



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ค่าคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมตะกั่วเตาถลุงเหล็กบดและผง
หินปูน

(Threshold chloride value of concrete containing ground granulated blast-furnace
slag and limestone powder)

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 177146
สัญญาเลขที่ 111/2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ค่าคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผง
หินปูน

(Threshold chloride value of concrete containing ground granulated blast-furnace
slag and limestone powder)

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มีนาคม 2560

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 111/2558

Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 111/2558)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูนต่อค่าคลอไรด์ วิกฤตของคอนกรีต ทำการทดสอบค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตและระยะเวลาการเริ่มเกิด สนิมของเหล็กเสริม ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนแทนที่วัสดุ ประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 20 ถึง 70 อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยผง หินปูนที่ร้อยละ 5 ถึง 15

จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง เหล็กบดมีค่าลดลงแต่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมนานขึ้นเมื่อร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดสูงขึ้น ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และผงหินปูนมีค่าสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ยกเว้นคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อย ละ 50 และผงหินปูนถึงร้อยละ 15 แต่ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานกว่าในคอนกรีต ซีเมนต์ล้วน

Abstract

This research aims to study the effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and limestone powder (LP) on threshold chloride content value of concrete. The threshold chloride content of concrete and depassivation time of steel were also conducted. The water to binder ratios of 0.40 and 0.50 were used. GGBFS and LP were used as cement replacing materials at the ratios of 20% to 70% and 5% to 15%, respectively.

From the experimental results, it was found that the total threshold chloride content decreased and the depassivation times of concrete increased with the increasing of GGBFS content. The total threshold chloride content of concrete with GGBFS and LP was higher than that of cement concrete, except for the concrete containing 50% of GGBFS and LP up to 15%. The depassivation time of concrete with GGBFS and LP was higher than that of cement concrete.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่	
1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
ขอบเขตของการศึกษา	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์	4
แหล่งที่มาและประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต	5
การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์จากภายนอกเข้าสู่เนื้อคอนกรีต	7
กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์	9
ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต	11
วิธีการวัดคลอไรด์และความต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีต	11
ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต	12
การวัดค่าระดับคลอไรด์วิกฤต	15
การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤต	17
ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	18

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

บทที่	หน้า
กระบวนการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็ก	20
องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก	21
ข้อกำหนดสำหรับตะกรันเตาถลุงเหล็ก	21
ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตสด	23
ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	24
ผงหินปูน	27
วัสดุเนื้อที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี	27
วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี	27
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
3 การดำเนินการทดลอง	34
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	34
การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต	37
การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต	37
การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระของคอนกรีต	40
การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีต	43
อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	43
การทดลองหาปริมาณคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีต	44
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	49
การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	49
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	49
4 ผลการทดลองและการอภิปราย	51
ปริมาณคลอไรด์วิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	51
ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต	51

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

บทที่	หน้า
ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม	54
กำลังอัดของคอนกรีต	56
ผลกระทบของอัตราส่วนตะกรันเตากลูงเหล็กบดและผงหินปูนต่อ	
วัสดุประสาน	56
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	60
สรุปคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตากลูงเหล็กและผงหินปูน	62
5 สรุปผล	64
สรุปผล	64
ข้อเสนอแนะ	65

ผลผลิต (Output)

บรรณานุกรม

ภาคผนวก

ประวัตินักวิจัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่รายงานจากนักวิจัยต่างๆ ที่สภาพการทดสอบต่างๆ.....	14
2-2 ดัชนีปฏิกิริยาและคุณสมบัติทางกายภาพของตะกรันเหล็กที่กำหนดใน ASTM C989.....	22
3-1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (GGBFS) และผงหินปูน (LP).....	36
3-2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ Chloride threshold.....	45
4-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูนเมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน.....	63

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต.....	6
2-2 การแพร่ของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต.....	8
2-3 การดึงดูดไอออนเข้าไปในคอนกรีต.....	8
2-4 การดึงดูดแบบคาพิลลารี.....	9
2-5 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์.....	10
2-6 ประเภทของตะกรันเหล็ก.....	19
2-7 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120, 100 และ 80 ตามมาตรฐาน ASTM C 989 ผสมอยู่ร้อยละ 50 เปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน.....	25
2-8 ผลกระทบเนื่องจากปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์.....	26
3-1 ภาพขยาย SEM อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	35
3-2 ภาพขยาย SEM อนุภาคของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด.....	35
3-3 ภาพขยาย SEM อนุภาคของผงหินปูน.....	35
3-4 การชั่งตัวอย่าง.....	37
3-5 การเติมน้ำกลั่นและกรดไนตริกลงในตัวอย่าง.....	37
3-6 การต้มตัวอย่าง.....	38
3-7 การกรองสารละลาย.....	38
3-8 การใช้เครื่อง Auto titration.....	39
3-9 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์.....	39
3-10 การเติมน้ำกลั่นลงในตัวอย่าง.....	40
3-11 การเติมสารละลายกรดไนตริกลงในตัวอย่าง.....	41
3-12 การใช้เครื่อง Auto titration.....	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-13 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์.....	42
3-14 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบระยะเวลาการเกิดสนิม.....	43
3-15 ชุดทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potentials).....	44
3-16 มัลติมิเตอร์ ความละเอียด 0.01 มิลลิโวลต์.....	44
3-17 การเตรียมตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G109.....	46
3-18 การวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell) ของตัวอย่างทดสอบ.....	47
3-19 การวัดศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเหล็กเสริมในตัวอย่างทดสอบ.....	47
3-20 การเก็บตัวอย่างผงปูนเพื่อนำไปหาค่าระดับคลอไรด์วิกฤตที่ระดับความลึกต่าง ๆ.....	48
3-21 การวัดความลึกรูเจาะเก็บตัวอย่างผงปูน.....	48
3-22 ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 ลูกบาศก์เซนติเมตร.....	49
3-23 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีตขนาด 300 ตัน ยี่ห้อ ELE.....	50
4-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีต.....	53
4-2 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	55
4-3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40.....	58
4-4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50.....	59
4-5 การเปรียบเทียบผลกระทบของน้ำต่อกำลังอัดของคอนกรีต.....	60

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและความตื่นตัวในการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน จึงมีความพยายามในการนำวัสดุมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นและควรสนับสนุนอย่างยิ่ง เพราะไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนการผลิตในเรื่องของราคาวัสดุได้ แต่ยังสามารถลดการใช้พลังงานในการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การใช้เชื้อเพลิงในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ได้โดยตรงตามอัตราส่วนที่ถูกแทนที่ ซึ่งจะมีผลในการลดการปล่อยก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ลงได้อีกด้วย เพราะวัสดุทดแทนเหล่านั้น ไม่จำเป็นต้องเผา แต่สามารถผสมกับปูนซีเมนต์ได้เลย วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์แต่ละชนิดจะให้คุณสมบัติที่แตกต่างกันไป อีกทั้งในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก ดังนั้นประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุจากอุตสาหกรรมจากการผลิตเหล็กกล้าและหินย้อยย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ลง นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสีย เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงฝุ่นหินปูนที่เกิดจากอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าและหินย้อย ตามลำดับ และยังช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ และยังยืดระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นวัสดุจากอุตสาหกรรมจากการหลอมเหล็กกล้า ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาซิลิกาของแคลเซียมและอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะหลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยมักใช้ผสมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น

ผงหินปูนหรือผงแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นวัสดุจากอุตสาหกรรมจากการย่อยหินเพื่อผลิตมวลรวมหายาบสำหรับใช้ในการผลิตคอนกรีต ผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย และมีจุดเด่นแตกต่างจากเถ้าลอยอยู่หลายประการ จุดเด่นที่สำคัญคือ ทำให้การก่อตัวของคอนกรีตเร็วขึ้น กำลังในระยะต้นสูงชัน จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมเป็นอย่างยิ่งสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการการก่อตัวเร็ว และเร่งกำลัง ผงหินปูนยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติหลายอย่างของ คอนกรีตได้ เช่น ลดการเยิ้ม น้ำ ลดการหดตัว เพิ่มความต้านทานซัลเฟตและความต้านทานกรด เป็นต้น

ค่าคลอไรด์วิกฤต (Threshold chloride value) หมายถึง ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ระดับผิวเหล็กเสริมที่เพียงพอทำให้เกิดการสูญเสียชั้นฟิล์มต้านทานการเกิดสนิมเฉพาะที่ (Local passive film) และทำให้กระบวนการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปอาจแสดงในเทอมของ อัตราส่วนระหว่างคลอไรด์อิออนต่อไฮดรอกซิลอิออน (Ratio of chloride hydroxyl ions) หรือปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) หรือปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) เทียบเป็นร้อยละ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เป็นต้น

ดังนั้น การประเมินปริมาณคลอไรด์วิกฤตเป็นเรื่องที่สำคัญในการทำนายหาอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญกับเกลือคลอไรด์ ความหมายหนึ่งของอายุการใช้งาน (Service life) อาจหมายถึง ระยะเวลาที่ต้องการในกระบวนการเคลื่อนที่เพื่อเพิ่มระดับเกลือคลอไรด์ที่ระดับความลึกผิวเหล็กเสริมให้มีค่าถึงระดับคลอไรด์วิกฤต งานวิจัยต่างๆ จำนวนมากพยายามมุ่งหาค่าระดับคลอไรด์วิกฤตที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อน แต่ค่าที่วัดออกมาได้พบว่ามีการกระจายตัวค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากวิธีการวัดค่าระดับคลอไรด์วิกฤต วิธีการแสดงผลค่าระดับเกลือคลอไรด์วิกฤต สภาพของรอยต่อระหว่างเหล็กกับคอนกรีต และส่วนผสมคอนกรีต รวมทั้งอิทธิพลของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้นสัมพัทธ์และปริมาณก๊าซออกซิเจนในอากาศ เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาค่าคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน
2. เพื่อศึกษาระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูน

ขอบเขตของการศึกษา

ทำการศึกษาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดตั้งแต่ร้อยละ 30 ถึง 70 อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ทำการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงทำการศึกษาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต โดยดัดแปลงจากวิธีการตามมาตรฐาน ASTM G109 โดยทำการติดตั้งตัวด้านทาน 100 โอห์ม กับเหล็กเสริมด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง ทำการติดตั้ง Plastic dam ด้านบนตัวอย่างสำหรับขังสารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 5.0% โดยใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 400 มิลลิลิตร ทำการจำลองสภาวะเปียกสลับแห้ง ด้วยวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Wet-dry cycle) เท่ากับ 1 วัน : 1 วัน พร้อมวัดการไหลของกระแสไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จนกระทั่งเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า จึงทำการเจาะเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับผิวเหล็กเสริมไปตรวจสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน
2. ทำให้ทราบถึงระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์

ปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (The durability of reinforced concrete structure) เป็นปัญหาที่พบบ่อยในประเทศไทย โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine environment) ที่อาจจะเกิดการเสื่อมสภาพได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน แต่สาเหตุหลักคือ การทำลายโดยเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปในน้ำทะเลจะมีสารละลายเกลือคลอไรด์อยู่เป็นส่วนใหญ่ (มากกว่า 90%) ซึ่งเกลือคลอไรด์เหล่านั้นส่วนใหญ่ได้มาจากเกลือแร่ที่สะสมอยู่ในดิน หิน แล้วเกิดการสึกกร่อนและละลายโดยน้ำฝนไหลลงสู่ทะเล ดังนั้น สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลและต้องเผชิญกับน้ำทะเลโดยตรงคลอไรด์จะแทรกซึมเข้าไปสะสมในคอนกรีตจนถึงบริเวณที่ติดกับเหล็กเสริมจนมีค่าเกินกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) เหล็กเสริมก็จะสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และเริ่มเกิดการผุกร่อนเป็นสนิม และเนื้อสนิมที่เกิดขึ้นจะดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าวได้ ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็ว และมีอายุการใช้งานสั้นกว่าที่ควรจะเป็น

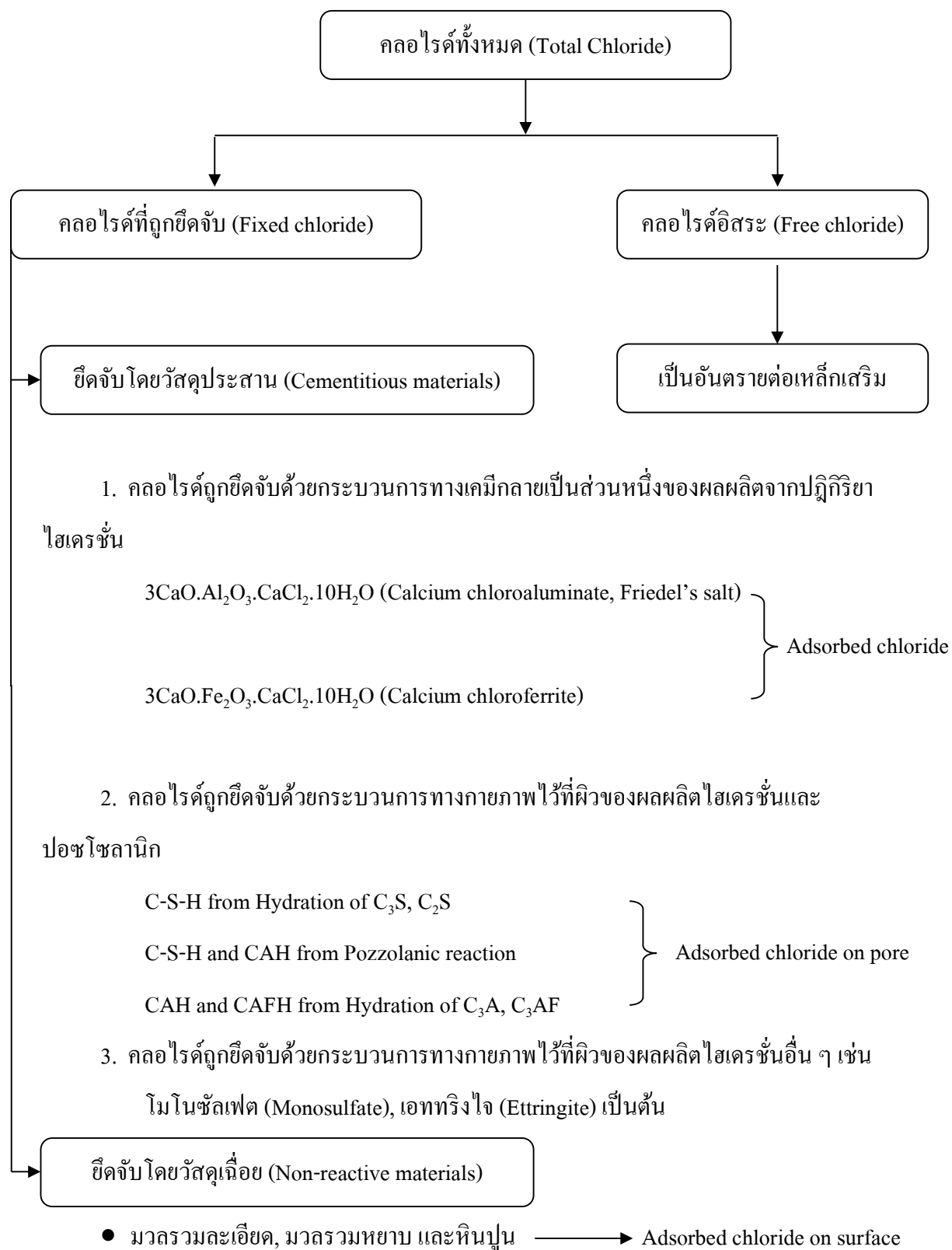
คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) การเกิดสนิมเหล็กจะมีผลเสียดังนี้ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมบริเวณที่เป็นขั้วลบ (ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอน) ลดลง ส่วนเหล็กเสริมบริเวณที่เป็นขั้วบวกจะเป็นสนิมพอกพูนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยสนิมจะขยายตัวเพิ่มปริมาตรถึง 4-6 เท่า และแรงยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตในส่วนนี้จะลดลงด้วย ในที่สุดโครงสร้างคอนกรีตจะแตกออกด้วยการเบ่งตัวของสนิมเหล็ก และเสียความสามารถในการรับกำลังลงไปอย่างมาก ส่วนโครงสร้างคอนกรีตที่จมอยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged zone) หรือโครงสร้างคอนกรีต ที่อยู่ในบริเวณใต้พื้นทะเล (Sea bed zone) จะได้รับความเสียหายจากการทำลายโดยสารละลายซัลเฟตเป็นหลักมากกว่าที่จะเกิดจากสารละลายคลอไรด์ ผลกระทบโดยรวมจากการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์ คือ กำลังรับแรงต่าง ๆ ของคอนกรีตโดยรวมลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

คุณสมบัติทางด้านความต้านทานความล้า (Fatigue) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือการเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย รวมถึงความยืดหยุ่น (Stiffness) ก็ลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่ผลข้างเคียงจากการทำลายโดยกระบวนการดังกล่าวคือ การแตกร้าวของคอนกรีต เป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยเร่งให้น้ำและออกซิเจนสามารถเข้าถึงบริเวณผิวของเหล็กเสริมได้เร็วและมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้น

แหล่งที่มาและประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

เกลือคลอไรด์ (Chloride) อาจมีอยู่ในเนื้อคอนกรีตตั้งแต่แรกเริ่ม โดยมีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ในหินและทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายที่มาจากแหล่งใกล้ทะเล หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น สารเร่งการก่อตัวจำพวกแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เป็นต้น ปัญหาของเกลือคลอไรด์ที่ส่งผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตส่วนมากจะเข้ามาจากภายนอกในช่วงที่ใช้งานโครงสร้างไปแล้ว เช่น มาจากน้ำทะเล มาจากดิน หรือมาจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็ง (De-icing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้ในน้ำทะเลประกอบไปด้วยสารประกอบซัลเฟตและคลอไรด์ของโซเดียมและแมกนีเซียมเป็นส่วนใหญ่ โดยเกลือคลอไรด์ถือเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเล โดยทั่วไปมีปริมาณประมาณ 1.8% โดยน้ำหนักของน้ำทะเล

เกลือคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปอยู่ในเนื้อคอนกรีตทั้งหมดถูกเรียกว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) ซึ่งเป็นผลรวมของเกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride content) และเกลือคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) โดยเกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับหมายถึงเกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยปฏิกิริยาทางเคมีและเปลี่ยนไปเป็นรูปของสารประกอบ Calcium chloroaluminate hydrate (Friedel's salt) และ Calcium chloroferrite หรือถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลึกผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น C-S-H และ C-A-H และบางส่วนอาจถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic products) ด้วย ซึ่งเกลือคลอไรด์ประเภทนี้ไม่มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ส่วนเกลือคลอไรด์อิสระ หมายถึง เกลือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในสารละลายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) ซึ่งเกลือคลอไรด์ประเภทนี้ถ้ามีปริมาณที่มากพอก็จะสามารถทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมขึ้นได้



ภาพที่ 2-1 ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต (ทวีชัย สำราญวานิช, 2553)

การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์จากภายนอกเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีต

การเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์จากภายนอกเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตถือเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับคอนกรีต ซึ่งมีผลต่อความคงทนของคอนกรีตทั้งทางตรงและทางอ้อม และนำไปสู่การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ถูกเรียกว่า การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ (Chloride penetration) ซึ่งเกิดขึ้นจากกลไกต่าง ๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ ประจุไฟฟ้า และแรงดันน้ำ นอกจากนี้ยังอาจเกิดขึ้นจากแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนผ่านด้วย ดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไกหลัก ๆ ดังนี้

