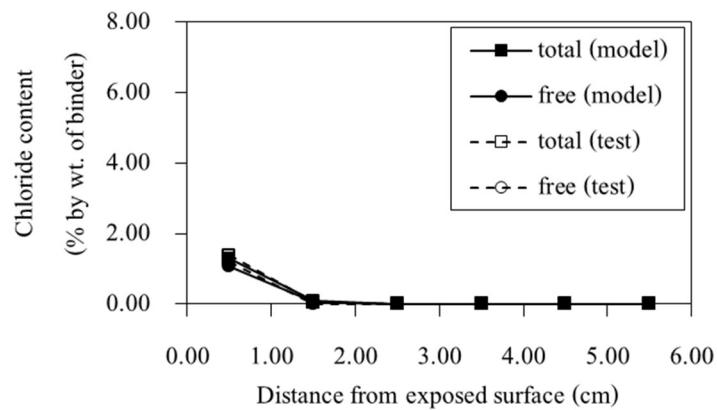


ค. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

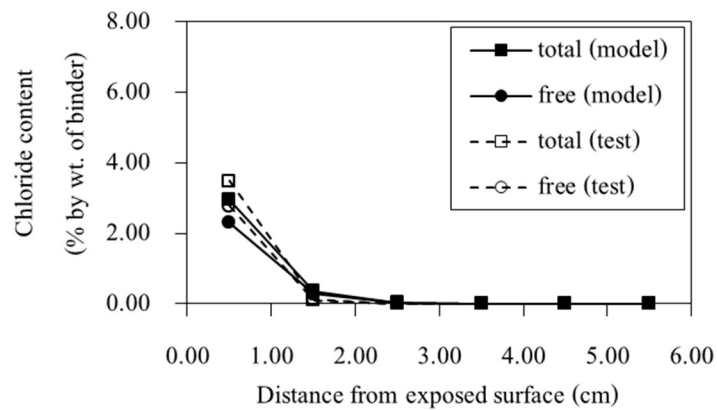
ภาพที่ 4-11 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $400 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาสูงเหล็กกับคต่อวัสดุประสาน 0.60



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

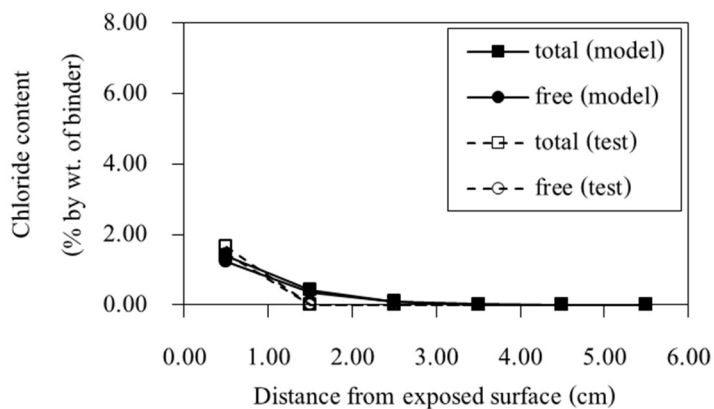


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

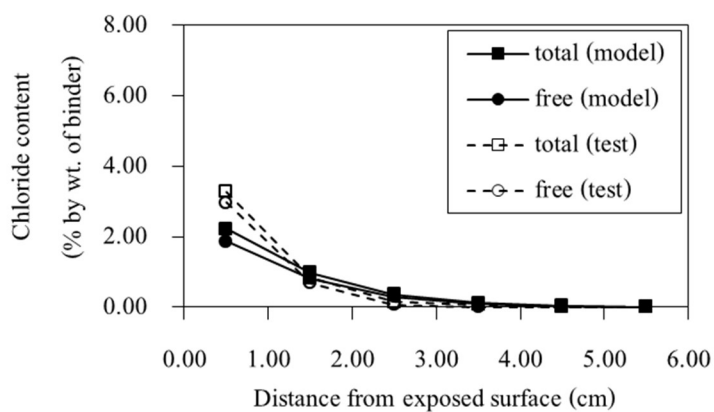


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

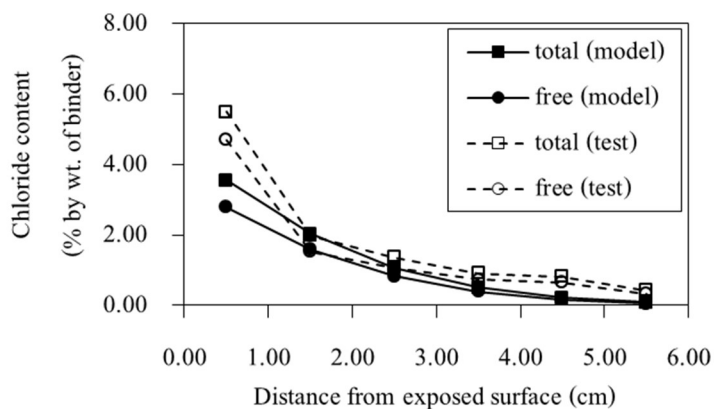
ภาพที่ 4-12 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $400 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกันเตาสูงเหลือกับคต่อวัสดุประสาน 0.70



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

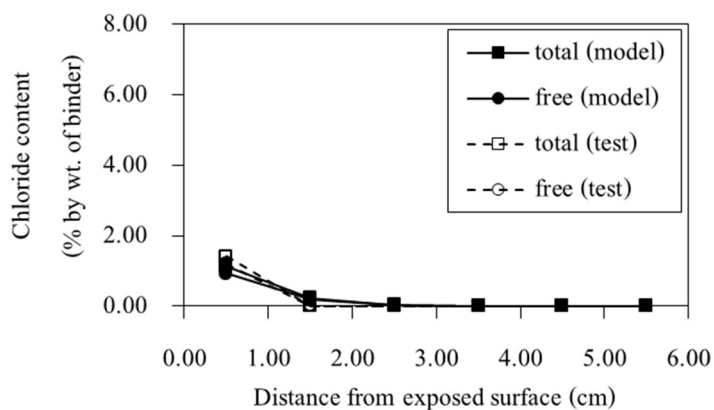


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

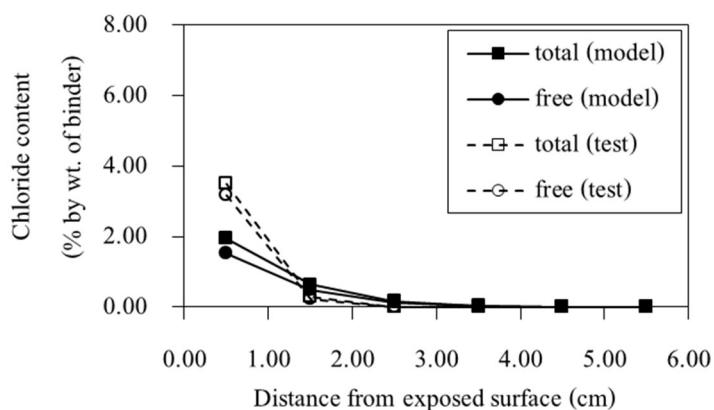


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

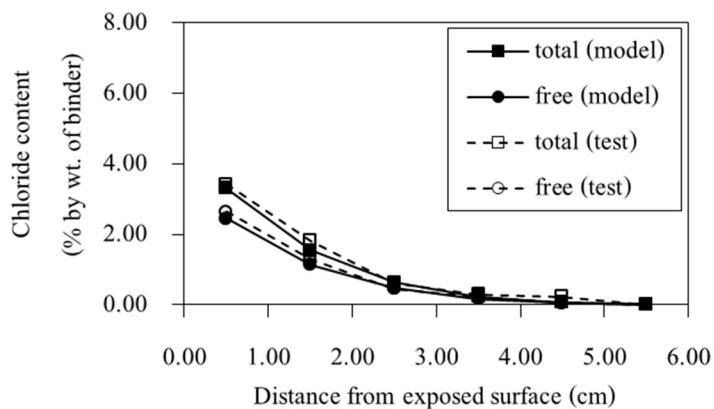
ภาพที่ 4-13 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $320 \text{ kg/m}^3$  และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

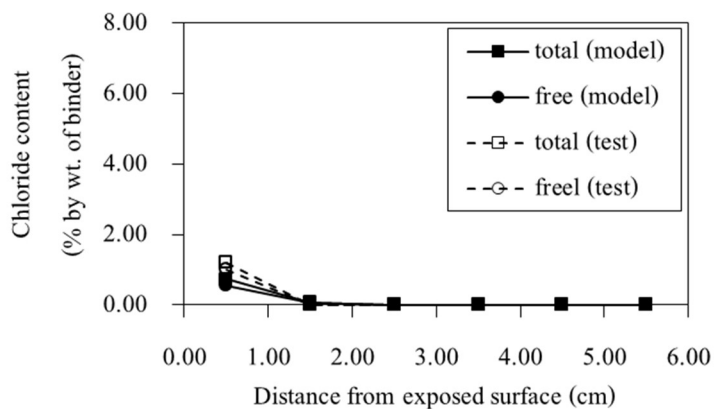


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

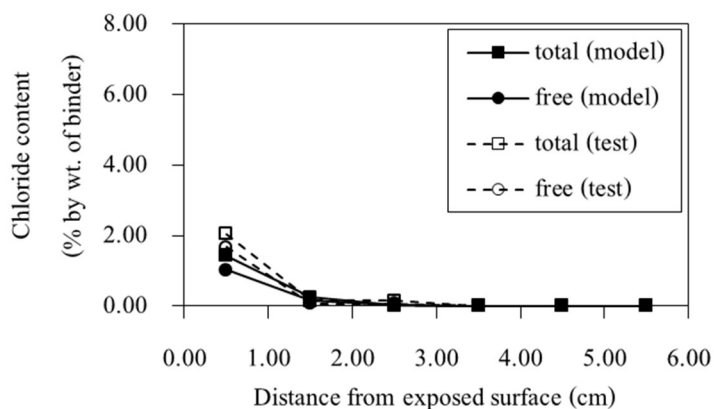


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

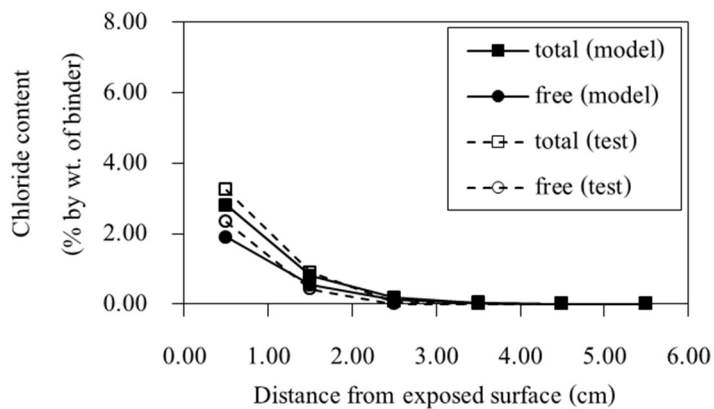
ภาพที่ 4-14 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $320 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กกับคต่อวัสดุประสาน 0.20



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

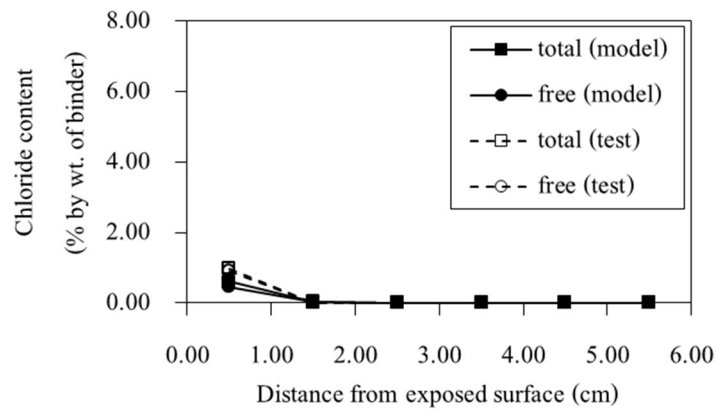


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

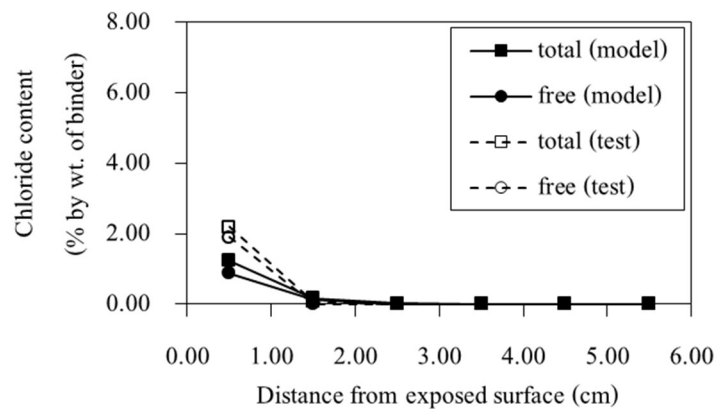


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

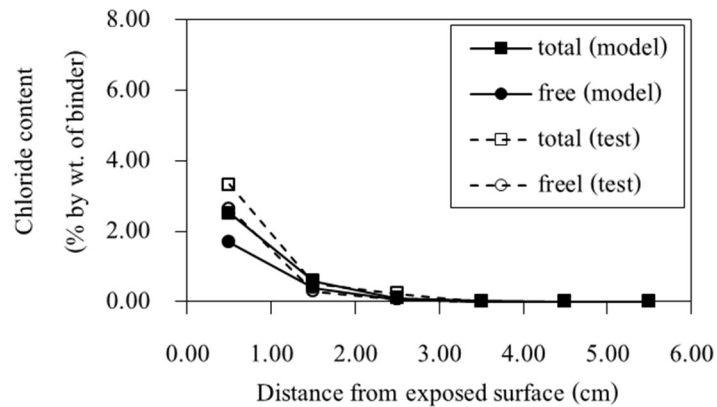
ภาพที่ 4-15 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $320 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกั่วกรันเตากลึงเหลือกับคต่อวัสดุประสาน 0.50



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

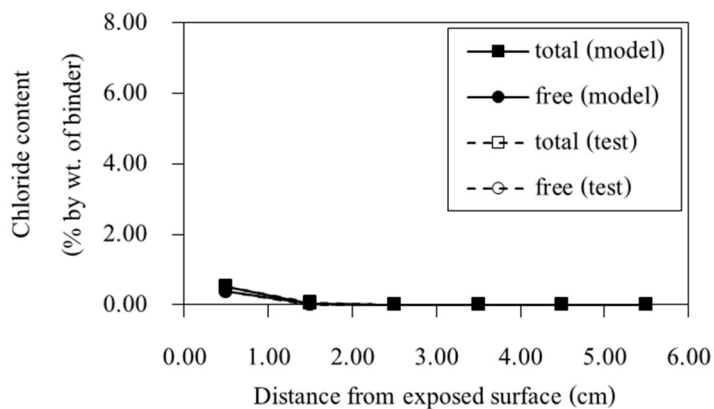


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

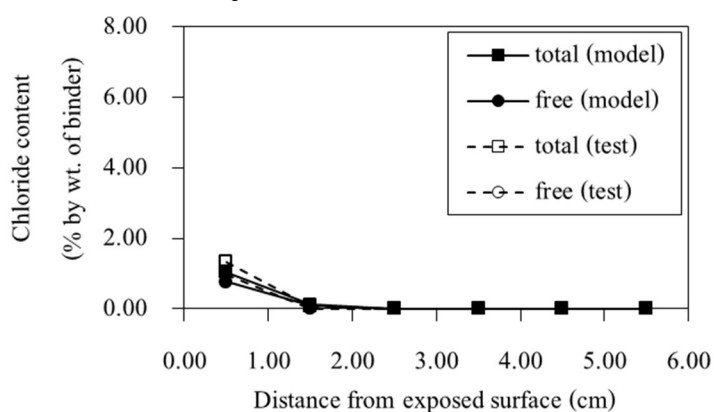


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

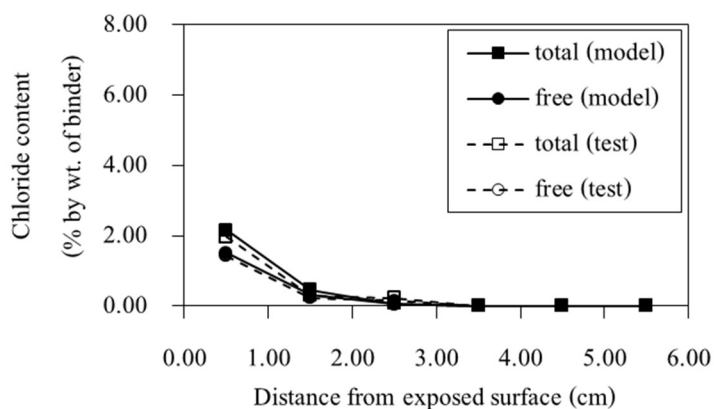
ภาพที่ 4-16 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $320 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กกับดต่อวัสดุประสาน 0.60



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน



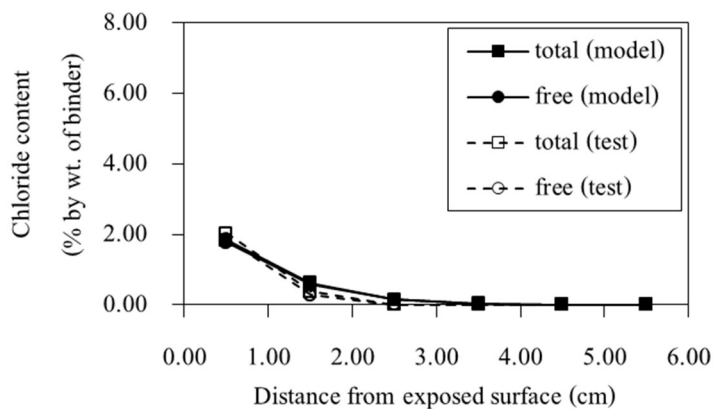
ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน



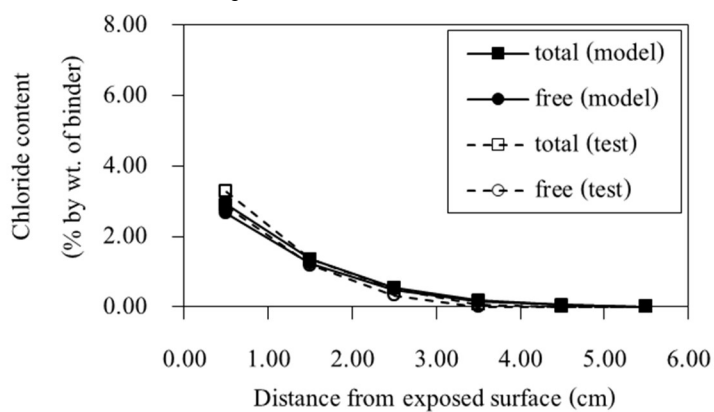
ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

ภาพที่ 4-17 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $320 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กกับคต่อวัสดุประสาน 0.70

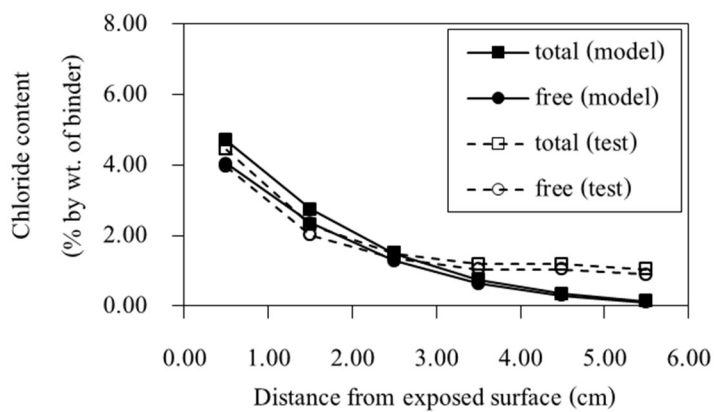




ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

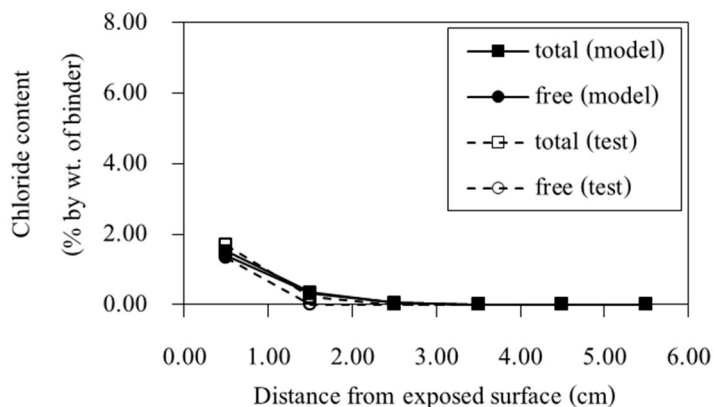


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

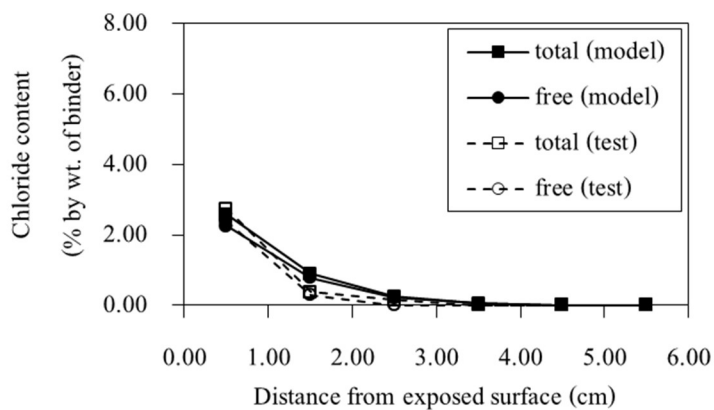


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

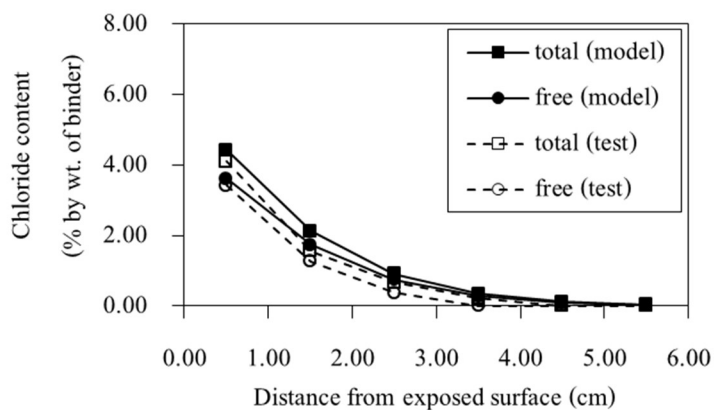
ภาพที่ 4-18 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $320 \text{ kg/m}^3$  และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



ก. เผิคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

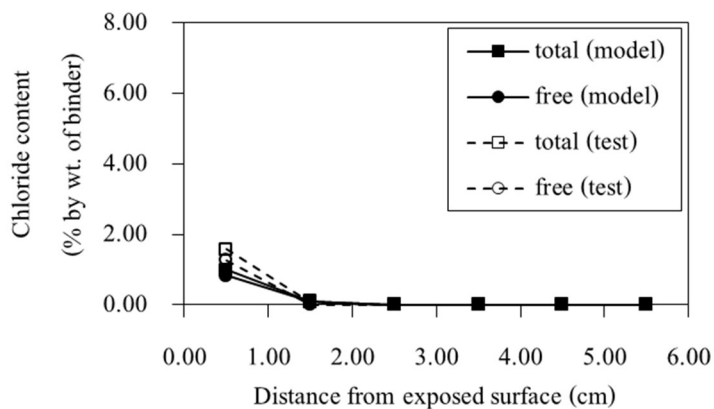


ข. เผิคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

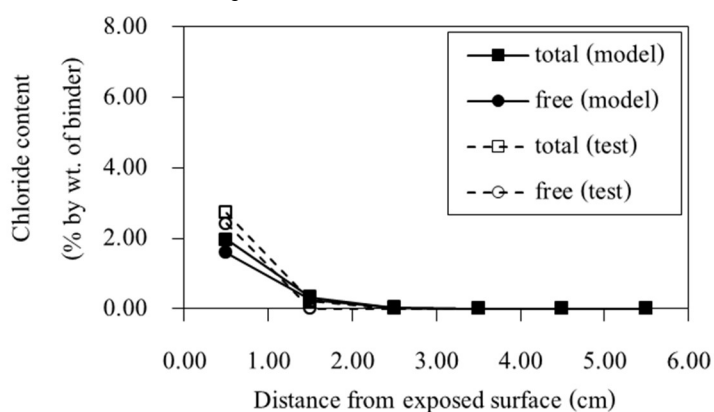


ค. เผิคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

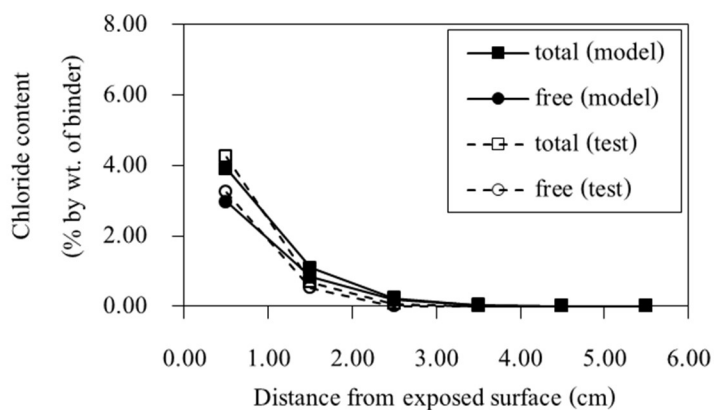
ภาพที่ 4-19 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m<sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกั่วกันเตาสูงเหล็กกับคต่อวัสดุประสาน 0.20



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

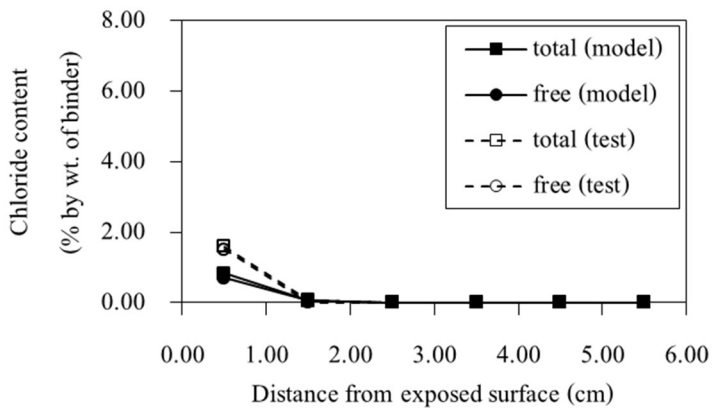


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

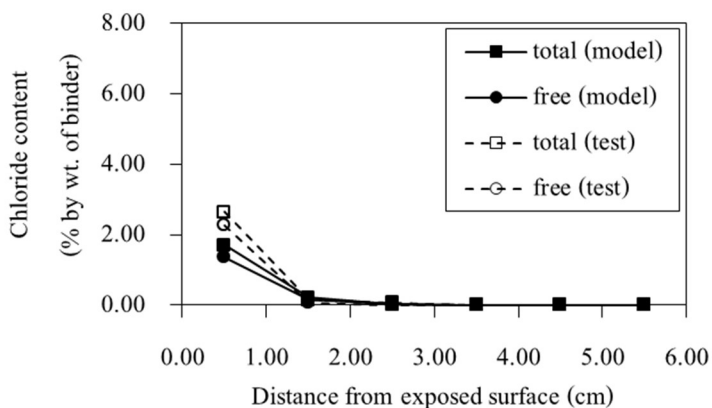


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

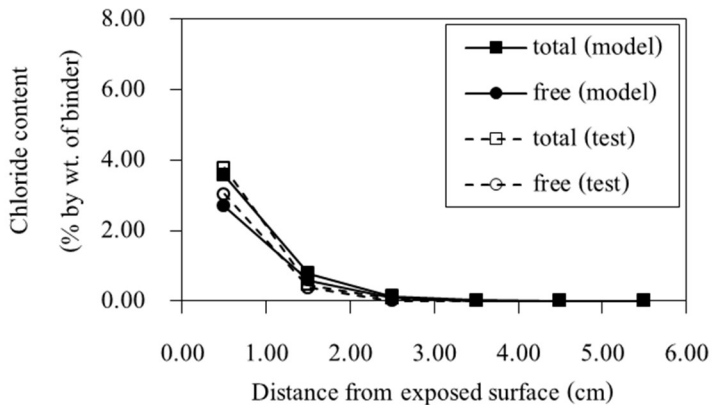
ภาพที่ 4-20 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m<sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.50



ก. เผลซญคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน

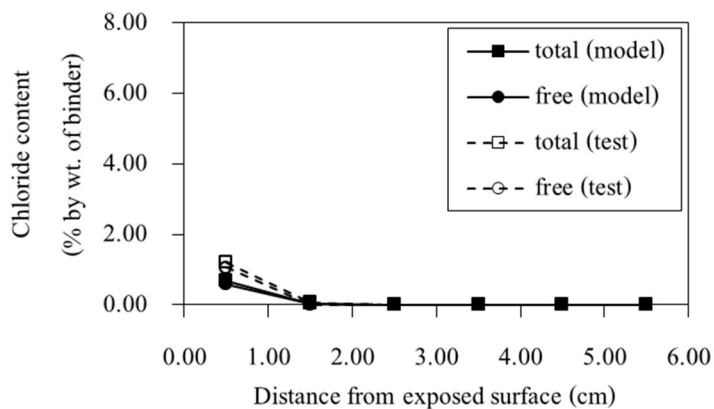


ข. เผลซญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

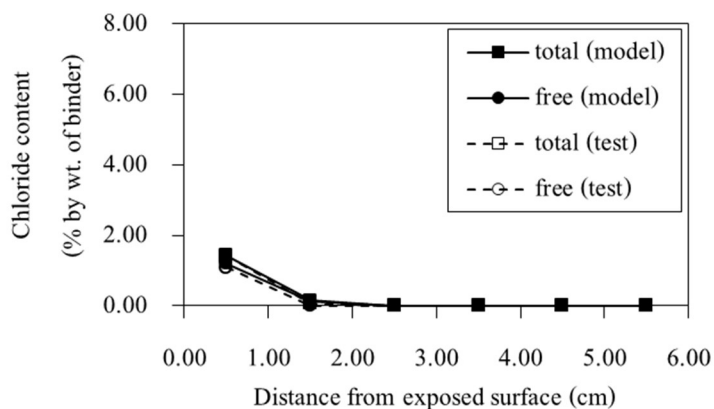


ค. เผลซญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

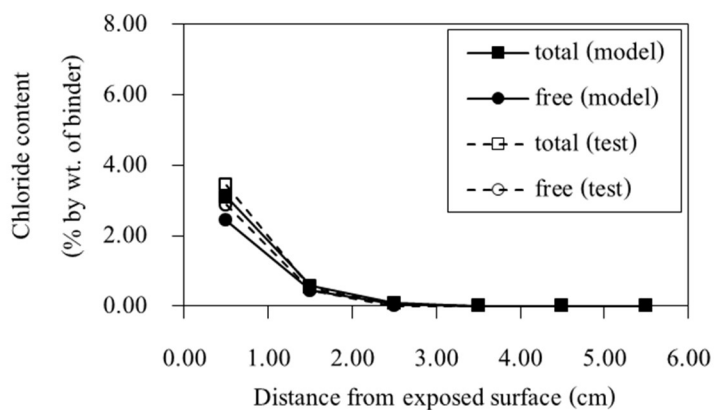
ภาพที่ 4-21 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 320 kg/ m<sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกรันเตาสูงเหล็กกับคต่อวัสดุประสาน 0.60



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 28 วัน



ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

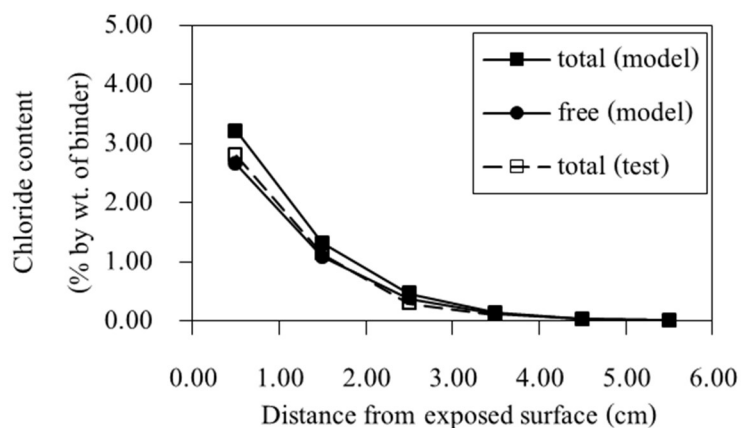


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

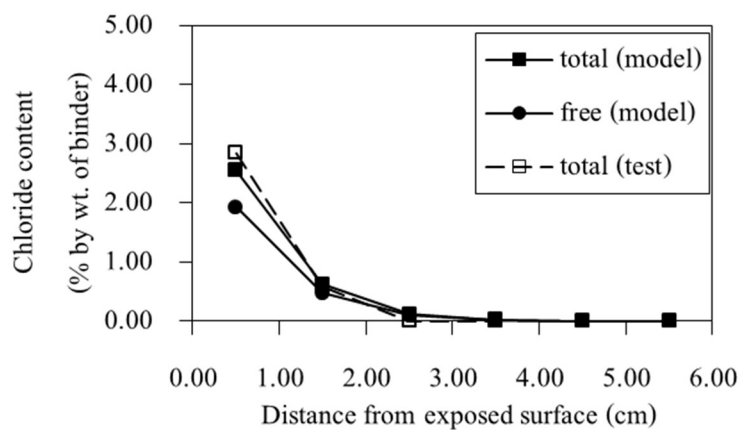
ภาพที่ 4-22 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $320 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกั่วกรันเตาลงเหลือกับคต่อวัสดุประสาน 0.70

Song and Kwon (2009) ได้ทำการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด โดยให้ตัวอย่างคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.42 และอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.30 และ 0.50 และบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นทำการเคลือบผิวตัวอย่างทุกหน้าด้วยเรซินยกเว้นหน้าตัดด้านเดียว แล้วนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ร้อยละ 3.5 เป็นเวลา 6 เดือน โดยแสดงเฉพาะค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเนื่องจากไม่มีข้อมูลผลการทดลองของปริมาณคลอไรด์อิสระ