1. การแพร่ (Diffusion) กลไกนี้มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์เข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อึดตัว แรงขับเคลื่อนของเกลือคลอไรด์ในกลไกนี้เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ กล่าวคือ เกลือคลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำดังภาพที่ 2-2 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อสองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางและเวลา ดังสมการที่ 2-1

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

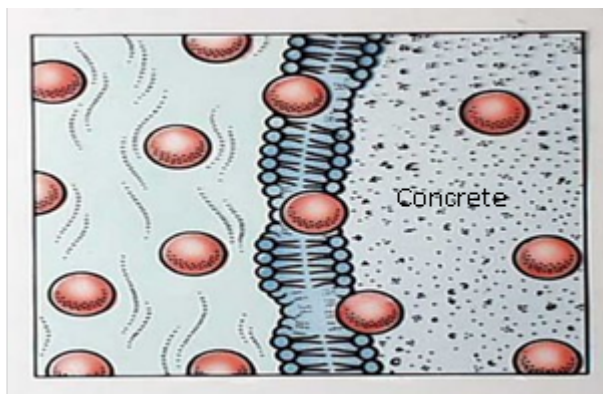
โดยที่ $C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา t (โมล/ ลิตร)

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

D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.²/ ปี)

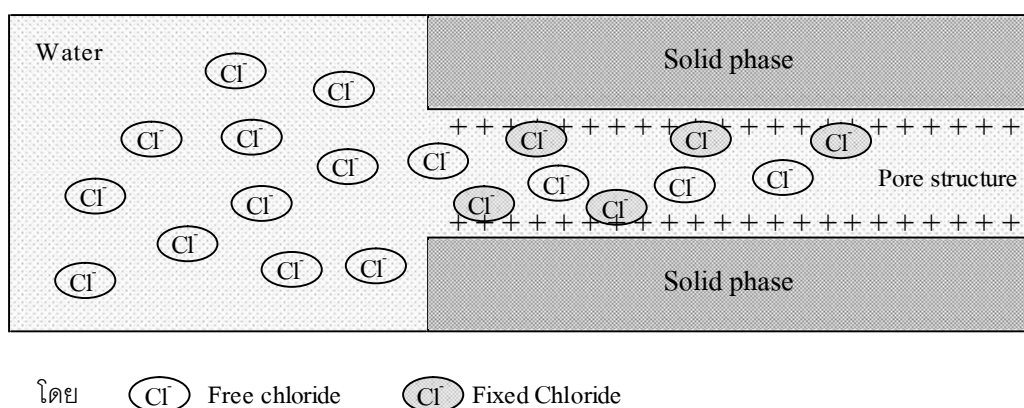
x คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)

t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)



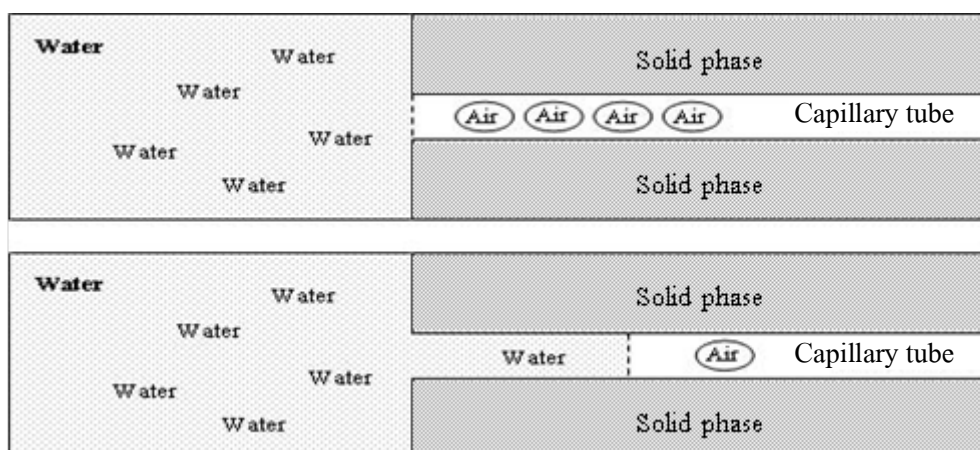
ภาพที่ 2-2 การแพร่ของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต

2. การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) ใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเล ตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารถละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนจะเกิดขึ้น เนื่องจาก โพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผนังของโพรงช่องว่างในคอนกรีตจะดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้นให้สูงขึ้น ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 การดึงดูดไอออนเข้าไปในคอนกรีต

3. การดึงดูดคาพิวลารี (Capillary suction) สามารถดึงน้ำเกลือคลอไรด์ผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตได้ โดยทั่วไปโครงสร้างส่วนมากจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงดูดเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ด้วยกลไกการดึงดูดคาพิวลารีซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและใช้เวลาสั้น ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การดึงดูดแบบคาพิวลารี

4. แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) สำหรับโครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน เชื่อน อุโมงค์ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีเกลือคลอไรด์อยู่ เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยังคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูง ไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำกว่าได้

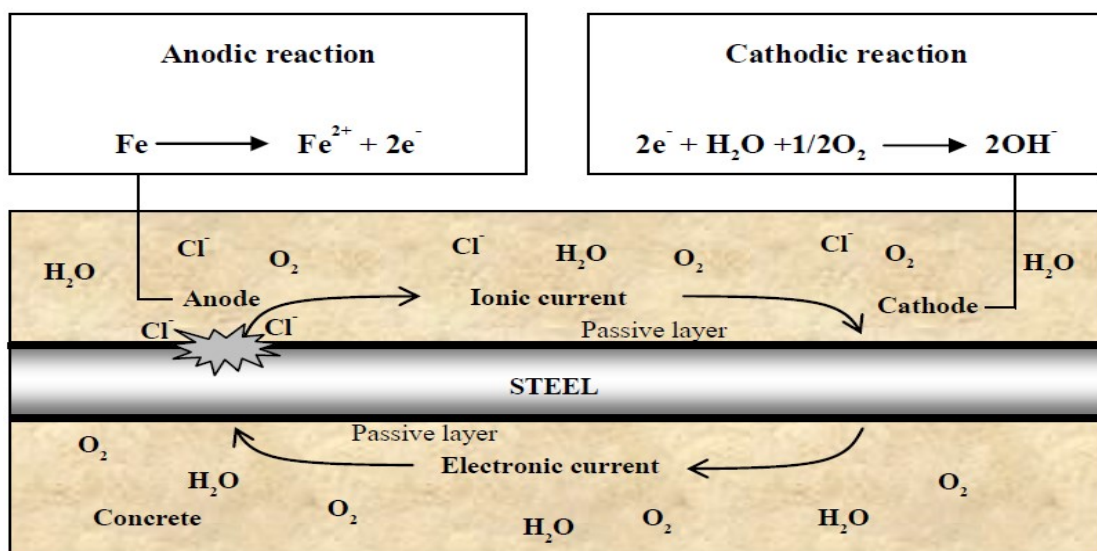
กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์

โดยปกติเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีชั้นฟิล์มออกไซด์ (Protective passivity layer) บาง ๆ เคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กเสริม เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) แต่เมื่อใดก็ตาม หากเกลือคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมและสะสมจนมีปริมาณถึงค่าคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold content) ชั้นฟิล์มออกไซด์นี้จะถูก

ทำลายลง ซึ่งเรียกว่าเกิดการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และหากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจน (O₂) และความชื้น (H₂O) ในปริมาณที่เหมาะสมแล้ว กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมก็จะเกิดขึ้นดังภาพที่ 2-5 ทำให้เกิดสนิมขึ้น โดยปริมาณของเนื้อสนิมที่เกิดขึ้นนี้มีมากกว่าปริมาณเนื้อเหล็กที่สูญเสีย 2-10 เท่า

การเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีตซึ่งทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น มีขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) เชื่อมกัน โดยน้ำซึ่งมีคลอไรด์ในโพรงของซีเมนต์เพสต์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ประจุไฟฟ้า Fe²⁺ ที่ขั้วบวกจะวิ่งไปสู่ขั้วอิเล็กโทรไลต์ และอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบบวิ่งตามเหล็กเสริมไปที่ขั้วบวก อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิด OH⁻ ซึ่งวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ Fe²⁺ ทำให้เกิด Fe(OH)₂ และทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอีกทำให้เกิดสนิมของเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 2-5

ความต่างศักย์เกิดจากการที่คอนกรีตมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น จากความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในสารละลายโพรงช่องว่าง ความแตกต่างของสภาพแวดล้อม และความแตกต่างของความหนาของคอนกรีตหุ้ม เป็นต้น เซลล์ไฟฟ้าของคอนกรีตในลักษณะนี้เซลล์หนึ่งอาจยาว 10 มิลลิเมตร จนถึง 6 เมตร



ภาพที่ 2-5 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์ (ทวีชัย สำราญวานิช, 2553)

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 และระยะเวลาการเผชิญเกลือคลอไรด์ด้วย เป็นต้น หากคอนกรีตชนิดใดมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ได้สูงจะส่งผลดีต่อคอนกรีตในการป้องกันปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์ เนื่องจากจะลดปริมาณคลอไรด์อิสระที่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตให้น้อยลง

วิธีการวัดคลอไรด์และความต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีต

การทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตในระยะความลึกต่าง ๆ นิยมใช้วิธีการวิเคราะห์ทางเคมี โดยต้องเจาะหรือนำเอาคอนกรีตบริเวณที่ต้องการหาปริมาณคลอไรด์ไปบดให้ละเอียดและวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ ซึ่งในการทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์มีสองลักษณะ คือ วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble) ตาม ASTM C1152 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble) ตามมาตรฐาน ASTM C1218 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) โดยหลังจากเตรียมสารละลายเสร็จ สามารถไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตด้วยมือหรือด้วยเครื่อง Potentiometric titration ซึ่งเป็นเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ ที่สามารถคำนวณร้อยละของคลอไรด์ที่เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคอนกรีตได้ดังสมการ

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

เมื่อ V_1 คือ Millilitres ของสารละลาย 0.05N $AgNO_3$ ที่ใช้สำหรับการไทเทรตตัวอย่าง

V_2 คือ Millilitres ของสารละลาย 0.05N $AgNO_3$ ที่ใช้สำหรับการไทเทรต Blank

N คือ Exact normality ของสารละลาย 0.05N $AgNO_3$

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

0.02 คือ น้ำหนักของผงตัวอย่างคอนกรีต (กรัม)

การทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ยังสามารถทำได้โดยใช้วิธีทดสอบแบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) ตาม ASTM C1102 ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ประจุไฟฟ้าให้วิ่งผ่านชิ้นตัวอย่างคอนกรีตระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์ประมาณ 60 โวลต์ ซึ่งปริมาณประจุไฟฟ้า (คูลอมป์) จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการแทรกซึมของคลอไรด์ วิธีนี้สามารถบอกผลได้อย่างรวดเร็วว่าคอนกรีตสามารถต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากน้อยเพียงใด

ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) ของคอนกรีต หมายถึงปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระดับผิวเหล็กเสริมที่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการสูญเสียชั้นฟิล์มต้านทานการเกิดสนิมเฉพาะที่ (Local passive film) และทำให้กระบวนการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปอาจแสดงในเทอมของอัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออน (Ratio of chloride hydroxyl ions) หรือปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) หรือปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) เทียบเป็นร้อยละ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสาน เป็นต้น

มีงานวิจัยจำนวนมากพยายามมุ่งหาปริมาณระดับคลอไรด์วิกฤตที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม แต่ค่าที่วัดออกมาได้พบว่าการกระจายตัวค่อนข้างมาก ดังตารางที่ 2-1 ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากวิธีการวัดค่าระดับคลอไรด์วิกฤต วิธีการแสดงผลค่าระดับเกลือคลอไรด์วิกฤต สภาพของรอยต่อระหว่างเหล็กกับคอนกรีต และส่วนผสมคอนกรีต รวมทั้งอิทธิพลของปัจจัยด้าน

สิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้นสัมพัทธ์และปริมาณก๊าซออกซิเจนในอากาศ เป็นต้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าคอนกรีตแต่ละชนิดจะมีปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่แตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตาม มาตรฐานโครงสร้างคอนกรีตของประเทศญี่ปุ่น (Japan Society of Civil Engineer for standard specifications for concrete structures) ได้กำหนดค่าระดับคลอไรด์วิกฤตไว้ที่ 1.2 กิโลกรัมต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2-1 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่รายงานจากนักวิจัยต่าง ๆ ที่สภาพการทดสอบต่าง ๆ (K.Y. Ann & H-W. Song, 2007)

สภาพการทดสอบ	ปริมาณคลอไรด์วิกฤต			วิธีการหา	อ้างอิง
	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	[Cl ⁻]/[OH ⁻]		
	(% โดยน้ำหนักของซีเมนต์)	(% โดยน้ำหนักของซีเมนต์)			
สารละลายในคอนกรีต (Pore solution)			0.6	ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	Hausmann (1967)
			0.3	โพลาริเซชัน	Gouda (1970)
ตัวอย่างที่ผสมคลอไรด์เข้าไปข้างใน (Internal chloride)			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		
	0.35-1.00	0.14-0.22		Cl ⁻ /OH ⁻ = 0.3	Hussain et al. (1995)
ตัวอย่างที่เผชิญคลอไรด์จากภายนอก (External chloride)	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)
	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 โดยทันที มาโครเซลล์ประกอบด้วยเหล็กขั้วแอโนดและขั้วคาโทดที่ทำจากตาข่ายไทเทเนียม แกรไฟท์หรือเหล็กสแตนเลส ทั้งหมดถูกฝังในคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมไว้ ทั้งนี้การวัดกระแสมาโครเซลล์ไม่ได้ให้ค่าอัตราการผุกร่อนโดยตรง และอาจให้ค่าที่ผิดพลาดได้เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง

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

การวัดอัตราการผุกร่อนด้วยด้วยเทคนิคโพลาไรเซชัน (Polarization technique) หรือวิธี AC impedance เป็นวิธีการที่ให้ข้อมูลที่ถูกต้องที่สุดสำหรับการผุกร่อนของเหล็ก โดยให้ค่าอัตราการผุกร่อนโดยตรง แต่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผุกร่อนและการเริ่มเกิดการผุกร่อนยังไม่ชัดเจน มีความแปรเปลี่ยนค่อนข้างมากซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำของระดับคลอไรด์วิกฤต อัตราการผุกร่อนของเหล็กเสริมเริ่มมีนัยสำคัญเมื่อมีค่าเกินกว่า $1-2 \text{ mA/m}^2$ อีกทั้งความไม่แน่นอนรอบ ๆ

บริเวณที่สูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมด้วย เนื่องจากการผุกร่อนของเหล็กเสริมไม่สามารถสังเกตด้วยตาเปล่า ต้องใช้ระยะเวลาานเพียงพอที่จะเห็นสีออกไซด์ของเหล็กที่เกิดสนิมขึ้น

การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเนื่องจากการผุกร่อนสามารถใช้ในการหาระดับคลอไรด์วิกฤตได้แม้ว่าจะไม่ได้ให้เวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อนก็ตาม การสูญเสียน้ำหนักคำนวณจากผลต่างน้ำหนักแห้งเหล็กก่อนฝังลงในคอนกรีต และเมื่อเวลาผ่านไปช่วงระยะหนึ่งก็กะเทาะคอนกรีตเอาแห้งเหล็กออกมาทำความสะอาดเนื้อสนิมออกไปแล้ววัดน้ำหนักอีกครั้ง วิธีการนี้จะใช้ได้เมื่อการเกิดสนิมเกิดขึ้นไปได้ระยะหนึ่งจนสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่วิธีการนี้ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพสำหรับการวัดการผุกร่อนหลุมลึก (Pitting corrosion) หากมีการสูญเสียน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

1.2 ปริมาณคลอไรด์ (Chloride content)

เมื่อการผุกร่อนเกิดขึ้นแล้วจะต้องทำการวัดปริมาณคลอไรด์หรือการกระจายตัวของคลอไรด์ตามระดับความลึกเพื่อที่จะหาค่าระดับคลอไรด์วิกฤต ในการวัดปริมาณคลอไรด์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ การเก็บตัวอย่าง (Sampling) และการวิเคราะห์ (Analysis)

การเก็บตัวอย่างเกี่ยวข้องกับการเจาะคอนกรีตแล้วเก็บเอาฝุ่นคอนกรีตที่ระดับความลึกจากผิวหน้าต่าง ๆ ซึ่งต้องพยายามให้มีส่วนที่เป็นเนื้อซีเมนต์เพสต์ในแต่ละตัวอย่างเท่า ๆ กันโดยประมาณด้วย โดยเทียบกับเนื้อคอนกรีตนั้น เพราะหากเก็บตัวอย่างที่มีส่วนที่เป็นมวลรวมมาก ๆ อาจทำให้การวิเคราะห์ผลคลาดเคลื่อนได้

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

วิธีการที่ขอมารับกันกว้างขวาง คือ การวัดคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ด้วยการใช้กรดละลายออกมา โดยตั้งสมมติฐานว่าทั้งคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและคลอไรด์อิสระจะละลายออกมาด้วยกรด การวัดคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid soluble) หรือคลอไรด์ทั้งหมดนี้อาจทำได้ด้วยการใช้ขี้ววัดคลอไรด์อออน หรือการไตเตรทซัน

2. การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตสะท้อนให้เห็นถึงปริมาณคลอไรด์อออนที่เป็นอันตราย (Aggressive chloride content) และคุณสมบัติยับยั้งของเนื้อประสานจากซีเมนต์ (Inhibitive properties of cement matrix) คลอไรด์ที่ถูกแยกออกมาจากสารละลายในคอนกรีตด้วยเนื้อประสานส่วนที่เป็นของแข็ง (คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ) จะไม่เคลื่อนที่และไม่สามารถเคลื่อนที่ลึกเข้าไปที่ผิวเหล็กเสริม ดังนั้นตามทฤษฎีแล้วปริมาณคลอไรด์อิสระ (คลอไรด์ที่ละลายในน้ำ) จึงนิยมใช้แสดงในค่าระดับคลอไรด์วิกฤต

2.1 การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ

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

สำหรับการแสดงผลแบบนี้ค่าคลอไรด์ที่ถูกยึดจับถูกสมมติว่าไม่มีผลต่อความเสี่ยงของการผุกร่อนเลย และความเข้มข้นของไฮดรอกซิลอออนบ่งบอกถึงปริมาณสารยับยั้งของสิ่งแวดล้อมด้วยการที่สารละลายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตมีค่า pH สูงมาก งานวิจัยในอดีตจึงใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่อความเข้มข้นของไฮดรอกซิลอออน ($[Cl^-]/[OH^-]$) ในการแสดงค่าของระดับคลอไรด์วิกฤต ทั้งนี้อัตราส่วนของ $[Cl^-]/[OH^-]$ บอกถึง

ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนซึ่งสะท้อนถึงปริมาณสารยับยั้งของสารละลายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต นั่นก็คือ อัตราส่วนของสารที่เป็นอันตรายต่อสารยับยั้งที่ทำให้เกิดการผุกร่อนในสารละลายในโพรงช่องว่าง

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

2.2 การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตด้วยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

การแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตด้วยค่าคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) เป็นวิธีการที่ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุด และถูกใช้ในมาตรฐานต่าง ๆ ด้วยการแสดงค่าระดับคลอไรด์วิกฤตในรูปแบบของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในรูปแบบร้อยละโดยน้ำหนักของซีเมนต์เป็นที่นิยม เพราะว่าง่ายในการคำนวณและครอบคลุมความเสี่ยงของการผุกร่อนของคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและผลการยับยั้งเนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย

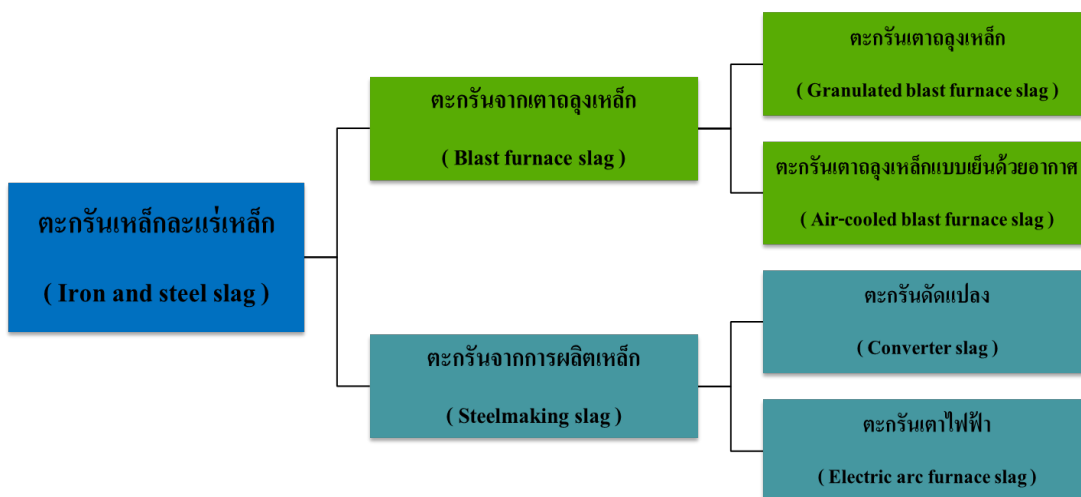
ตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ACI 116 ให้คำจำกัดความของตะกรันเตาถลุงเหล็ก (blast-furnace slag) คือ ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและอื่น ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่หลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็กนอกจากนี้ยังให้คำจำกัดความของเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก (granulated blast-furnace slag) หมายถึง เม็ดวัสดุที่ไม่เป็นผลึกซึ่งได้จากการทำตะกรันที่หลอมเหลวในเตาถลุงเหล็กให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีด เพื่อให้ตะกรันเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว

อย่างไรก็ตาม จากสมาคม NIPPON SLAG (Nippon slag association, n.d.) ได้ให้คำจำกัดความของตะกรันเหล็กว่า เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการถลุงแร่เหล็กและกระบวนการผลิตเหล็ก โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ ตะกรันที่ได้จากเตาถลุงแร่เหล็ก (Blast furnace slag) และ ตะกรันที่ได้จากวิธีการผลิตเหล็ก (Steelmaking slag) ดังแสดงในภาพที่ 2-6

ตะกรันจากเตาถลุงแร่เหล็ก (Blast furnace slag) เป็นตะกรันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการถลุงแร่เหล็ก เมื่อถูกนำออกมาจากเตาหลอมตะกรันยังคงเป็นวัสดุหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1,500 °C ทั้งนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการทำให้ตะกรันเย็นตัวลง ได้แก่ ตะกรันที่ถูกปล่อยให้เย็นตัวในอากาศตามธรรมชาติ (Air-cooled blast furnace slag) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นก้อนผลึกเม็ดใหญ่ และตะกรันที่มีลักษณะเป็นเม็ดไม่เป็นผลึก (Granulated blast furnace slag) ซึ่งเป็นตะกรันที่ได้จากการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในขณะที่นำออกจากเตาหลอมด้วยการฉีดน้ำแรงดันสูง

ส่วนตะกรันจากการผลิตเหล็ก (Steelmaking slag) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตขึ้นเหล็กซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิด ได้แก่ ตะกรันดัดแปลง (Converter slag) เป็นตะกรันที่มีลักษณะเหมือนกับตะกรันถลุงเหล็กแบบเย็นตัวในอากาศ และตะกรันจากเตาไฟฟ้า (Electric arc furnace slag) ซึ่งเกิดขึ้นจากการหลอมเศษเหล็กในเตาหลอมไฟฟ้า



ภาพที่ 2-6 ประเภทของตะกรันเหล็ก (NIPPON SLAG ASSOCIATION, n.d)

การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Granulated blast-furnace slag) เริ่มตั้งแต่ ค.ศ. 1774 โดยใช้ทำมอร์ต้าร์ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับปูนขาวและทราย หลังจากนั้นได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ เรื่อยมา จนในปัจจุบันนี้สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างดี เช่น ในประเทศเยอรมนีได้มีการผลิตปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมปูนขาวขายในปี ค.ศ. 1865 ประเทศฝรั่งเศสใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กในปี ค.ศ. 1889 เพื่อก่อสร้างระบบใต้ดินในกรุงปารีส และในค.ศ. 1981 มีรายงานว่าร้อยละ 20 ของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในทวีปยุโรปเป็นปูนซีเมนต์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมอยู่ ตะกรันเตาถลุงเหล็กนอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้วยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาวอิมตัว (Hydrated lime) ยิปซัม หรือ แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีตมีข้อดี 2 ประการคือ 1) สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และ 2) สามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้ เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นวัสดุที่เกี่ยวข้องกับงานคอนกรีตมาก ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะยังไม่ใช้วัสดุนี้ในงานก่อสร้างก็ตาม แต่ว่ามีตะกรันเตาถลุงเหล็กอยู่ตามโรงงานถลุงเหล็กกรีตซ้าเป็นจำนวนมากและอาจสามารถพัฒนาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ ในปัจจุบันมีการนำตะกรันเตาดังกล่าวมาย่อยให้แตกเป็นชิ้นเล็กขนาดเท่ากับมวลรวมเพื่อถมที่หรือใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีต แต่ปริมาณการใช้ยังน้อยและไม่แพร่หลายเพราะมีปัญหาเรื่องราคาค่าขนส่งและพลังงานในการย่อยหรือบดวัสดุ

1. กระบวนการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ในกระบวนการถลุงเหล็ก โรงงานจะใส่สินแร่เหล็กเข้าในเตาถลุงรวมทั้งใส่สารที่เป็นฟลักซ์ (flux) ซึ่งได้แก่ หินปูนและหินโดโลไมต์ เพื่อลดอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวลงเพื่อประหยัดพลังงาน การเผาจะใช้ถ่านโค้ก (ถ่านโค้ก คือ ถ่านหินที่เผาจนหมดควัน) เป็นเชื้อเพลิงหลังจากเผาจนอุณหภูมิสูงประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์สองอย่างเกิดขึ้นในเตาเผาพร้อมกันคือ เหล็กที่หลอมจนเหลวซึ่งตกอยู่ก้นเตาและตะกรันเหลวซึ่งลอยอยู่บนเนื้อเหล็กเหลว การทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็วช่วยป้องกันการเกิดผลึกในตะกรันเตาถลุงเหล็ก และทำให้

ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นเม็ดที่มีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่า 4.75 มม. จึงเรียกว่าเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast furnace slag) ในทางตรงกันข้ามถ้าปล่อยให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ออกจากเตาเผาเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ จะทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กอยู่ในรูปที่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่และไม่มีคุณสมบัติทางวัสดุประสาน (Air-cooled slag) กระบวนการทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเพื่อไม่ให้ผลึกทำได้โดยการฉีดน้ำที่มีความเร็วสูงไปกระทบกับตะกรันเตาถลุงเหล็กเหลวที่ยังร้อนอยู่ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อตะกรันเตาถลุงเหล็กประมาณ 10 : 1 โดยมวล ซึ่งทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นเม็ดและอยู่ในรูปไม่เป็นผลึกสูงมากภายหลังที่ได้เม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กจึงทำให้แห้งและบดให้ละเอียดโดยใช้วิธีการเดียวกับการบดเม็ดปูนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ในช่วงก่อนและระหว่างการบดเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กจะนำแม่เหล็กมาดูดแร่เหล็กที่ยังติดมาหรือตกค้างอยู่ก่อนเพื่อนำแร่เหล็กกลับไปใช้ใหม่ ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะบดให้ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์เพราะการทำปฏิกิริยาจะเกิดเร็วขึ้นตามความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กเพิ่มขึ้น

2. องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักซึ่งปนมากับสินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูนและหิน โดโลไมต์ องค์ประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่าร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่น ๆ ที่ติดมา เช่น SO_3 , Fe_2O_3 และ MnO อยู่เล็กน้อย ตารางที่ 3-1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกับปูนซีเมนต์ และการที่มีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป) จึงทำให้ถูกมองว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กจะเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ

3. ข้อกำหนดสำหรับตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ASTM C989 ได้กำหนดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 80, 100 และ 120 ซึ่งแต่ละชั้นคุณภาพจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (Slag activity index) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มีชั้นคุณภาพสูงจะให้ค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันสูง โดย ค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-3

$$\text{ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ)} = [\text{SP/P}] \times 100 \quad (2-3)$$

เมื่อ SP = ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมอยู่ร้อยละ 50

P = ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน

ตารางที่ 2-2 ดัชนีปฏิบัติการและคุณสมบัติทางกายภาพของตะกรันเหล็ก (จาก ASTM C989, n.d.)

อายุและชั้นคุณภาพ	ค่าต่ำสุดของดัชนีปฏิบัติการของตะกรันเตาถลุงเหล็ก (%)	
	ค่าเฉลี่ยของผลทดสอบ 5 ตัวอย่างติดต่อกัน	ผลทดสอบแต่ละตัวอย่าง
ดัชนีปฏิบัติการของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่อายุ 7 วัน		
ชั้นคุณภาพ 80	-	-
ชั้นคุณภาพ 100	75	70
ชั้นคุณภาพ 120	95	90
ดัชนีปฏิบัติการของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่อายุ 28 วัน		
ชั้นคุณภาพ 80	75	70
ชั้นคุณภาพ 100	95	90
ชั้นคุณภาพ 120	115	110
ความละเอียดของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ		
	-	20
ปริมาณฟองอากาศของมอร์ตาร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานไม่เกิน		
	-	12

ข้อกำหนดที่ต้องการของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดของแต่ละชั้นคุณภาพที่แบ่งตาม ASTM C989 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-2 นอกจากค่าดัชนีปฏิบัติการของตะกรันแล้ว มาตรฐาน ASTM ยังได้กำหนดคุณสมบัติอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต้องมีปริมาณวัสดุที่ค้างบนตะแกรงขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (No. 325) ไม่เกินร้อยละ 20 ปริมาณฟองอากาศในมอร์ตาร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นวัสดุประสานล้วนไม่เกินร้อยละ 12

ปริมาณของกำมะถันจากซัลไฟด์ (Sulfide sulfur) ไม่เกินร้อยละ 2.5 และปริมาณของซัลเฟต (SO_3) ไม่เกินร้อยละ 4.0 ในกรณีที่น่าตะกรันเตาถลุงเหล็กมาใช้เป็นส่วนผสมหนึ่งของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งตาม ASTM C595 ได้แบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่มีอยู่ในส่วนผสม คือ 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลงด้วยตะกรัน (Slag-modified Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมไม่เกินร้อยละ 25 และแบ่งออกเป็น Type IS ซึ่งใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป Type IS (MS) สำหรับด้านซัลเฟตระดับปานกลาง Type IS (A) สำหรับคอนกรีตที่มีฟองอากาศ และ Type IS (MH) สำหรับคอนกรีตความร้อนปานกลาง 2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Portland blast-furnace slag cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมร้อยละ 25 ถึง 70 ซึ่งยังแบ่งออกเป็น Type I (SM) ที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป Type I (MS) สำหรับด้านทานซัลเฟตระดับปานกลาง Type I (A) สำหรับคอนกรีตที่มีฟองอากาศ, และ Type I (MH) สำหรับคอนกรีตความร้อนปานกลาง 3) ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จะมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมเท่ากับหรือมากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือใช้ร่วมกับปูนขาวเพื่อใช้ในงนก่ออิฐหรือฉาบปูน

4. ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตสด

โดยทั่วไปคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีความสามารถในการเทและเขย่าหรือทำให้แน่นได้ง่ายกว่าคอนกรีตธรรมดา การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะยืดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตออกไปในกรณีที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ เวลาการก่อตัวที่ยืดออกไปจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคอนกรีตปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปเวลาการก่อตัวจะยืดออกไปราว ½ ถึง 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียสเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา การใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อเร่งการก่อตัวของคอนกรีตจะสามารถชดเชยผลกระทบของการก่อตัวที่ยืดออกไปได้ดี การเย็นน้ำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด กล่าวคือถ้าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้การเย็นน้ำลดลง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์การเย็นน้ำของคอนกรีตจะสูงขึ้น อัตราการ

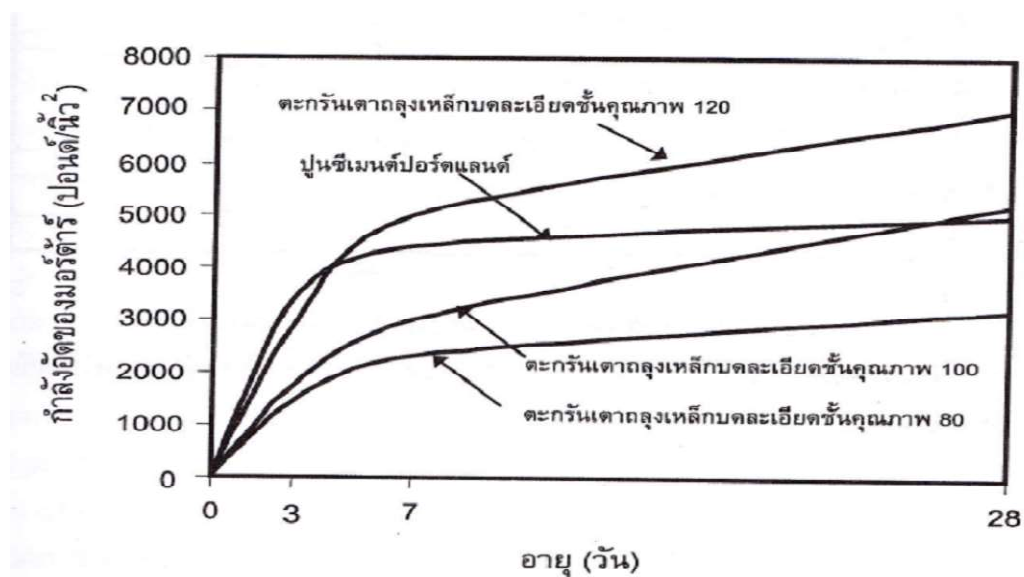
สูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันหรือลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานอย่างเดียว

5. ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

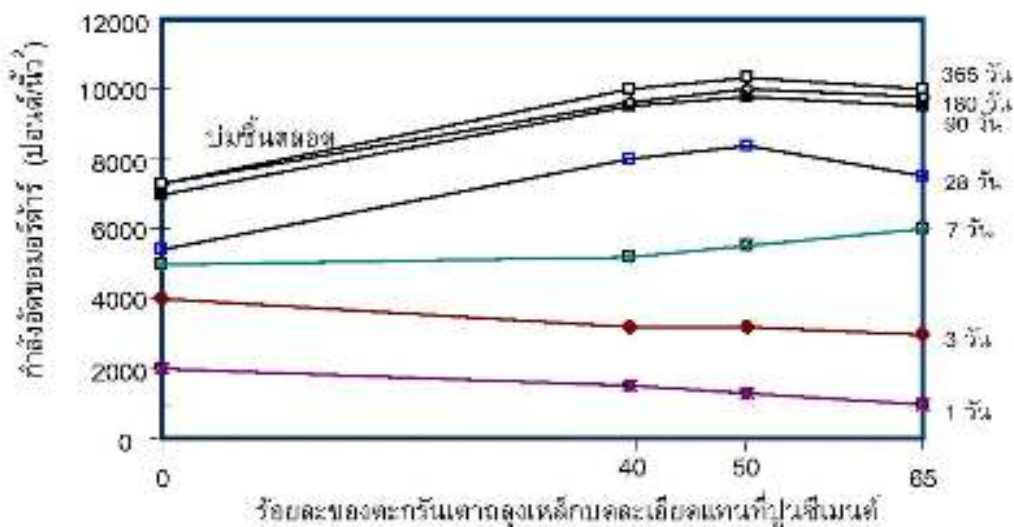
การบ่มคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพเพราะคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กจะมีปัญหาเรื่องการสูญเสียกำลังหากหยุดบ่มภายหลังจากหล่อ 3 วันไปแล้ว ซึ่งจะคล้ายกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 และอัตราการสูญเสียกำลังของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสูงกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป มีแนวโน้มที่จะเสี่ยงอันตรายมากกว่าคอนกรีตธรรมดาในกรณีที่ไม่มีการบ่มที่ดี

การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับชั้นคุณภาพ กล่าวคือ การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120 จะทำให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาเล็กน้อยในช่วงอายุ 1 ถึง 3 วันและให้กำลังอัดสูงกว่าเมื่ออายุเกิน 7 วันไปแล้ว แต่การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 80 และ 100 จะให้กำลังที่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีการบ่ม ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 2-7 และภาพที่ 2-8 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตมีผลต่อกำลังอัดอย่างมาก กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่อายุต่ำกว่า 28 วันจะลดลงเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเพิ่มขึ้น แต่หลังจากอายุ 28 วันการพัฒนากำลังของส่วนผสมที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่สูงจะพัฒนาได้ดีกว่า โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 จะให้กำลังสูงสุด การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์จะช่วยลดอุณหภูมิของคอนกรีตได้ เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมและทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำขึ้นและการซึมผ่านน้ำจะลดลงอย่างมากตามอายุที่เพิ่มขึ้น ยิ่งปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากจะยิ่งลดการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตได้มากขึ้นเพราะโครงสร้างของโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีแนวโน้มที่บ่มน้ำมากกว่ากรณีของซีเมนต์เพสต์ล้วน

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์ และซัลเฟตได้ดี การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ซึ่งมี C_3A ถึงร้อยละ 12 ให้ผลการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตเท่ากับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (C_3A ไม่เกินร้อยละ 5) ซึ่งความสามารถในการต้านทาน การกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเนื่องมาจากคอนกรีตมีการ ซึมผ่านน้ำต่ำ การที่ $Ca(OH)_2$ และอัลคาไลทำปฏิกิริยากับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดได้เป็น C-S-H จึงเหลืออัลคาไลและ $Ca(OH)_2$ น้อยลงในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟต การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาของอัลคาไลซิลิกา แต่ยังคงใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณสูงถึงร้อยละ 40 ถึง 65 ของวัสดุประสานจึง จะสามารถลดปัญหานี้ได้ดี



ภาพที่ 2-7 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120, 100, และ 80 ตามมาตรฐาน ASTM C 989 ผสมอยู่ร้อยละ 50 เปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ มาตรฐาน



ภาพที่ 2-8 ผลกระทบเนื่องจากปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