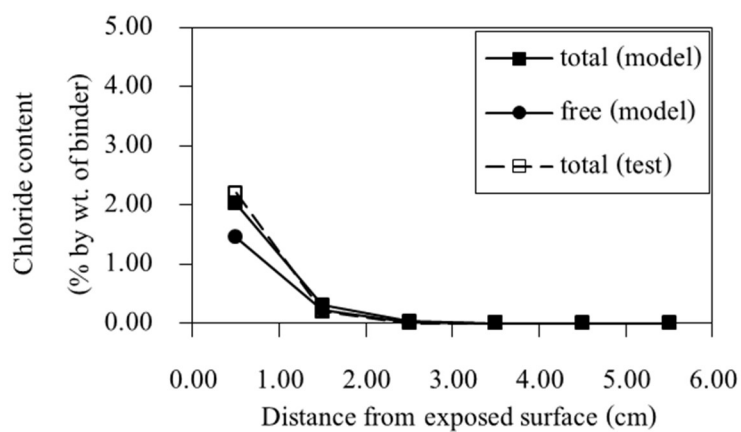
ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่คำนวณได้จากแบบจำลองโดยเทียบกับผลการทดลองดังภาพที่ 4-23 พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง



ก. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



ข. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.30



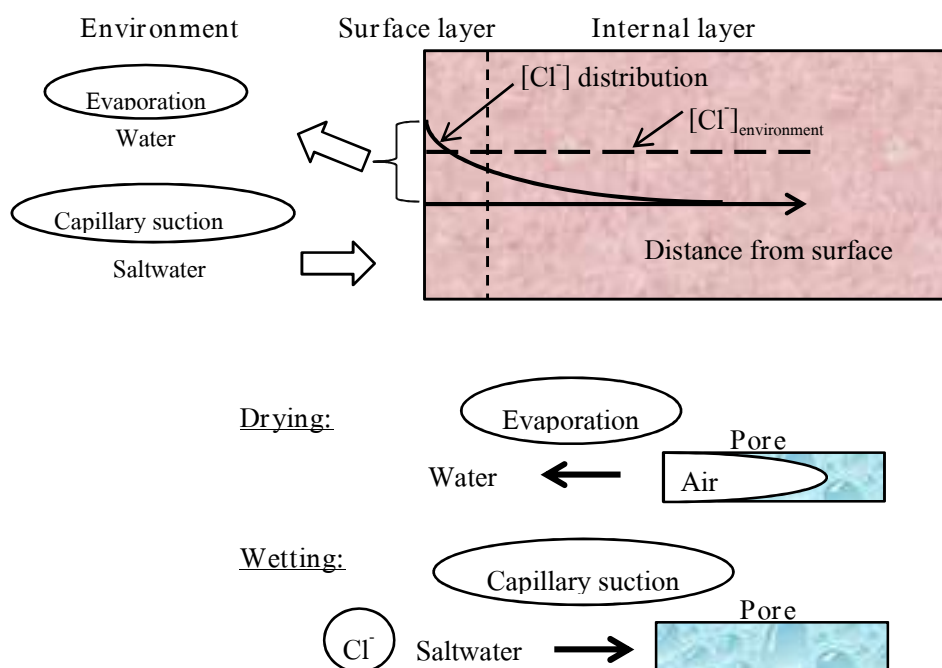
ค. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.50

ภาพที่ 4-23 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.42 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 6 เดือน (Song & Kwon, 2009)

## 2.2 เงื่อนไขการเผชิญกับคลอไรด์โดยปรากฏการณ์เปียกสลับแห้ง

ในสภาพแวดล้อมทะเลจริงจะมีปรากฏการณ์เปียกสลับแห้ง (Cyclic wetting and drying) เกิดขึ้นต่อโครงสร้างคอนกรีต ณ บริเวณที่เกิดน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) และบริเวณที่สัมผัสกับละอองคลื่น (Splash zone) นอกจากนี้ยังอาจเกิดขึ้นได้ที่บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งแต่ได้รับการสัมผัสกับไอทะเล ซึ่งกลไกนี้จะทำให้เกิดความเสียหายรุนแรงที่สุดต่อโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล

จากภาพที่ 4-24 ในสภาวะเปียก น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยกลไกการดูดซับหรือการดึงดูดคาพิลลารี (Capillary suction) จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อิ่มตัว เมื่อสภาวะภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตระเหย (Evaporation) ออกไป ทิ้งคราบเกลือไว้ในโพรงช่องว่างของคอนกรีต เมื่ออยู่ในสภาวะเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่บริเวณผิวสูงขึ้น ดังนั้นไอออนคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้ง จะทำให้คลอไรด์ที่บริเวณผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นคลอไรด์ภายนอก



ภาพที่ 4-24 ปรากฏการณ์เปียกสลับแห้ง (Cyclic wetting and drying)



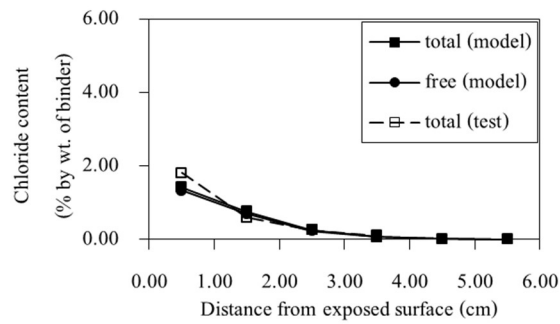
McPolin, Basheer, Long, Grattan, and Sun (2005) ได้ทำการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดภายใต้เงื่อนไขเปียกสลับแห้ง โดยแต่ละรอบมี 7 วัน คือ เปียก 1 วัน และแห้ง 6 วัน หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 3 วัน และนำมาบ่มด้วยการหุ้มแผ่นพลาสติกไว้จนตัวอย่างคอนกรีตครบอายุ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาเผชิญกับสารละลายเกลือคลอไรด์โดยวัฏจักรที่ต่างกันโดยผลการศึกษาที่แสดงเฉพาะค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ส่วนผสมของคอนกรีต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (McPolin et al., 2005)

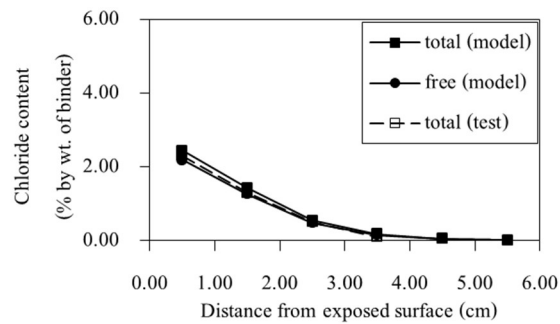
ประเภทตัวอย่าง	คอนกรีตล้วน	คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด
w/b	0.50	0.50
s/b	0.00	0.50
ส่วนผสมคอนกรีต (kg/ m <sup>3</sup> )		
ปูนซีเมนต์	369	181
ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด	0	181
น้ำ	185	181
ทราย	922	905
หิน	923	905
ความเข้มข้นของคลอไรด์	1.95% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน	
ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	28	
วัฏจักรเปียกสลับแห้ง (วัน)	84, 168, 252, 336	
องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด
SiO <sub>2</sub> (%)	21.0	35.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6.0	13.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.0	1.0
CaO (%)	64.0	41.0
SO <sub>3</sub> (%)	3.0	0.1

สมการของแบบจำลองของความสามารถเก็บกักคลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ การดึงดูดอออนคลอไรด์ และแบบจำลองของวัฏจักรเปือกสลับแห้งถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตภายใต้สภาวะเปือกสลับแห้ง ความสามารถเก็บกักคลอไรด์สามารถลดปริมาณคลอไรด์อิสระได้โดยการยึดจับไม่ให้คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในขณะที่คลอไรด์อิสระที่เหลือสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และการดึงดูดอออนจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนตะกรันเตาสูงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่ใช้ เมื่อคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น คอนกรีตจะเกิดโพรงช่องว่างมากขึ้น จึงส่งผลให้คลอไรด์สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีตได้มากกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ นอกจากนี้การใช้ปริมาณตะกรันเตาสูงเหล็กบดแทนที่ปริมาณวัสดุประสานสามารถช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตได้โดยตะกรันเตาสูงเหล็กบดจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้เกิดเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในโพรงช่องว่างของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตที่บดแน่นมากขึ้น จึงสามารถช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตได้

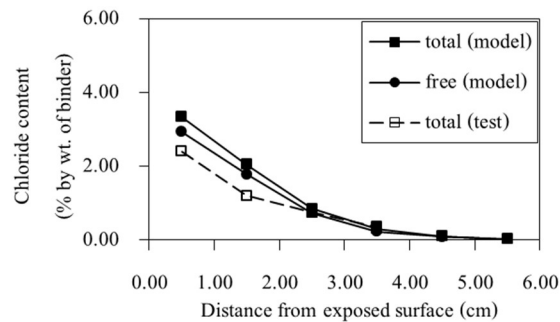
ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่เกิดสภาวะเปือกสลับแห้งเป็นเวลา 84 วัน 168 วัน 252 วัน และ 336 วัน ดังภาพที่ 4-25 และภาพที่ 4-26 ซึ่งพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระมีค่าลดลงเมื่อความลึกของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเกิดสภาวะเปือกสลับแห้งนานขึ้น และจากการคำนวณพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้มีแนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง



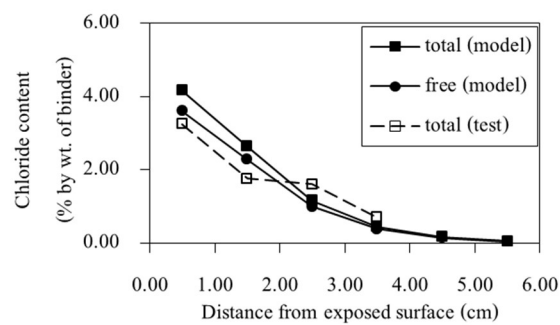
ก. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 84 วัน



ข. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 168 วัน



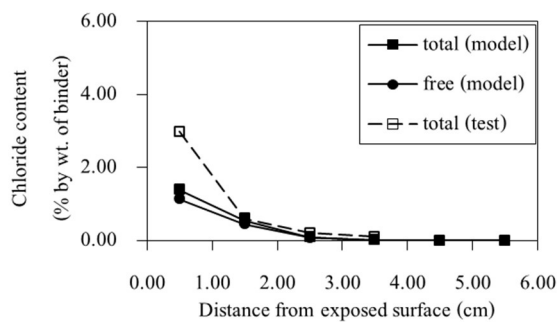
ค. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 252 วัน



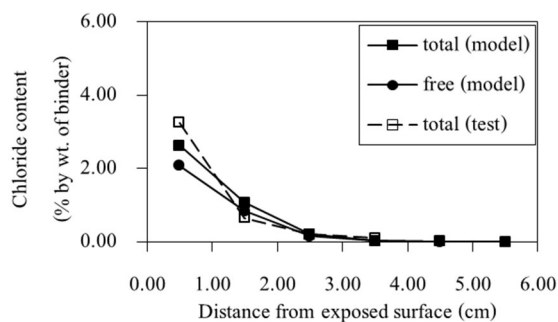
ง. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 336 วัน

ภาพที่ 4-25 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

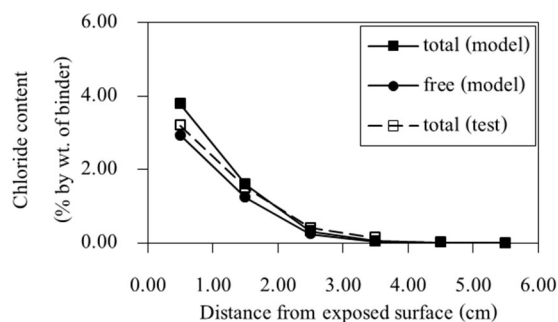
(McPolin et al., 2005)



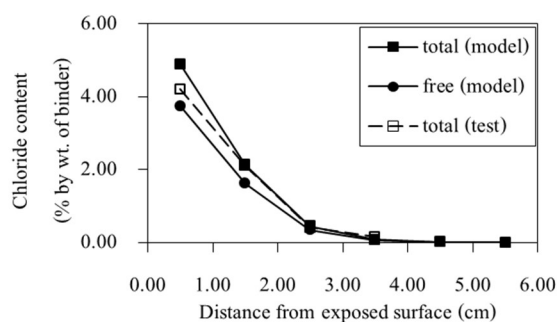
ก. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 84 วัน



ข. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 168 วัน



ค. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 252 วัน



ง. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 336 วัน

ภาพที่ 4-26 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนตะกั่วกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.50 (McPolin et al., 2005)

## แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก

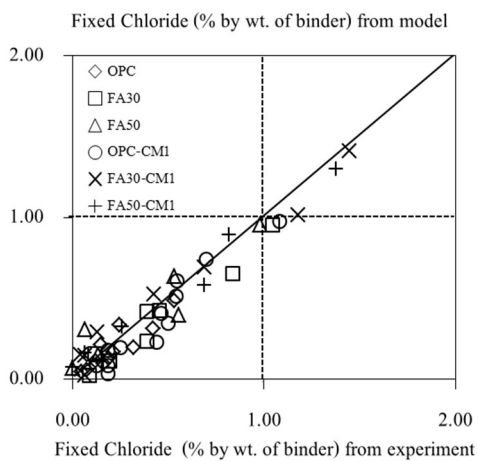
### 1. การตรวจสอบแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์

แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกจะถูกรวบรวมกับผลการทดลองของ Our, Chour and Prak (2012) โดยส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และถั่วลยคังตารางที่ 4-3

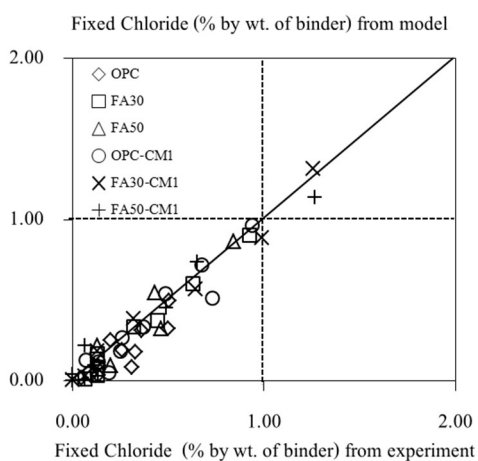
ตารางที่ 4-3 ส่วนผสมของคอนกรีต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และถั่วลยคัง

ประเภทตัวอย่าง	คอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก	
w/b	0.50, 0.60	
f/b	0.30, 0.50	
CM/b	0.01	
ความเข้มข้นของคลอไรด์	5.0% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน	
ระยะเวลาการบ่มน้ำ (วัน)	7, 28	
ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ (วัน)	91, 182, 365	
องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์	ถั่วลยคัง
SiO <sub>2</sub> (%)	21.30	39.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.96	17.93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.10	12.92
CaO (%)	66.61	19.19
SO <sub>3</sub> (%)	2.72	3.03
LOI (%)	0.74	-

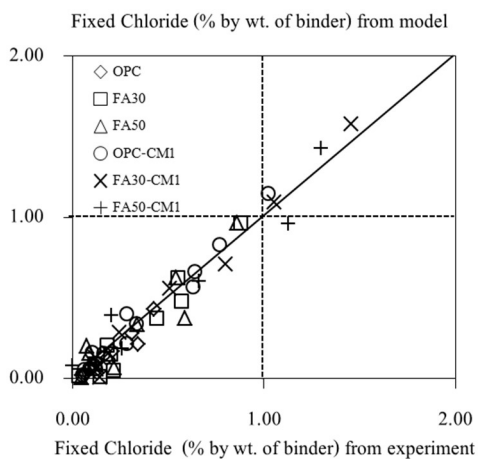
ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตถูกตรวจสอบกับคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และอัตราส่วนถั่วลยคังต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน และระยะเวลาการเผชิญกับคลอไรด์ที่นานขึ้น ซึ่งจากการตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองของ Our et al. (2012) พบว่าแบบจำลองสามารถใช้ในการคำนวณหาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกได้ดังภาพที่ 4-27



ก. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และบ่มน้ำเป็นเวลา 7 วัน



ข. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน



ค. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน

ภาพที่ 4-27 การตรวจสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์จากแบบจำลองกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วน  
 etailoyต่อวัสดุประสานต่าง ๆ

## 2. การตรวจสอบแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และการดึงดูคือนอน

### 2.1 เงื่อนไขการเผชิญคลอไรด์แบบแซ่สารละลายคลอไรด์

จากแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูคือนอนสามารถใช้เพื่อกำหนดหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก ซึ่งเป็นผลการทดลองของ Our et al. (2012) หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาเคลือบผิวด้วยอีพ็อกซี และแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ร้อยละ 5.0 เป็นเวลา 91 วัน 182 วัน และ 365 วัน ดังภาพที่ 4-2 เพื่อให้คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีต ซึ่งการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตเกิดขึ้นจากกระบวนการการแพร่และการดึงดูคือนอน สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตและเงื่อนไขของการทดลองดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ส่วนผสมของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกและเงื่อนไขการทดลอง

รหัสส่วนผสม	CM/b	w/b	f/b	ระยะเวลาบ่มน้ำ (วัน)	ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)
OPC	0	0.50	0	7, 28	91, 182, 365
FA30	0	0.50	0.30	7, 28	91, 182, 365
FA50	0	0.50	0.50	7, 28	91, 182, 365
OPC-CM1	0.01	0.50	0	7, 28	91, 182, 365
FA30-CM1	0.01	0.50	0.30	7, 28	91, 182, 365
FA50-CM1	0.01	0.50	0.50	7, 28	91, 182, 365
OPC	0	0.60	0	28	91, 182, 365
FA30	0	0.60	0.30	28	91, 182, 365
FA50	0	0.60	0.50	28	91, 182, 365
OPC-CM1	0.01	0.60	0	28	91, 182, 365
FA30-CM1	0.01	0.60	0.30	28	91, 182, 365
FA50-CM1	0.01	0.60	0.50	28	91, 182, 365