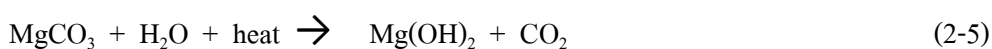
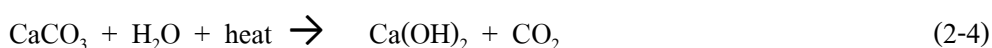
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและการต้านทานสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลักกันของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด พบว่า มีความสามารถเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปแต่การคืบและการหดตัวมีแนวโน้มว่าคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีค่าสูงกว่าของคอนกรีตธรรมดา ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีสีจางกว่าสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังนั้นเมื่อหล่อเป็นคอนกรีตแล้วจึงอาจมีสีออกไปทางเขียวอ่อนได้ นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีของกำมะถันจากซัลไฟด์กับองค์ประกอบอื่น ๆ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปรับปรุงด้วยตะกรันหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก Type IS ถือว่าเป็นปูนซีเมนต์เทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C595 ดังนั้นจึงสามารถใช้กับงานทุกประเภทที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยกเว้นในกรณีที่ต้องการกำลังสูงในช่วงอายุต้นของคอนกรีต นอกจากนี้ยังสามารถใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมกับปูนซีเมนต์ในขณะผสมคอนกรีตก็ได้โดยปริมาณและอัตราส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดขึ้นอยู่กับชนิดของงานคอนกรีตแต่ละงาน

ผงหินปูน

ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูนจะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO₃) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive material) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีจึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้นและยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตและคลอไรด์ได้อีกด้วย ในขณะที่เดียวกันก็อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO₃) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารที่จะทำปฏิกิริยาได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียง และ/ หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2-4 และสมการที่ 2-5



2. วัสดุเฉื่อยที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2-6 ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์



การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูนและวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่าง ๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสานทั้งในซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัยจตุร พิทักษ์กุล (2547) ได้ศึกษาผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยพบว่าการบ่มคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพ เพราะคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะมีปัญหาเรื่องการสูญเสียกำลังหากหยุดบ่มภายหลังจากหล่อ 3 วันไปแล้วจะมีแนวโน้มที่จะเสี่ยงอันตรายมากกว่าคอนกรีตธรรมดาในกรณีที่ไม่มีการบ่มที่ดี

Li and G. Yuan (2012) ได้นำเสนอผลกระทบของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนที่ร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยตัวอย่างคอนกรีตจะถูกให้เผชิญกับอุณหภูมิสูง 6 ระดับแตกต่างกันตั้งแต่ 150 องศาเซลเซียส ถึง 700 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการคำนวณหาการสูญเสียน้ำหนัก ความลึกของคาร์บอนเนชั่น กำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต พบว่า ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กน้อยกว่าร้อยละ 8 ภายใต้อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งคล้ายคลึงกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กในปริมาณที่สูงมากกว่าคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กในปริมาณที่ต่ำ โดยความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กมีค่าประมาณ 2 เท่าของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่หลังจากสัมผัสกับอุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ผลกระทบของอุณหภูมิเหนือ 400

องศาเซลเซียส ต่อกำลังอัดของคอนกรีตยังเห็นได้ชัดเจนมากขึ้น โดยเฉพาะคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาดลูงเหล็ก และหลังจากสัมผัสกับอุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาดลูงเหล็กที่ร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 เท่ากับร้อยละ 60, 62, 44 และ 41 ตามลำดับ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาดลูงเหล็กลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 300 องศาเซลเซียส และชัดเจนมากขึ้นหลังจากสัมผัสกับอุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส โดยความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาดลูงเหล็กเท่ากับร้อยละ 22, 25 และ 27 ตามลำดับ และน้อยกว่าร้อยละ 30 ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

Bagheri, Zanganeh and Moalemi (2012) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลและความคงทนของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมและตะกรันเตาดลูงเหล็กปฏิกิริยาต่ำ โดยใช้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยตะกรันเตาดลูงเหล็กที่ร้อยละ 15, 30 และ 50 คอนกรีตที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 และคอนกรีตที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซิลิกาฟูมร่วมกับตะกรันเตาดลูงเหล็กที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ใช้ตะกรันเตาดลูงเหล็กที่ร้อยละ 15, 30 และ 50 และซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 2.5, 5 และ 7) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ทุกส่วนผสมเท่ากับ 0.38 และ 420 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยตัวอย่างคอนกรีตจะถูกประเมินค่ากำลังอัด ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งตามมาตรฐาน ASTM C1202 (RCPT) และการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ตามมาตรฐานของ AASHTO TP64 (RCMT) ที่อายุ 180 วัน ผลปรากฏว่า การใช้รวมกันระหว่างซิลิกาฟูมกับตะกรันเตาดลูงเหล็กปฏิกิริยาต่ำมีผลกระทบต่ออัตราการพัฒนากำลังอัดช้าเพียงระดับปานกลาง อย่างไรก็ตามมันก็ช่วยเพิ่มความคงทนของคอนกรีตได้อย่างมาก การใช้รวมกันระหว่างตะกรันเตาดลูงเหล็กกับซิลิกาฟูมในสัดส่วนที่เหมาะสมจะทำให้สามารถได้รับค่ากำลังอัดที่ 28 วันที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมและเพิ่มความคงทนของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระยะยาว นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดน้ำที่ต้องการใช้ในส่วนผสมให้น้อยลงด้วย

Chen, Huang, Tang, Malek and Ean (2012) ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากสภาวะการบ่มต่อกำลังอัด ความพรุน และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ทำด้วยซีเมนต์ที่มีปริมาณตะกรันเตาดลูงเหล็กสูง (HBFC) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้เท่ากับ 0.33, 0.34 และ 0.36 โดยมีเงื่อนไขการบ่มในสองสภาวะที่ต่างกัน คือ การแช่

ในน้ำทะเลและการสัมผัสบรรยากาศทะเลเป็นระยะเวลา 4, 7, 28, 90, 180 และ 360 วัน พบว่า สภาวะการบ่มมีผลอย่างเห็นได้ชัดต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล แสดงค่ากำลังอัดสูงกว่าที่อายุต้นเพียงเล็กน้อยแต่ต่ำกว่าค่ากำลังอัดประลัยเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่บ่ม ในอากาศ และในส่วนผสมเดียวกัน HBFC คอนกรีตมีค่าความพรุน MIP ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ OPC คอนกรีต นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของ HBFC คอนกรีตต่ำกว่า OPC คอนกรีตอย่างมาก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า HBFC คอนกรีตมีความต้านทานต่อการแทรกซึม ของไอออนคลอไรด์มากกว่า OPC คอนกรีต

Shoude, Cheng, Lingchao. and Xin (2012) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตะกรันเตา ถลุงเหล็กและผงหินปูนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีส่วนประกอบของแร่ $C_{2.75}B_{1.25}A_3S$ (Alite-calcium barium sulphoaluminate) จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถต้องการน้ำและระยะเวลา การก่อตัวมีค่าลดลงไปพร้อมกับการลดอัตราส่วนของตะกรันเตาถลุงเหล็กต่อผงหินปูน กำลังอัด ของคอนกรีตที่บ่มเป็นระยะเวลา 90 วัน และใช้อัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยตะกรันเตา ถลุงเหล็กและผงหินปูนที่ร้อยละ 30 และ 20 สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ตะกรันเตาถลุงเหล็กและ ผงหินปูนจะช่วยกระตุ้นการคายความร้อนที่ปรากฏให้เห็นในช่วงต้นให้สั้นลง อย่างไรก็ตามการใช้ ตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูนจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ในช่วงอายุต้น ลดลง

Topcu and Boga (2010) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อการ กัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีต โดยใช้คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสม ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก (GGBFS) ที่ร้อยละ 25 และ 50 โดยตัวอย่างคอนกรีตจะถูกทดสอบที่อายุ 28 วัน และ 90 วันหลังจากบ่มในสองสถานะที่แตกต่างกัน สำหรับตัวอย่างคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ใส่เหล็กเสริมจะ ถูกนำไปทดสอบเพื่อหา หน่วยน้ำหนัก (Unit weight test) ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic pulse velocity test) กำลังรับแรงดึง (Splitting tensile strength test) และกำลังรับแรงอัด (Compressive strength test) ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่ใส่เหล็กเสริมจะใช้ในการทดสอบการเร่ง การเกิดสนิม (Accelerated corrosion test) และการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential test) จากผลการทดลองสรุปได้ว่าอายุการบ่มและวิธีการบ่มล้วนมีนัยสำคัญต่อคอนกรีต และ

คอนกรีตให้ความสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมดีที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 25

Bouikni, Swamy and Bali (2009) ได้ศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 50 และ 65 โดยทำการบ่มตัวอย่างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ส่วนผสมของคอนกรีตจะถูกออกแบบโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ มีความสามารถทำงานได้สูง และมีการพัฒนากำลังอัดคล้ายกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุตั้งแต่ 3 วันขึ้นไป ซึ่งพบว่าวิธีการบ่มมีผลกระทบต่อภาระถ่ายตัวของโพรงช่องว่าง โครงสร้างจุลภาคเล็ก ๆ และการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำเป็นเวลา 7 วันก่อนที่จะนำไปเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แห้งจะทำให้ความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคลดลง และจากผลการทดลองก็ยังพบว่า คอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กจะมีโครงสร้างของโพรงช่องว่างที่เล็กกว่าและมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนถึงแม้คอนกรีตต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรงก็ตาม

Ramezani pour, Ghiasvand, Nickseresht, Mahdikhani and Moodi (2009) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณหินปูนต่อกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ การดูดซับน้ำ ความต้านทานไฟฟ้า และการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนที่อายุ 28, 90 และ 180 วัน ใช้เปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงหินปูนที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.37, 0.45 และ 0.55 ใช้ปริมาตรของวัสดุประสานคงที่ที่ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่า คอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนที่ 10% ให้คุณสมบัติที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและส่วนผสมอื่น ๆ นอกจากนี้การใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนจะทำให้ได้รับผลประโยชน์ตอบแทนที่ดีขึ้นทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม โดยการช่วยลดการปล่อยก๊าซ CO₂

Ahmed, Kayali and Anderson (2008) ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต 2 วิธี คือ การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (AASHTO's RCPT) และการทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์ตามมาตรฐานของมหาวิทยาลัยเคปทาวน์ (UCT) โดยส่วนผสมของคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.48 และบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน แก้วลอมและตะกรันเตาถลุงเหล็กถูกนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนที่ร้อยละ 25, 50 และ 70

นอกจากนี้ ซิลิกาฟูมก็ถูกนำมาใช้เพิ่มเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนที่ร้อยละ 10 อีกด้วย ดังนั้นวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้จึงเป็นทั้งการผสมผสานแบบแทนที่วัสดุประสานด้วยวัสดุปอซโซลานอย่างใดอย่างหนึ่ง (Binary) หรือแบบแทนที่วัสดุประสานด้วยวัสดุปอซโซลานสองอย่างรวมกัน (Ternary) ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่ร้อยละ 25 รวมกับซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 10 ค่าประจุไฟฟ้า (Charge passed) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่ร้อยละ 25 เพียงอย่างเดียว ในทำนองเดียวกันค่าประจุไฟฟ้าของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 25 และ 50 รวมกับซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 10 พบว่าค่าประจุไฟฟ้าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละเหมือนกันเพียงอย่างเดียว

Yeau and Kim (2005) ได้ทำการศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 ชนิด (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5) ผสมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulate blast-furnace slag, GGBFS) ในอัตราส่วนตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 55 และทำการประมาณค่าการซึมผ่าน การแพร่ พื้นที่การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ความน่าจะเป็นต่อการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และพื้นที่การกัดกร่อนของเหล็กยังขึ้นอยู่กับความหนาของระยะหุ้มเหล็กและปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ จากผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท 1 ผสมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดสูงชันส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กที่ดีขึ้นตามไปด้วย

Maslehuddin, Sharif, Shameem, Ibrahim and Barry, (2003) ได้ทำการศึกษาเพื่อประเมินคุณสมบัติเชิงกลและลักษณะความทนทานของตะกรันเหล็กเปรียบเทียบกับหินปูนย่อยเมื่อนำมาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีต โดยประสิทธิภาพความทนทานของทั้งตะกรันเหล็กและหินปูนย่อยผสมคอนกรีตถูกประเมินด้วยวิธีการซึมผ่านของน้ำ ความเร็วคลื่น การคงสภาพรูปทรงที่ดี และการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าลักษณะความทนทานของตะกรันเหล็กเมื่อผสมคอนกรีตดีกว่าเมื่อเทียบกับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อย

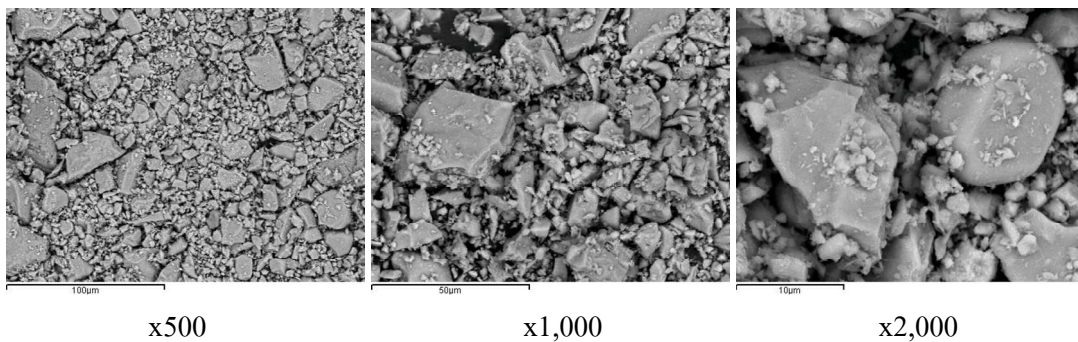
Leng, Feng and Lu (2000) ได้ทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ อีออนคลอไรด์ในคอนกรีตสมรรถนะสูง (HPC) ที่ผสมเถ้าลอย และ/หรือตะกรันเตาถลุงเหล็กโดยใช้สมการของ Nernst-Einstein พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของอีออนคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น และสัมประสิทธิ์การแพร่ของอีออนคลอไรด์มีค่าลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กในปริมาณที่มากขึ้น กว่าที่ได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอีออนคลอไรด์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของวัสดุที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย และคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กมีความต้านทานต่ออีออนคลอไรด์ที่ดี โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอีออนคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กมีค่าต่ำกว่า 10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

บทที่ 3

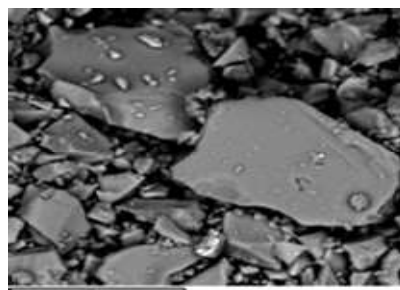
การดำเนินการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ (Cement) ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก. 15-2532 องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์แสดงไว้ในตารางที่ 3-1 และรูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์แสดงในภาพที่ 3-1
2. ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulated blast-furnace slag, GGBFS) คือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาซิลิกาของแคลเซียมและอื่น ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่หลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก องค์ประกอบทางเคมี และทางกายภาพของตะกรันเตาถลุงเหล็กแสดงในตารางที่ 3-1 ลักษณะรูปร่างอนุภาคแสดงในภาพที่ 3-2
3. ผงหินปูน (Limestone powder, LP) องค์ประกอบทางเคมี และทางกายภาพของผงหินปูนดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-1 และรูปร่างอนุภาคของผงหินปูนแสดงในภาพที่ 3-3
4. น้ำ (Water) ที่ใช้ผสมคอนกรีต เป็นน้ำประปาจากห้องปฏิบัติการคอนกรีตภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา
5. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) หมายถึง หินหรือกรวดที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4
6. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) หมายถึง ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร

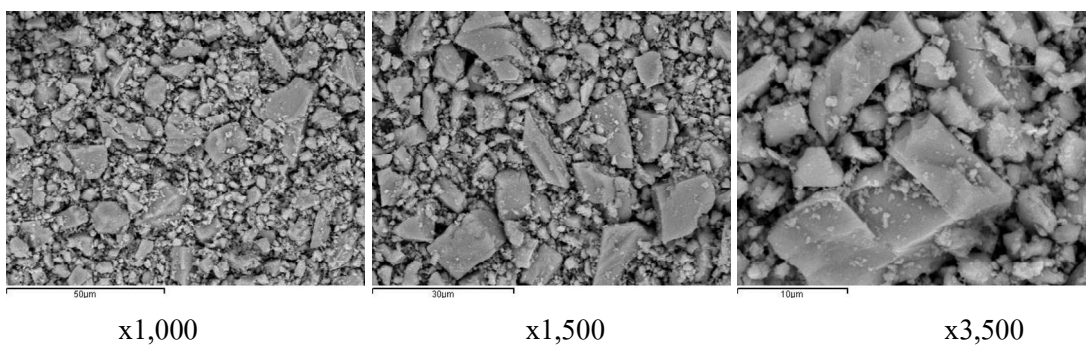


ภาพที่ 3-1 ภาพขยาย SEM อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



x1,000

ภาพที่ 3-2 ภาพขยาย SEM อนุภาคของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด



ภาพที่ 3-3 ภาพขยาย SEM อนุภาคของผงหินปูน

ตารางที่ 3-1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (GGBFS) etailoy และผงหินปูน (LP)

Chemical Compositions (%)	Portland cement type I	GGBFS	LP
Silicon dioxide, SiO ₂	19.51	34.06	2.48
Aluminum oxide, Al ₂ O ₃	4.97	16.27	1.13
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	3.78	1.7	0.38
Calcium oxide, CaO	65.38	36.05	55.13
Magnesium oxide, MgO	1.08	7.38	0.77
Sulfur Trioxide, SO ₃	2.16	2.16	0.03
Sodium oxide, Na ₂ O	0.01	0.21	< 0.01
Potassium oxide, K ₂ O	0.44	1.09	0.05
Titanium Dioxide, TiO ₂	0.27	0.47	0.04
Phosphorus pentoxide P ₂ O ₅	0.07	0.01	0.01
Loss on ignition, LOI	2.27	1.14	39.73
MnO	-	0.28	0.02
Physical properties			
Blaine Fineness (cm ² /g)	3,550	4,600	8,840
Specific gravity	3.15	2.85	2.69

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีต

1. การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) หรือคลอไรด์ที่ละลายด้วยกรด (Acid soluble) ในคอนกรีตสามารถหาได้ตามมาตรฐาน ASTM C1152 และมาตรฐาน C 114 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 นำตัวอย่างคอนกรีตที่บดเป็นผงมาชั่งจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม โดยใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร



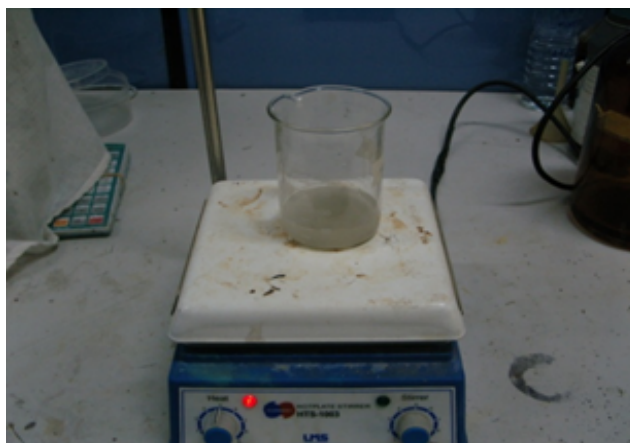
ภาพที่ 3-4 การชั่งตัวอย่าง

1.2 เติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ที่มีผงคอนกรีตไว้แล้วจนถึงขีด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกที่เจือจางในอัตราส่วน 1:1 แล้วลงไป 25 มิลลิลิตร ตามลงไปทันที



ภาพที่ 3-5 การเติมน้ำกลั่นและกรดไนตริกลงในตัวอย่าง

1.3 ให้ความร้อนแก่วีคเกอร์ที่มีตัวอย่างด้วยการต้มให้เดือด อย่าให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (Hot plate) แล้วทิ้งไว้ให้เย็น



ภาพที่ 3-6 การต้มตัวอย่าง

1.4 ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองตัวอย่าง ล้างวีคเกอร์ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย ดังภาพที่ 3-7 ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้นโป่งไปยัง บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่น ทั้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้อง และปริมาตรต้องไม่เกิน 175 มิลลิลิตร



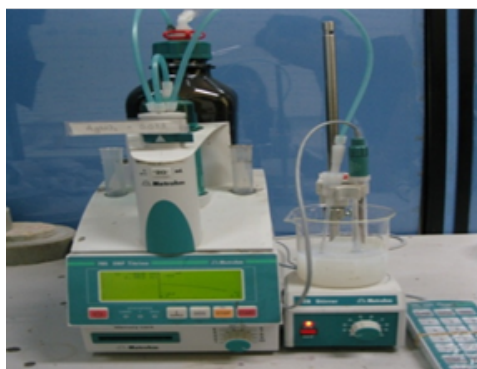
ภาพที่ 3-7 การกรองสารละลาย

1.5 เริ่มทำการทดสอบโดยนำบิกเกอร์สารที่เขียนแล้ววางบิกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไปแช่ Electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ Stirring bar ไปชน Electrode เริ่มการกวนช้า ๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงในหรือ อยู่เหนือสารละลาย ดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 การใช้เครื่อง Auto titration

1.6 เครื่อง Auto titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้และประจุ ดังภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์

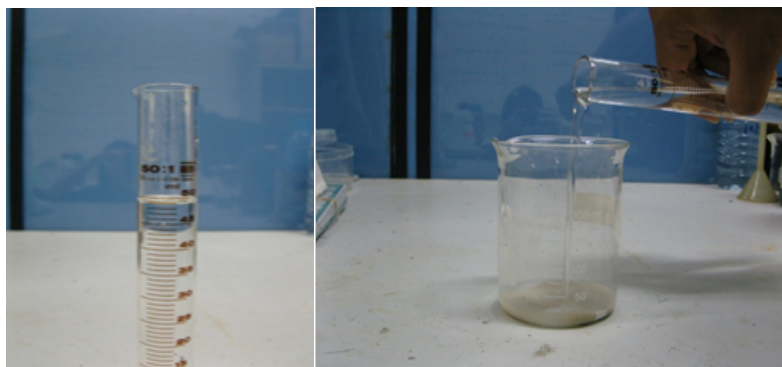
1.7 อ่านและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Auto titration

2. การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระของคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) หรือคลอไรด์ที่ละลายน้ำ (Water soluble) สามารถหาได้ตามมาตรฐาน ASTM C1218 และมาตรฐาน C114 โดยมีรายละเอียดวิธีการทดสอบ ดังนี้

2.1 นำตัวอย่างคอนกรีตที่บดเป็นผงมาชั่งจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม โดยใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 3-4

2.2 เติมน้ำกลั่น (Reagent water meeting specification D 1193) ลงไป 50 มิลลิลิตร



ภาพที่ 3-10 การเติมน้ำกลั่นลงในตัวอย่าง

2.3 นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที ดังภาพที่ 3-6 แล้วปล่อยให้เย็นไว้ 24 ชั่วโมง

2.4 ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 3-7 ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้ว ก้นโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำกลั่น ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 มิลลิลิตร

2.5 เติมสารละลายกรดไนตริกที่ dilute ที่เจือจางด้วยน้ำกลั่นแล้วในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 มิลลิลิตร และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้น 30% ลงไป 3 มิลลิลิตร ลงในสารละลายที่ผ่านการกรอง ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระเบื้องแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1

ถึง 2 นาที ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือด อย่าให้เดือดนานเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (Hot plate)



ภาพที่ 3-11 การเติมสารละลายกรดไนตริกลงในตัวอย่าง

2.6 สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ว วางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แخذ Electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ Stirring bar ไปชน Electrode เริ่มการกวนช้า ๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เติมไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ลงในหรืออยู่เหนือสารละลาย



ภาพที่ 3-12 การใช้เครื่อง Auto titration

2.7 เครื่อง Auto titration จะทำการไทเตรตให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Auto titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) ที่ใช้และประจุ ดังภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 การไทเตรตหาปริมาณคลอไรด์

2.8 อ่านและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Auto titration

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

1. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
 - 1.1 แบบหล่อตัวอย่าง ขนาด 115×150×280 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3-14
 - 1.2 เหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 ชั้นคุณภาพ SD40
 - 1.3 อีพอกซีกันน้ำ สำหรับทาเหล็กเสริมในตัวอย่างทดสอบ
 - 1.4 เทปพันสายไฟ สำหรับพันทับเหล็กเสริมที่เคลือบอีพอกซีในตัวอย่างทดสอบ
 - 1.5 ช่องขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Plastic dam) ขนาด 76×76×150 มิลลิเมตร
 - 1.6 ซิลิโคนสำหรับติดตั้ง Plastic dam เข้ากับตัวอย่างทดสอบ
 - 1.7 ตัวต้านทาน 100 โอห์ม
 - 1.8 ชุดบัคกรีพร้อมตะกั่ว สำหรับติดตั้งตัวต้านทาน
 - 1.9 สายไฟ
 - 1.10 ชุดทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potentials) ดังภาพที่ 3-15
 - 1.11 สารละลาย Copper sulphate
 - 1.12 มัลติมิเตอร์ ความละเอียดในการวัด 0.01 มิลลิโวลต์ ดังภาพที่ 3-16
 - 1.13 สว่านสำหรับขุดผิวหน้าและเจาะตัวอย่าง



ภาพที่ 3-14 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบระยะเวลาการเกิดสนิม



ภาพที่ 3-15 ชุดทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potentials)



ภาพที่ 3-16 มัลติมิเตอร์ ความละเอียด 0.01 มิลลิโวลต์

2. การทดลองหาปริมาณคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีต

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สูง 15 เซนติเมตร กว้าง 11.5 เซนติเมตร และยาว 20 เซนติเมตร โดยผสมคอนกรีตตามส่วนผสมคอนกรีตดังตารางที่ 3-2 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 30, 40, 50 และ 70 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 โดยตัวอย่างจะถูกบ่มน้ำหลังจากที่หล่อครบ 24 ชั่วโมงแล้วเป็นเวลา 28 วัน

ตารางที่ 3-2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ Chloride threshold (Cement content 400 kg/m³)

Mixture code	w/b	Mix proportion of concrete (kg/m ³)					
		Cement	GGBFS	LP	Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
I50		400	-	-	200	747	988
I50SL30		280	120	-	200	743	982
I50SL40		240	160	-	200	742	980
I50SL50		200	200	-	200	740	978
I50SL70		120	280	-	200	736	973
I50SL30LP5	0.50	260	120	20	200	741	980
I50SL30LP10		240	120	40	200	739	976
I50SL30LP15		220	120	60	200	737	975
I50SL50LP5		180	200	20	200	738	976
I50SL50LP10		160	200	40	200	736	973
I50SL50LP15		140	200	60	200	735	971

หมายเหตุ: “I” หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, “GGBFS” หมายถึง ตะกรันเตาถลุง
เหล็กบด, “LP” หมายถึง ผงหินปูน

2.2 การทดสอบระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

หลังจากบ่มตัวอย่างครบอายุที่จะทำการทดสอบแล้ว เราจะนำตัวอย่างมาทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบโดยดัดแปลงมาจากมาตรฐาน ASTM G109 โดยจะทำการติดตั้งตัวต้านทาน 100 โอห์ม กับเหล็กเสริมของตัวอย่าง และทำการติดตั้ง Plastic dam กับตัวอย่างคอนกรีตสำหรับขังสารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 5.0% ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาตร 400 มิลลิลิตร และใช้วัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Wet-dry cycle) เท่ากับ 1 วัน : 1 วัน สำหรับทุกตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 3-17 การเตรียมตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G109

สำหรับเกณฑ์การทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤต ใช้เกณฑ์เมื่อตัวอย่างทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า (Current density) และ ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์อย่างรวดเร็ว จึงนำตัวอย่างมาเจาะเพื่อนำค่าปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก จากผิวหน้าต่าง ๆ โดยทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ASTM C1152) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ASTM C1218) ต่อไป

เมื่อเวลาการทดสอบผ่านไป 24 ชั่วโมง เทสสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ขังไว้บน ตัวอย่างทดสอบออก เริ่มทำการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potentials) และวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ ไหลผ่านเหล็กเสริมในตัวอย่างทดสอบ (ดังภาพที่ 3-18 และภาพที่ 3-19) โดยทำการวัดกระแสไฟฟ้า ครอบตัวต้านทาน 100 โอห์ม และนำค่าที่วัดได้ไปแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่าง ทดสอบ ตามกฎของโอห์ม (Ohm's laws) และคำนวณเป็นประจุไฟฟ้าต่อไป



ภาพที่ 3-18 การวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell) ของตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 3-19 การวัดศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเหล็กเสริมในตัวอย่างทดสอบ

เมื่อตัวอย่างทดสอบถึงเกณฑ์ที่กำหนดจึงนำตัวอย่างมาเจาะเพื่อหาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกจากผิวหน้าต่าง ๆ โดยทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระ



ภาพที่ 3-20 การเก็บตัวอย่างผงปูนเพื่อนำไปหาค่าระดับคลอไรด์วิกฤตที่ระดับความลึกต่าง ๆ



ภาพที่ 3-21 การวัดความลึกที่เจาะเก็บตัวอย่างผงปูน

2.3 การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

ขั้นตอนการหาปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีตทั้งการทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 และการทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่มีขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร ดังแสดง ภาพที่ 3-22 โดยผสมตัวอย่างตามตารางปฏิบัติการส่วนผสมที่แสดงในตารางที่ 3-2 โดยจะทำการถอดแบบหลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำบ่มตัวอย่างไปบ่มในน้ำทันที



ภาพที่ 3-22 ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร

2. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุครบกำหนด (ที่ 28 วัน, 91 วัน และ 182 วัน) นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 ดังนี้

2.1 นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ และปล่อยให้แห้ง

2.2 ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัด ขนาด 300 ตัน ยี่ห้อ ELE ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ดังภาพที่ 3-23

2.3 อ่านและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง



ภาพที่ 3-23 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีตขนาด 30 ตัน ยี่ห้อ ELE

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

ปริมาณคลอไรด์วิกฤต และระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

1. ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต

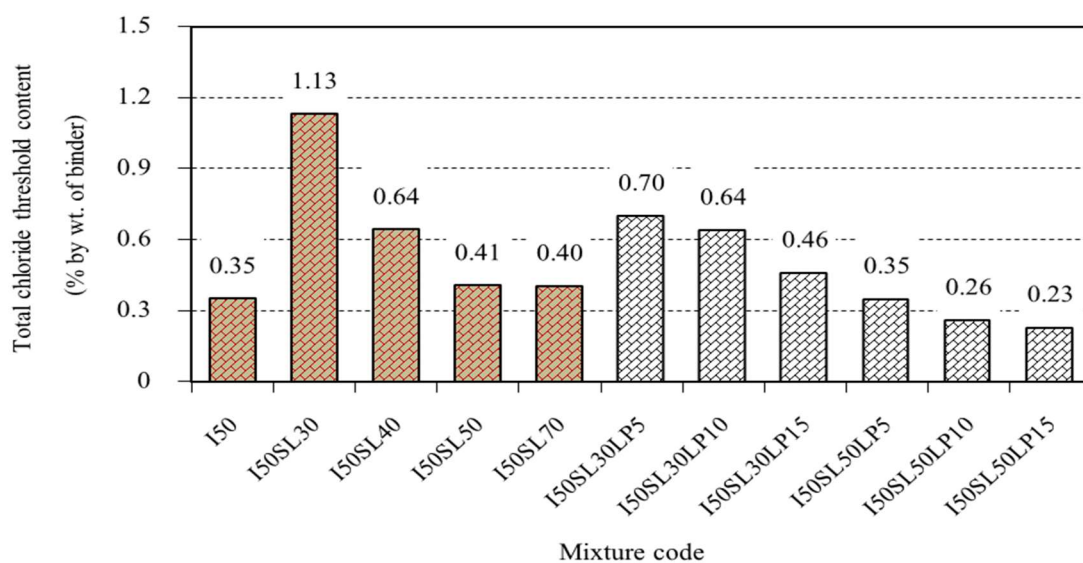
สำหรับค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตในงานวิจัยนี้จะถูกแสดงเป็นค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) ในหน่วยร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (% by weight of binder)

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตแสดงในภาพที่ 4-1 ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (I50) มีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตเท่ากับ 0.35% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ขณะที่คอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยด้วยตระกรันเตาถลุงเหล็กบด (I50SL30, I50SL40, I50SL50 และ I50SL70) ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oh et al. (2003) ที่พบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมตระกรันเตาถลุงเหล็กจะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน โดยปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมตระกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 30 เท่ากับร้อยละ 0.97 ในขณะที่คอนกรีตซีเมนต์ล้วนมีค่าเท่ากับ 0.93% เช่นเดียวกับ Schiessl and Breit (1996) ก็พบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมตระกรันเตาถลุงเหล็กจะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน โดยค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสำหรับคอนกรีตผสมตระกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 50 ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตอยู่ระหว่างร้อยละ 1.00 - 1.50 ในขณะที่คอนกรีตซีเมนต์ล้วนมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.50 - 1.00 การเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตระกรันเตาถลุงเหล็กบางส่วนนั้นอาจเนื่องมาจากคอนกรีตที่ผสมตระกรันเตาถลุงเหล็กสามารถยึดจับคลอไรด์ได้สูงเนื่องจากมีระดับออกซิเดชันที่สูง อย่างไรก็ตามค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตมีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 1.13, 0.64, 0.41 และ 0.40 ตามลำดับ เมื่อใช้ร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยตระกรันเตาถลุงเหล็กในปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30, 40, 50 และ 70 ตามลำดับ ซึ่งอาจเนื่องจากตระกรันเตาถลุงเหล็กบดเมื่อทำปฏิกิริยาปอซ

โซลานิกจะทำให้เกิดสาร CSH เจลเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณไฮดรอกซิลไอออน (OH⁻) ในสารละลายโพรงช่องว่าง (Pore solution) ก็ลดลงอย่างมาก เนื่องจากถูกนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่งผลให้อัตราส่วนของคลอไรด์อิสระต่อไฮดรอกซิลไอออน (Cl⁻/OH⁻) ในคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น (เป็นเหตุทำให้ความสามารถยึดจับคลอไรด์และค่า pH ของคอนกรีตลดต่ำลง) จนถึงระดับที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้ Cheng et al. (2005) กล่าวว่า การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะทำให้ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กจะไปช่วยปรับปรุงการยึดจับทางกายภาพและเคมีของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น แต่จะทำให้ pH ในโพรงของคอนกรีตลดลง โดยค่า pH เท่ากับ 12.8 สำหรับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 40 และ 12.4 สำหรับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 60

พิจารณาคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กพร้อมกับผงหินปูน (I50SL30LP5, I50SL30LP10, I50SL30LP15, I50SL50LP5, I50SL50LP10 และ I50SL50LP15) โดยใช้ร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดคองที่ (ที่ร้อยละ 30 และ 50) และร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเพิ่มขึ้น (เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5, 10 และ 15) ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง โดยเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานคองที่ที่ร้อยละ 30 พบว่า ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตลดลงและต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดอย่างเดียวแต่ก็ยังมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.70, 0.64 และ 0.46 ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานคองที่ที่ร้อยละ 50 ก็พบว่า ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตลดลงและต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดอย่างเดียว (ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตเท่ากับร้อยละ 0.41) และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตเท่ากับร้อยละ 0.35) ยกเว้นส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 50 และ 5 (I50SL50LP5) ที่มีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตที่ร้อยละ 0.35 เท่ากับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน การลดลงของค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของ

คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนอาจเนื่องมาจากผลกระทบของผงหินปูน ซึ่งแม้จะมีความละเอียดที่สูงที่สามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างในคอนกรีต (Filler effect) ทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้นได้แต่ผงหินปูนไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน ดังนั้นเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นก็จะส่งผลทำให้ความสามารถยึดจับคลอไรด์ลดลง เนื่องจากการลดลงของปริมาณวัสดุประสานในคอนกรีต



ภาพที่ 4-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีต

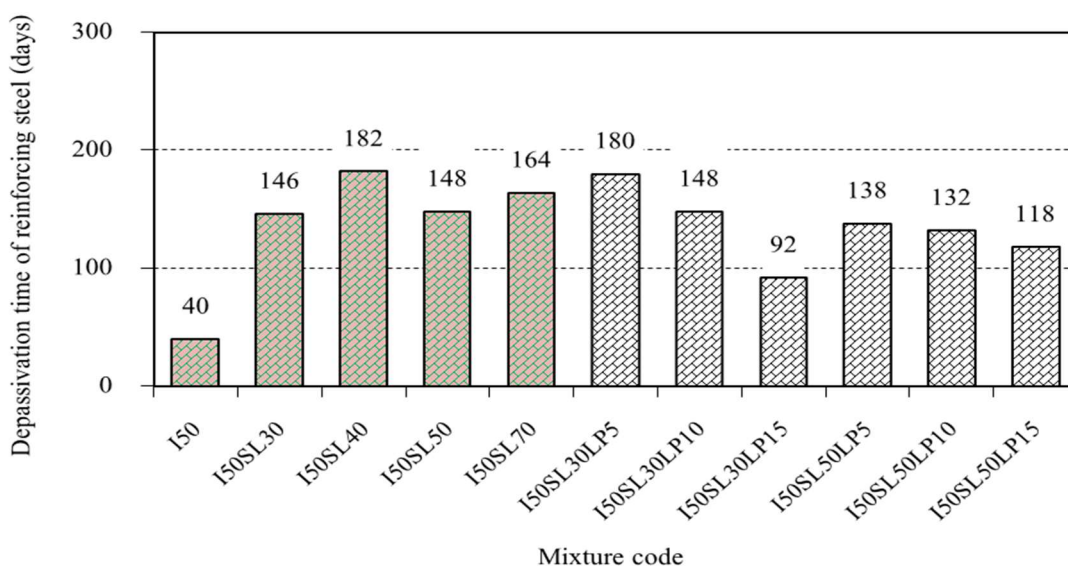
2. ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิม (Depassivation time) ของเหล็กเสริมจะถูกแสดงในหน่วยเป็นวัน เริ่มนับตั้งแต่วันที่ตัวอย่างคอนกรีตเริ่มเผชิญกับสารละลายเกลือคลอไรด์ไปจนถึงวันที่เหล็กเริ่มเกิดการกัดกร่อน