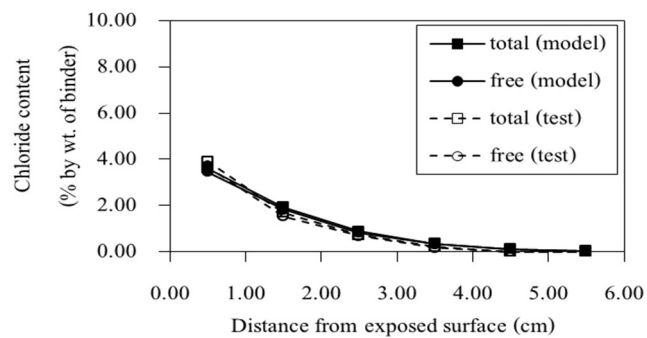
หมายเหตุ: ความหมายของสัญลักษณ์

“OPC” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ล้วนแทนที่วัสดุประสาน

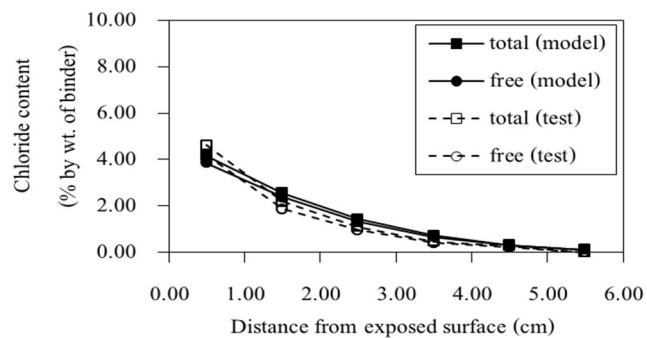
“FA30” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30

“OPC-CM1” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ล้วนแทนที่วัสดุประสานและใช้อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01

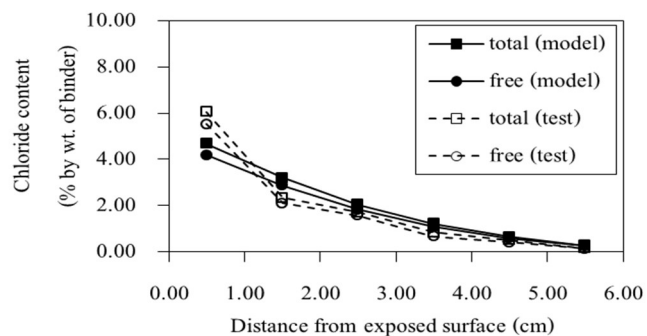
จากการตรวจสอบผลการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองสามารถใช้เพื่อคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ที่ระยะเวลาการเผชิญกับคลอไรด์ต่าง ๆ โดยปริมาณคลอไรด์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มที่ดีกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการทดลองดังภาพที่ 4-28 ถึงภาพที่ 4-45



ก. เผชิญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน



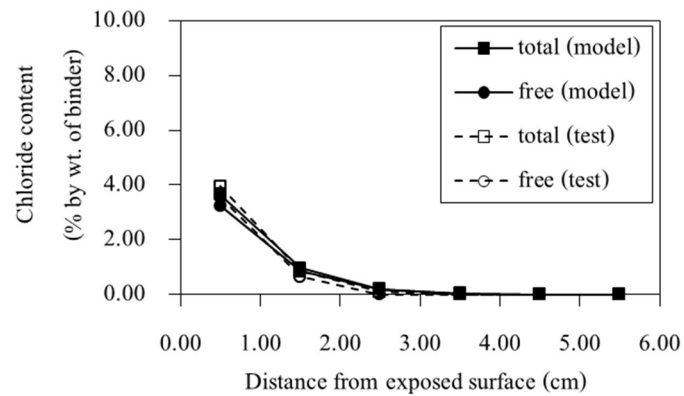
ข. เผชิญคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน



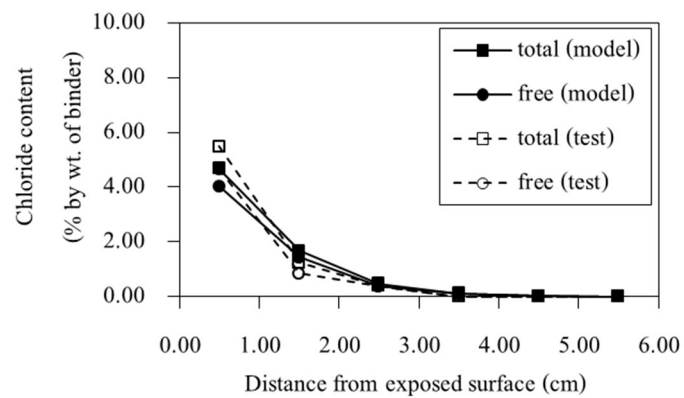
ค. เผชิญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

ภาพที่ 4-28 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตส่วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7 วัน

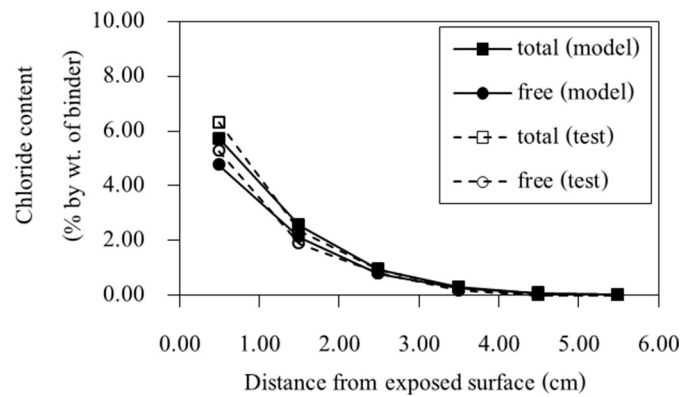




ก. เผิคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

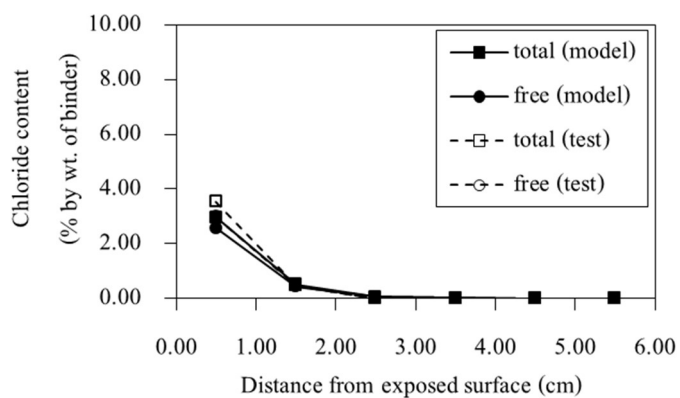


ข. เผิคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

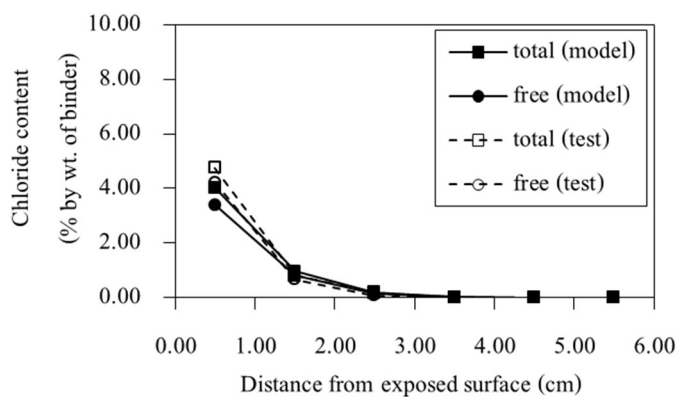


ค. เผิคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

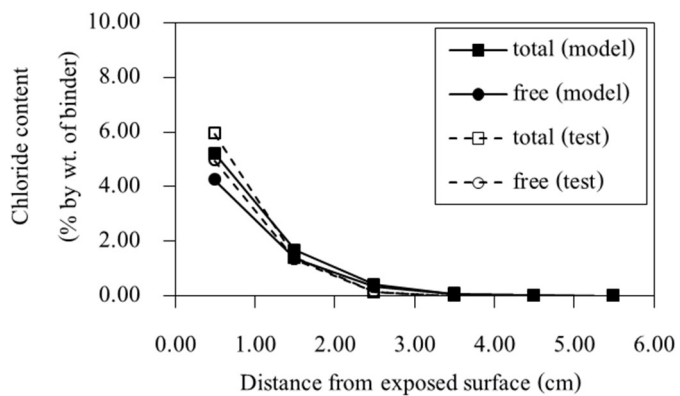
ภาพที่ 4-29 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7 วัน



ก. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

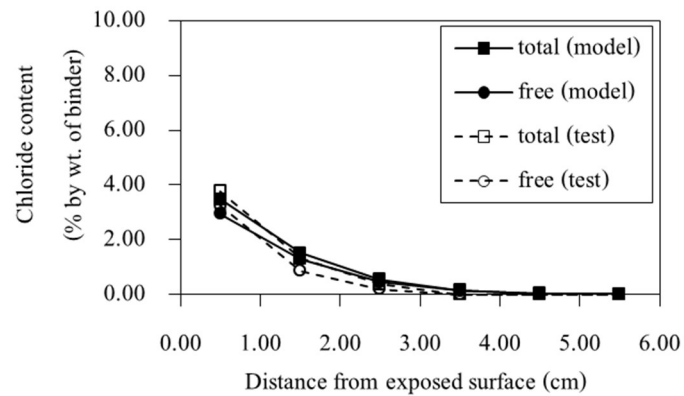


ข. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

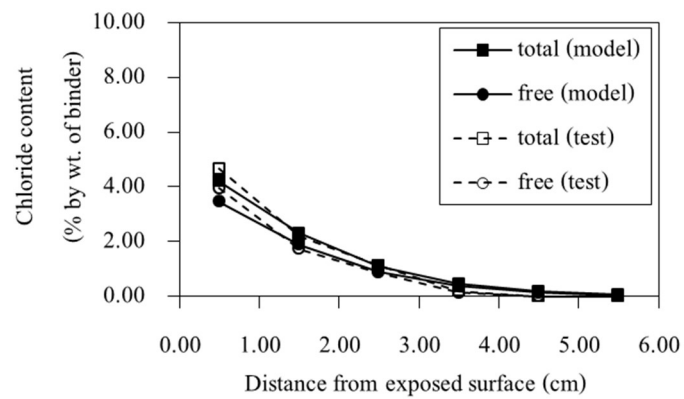


ค. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

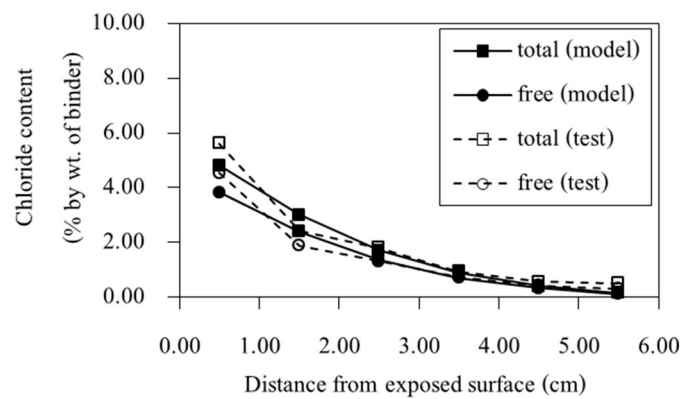
ภาพที่ 4-30 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7 วัน



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

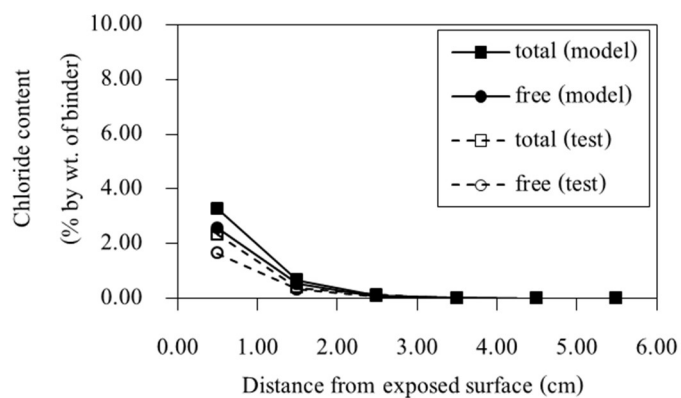


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

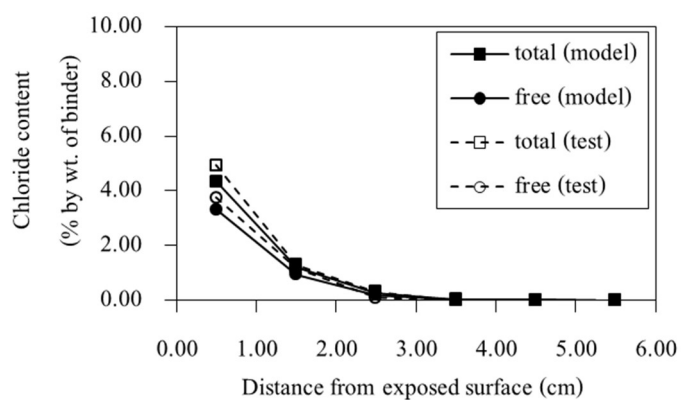


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

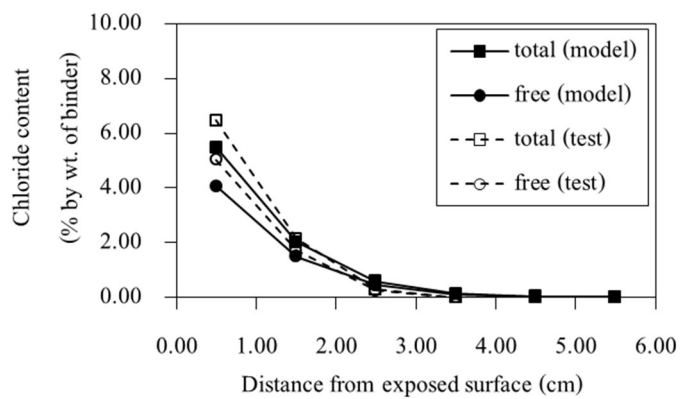
ภาพที่ 4-31 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7 วัน



ก. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

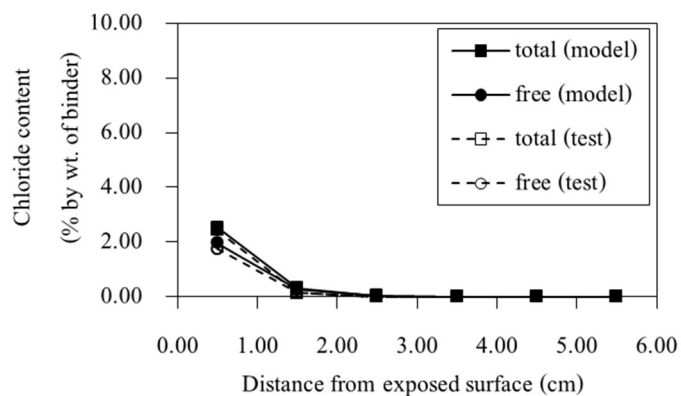


ข. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

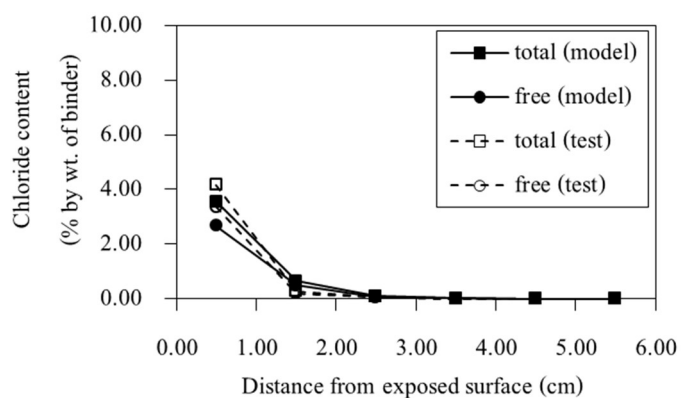


ค. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

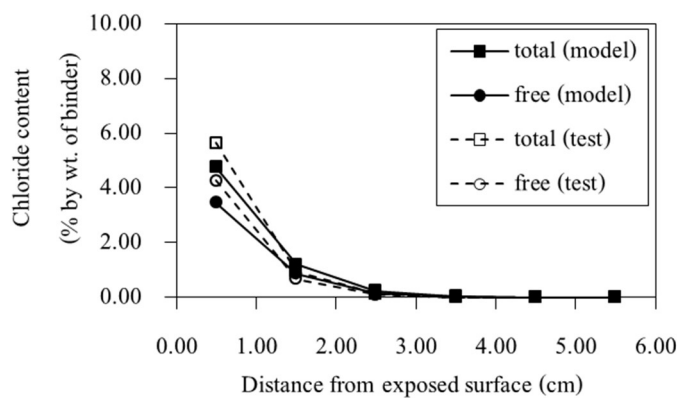
ภาพที่ 4-32 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7 วัน