จากภาพที่ 4-2 พิจารณาคอนกรีตที่ผสมตะกั่วเตาถลุงเหล็กบด (I50SL30, I50SL40, I50SL50 และ I50SL70) พบว่า ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียวและมีแนวโน้มมากขึ้น ในขณะที่การใช้ร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกั่วเตาถลุงเหล็กบดเพิ่มมากขึ้น (เพิ่มจากร้อยละ 30, 40, 50 และ 70 ตามลำดับ) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมตะกั่วเตาถลุงเหล็ก โดยทั่วไปเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ที่ช้าลง เนื่องจากโครงสร้างของโพรงช่องว่างที่เล็กลง และความสามารถในการยึดจับคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากตะกั่วเตาถลุงเหล็กบด (Ann et al., 2007) จากการศึกษาพบว่า การแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกั่วเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 40 (I50SL40) มีระยะเวลาการเกิดสนิมนานที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมตะกั่วเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 30 (I50SL30) แม้จะมีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมตะกั่วเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 40 ก็ตาม แต่เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าสูงกว่า ส่งผลให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมเร็วกว่า ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมจึงสั้นลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ตะกั่วเตาถลุงเหล็กบดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตต่อความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสามารถใช้ได้สูงถึงร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เนื่องจากตะกั่วเตาถลุงเหล็กบดนั้นสามารถเพิ่มความสามารถยึดจับคลอไรด์ของคอนกรีตจากปริมาณของ CSH ที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอลิซโซลานิก โดยจากงานวิจัยของ Tang and Nilsson ได้สรุปไว้ว่า ความสามารถยึดจับคลอไรด์นั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ C-S-H ในคอนกรีต ซึ่งวัสดุประสานที่ถูกแทนที่บางส่วนด้วยวัสดุผสมเพิ่ม เช่น ตะกั่วเตาถลุงเหล็กสามารถเสริมสร้างการก่อตัวของ C-S-H เกล็ดให้มากขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับคลอไรด์ที่ออบอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น คลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปได้ช้าลงส่งผลให้ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตเพิ่มขึ้นถึงแม้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตลดลงก็ตาม

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ถูกแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกั่วเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน (I50SL30LP5, I50SL30LP10, I50SL30LP15, I50SL50LP5, I50SL50LP10 และ I50SL50LP15) พบว่า ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ผงหินปูนมากขึ้น

(เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 15) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเพียงอย่างเดียว (ที่ร้อยละ 30 และ 50) และคอนกรีตที่ถูกแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูน ที่อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 30 พบว่า ส่วนผสมที่ใช้ผงหินปูนที่ร้อยละ 5 และ 10 มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมสูงกว่า เนื่องจากผงหินปูนสามารถช่วยลดความพรุนของคอนกรีตลง โดยอนุภาคขนาดเล็กของผงหินปูนทำหน้าที่ช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างในคอนกรีต (Filler effect) ทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น เกิดคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น ส่งผลให้ออกาสที่เกลือคลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปจนถึงบริเวณผิวเหล็กเสริมมากขึ้น แต่ที่อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 30 กลับพบว่า ส่วนผสมที่ใช้ผงหินปูนที่ร้อยละ 5 ถึง 15 มีระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเพียงอย่างเดียว เนื่องจากผงหินปูนไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน ถึงแม้จะช่วยทำให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้นแต่คลอไรด์ยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ และเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นก็จะส่งผลทำให้ความสามารถยึดจับคลอไรด์ลดลง เนื่องจากการลดลงของปริมาณวัสดุประสานในคอนกรีต จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การใช้อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูนในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถยืดระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้



ภาพที่ 4-2 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

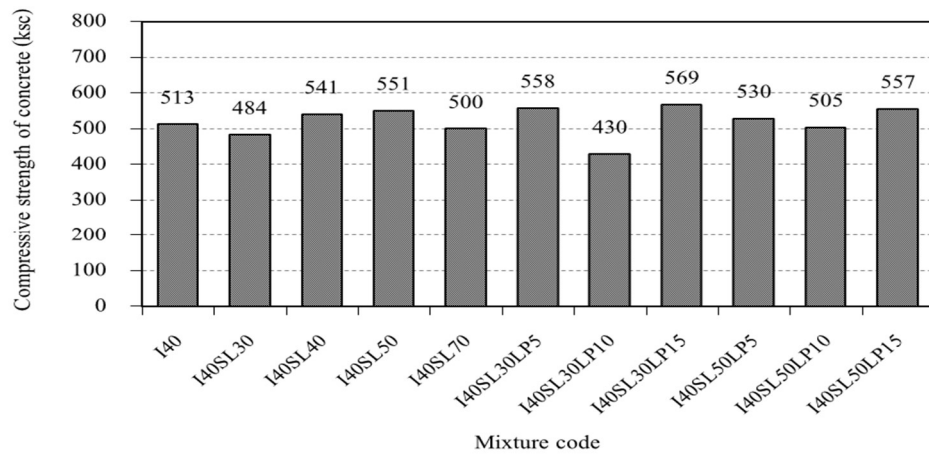
กำลังอัดของคอนกรีต

1. ผลกระทบของอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน และอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

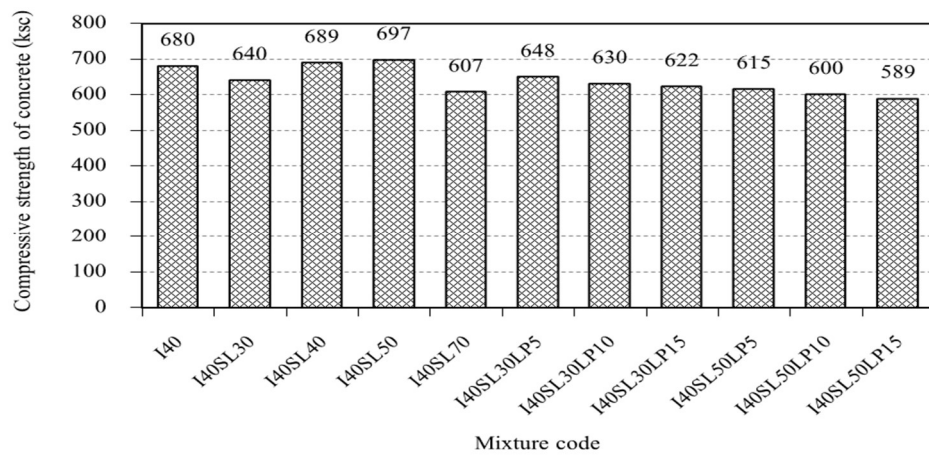
กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูนเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 28 วัน, 91 วัน และ 182 วัน แสดงไว้ในภาพที่ 4-3 และภาพที่ 4-4 ซึ่งเมื่อพิจารณาส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 จากภาพที่ 4-3 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดอย่างเดียวนั้นแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมากขึ้นถึงร้อยละ 50 และกำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 70 คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 50 ให้กำลังอัดสูงสุดทุกอายุการบ่ม กำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่วนคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดรวมกับผงหินปูน พบว่า ที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่ากำลังอัดสูงสุดเมื่อคอนกรีตใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 15 สูงกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดอย่างเดียวก่อน แต่เมื่อเวลาการบ่มนานขึ้น (ที่ 91 วัน และ 182 วัน) พบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นในแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่ร้อยละการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเพิ่มขึ้น โดยที่ 91 วัน คอนกรีตให้กำลังอัดสูงสุดเมื่อใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 5 และที่ 182 วัน คอนกรีตให้กำลังอัดสูงสุดเมื่อใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 10 จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าผงหินปูนมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต โดยสามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นให้ดีขึ้นได้

เมื่อพิจารณาส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จากภาพที่ 4-4 พบว่า ที่ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดอย่างเดียวก่อน และคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดรวมกับผงหินปูนมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนอย่างชัดเจน เนื่องจากการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กซึ่งเป็นสารปอซโซลานที่อายุต้นต้องใช้เวลาในการพัฒนากำลังอัด แต่เมื่อพิจารณาที่อายุ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีกำลังอัดที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่ระยะเวลาการบ่ม 182 วัน กำลังอัดของ

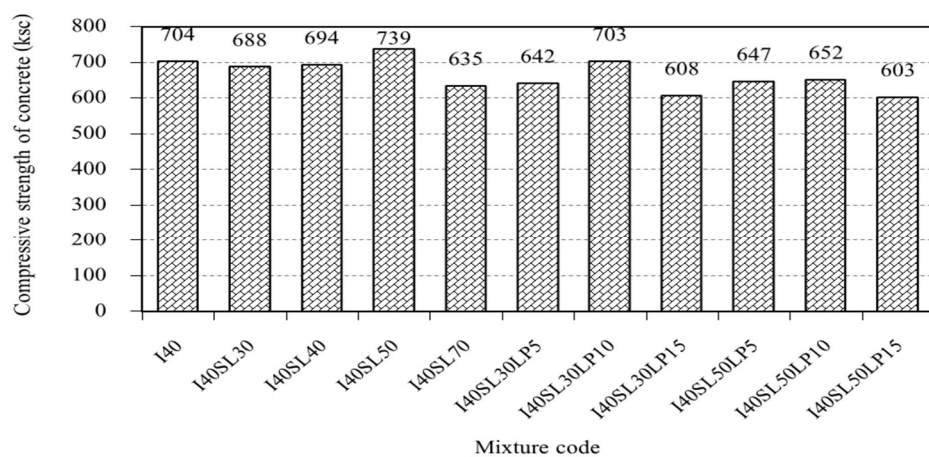
คอนกรีตเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน โดยเฉพาะคอนกรีตที่ใช้ อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 50 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต ซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดอื่นๆ และ เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนร่วมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่อายุ 91 วัน และ 182 วันเช่นกัน พบว่า การใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานในปริมาณที่สูงขึ้น กำลังอัดของ คอนกรีตก็สูงขึ้น เฉพาะเมื่อใช้กับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 30 เท่านั้น



ก. บ่มน้ำที่ 28 วัน

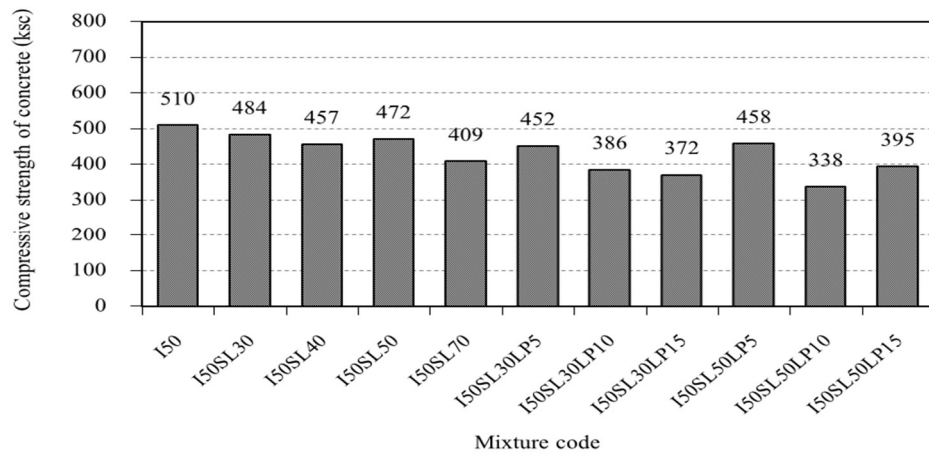


ข. บ่มน้ำที่ 91 วัน

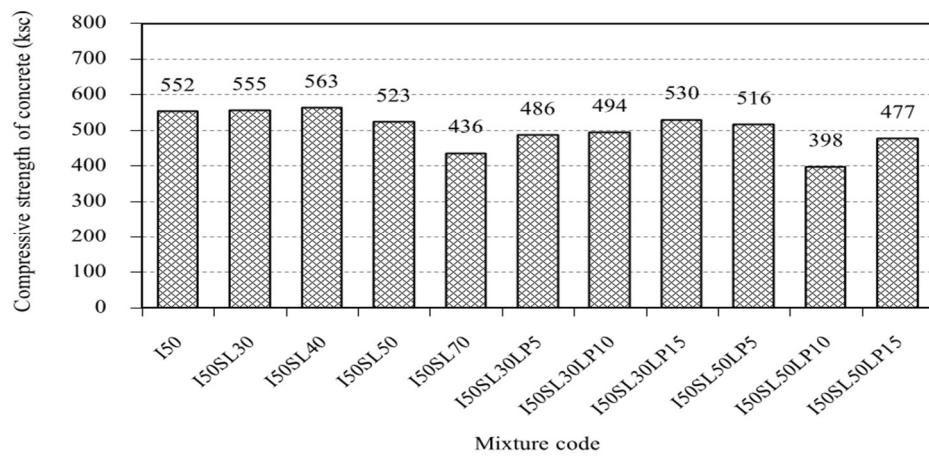


ค. บ่มน้ำที่ 182 วัน

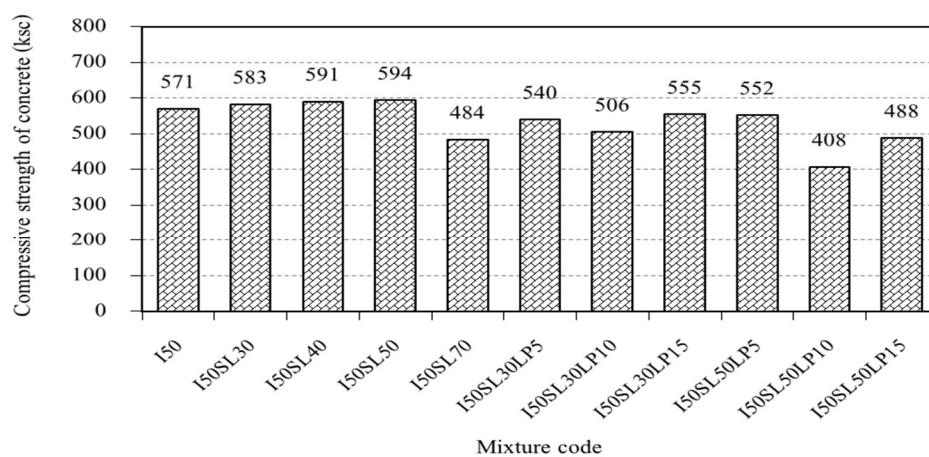
ภาพที่ 4-3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก. บ่มน้ำที่ 28 วัน



ข. บ่มน้ำที่ 91 วัน

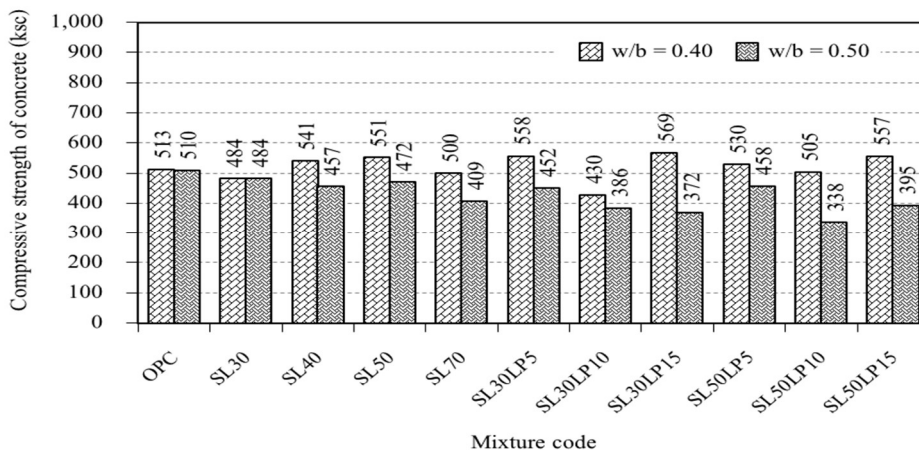


ค. บ่มน้ำที่ 182 วัน

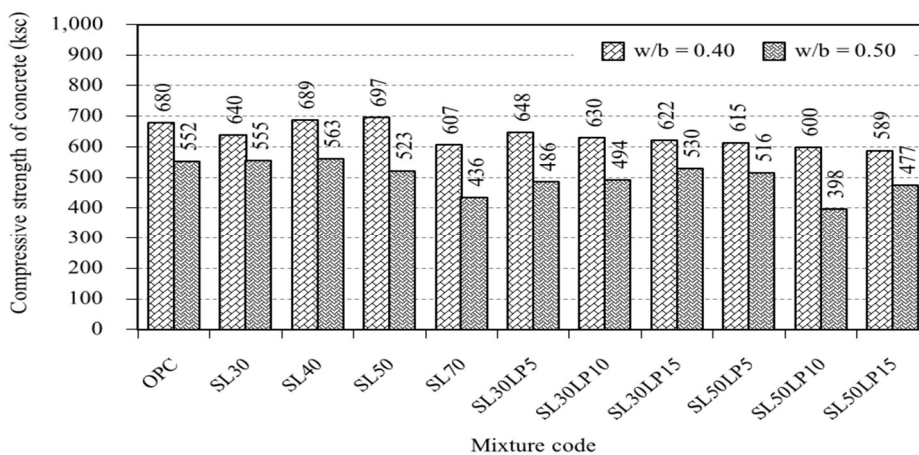
ภาพที่ 4-4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

2. ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

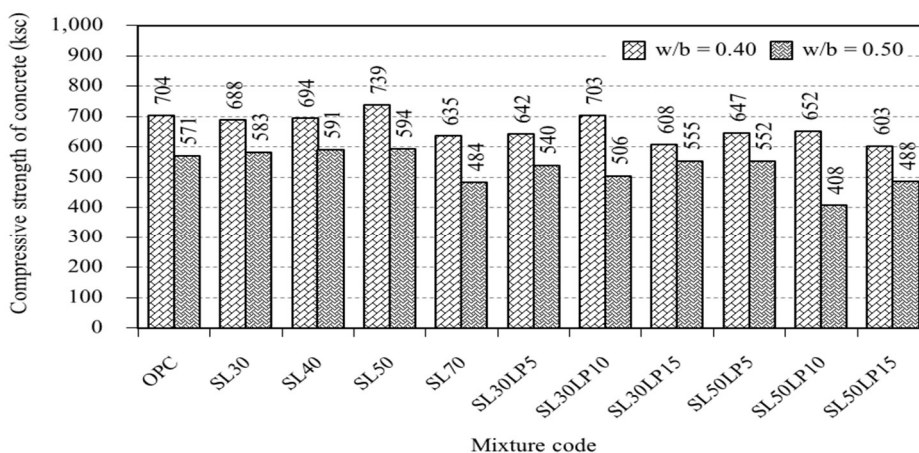
พิจารณาจากภาพที่ 4-5 พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เนื่องจากในส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 นั้นจะมีปริมาณน้ำอิสระมากกว่าส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ส่งผลทำให้เกิดโพรงในคอนกรีตเป็นจำนวนมาก ส่วนคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะมีความทึบและแน่นมากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตจึงสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงผลของอายุการบ่มซึ่งจากภาพที่ 4-2 พบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการบ่มตัวอย่างคอนกรีตนานขึ้น (บ่มน้ำที่ 28 วัน 91 วัน และ 182 วัน) ทุกส่วนผสม และสำหรับส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ยังส่งผลกระทบที่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ถึงแม้จะใช้เวลาในการบ่มที่นานขึ้น ก็ตาม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาปอซโซลานีกระหว่างตะกรันเตาถลุงเหล็กและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลทำให้เนื้อภายในคอนกรีตมีความแน่นและทึบมากยิ่งขึ้น



ก. บ่มน้ำที่ 28 วัน



ข. บ่มน้ำที่ 91 วัน



ค. บ่มน้ำที่ 182 วัน

ภาพที่ 4-5 การเปรียบเทียบผลกระทบบของน้ำตอ่กำลังอัดของคอนกรีต

สรุปคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูน

จากการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน เทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนได้ดังตารางที่ 4-1 ซึ่งแสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยแสดงให้เห็นว่า สำหรับคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดอย่างเดี่ยว และคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 30 รวมกับผงหินปูนถึงร้อยละ 15 จะให้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตสูงกว่าและมีระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่นานกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ส่วนคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 50 รวมกับผงหินปูนถึงร้อยละ 15 นั้นถึงแม้จะมีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตที่ต่ำกว่า แต่ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมยังสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

จากงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดรวมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน (Ternary blended) พบว่า การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 30 รวมกับผงหินปูนถึงร้อยละ 15 มีแนวโน้มให้คุณสมบัติคอนกรีตที่ดีทั้งด้านปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดรวมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานเหมือนกัน แต่ใช้ร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดในปริมาณที่มากขึ้น (ที่ร้อยละ 50) เนื่องจากเมื่อใช้วัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงมาก ยิ่งทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์เหลือน้อยลง ซึ่งอาจจะทำให้มีปริมาณของ Ca(OH)_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่เพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

ตารางที่ 4-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูนเมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

	วัสดุประสาน	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต	ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	แทนที่บางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด	สูงกว่า	นานกว่า
	แทนที่บางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (ที่ร้อยละ 30) และผงหินปูน (ตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึง 15)	สูงกว่า	นานกว่า
	แทนที่บางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (ที่ร้อยละ 50) และผงหินปูน (ตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึง 15)	ต่ำกว่า	นานกว่า

บทที่ 5

สรุปผล

สรุปผล

จากผลการศึกษาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนถึงร้อยละ 15 สูงกว่าค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม ในขณะที่คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ร้อยละ 50 ร่วมกับผงหินปูนถึงร้อยละ 15 มีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 30 ให้ค่าระดับคลอไรด์วิกฤตสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 1.13 อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูนเพิ่มมากขึ้น ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตจะมีค่าลดลง แต่ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดยังคงสูงกว่าของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดในปริมาณที่เท่ากันร่วมกับผงหินปูน

2. ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนนานกว่าระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีแนวโน้มนานขึ้นเมื่อใช้ปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมากขึ้น แต่ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมมีแนวโน้มสั้นลงเมื่อใช้ผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานในปริมาณที่มากขึ้น การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 40 มีระยะเวลาการเกิดสนิมนานที่สุด

3. การใช้ผงหินปูนที่ร้อยละ 5 แทนที่วัสดุประสานในคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตที่สูง และระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ยาวนาน

4. กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดอย่างเดียวนั้นมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 50 และจะลดลงที่ร้อยละ 70 โดยการใส่ตะกรันเตาถลุงเหล็กทดแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและส่วนผสมอื่น ๆ

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและผงหินปูนมีข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไป ดังนี้

1. เนื่องจากทั้งตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูนอาจจะมีแหล่งผลิตและที่มาที่ต่างกันย่อมมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ต่างกันด้วย ดังนั้นควรมีการศึกษาผลกระทบของชนิดตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูนจากแหล่งอื่น ๆ ต่อค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

ผลผลิต (Output)

ผลงานตีพิมพ์

มีแผนเผยแพร่ผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ

บรรณานุกรม

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, (2543) ความคงทนของคอนกรีต.

ทวิชัย สำราญวานิช (2553) การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์ โยธา
สาร วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 22 (3), 79-85.

ทวิชัย สำราญวานิช. (2551). คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 4 เดือน
สิงหาคม.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัยจาดูร พิทักษ์กุล (2547) ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต
สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.) ฉบับปรับปรุงใหม่ครั้งที่ 7 มีนาคม 2555.

ชุมพล จันทรสม (2540). การเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 25 ฉบับที่ 2
(ก.ค.-ธ.ค. 2540).

เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต, ทวิชัย สำราญวานิช, ภัควัฒน์ แสนเจริญ และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล (2552),
“ความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์ที่ผสมแกลลวย ฟูนหินปูน
และสารขยายตัว”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14.

<http://www.slg.jp/e/slag/index.html>

ASTM C876, Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in
concrete. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C989, Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in
Concrete and Mortars.

ASTM C1152. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. Annual
Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2000.

ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist
Chloride Ion Penetration.

ASTM C1218, Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. Annual
Book of ASTM Standards.

ASTM C1556, Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion

ASTM G109, Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments

Ahmed M.S., Kayali O. and Anderson W., “Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods”. **Cement & Concrete Composites**, 30, pp. 576–582, 2008.

Alonsoa C., Andradea C., Castellotea M. and Castro P., “Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar”, **Cement and Concrete Research** 30 (2000) 1047 – 1055.

Ann K.Y. and Song H.W., “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete”, **Corrosion Science**, 2007, 49: 4113-4133.

Angst U., Elsener B., Larsen C.K. and Vennesland Ø., “Critical chloride content in reinforced concrete”, **Cement and Concrete Research** 39 (2009) 1122–1138.

Bouikni A., Swamy R.N. and BaliA., “Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag”. **Construction and Building Materials**, 23, pp. 2836–2845, 2009.

Bagheri A.R., Zanganeh H. and Moalemi M.M., “Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag”. **Cement & Concrete Composites**, 34, pp. 663–670, 2012.

Bouteiller V., Cremona C., Baroghel-Bouny V. and Maloula A., “Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contents and electrochemical characterizations versus time”, **Cement and Concrete Research** 42 (2012) 1456–1467.

- Cheng A., Huang R., Wu J.-K. and Chen C.-H., "Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete", **Materials Chemistry and Physics**, 93 (2005) 404-411.
- Chen H.J., Huang S.S., Tang C.W., Malek M.A. and Ean L.W., "Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag cement concretes". **Construction and Building Materials**, 35, pp. 1063–1070, 2012.
- Dhir R.K., El-Mohr M.A.K. and Dyer T.D., "Chloride binding in GGBS concrete", **Cement and concrete Re-search**, 26 (1996) 1767-1773.
- Feng Q., High-Performance Concrete, Building Industry Press, Beijing, 1996.
- Hussain S.E., "Mechanisms of high durability performance plane and blended cements" PhD Dissertation, Department Civil Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, 1991.
- Hornain H., Marchand J., Duhot V., and Moranville-Regourd M., "Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars", **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, No. 8, pp. 1667-1678, 1995.
- Heikal M., El-Didamony H. and Morsy M.S., "Limestone-filled pozzolanic cement", **Cement and Concrete Research**, Vol. 30, No. 11, pp. 1827–1834, 2000.
- Kumar A. and Roy D.M., "The effect of desiccation on the porosity and pore structure of freeze dried hardened portland cement and slag-blended pastes". **Cement and Concrete Research**, 16, pp. 74– 78, 1986.
- Leng F., Feng N. and Lu X., "An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete". **Cement and Concrete Research**, 30, pp. 989-992, 2000.
- Luo R., Cai Y.B., Wang C.Y. and Huang X.M., "Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete", **Cement and Concrete Research**, 33 (2003) 1-7.

- Li Q., Li Z. and Yuan G., “Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material”. **Construction and Building Materials**, 35, pp. 687–692, 2012.
- Maslehuddin M., Sharif A.M., Shameem M., Ibrahim M. and Barry M.S., “Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes”. **Construction and Building Materials**, 17, pp. 105-112, 2003.
- Naik T.R., Canpolat F., and Chun Y., “Limestone powder use in cement and concrete”. **Cement for by-products utilization**. Department of Civil Engineering and Mechanics, College of Engineering and Applied Science, The university of WISCONSIN – MILWAUKEE, Report No. CBU-2003-31, REP-525, July 2003.
- Oh B.H., Jang S.Y. and Shin Y.S., “Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures” **Magazine of Concrete Research** 55 (2003) 117–124.
- Poulsen S.L., Chloride Threshold Values – State of the art. **Danish Expert Centre for Infrastructure Constructions**, Version 1.0 (December 13, 2012).
- Ramezaniapour A.A., Ghiasvand E., Nickseresht I., Mahdikhani M. and Moodi F., “Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes”. **Cement & Concrete Composites**, 31, pp. 715–720, 2009.
- Schiessl P. and Raupach M., 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**, 1990, 49-58.
- Schiessl P. and Breit W., “Local repair measures at concrete structures damaged by reinforcement corrosion”, **Proceedings of the Fourth International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction**, SCI, Cambridge, (1996) 525–234.

Shoude W., Cheng C., Lingchao L. and Xin C., “Effects of slag and limestone powder on the hydration and hardening process of alite-barium calcium sulphoaluminate cement”.

Construction and Building Materials, 35, pp. 227–231, 2012.

Tang L, Nilson L.-O., “Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars”, **Cem. Concr. Res.** 23 (1993) 247–253.

Topcu I.B. and Boga A.R., “Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete”. **Materials and Design**, 31, pp. 3358–3365, 2010.

Wu X., Xu L., Yang Q. and Huang S., “The diffusion equation of chloride ions in cement mortar”, **Trans Shanghai Build Mater Coll** 4 (4) (1991) 364 - 372.

Yeau K.Y. and Kim E.K., “An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag”. **Cement and Concrete Research**, 35, pp. 1391–1399, 2005.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ตารางที่ ก-1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

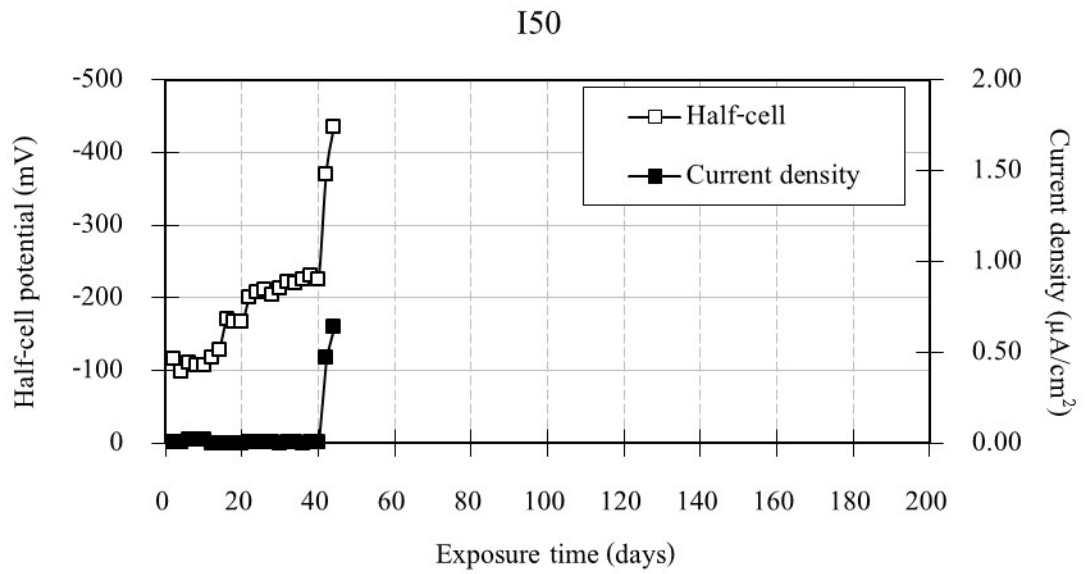
Mixture code	Distance from exposed surface (cm)	Chloride threshold content of concrete				Depassivation time (Days)
		% by wt of concrete		% by wt of binder		
		Total chloride	Free chloride	Total chloride	Free chloride	
I50	0.00	2.22	1.87	12.96	10.92	40
	0.50	0.74	0.67	4.32	3.91	
	1.25	0.17	0.13	0.99	0.76	
	1.75	0.07	0.06	0.41	0.35	
	2.25	0.05	0.03	0.29	0.18	
	2.75	0.02	0.02	0.12	0.12	
	3.50	0.01	0.01	0.06	0.06	
	Chloride threshold	0.06	0.05	0.35	0.26	
I50SL30	0.00	1.87	2.95	10.87	17.15	146
	0.50	0.95	0.84	5.52	4.88	
	1.25	0.36	0.32	2.09	1.86	
	1.75	0.28	0.21	1.63	1.22	
	2.25	0.11	0.09	0.64	0.52	
	2.75	0.13	0.08	0.76	0.47	
	3.50	0.05	0.03	0.29	0.17	
	Chloride threshold	0.20	0.15	1.13	0.87	
I50SL40	0.00	3.53	0.96	20.61	5.60	182
	0.50	0.89	0.88	5.20	5.14	
	1.25	0.37	0.35	2.16	2.04	
	1.75	0.17	0.14	0.99	0.82	
	2.25	0.05	0.04	0.29	0.23	
	2.75	0.01	0.02	0.06	0.12	
	3.50	0.01	0.01	0.06	0.06	
	Chloride threshold	0.11	0.09	0.64	0.53	
I50SL50	0.00	2.35	0.59	13.62	3.42	148
	0.50	1.02	0.98	5.91	5.68	
	1.25	0.28	0.27	1.62	1.56	
	1.75	0.10	0.06	0.58	0.35	
	2.25	0.04	0.05	0.23	0.29	
	2.75	0.04	0.03	0.23	0.17	
	3.50	0.15	0.02	0.87	0.12	
	Chloride threshold	0.07	0.06	0.41	0.32	

ตารางที่ ก-2 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

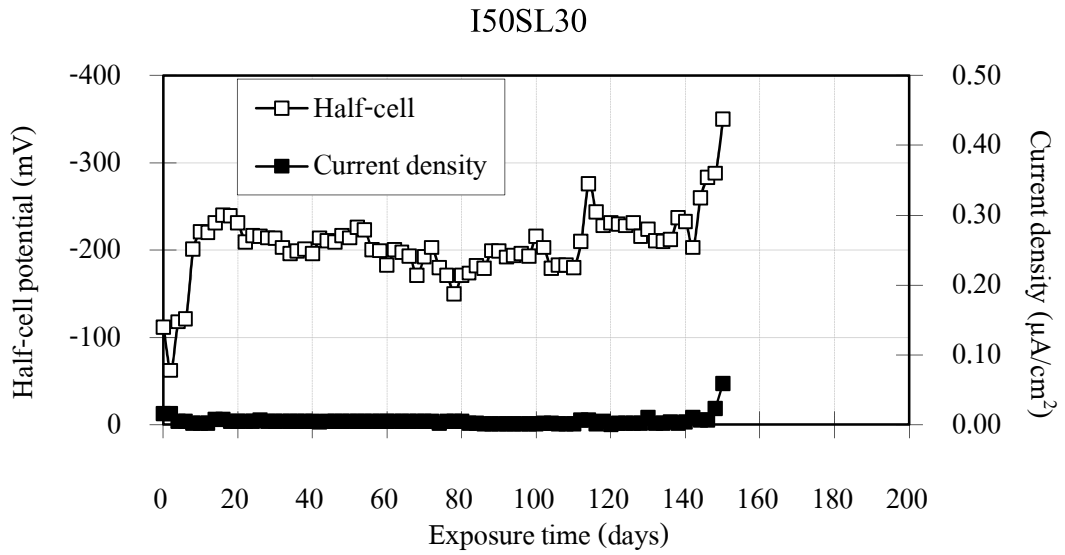
Mixture code	Distance from exposed surface (cm)	Chloride threshold content of concrete				Depassivation time (Days)
		% by wt of concrete		% by wt of binder		
		Total chloride	Free chloride	Total chloride	Free chloride	
150SL70	0.00	1.13	0.71	6.52	4.10	164
	0.50	0.83	0.80	4.79	4.62	
	1.25	0.22	0.19	1.27	1.10	
	1.75	0.09	0.05	0.52	0.29	
	2.25	0.05	0.03	0.29	0.17	
	2.75	0.04	0.02	0.23	0.12	
	3.50	0.03	0.01	0.17	0.06	
Chloride threshold		0.07	0.04	0.40	0.23	
150SL30LP5	0.00	2.83	1.37	16.42	7.95	180
	0.50	1.12	1.02	6.50	5.92	
	1.25	0.50	0.40	2.90	2.32	
	1.75	0.18	0.13	1.04	0.75	
	2.25	0.06	0.05	0.35	0.29	
	2.75	0.03	0.03	0.17	0.17	
	3.50	0.01	0.01	0.06	0.06	
Chloride threshold		0.12	0.09	0.70	0.52	
150SL30LP10	0.00	2.52	1.77	14.58	10.24	148
	0.50	1.04	0.95	6.02	5.50	
	1.25	0.36	0.31	2.08	1.79	
	1.75	0.14	0.13	0.81	0.75	
	2.25	0.08	0.07	0.46	0.41	
	2.75	0.01	0.05	0.06	0.29	
	3.50	0.08	0.02	0.46	0.12	
Chloride threshold		0.11	0.10	0.64	0.58	
150SL30LP15	0.00	0.88	0.90	5.09	5.20	92
	0.50	1.05	1.00	6.07	5.78	
	1.25	0.43	0.35	2.49	2.02	
	1.75	0.09	0.05	0.52	0.29	
	2.25	0.07	0.03	0.40	0.17	
	2.75	0.03	0.02	0.17	0.12	
	3.50	0.05	0.02	0.29	0.12	
Chloride threshold		0.08	0.04	0.46	0.23	

ตารางที่ ก-3 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤตและระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

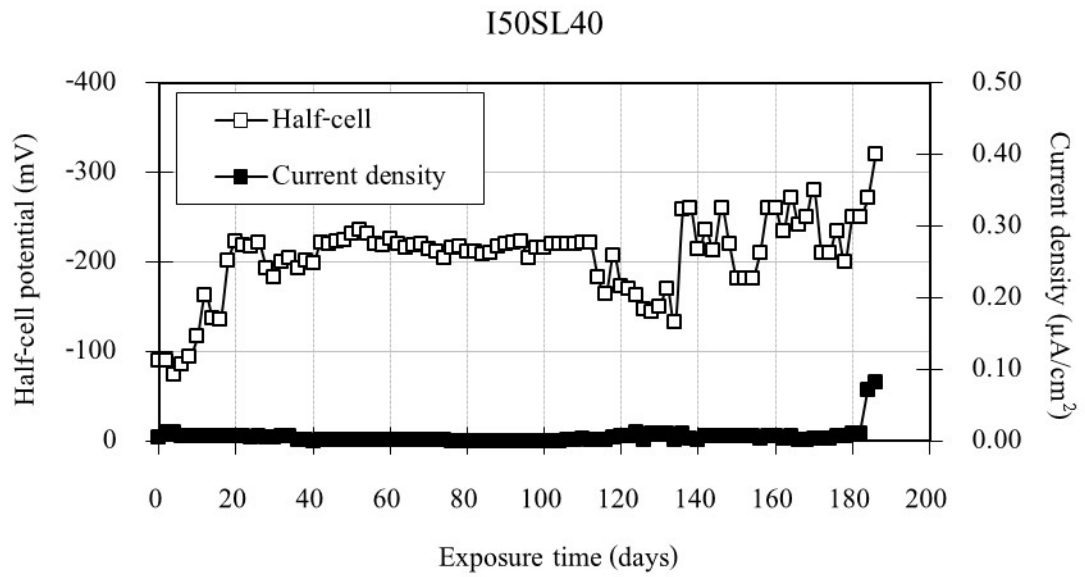
Mixture code	Distance from exposed surface (cm)	Chloride threshold content of concrete				Depassivation time (Days)
		% by wt of concrete		% by wt of binder		
		Total chloride	Free chloride	Total chloride	Free chloride	
150SL50LP5	0.00	2.44	2.43	14.07	14.01	138
	0.50	0.95	0.91	5.48	5.25	
	1.25	0.21	0.18	1.21	1.04	
	1.75	0.08	0.07	0.46	0.40	
	2.25	0.04	0.05	0.23	0.29	
	2.75	0.04	0.03	0.23	0.17	
	3.50	0.06	0.06	0.35	0.35	
Chloride threshold		0.06	0.06	0.35	0.35	
150SL50LP10	0.00	1.71	0.99	9.89	5.73	132
	0.50	1.09	1.01	6.31	5.84	
	1.25	0.03	0.15	0.17	0.87	
	1.75	0.05	0.03	0.29	0.17	
	2.25	0.04	0.03	0.23	0.17	
	2.75	0.07	0.05	0.40	0.29	
	3.50	0.01	0.02	0.06	0.12	
Chloride threshold		0.05	0.03	0.26	0.17	
150SL50LP15	0.00	1.07	0.98	6.18	5.66	118
	0.50	0.27	0.16	1.56	0.92	
	1.25	0.11	0.09	0.63	0.52	
	1.75	0.06	0.06	0.35	0.35	
	2.25	0.02	0.01	0.12	0.06	
	2.75	0.02	0.01	0.12	0.06	
	3.50	0.01	0.01	0.06	0.06	
Chloride threshold		0.04	0.04	0.23	0.20	