ก. เเพชญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

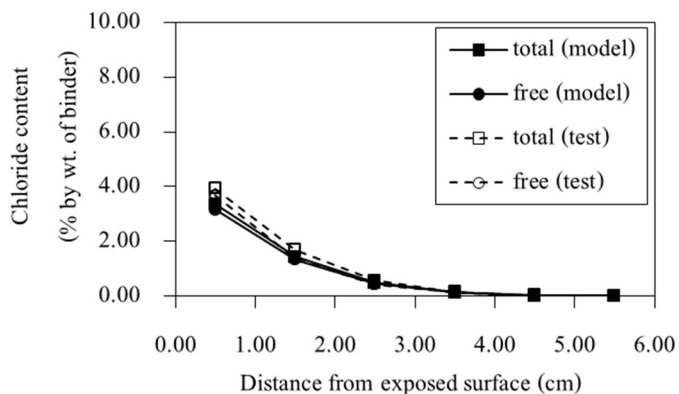


ข. เเพชญคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

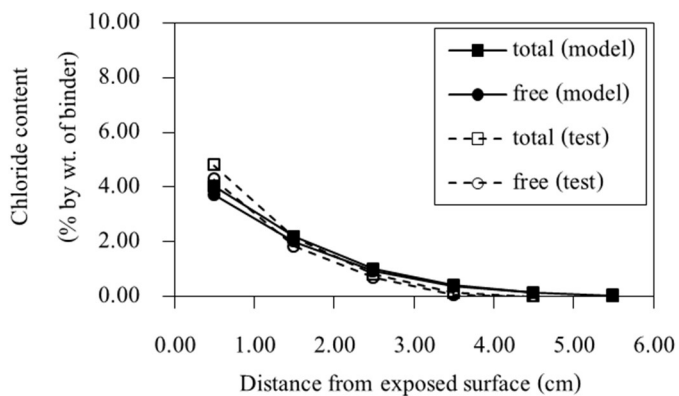


ค. เเพชญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

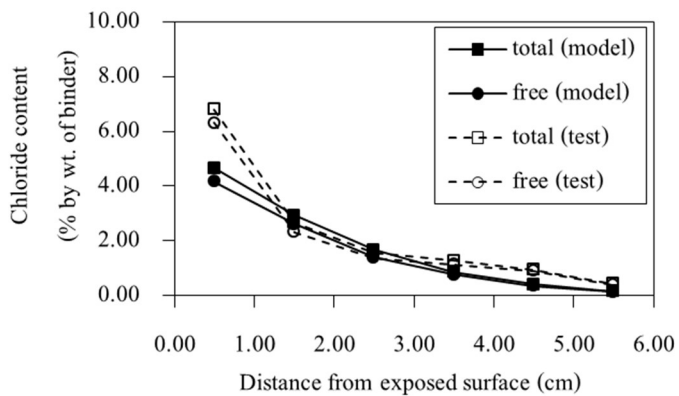
ภาพที่ 4-33 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50  
อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน  
0.01 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7 วัน



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

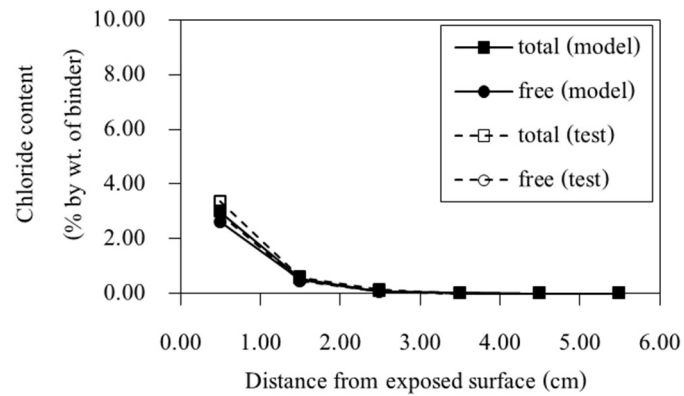


ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

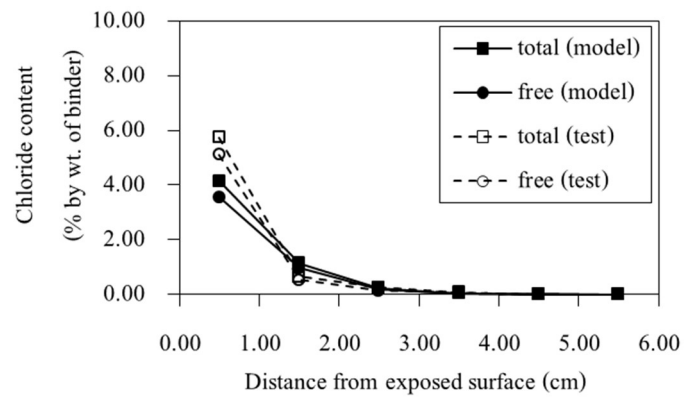


ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

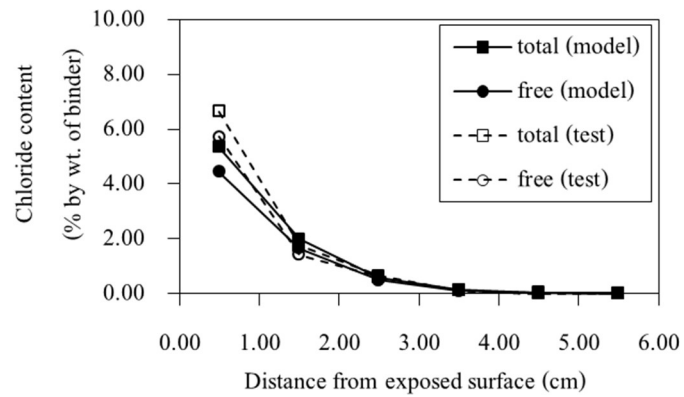
ภาพที่ 4-34 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน



ก. เชนิณคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

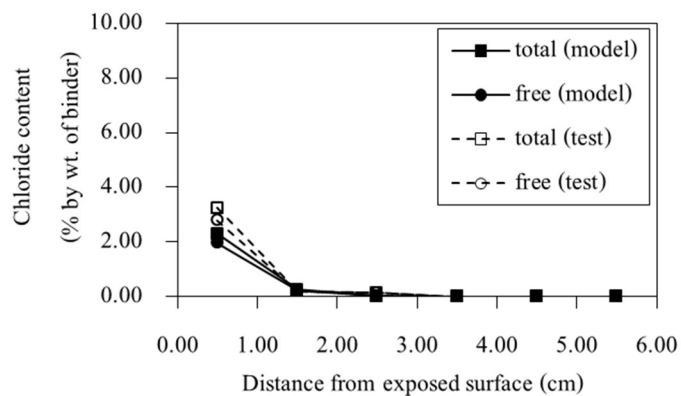


ข. เชนิณคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

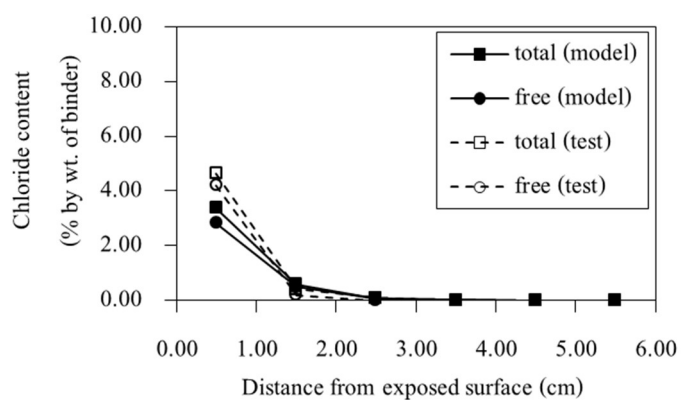


ค. เชนิณคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

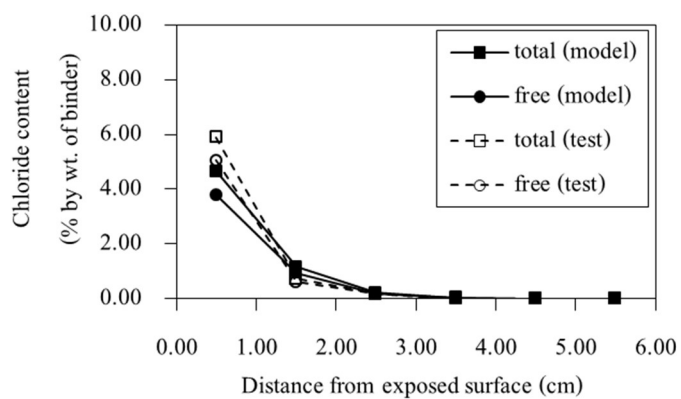
ภาพที่ 4-35 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน



ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน



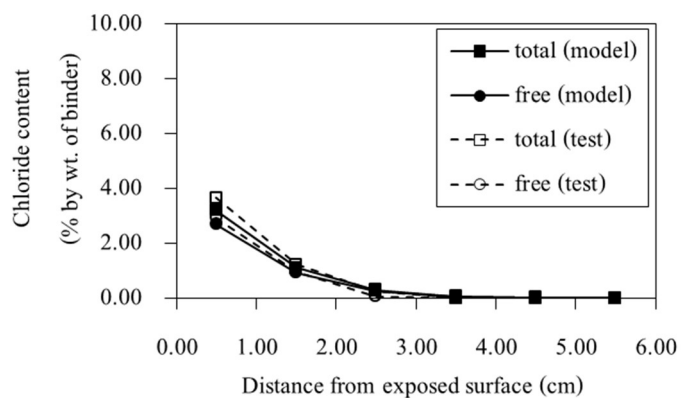
ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน



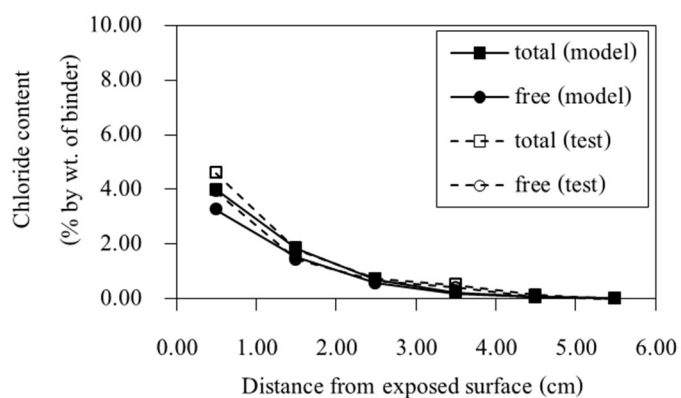
ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

ภาพที่ 4-36 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ล้าวนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน

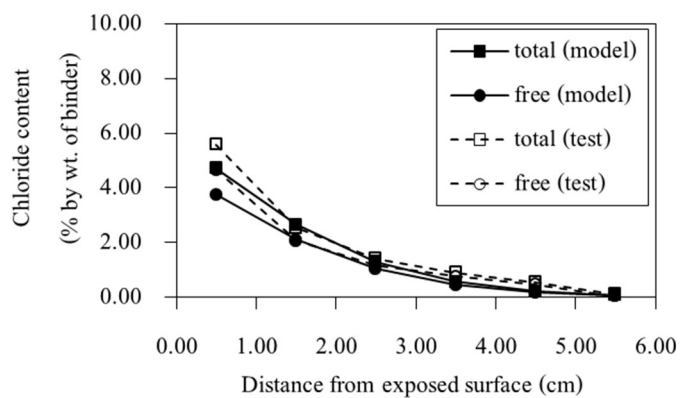




ก. เเพชฌัญคลอไรด์เป็นเวลาดำเนินการ 91 วัน

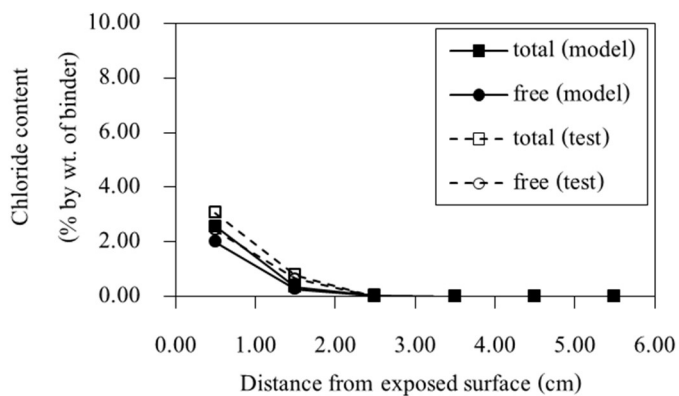


ข. เเพชฌัญคลอไรด์เป็นเวลาดำเนินการ 182 วัน

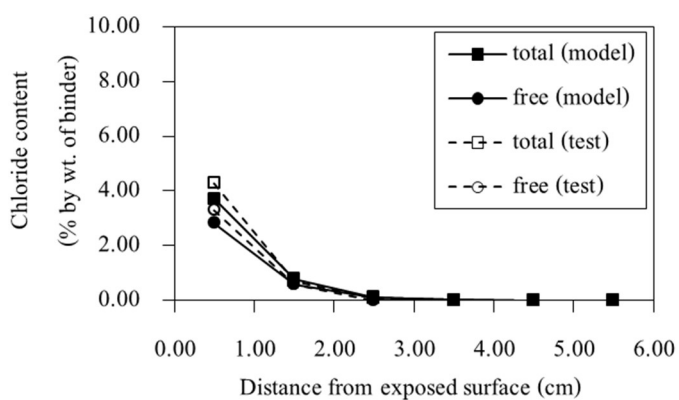


ค. เเพชฌัญคลอไรด์เป็นเวลาดำเนินการ 365 วัน

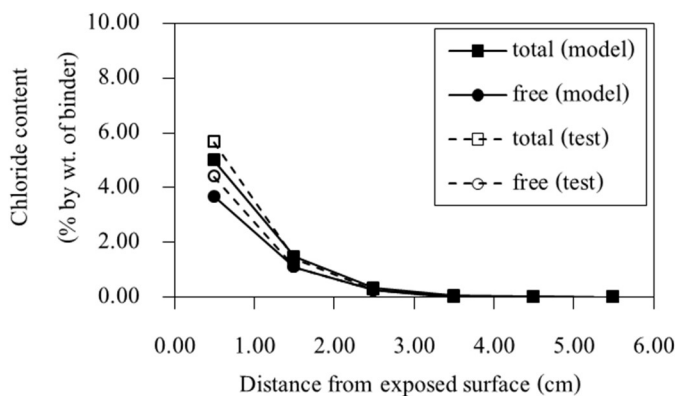
ภาพที่ 4-37 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน



ก. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

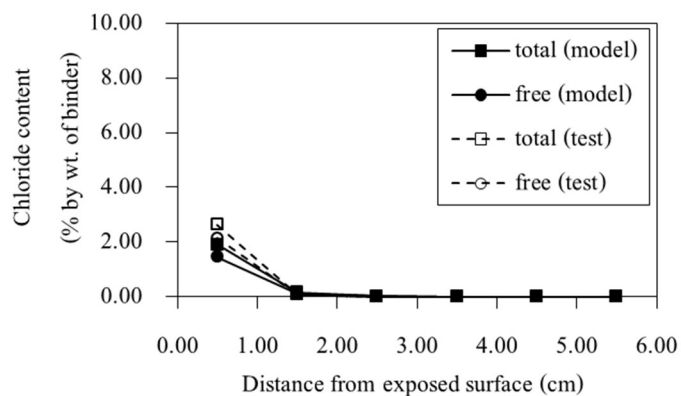


ข. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

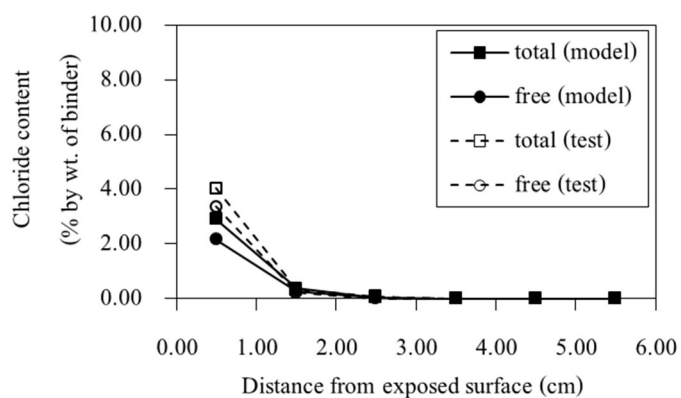


ค. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

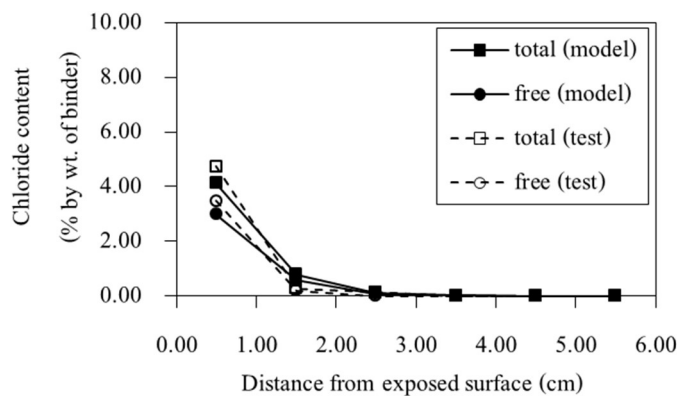
ภาพที่ 4-38 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน



ก. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

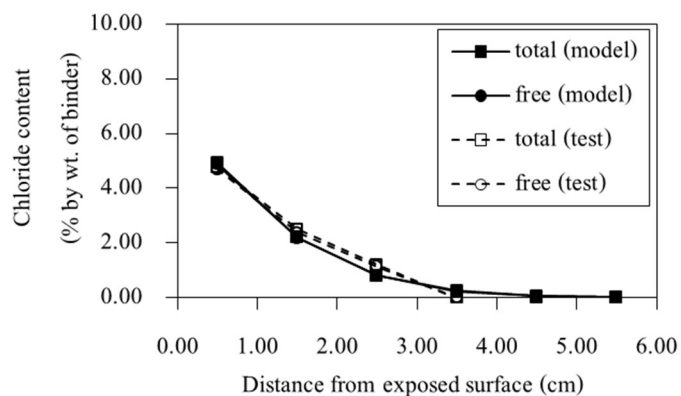


ข. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

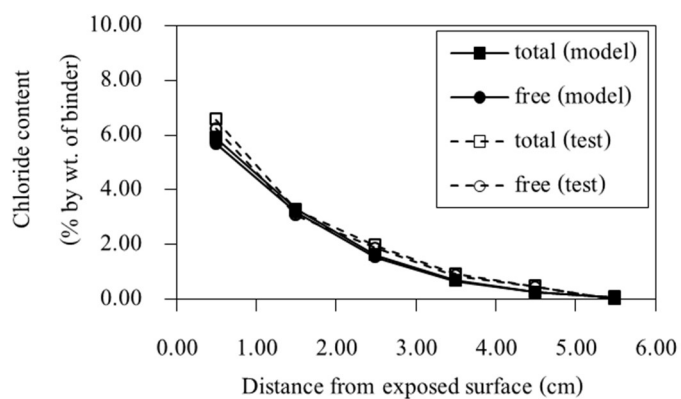


ค. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

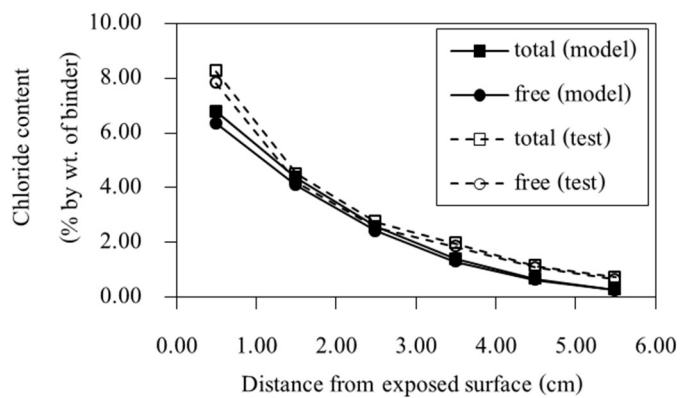
ภาพที่ 4-39 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50  
อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน  
0.01 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน



ก. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

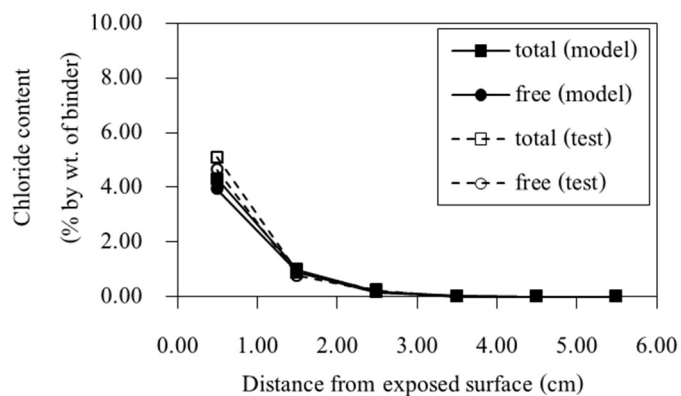


ข. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

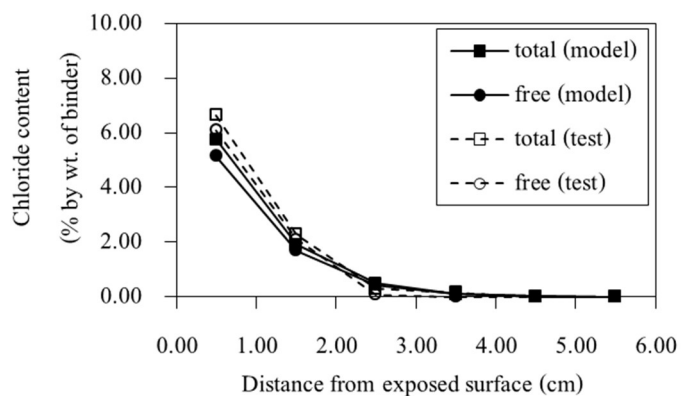


ค. เชนิยคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

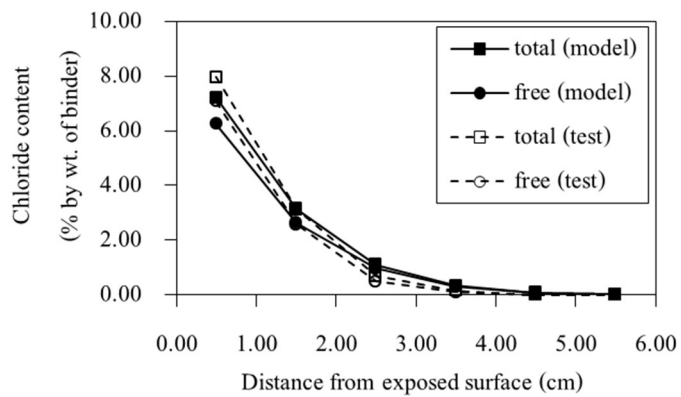
ภาพที่ 4-40 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตส่วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน



ก. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

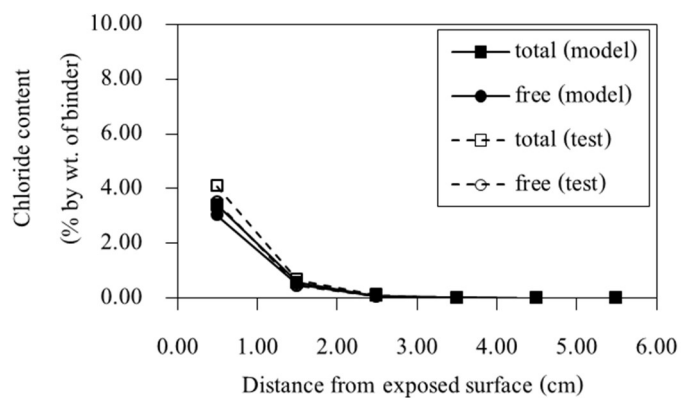


ข. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

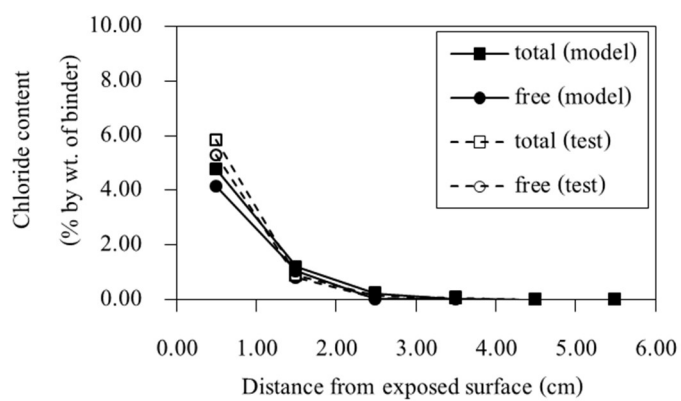


ค. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

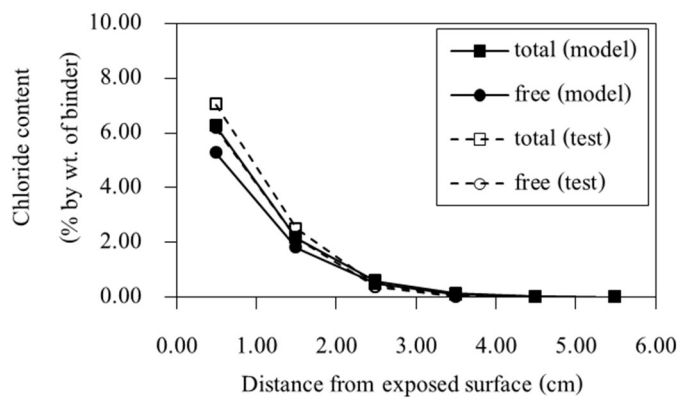
ภาพที่ 4-41 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน



ก. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลาดำเนินการ 91 วัน

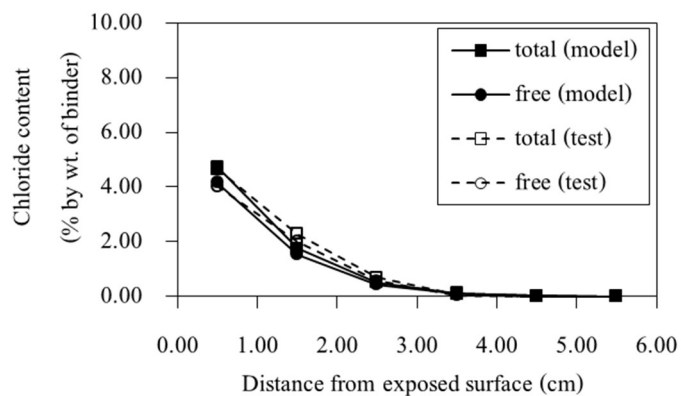


ข. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลาดำเนินการ 182 วัน

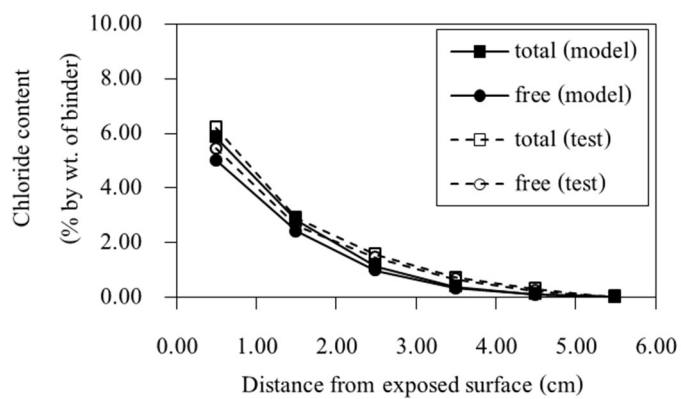


ค. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลาดำเนินการ 365 วัน

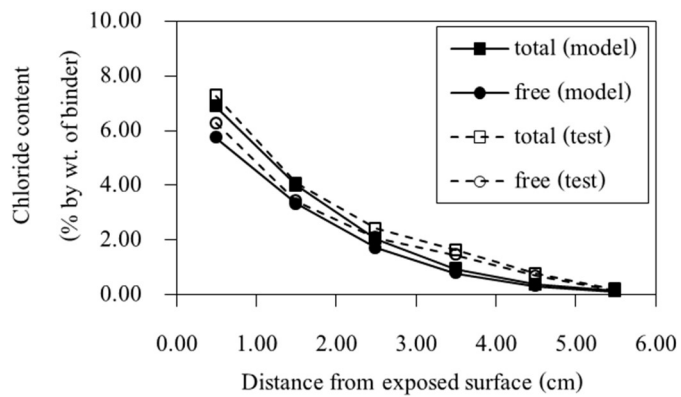
ภาพที่ 4-42 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน



ก. เเพชญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน

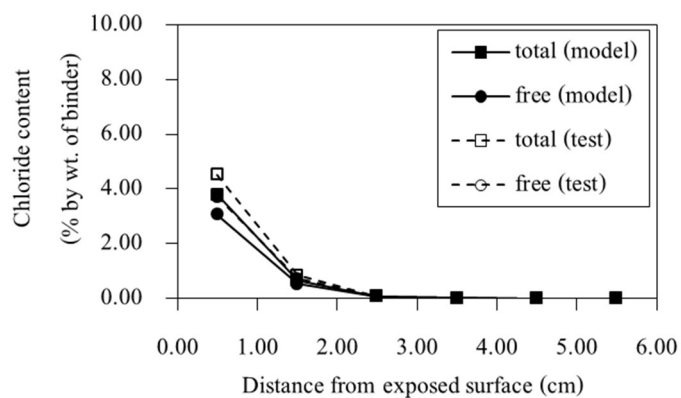


ข. เเพชญคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

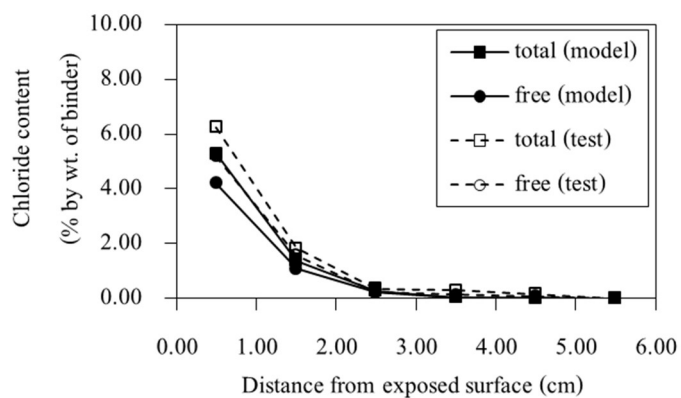


ค. เเพชญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

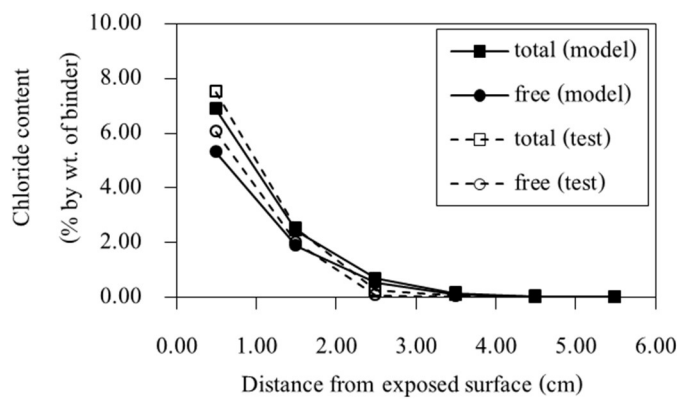
ภาพที่ 4-43 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน



ก. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน



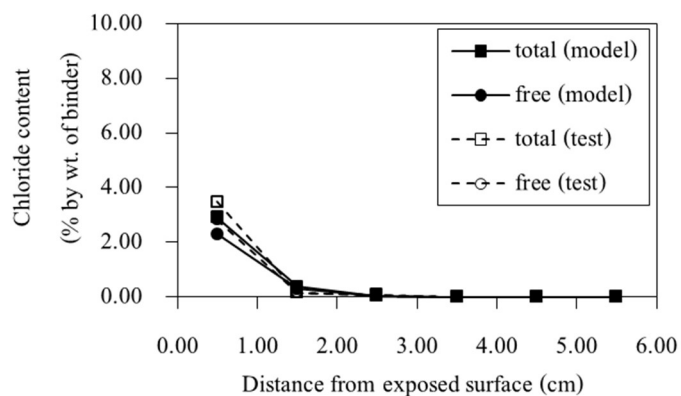
ข. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน



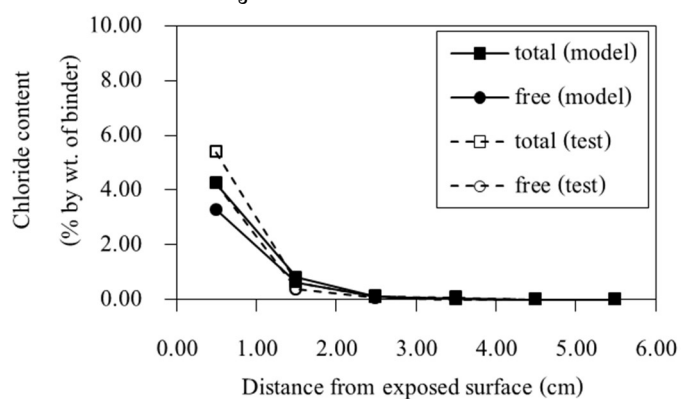
ค. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

ภาพที่ 4-44 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน

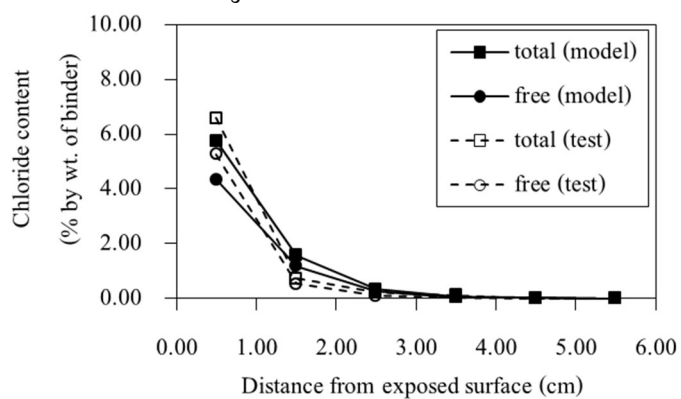




ก. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 91 วัน



ข. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 182 วัน

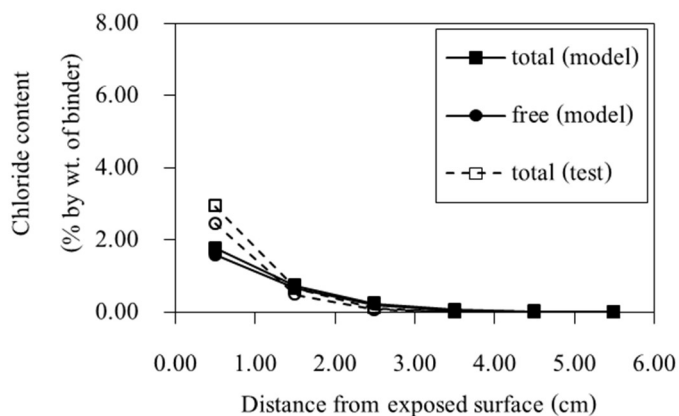


ค. เชนิญคลอไรด์เป็นเวลา 365 วัน

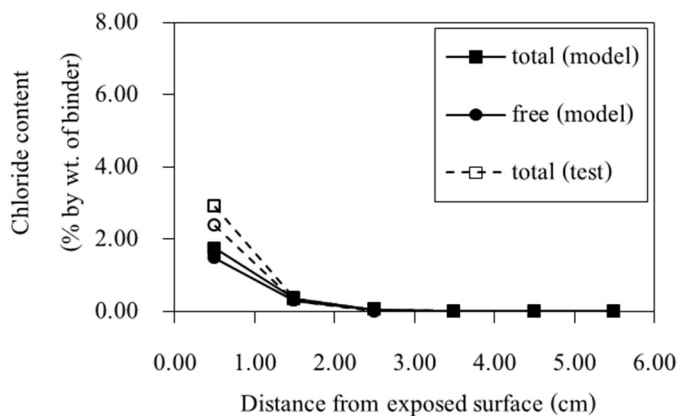
ภาพที่ 4-45 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน

Chour, Sumranwanich, and Tangtermsirikul (2013) ได้ทำการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20 และ 0.30 และปริมาณวัสดุประสาน  $400 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งหลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตขนาด  $10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  ในน้ำครบกำหนด 28 วัน จึงทำการเคลือบผิวคอนกรีตทุกหน้าด้วยอีพ็อกซี ยกเว้นหน้าตัดด้านเดียว แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสารละลายคลอไรด์เข้มข้นคลอไรด์ร้อยละ 3.0 เป็นเวลา 91 วัน และ 365 วัน เมื่อครบกำหนดการแช่แล้ว จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาตัดและบดให้ละเอียดและนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 และหาปริมาณคลอไรด์อิสระตามมาตรฐาน ASTM C1218

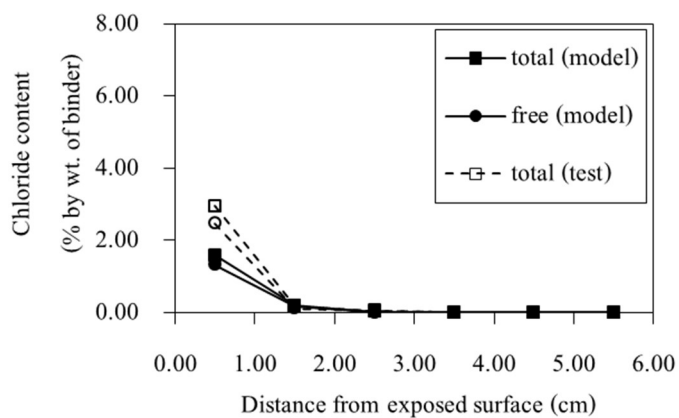
การคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณวัสดุประสาน  $400 \text{ kg/m}^3$  ที่ระยะเวลาเผชิญกับคลอไรด์ 91 วัน และ 365 วัน ดังภาพที่ 4-46 ถึงภาพที่ 4-49 ซึ่งพบว่า ทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระมีค่าลดลงตามระดับความลึกของคอนกรีตและขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เมื่ออัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ผลการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์มีแนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง



ก. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

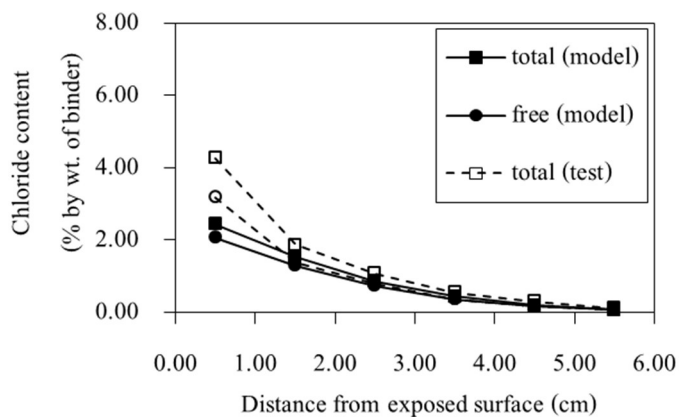


ข. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนแก้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20

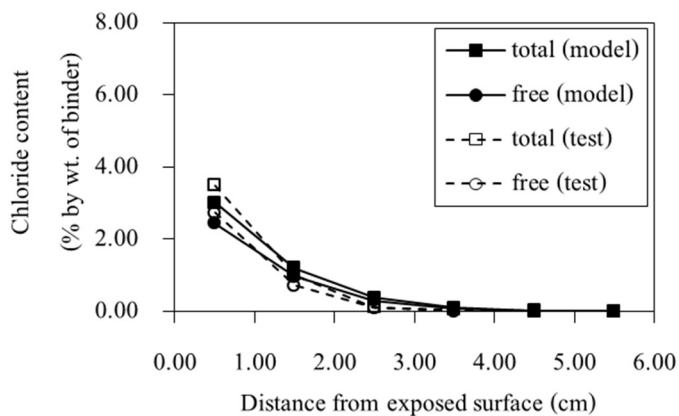


ค. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนแก้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30

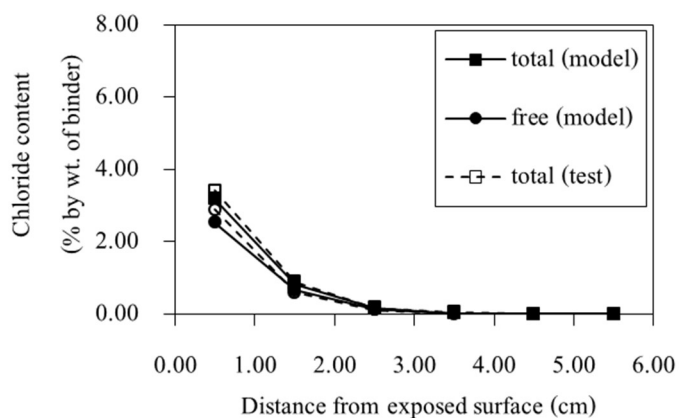
ภาพที่ 4-46 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน (Chour, Sumranwanich, & Tangtermsirikul, 2013)



ก. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

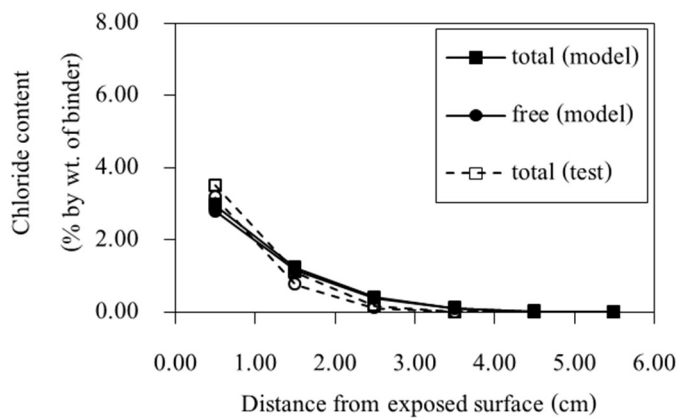


ข. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20

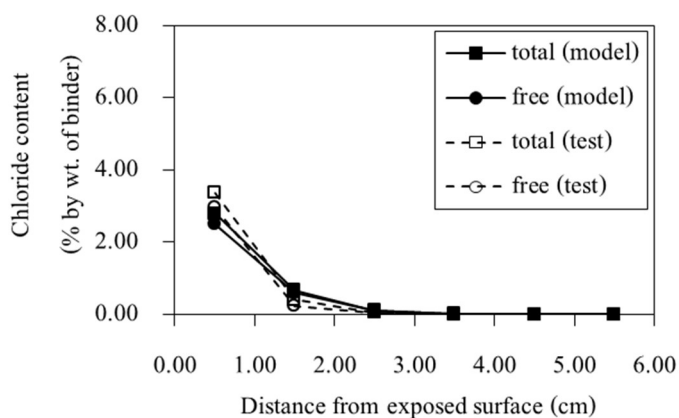


ค. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30

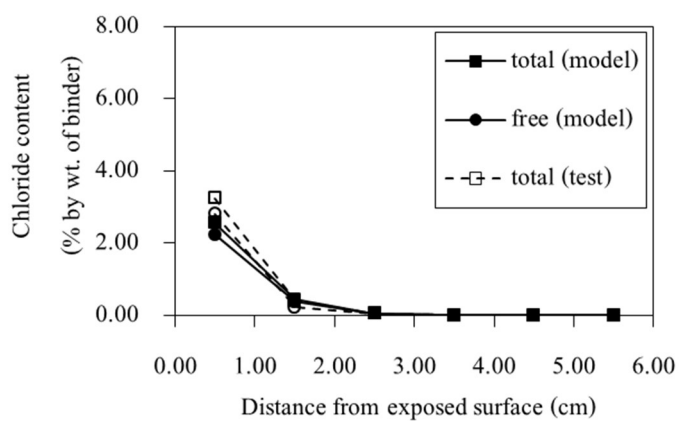
ภาพที่ 4-47 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ระยะเวลา  
เผชิญคลอไรด์ 365 วัน (Chour, Sumranwanich, & Tangtermsirikul, 2013)



ก. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

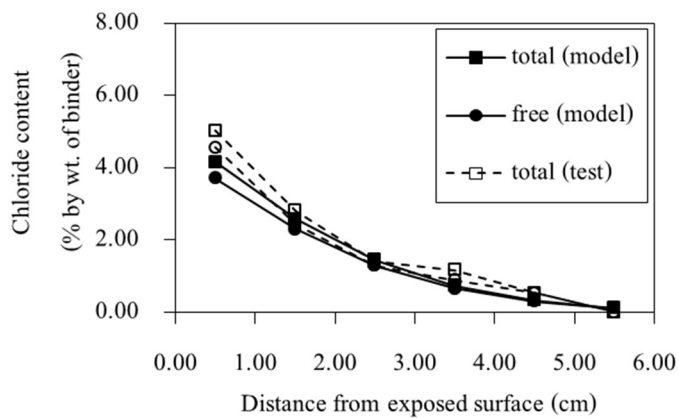


ข. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20

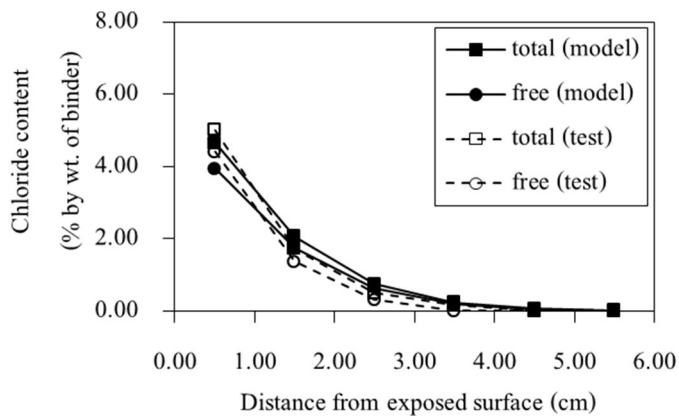


ค. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30

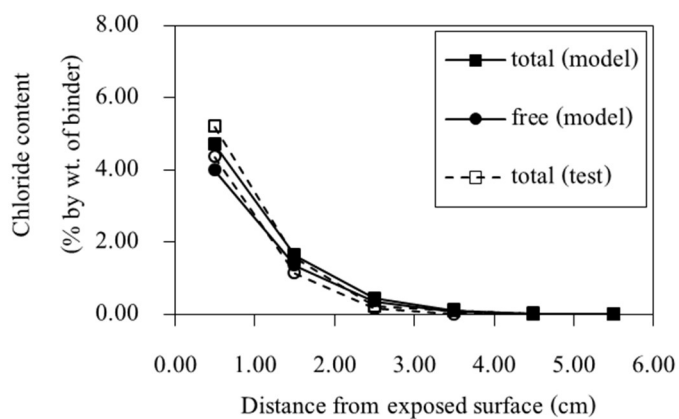
ภาพที่ 4-48 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลา  
เผชิญคลอไรด์ 91 วัน (Chour, Sumranwanich, & Tangtermsirikul, 2013)



ก. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



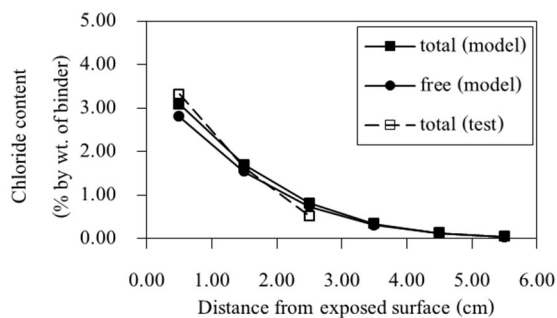
ข. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20



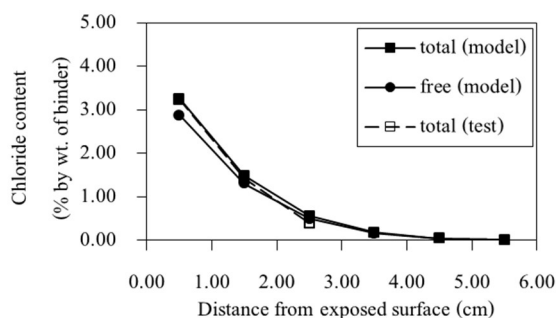
ค. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30

ภาพที่ 4-49 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 365 วัน (Chour, Sumranwanich, & Tangtermsirikul, 2013)

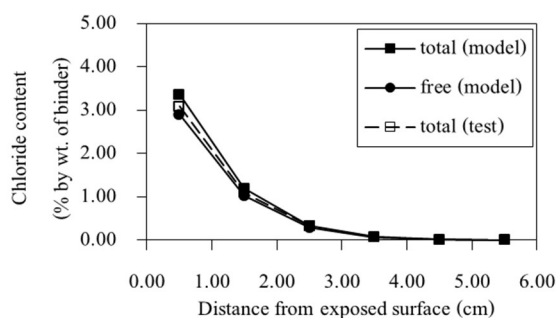
Song and Kwon (2009) ได้ทำการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสม  
ถ้ำลอย โดยตัวอย่างคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.47 และอัตราส่วนถ้ำลอยต่อ  
วัสดุประสาน 0.10, 0.20 และ 0.30 และบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นทำการเคลือบผิวตัวอย่าง  
คอนกรีตทุกหน้าด้วยเรซิน ยกเว้นหน้าตัดด้านเดียว แล้วนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์มี  
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 เป็นเวลา 6 เดือน โดยผลการศึกษาี้แสดงเฉพาะค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด  
ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของคอนกรีตผสมถ้ำลอยที่  
คำนวณได้จากแบบจำลอง โดยเทียบกับผลการทดลองดังภาพที่ 4-50 พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด  
ที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง



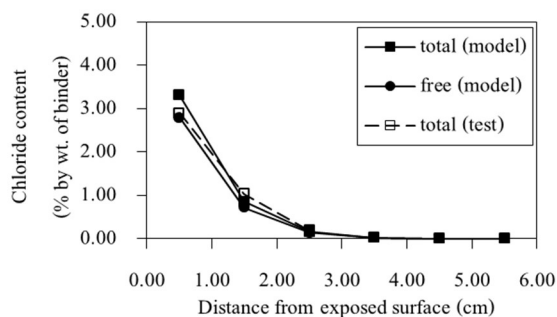
ก. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



ข. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.10



ค. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.20



ง. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30

ภาพที่ 4-50 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.47 ที่ระยะเวลา  
เผชิญคลอไรด์ 6 เดือน (Song & Kwon, 2009)



## 2.2 เงื่อนไขการเผชิญกับคลอไรด์โดยปรากฏการณ์เปียกสลับแห้ง

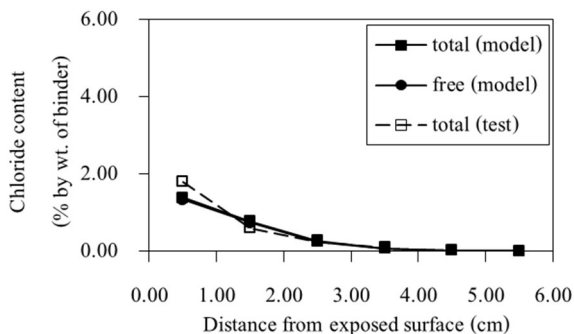
McPolin, Basheer, Long, Grattan, and Sun (2005) ได้ทำการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยภายใต้เงื่อนไขเปียกสลับแห้งโดยแต่ละรอบมี 7 วัน คือ เปียก 1 วัน และแห้ง 6 วัน หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 3 วัน และนำมาบ่มด้วยการหุ้มแผ่นพลาสติกไว้จนตัวอย่างคอนกรีตครบอายุ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาเผชิญกับสารละลายเกลือคลอไรด์โดยวัฏจักรที่ต่างกันโดยผลการศึกษานี้จะแสดงเฉพาะปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด สำหรับส่วนผสมและองค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ส่วนผสมของคอนกรีตและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย (McPolin et al., 2005)

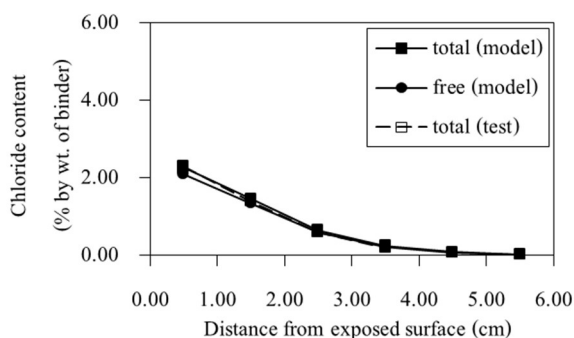
ประเภทตัวอย่าง	คอนกรีตล้วน	คอนกรีตผสมเถ้าลอย
w/b		0.50
f/b	0.00	0.30
ส่วนผสมคอนกรีต (kg/m <sup>3</sup> )		
ปูนซีเมนต์	369	246
เถ้าลอย	0	106
น้ำ	185	176
ทราย	922	880
หิน	923	880
ความเข้มข้นของคลอไรด์	1.95 % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน	
ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	28	
วัฏจักรเปียกสลับแห้ง (วัน)	84, 168, 252, 336	
องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย
SiO <sub>2</sub> (%)	21.0	35.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6.0	13.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.0	1.0
CaO (%)	64.0	41.0
SO <sub>3</sub> (%)	3.0	0.1

สมการแบบจำลองของความสามารถเก็บกักคลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ การดึงดูดอออน และแบบจำลองของวัฏจักรเปือกสลับแห้งถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตภายใต้สภาวะเปือกสลับแห้ง ความสามารถเก็บกักคลอไรด์สามารถลดปริมาณคลอไรด์อิสระได้โดยการยึดจับไม่ให้คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในขณะที่คลอไรด์อิสระที่เหลือสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และการดึงดูดอออนจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและปริมาณเกลือที่ใช้ เมื่อคอนกรีตใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น คอนกรีตจะเกิดโพรงช่องว่างมากขึ้น จึงส่งผลให้คลอไรด์สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีตได้มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำต่ำ นอกจากนี้การใช้ปริมาณเกลือแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์สามารถช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตได้โดยเกลือจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับผลผลิตที่ได้ปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้เกิดเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในโพรงช่องว่างของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำมากขึ้น จึงสามารถช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตได้

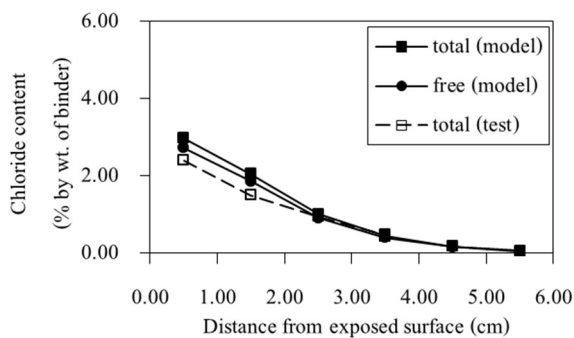
ผลคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่เกิดสภาวะเปือกสลับแห้งเป็นเวลา 84 วัน 168 วัน 252 วัน และ 336 วัน ดังภาพที่ 4-51 และภาพที่ 4-52 ซึ่งพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระมีค่าลดลงเมื่อความลึกของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเกิดสภาวะเปือกสลับแห้งนานขึ้น และจากการคำนวณพบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้มีแนวโน้มที่ดีกับผลการทดลอง



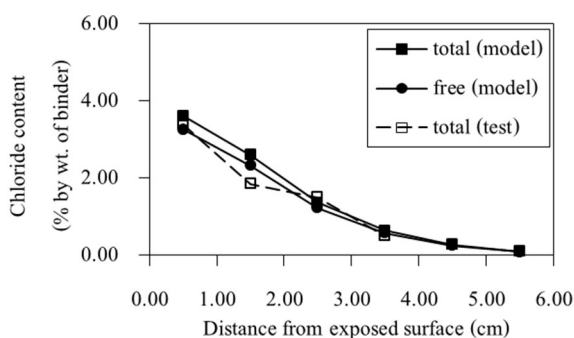
ก. เพลี้ยคลอไรด์เป็นเวลา 84 วัน



ข. เพลี้ยคลอไรด์เป็นเวลา 168 วัน

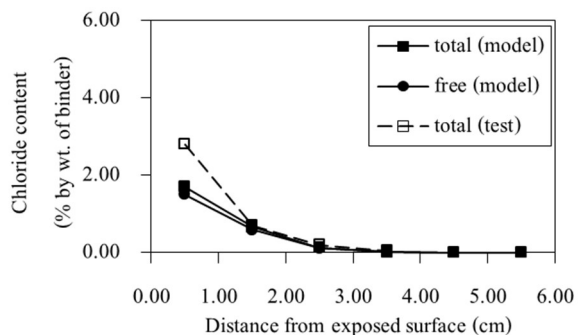


ค. เพลี้ยคลอไรด์เป็นเวลา 252 วัน

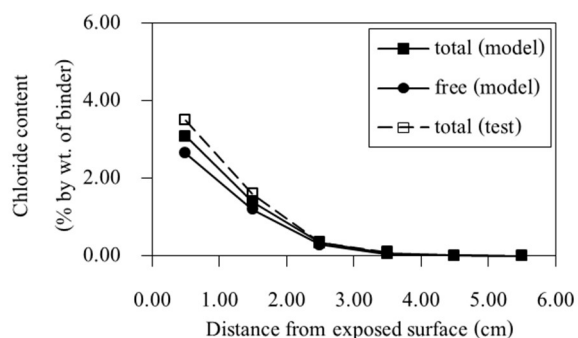


ง. เพลี้ยคลอไรด์เป็นเวลา 336 วัน

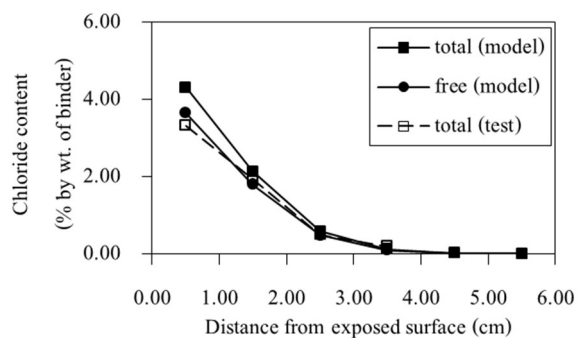
ภาพที่ 4-51 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตส่วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 (McPolin et al., 2005)



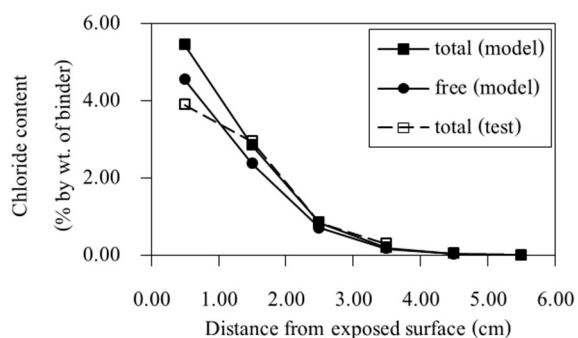
ก. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 84 วัน



ข. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 168 วัน



ค. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 252 วัน



ง. เฝ้าซึมคลอไรด์เป็นเวลา 336 วัน

ภาพที่ 4-52 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 (McPolin et al., 2005)

### การตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

จากการศึกษาครั้งนี้ เมื่อทำการตรวจสอบค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดของ Prak and Sumranwanich (2013); Prak (2014) ที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.20, 0.50, 0.60 และ 0.70 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 พบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ได้เท่ากับ +8.0% และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดของ Song and Kwon (2009) ที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.30 และ 0.50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.42 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ได้เท่ากับ +19.7% สำหรับคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดของ McPolin et al. (2005) ที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ได้เท่ากับ -4.2% ดังนั้นค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดอยู่ในช่วง -4.2% ถึง +19.7% รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ค

สำหรับคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก เมื่อทำการตรวจสอบค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองของ Our et al. (2012) ที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และ 0.50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 และอัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน 0.01 พบว่า ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ได้เท่ากับ +12.2% และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนการแทรกซึมคลอไรด์ของ Chour et al. (2013) ซึ่งเป็นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.20 และ 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ได้เท่ากับ +14.6% สำหรับ Song and Kwon (2009) ที่ใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.10, 0.20 และ 0.30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.47 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ได้เท่ากับ +8.7 และ McPolin et al. (2005) ที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ได้เท่ากับ -1.9% ดังนั้นค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกอยู่ในช่วง -1.9% ถึง +14.6% รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ง

## บทที่ 6

### สรุปผล

#### สรุปผล

จากการศึกษาเพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย แบบจำลองหลัก 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูดอออนคลอไรด์ โดยแต่ละแบบจำลองได้คำนึงถึงผลกระทบของอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณวัสดุประสาน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ในแบบจำลอง ทั้งนี้แบบจำลองสามารถคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ส่วนผสมและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ต่าง ๆ โดยแสดงผลทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีต และผลที่ได้จากการคำนวณมีความถูกต้องที่น่าพอใจกับผลการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง -4.2% ถึง +19.7%

2. แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ถึง 0.50 อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานสูงสุด 0.70 ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ  $320 \text{ kg/m}^3$  ถึง  $400 \text{ kg/m}^3$  ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์สูงสุด 365 วัน

3. แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย แบบจำลองหลัก 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และแบบจำลองการดึงดูดอออนคลอไรด์ โดยแต่ละแบบจำลองได้คำนึงถึงผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาบ่มน้ำ และระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ในแบบจำลอง ทั้งนี้แบบจำลองสามารถคำนวณการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกที่ส่วนผสมและระยะเวลาต่าง ๆ โดยแสดงผลทั้งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีต และผลที่ได้จากการคำนวณมีความถูกต้องที่น่าพอใจกับผลการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง -1.9% ถึง +14.6%

4. แบบจำลองการคำนวณการแทรกซึมคลองไรต์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึกถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลการแทรกซึมคลองไรต์ของคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ถึง 0.60 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานสูงสุด 0.50 อัตราส่วนวัสดุสร้างผลึกต่อวัสดุประสานสูงสุด 0.01 ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน ถึง 28 วัน และระยะเวลาเผชิญคลองไรต์สูงสุด 365 วัน

#### ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับแบบจำลองความสามารถเก็บกักคลองไรต์ของคอนกรีตควรพิจารณาถึงดัชนีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดหรือเถ้าลอย แทนการใช้อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยเตาถลุงเหล็กบดหรือเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดหรือเถ้าลอยมีความแตกต่างกัน เพราะเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการถลุงแร่เหล็กและการผลิตกระแสไฟฟ้า

2. สำหรับแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่คลองไรต์ของคอนกรีตควรพิจารณาถึงการพัฒนาโครงสร้างโพรงช่องว่างในคอนกรีตด้วย เช่น ความพรุนและขนาดโพรงช่องว่างเฉลี่ยของคอนกรีต เนื่องจากโครงสร้างโพรงช่องว่างส่งผลต่อความสามารถในการแพร่ของไอออนคลองไรต์

## ผลผลิต (Output)

### ผลงานตีพิมพ์

อัญชณา กิจจานนท์ สุเชียรรัตน์ จิว ทวีชัย สำราญวานิช, การทำนายการแทรกซึมคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตผสมถ้ำลอย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, โรงแรมเดอะชาयน์, ชลบุรี, 8-10 กรกฎาคม 2558.



## บรรณานุกรม

- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, (2543) **ความคงทนของคอนกรีต.** ชุมพล จันทรสม. (2540). การเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต. **วิศวกรรมสาร มข.** ปีที่ 25 ฉบับที่ 2 (ก.ค.-ธ.ค. 2540).
- ทวีชัย สำราญวานิช. (2551). คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล. **วารสารคอนกรีต** ฉบับที่ 4 เดือน สิงหาคม.
- ทวีชัย สำราญวานิช. (2553). การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์. **โยธา สาร วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์**, 22 (3), 79-85.
- นุชจิรา ทำมาตา, ทวีชัย สำราญวานิช, สนธยา ทองอรุณศรี และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. (2556). ผลกระทบของเกลือและผงหินปูนต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 18.**
- ลีนา ปริก และ ทวีชัย สำราญวานิช. (2556). ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18.**
- สุรชาติ ฤกษ์โหรา. (2556). ความต้านทานคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของระบบวัสดุประสานที่ผสมเกลือที่มีปูนขาวอิสระสูง และเกลือจากถ่านหินบิทูมินัส. วิทยานิพนธ์. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต, ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บวร, วสุ วิทยาเขตปลา และ ทวีชัย สำราญวานิช. (2551). ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และการแพร่คลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหินปูน. **9<sup>th</sup> National Grad Research Conference.**
- ASTM C989, Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars.
- ASTM C1556, Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion.
- Ann, K.Y., & Song, H.W. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science** 49 (pp. 4113-4133).

- Chalee, W., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2009). Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. **Marine Structure** 22 (pp. 341-353).
- Chour, S., Sumranwanich, T., & Tangtermsirikul, S. (2013). A model for determining chloride penetration profile in cementitious system. **18<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering**.
- Dhir, R.K., El-Mohr, M.A.K., & Dyer, T.D. (1996). Chloride binding in GGBS concrete. **Cement and Concrete Research** 26 (pp. 1767-1773).
- Florea, M.V.A., & Brouwers, H.J.H. (2014). Modelling of chloride binding related to hydration products in slag-blended cements. **Construction and Building Materials** 64 (pp. 421-430).
- Justnes, H. (1998). A Review of Chloride binding in cementitious system.
- Khatri, R.P., & Sirivivatnanon V. (2004). Characteristic service life for concrete exposed to marine environments. **Cement and Concrete Research** 34 (pp. 745-752).
- 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**.
- Luo, R., Cai, Y.B., Wang, C.Y., & Huang, X.M. (2003). Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. **Cement and Concrete Research** 33 (pp. 1-7).
- 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**. (pp. 519-538).
- Maruya, T., Tangtermsirikul, S., & Matsuoka, Y. (1998). Modelling of chloride ion movement in the surface layer of hardened concrete. **Concrete Library of JSCE** 32 (pp. 69-84).
- 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 (pp. 666-673).
- Moradillo, M.K., Shekarchi, M., & Hoseini, M. (2012). Time-dependent performance of concrete surface coatings in tidal zone of marine environment. **Construction and Building Materials** 30 (pp. 198-205).

- Oh, B.H. & Jang, S.Y. (2007). Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. **Cement and Concrete Research** **37** (pp. 47-53).
- Our, C., Chour, S., & Prak, L. (2012). Resistance to chloride penetration of concrete with repairing materials. **Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University**.
- Pack, S.W., Jung, M.S., Song, H.W., Kim, S.H., & Ann, K.Y. (2010). Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment. **Cement and Concrete Research** **40** (pp. 302-312).
- 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** (pp. 497-507).
- Prak, L. (2014). Chloride resistance of concrete containing ground granulated blast-furnace slag and limestone powder. **Thesis, Civil Engineering, faculty of Engineering, Burapha University**.
- Prak, L., & Sumranwanich, T. (2013). Effect of ground granulated blast-furnace slag and limestone powder on the chloride resistance of concrete. **Proceedings of the 6th ASEAN Civil Engineering Conference / the 6th ASEN Environmental Engineering Conference**.
- Schiessl, P., & Raupach, M. (1990). Influence of concrete composition and microclimate on the critical chloride content in concrete. In: Proc. 3rd Int. Symp. Corrosion of Reinforcement in Concrete. **Wishaw, UK. Elsevier Applied Science** (pp. 49-58).
- Song, H.W., & Kwon, S.J. (2009). Evaluation of chloride penetration in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure. **Cement and Concrete Research** **39** (pp. 814-824).
- Song, H.W., Lee, C.H., & Ann, K.Y. (2008). Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. **Cement and Concrete Composites** **30** (pp. 113-121).
- Song, H.W., & Saraswathy, V. (2006). Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag. **Journal of Hazardous Materials** **B138** (pp. 226-233).

- Sumranwanich, T. (2004). Chloride binding capacity of cement-fly ash paste and simulation of chloride profile in concrete. **Ph.D. Thesis, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University.**
- Sumranwanich, T., & Tangtermsirikul, S. (2002). A chloride binding capacity model for cement-fly ash binder taking into account the time-dependent effect. **8<sup>th</sup> National Civil Engineering Congress.**
- Sumranwanich, T., & Tangtermsirikul, S. (2004). A model for predicting time-dependent chloride binding capacity of cement-fly ash cementitious system. **Materials and Structures 37** (pp. 1047–1055).
- Sumranwanich, T., Tangtermsirikul, S., & Maruya, T. (2004). Prediction of chloride penetration profile in cement-fly ash mortar and concrete. **Fourth International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading**, South Korea.
- Sun, Y.M., Liang, M.T., & Chang, T.P. (2012). Time/depth dependent diffusion and chemical reaction model of chloride transportation in concrete. **Applied Mathematical Modelling 36** (pp. 1114-1122).
- Tamimi, A.K., Abdalla, J.A., & Sakka, Z.A. (2008). Prediction of long-term chloride diffusion of concrete in harsh environment. **Construction and Building Materials 22** (pp. 829-836).
- 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** (pp. 1-10).
- Thomas, M.D.A., & Bamforth, P.B. (1999). Modelling chloride diffusion in concrete, effect of fly ash and slag. **Cement and Concrete Research 29** (pp. 487-495).
- Yodmalai, D. (2011). Durability properties of concrete with crystalline materials. **Thesis, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Thailand.**

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าความคลาดเคลื่อนการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

ตารางที่ ก-1 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสม  
ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

GGBFS	
Researchers	Average of % Error
Prak and Sumranwanich (2013); Prak (2014)	+8.0
Song and Kwon (2009)	+19.7
McPolin et al. (2005)	-4.2

ภาคผนวก ข

ค่าความคลาดเคลื่อนการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก



ตารางที่ ข-1 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุสร้างผลึก

Crystalline material	
Researchers	Average of % Error
Our et al. (2012)	+12.2
Chour et al. (2013)	+14.6
Song and Kwon (2009)	+8.7
McPolin et al. (2005)	-1.9