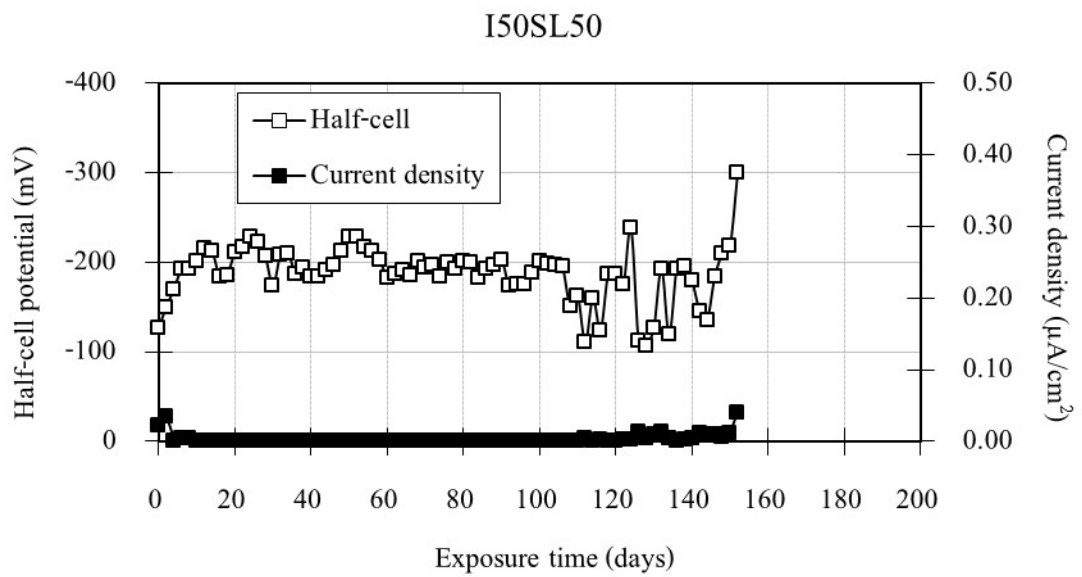
ภาพที่ ก-1 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน



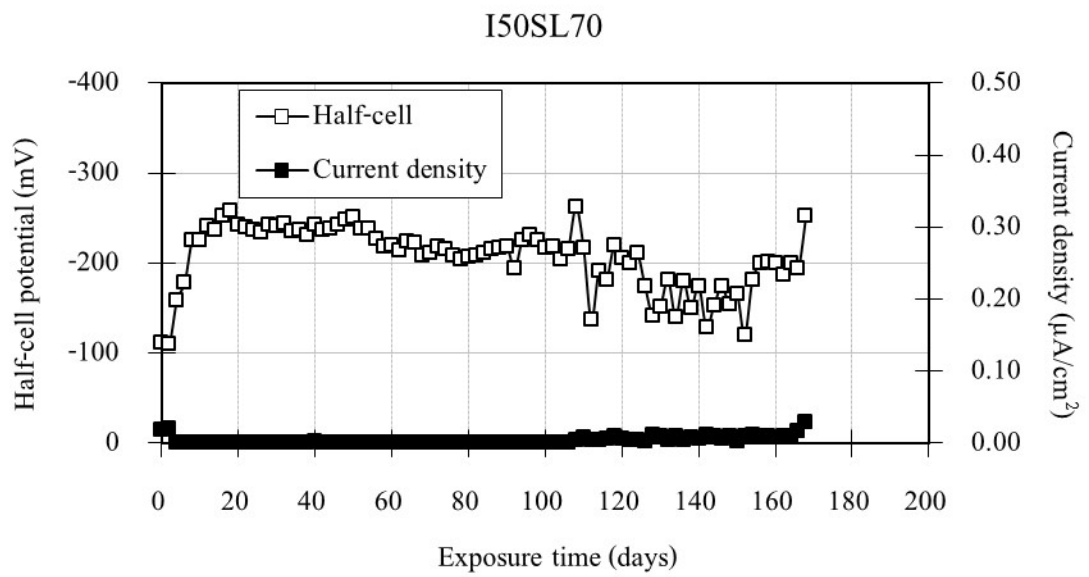
ภาพที่ ก-2 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 30



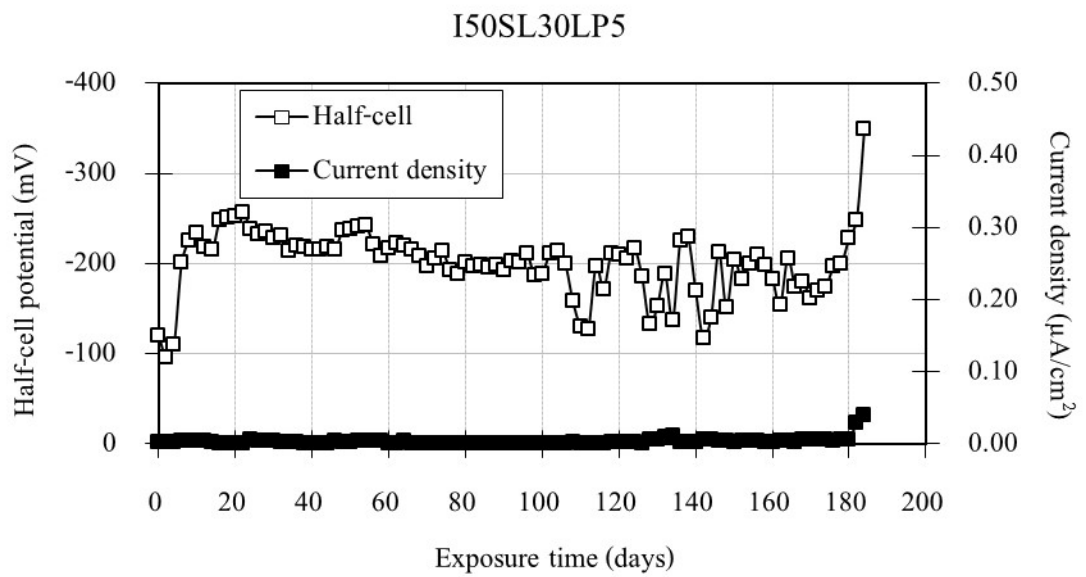
ภาพที่ ก-3 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 40



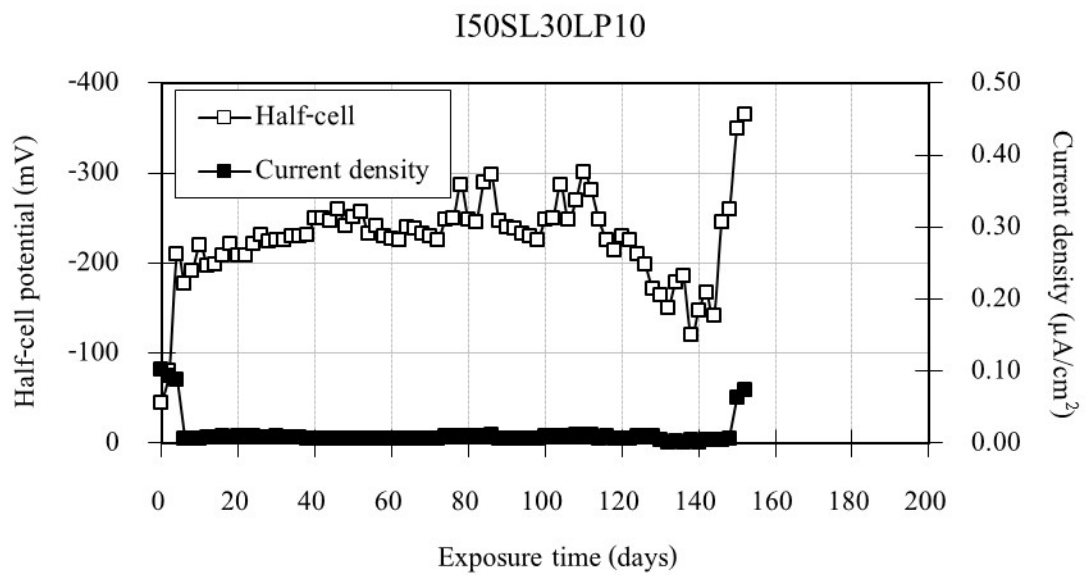
ภาพที่ ก-4 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 50



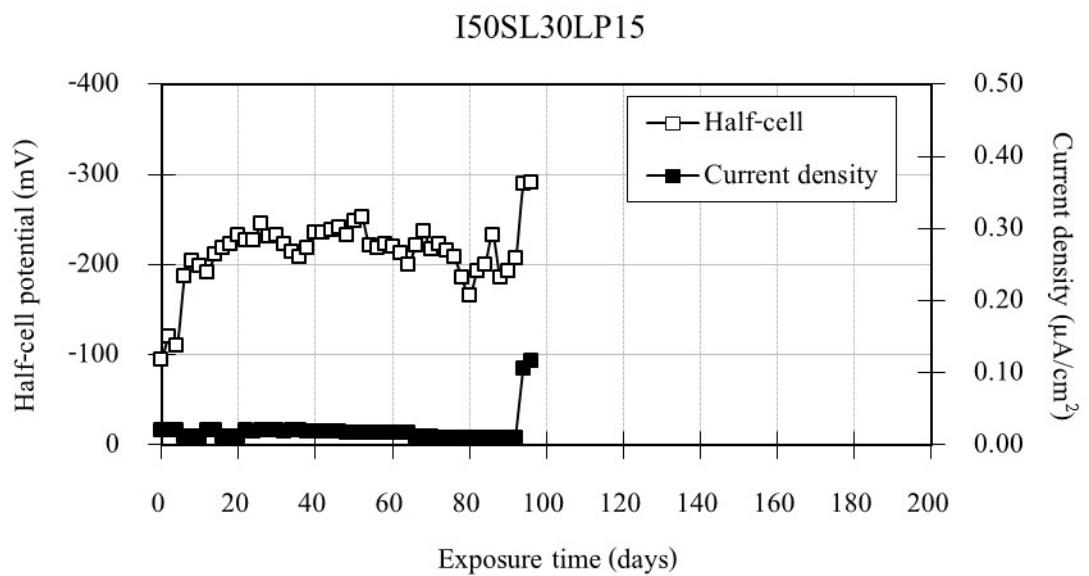
ภาพที่ ก-5 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 70



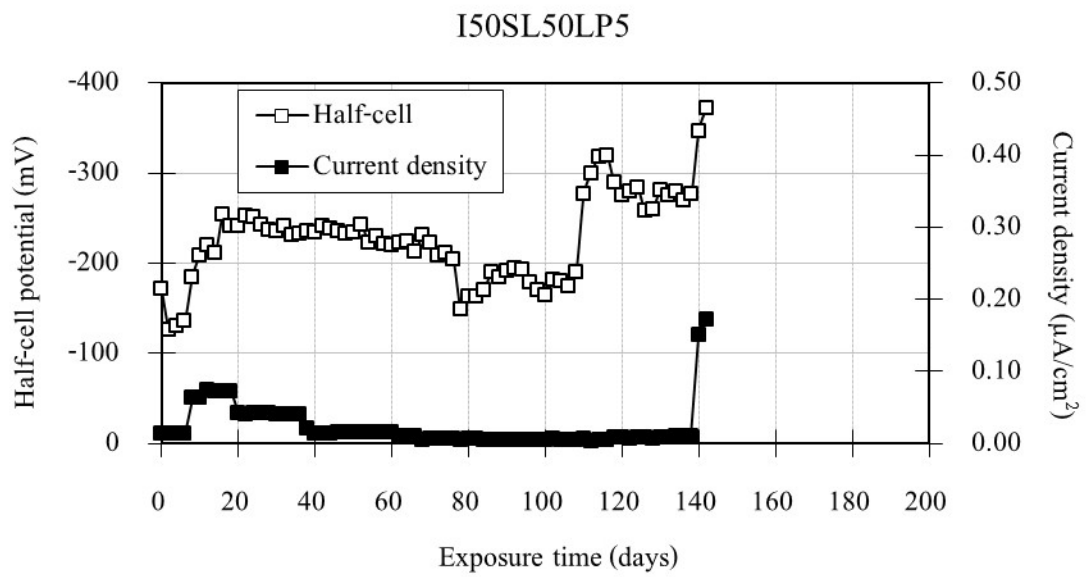
ภาพที่ ก-6 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 30 และผงหินปูนที่ร้อยละ 5



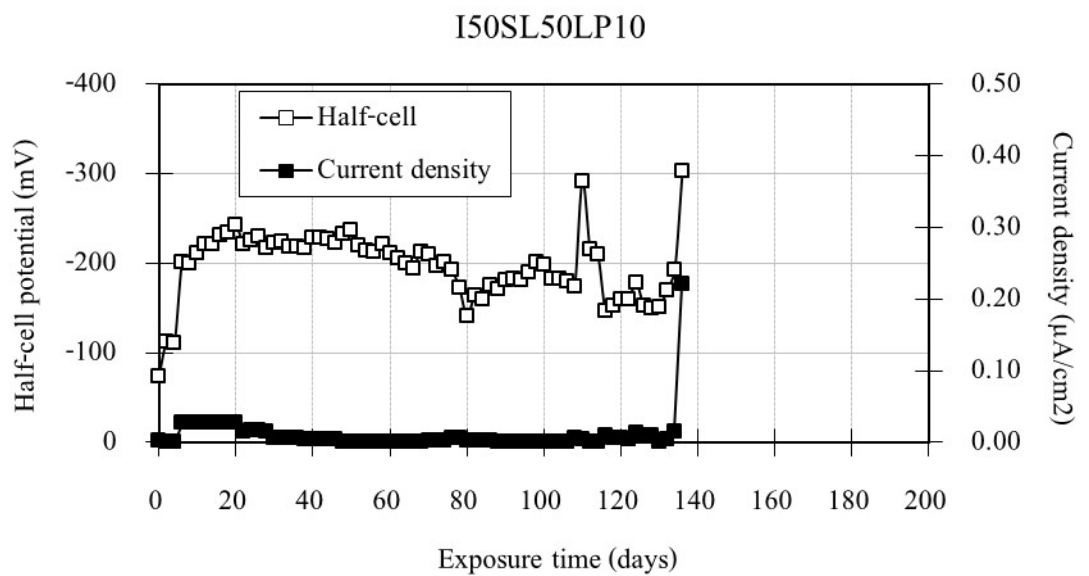
ภาพที่ ก-7 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 30 และผงหินปูนที่ร้อยละ 10



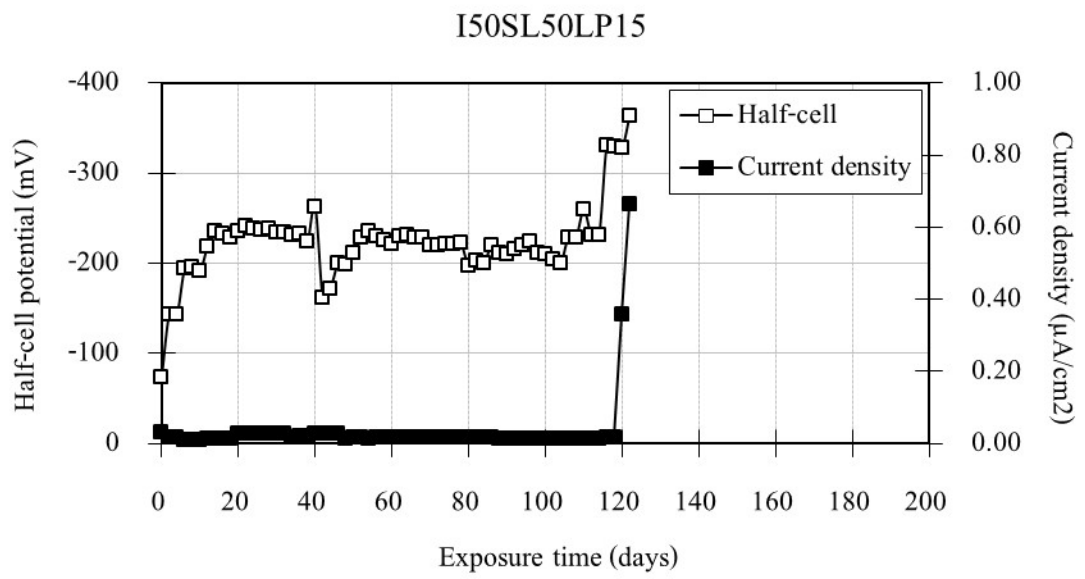
ภาพที่ ก-8 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 30 และผงหินปูนที่ร้อยละ 15



ภาพที่ ก-9 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 50 และผงหินปูนที่ร้อยละ 5



ภาพที่ ก-10 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 50 และผงหินปูนที่ร้อยละ 10



ภาพที่ ก-11 ระยะเวลาเริ่มเกิดสนิมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ร้อยละ 50 และผง หินปูนที่ร้อยละ 15

ภาคผนวก ข
กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ ข-1 กำลังอัดของคอนกรีต

		The compressive strength of concrete (Cement content 400 kg/m ³)								
Mixture code	w/b	At 28 days, water curing			At 91 days, water curing			At 365 days, water curing		
		Compressive strength (kg/cm ²)			Compressive strength (kg/cm ²)			Compressive strength (kg/cm ²)		
		Sample 1	Sample 2	Average	Sample 1	Sample 2	Average	Sample 1	Sample 2	Average
I40		503.5	513.1	513	670.7	689.1	680	690.3	717.5	704
I40SL30		452.8	483.7	484	660.1	620.4	640	694.7	682.1	688
I40SL40		541.3	646.1	541	688.7	690.1	689	705.0	683.2	694
I40SL50		551.2	786.1	551	698.2	695.6	697	749.8	728.7	739
I40SL70		489.6	510.9	500	606.8	607.8	607	646.4	624.5	635
I40SL30LP5	0.40	524.8	591.9	558	619.8	676.9	648	656.5	627.9	642
I40SL30LP10		488.3	371.9	430	648.3	611.6	630	713.6	693.2	703
I40SL30LP15		552.7	584.4	569	656.5	587.2	622	619.8	595.3	608
I40SL50LP5		522.4	536.8	530	593.2	636.8	615	636.1	658.5	647
I40SL50LP10		529.0	480.7	505	622.4	578.0	600	660.6	644.2	652
I40SL50LP15		553.0	560.2	557	586.5	591.2	589	611.6	595.3	603
I50		550.3	468.9	510	568.8	552.5	552	642.2	570.8	571
I50-FA30		321.8	330.8	326	428.1	428.1	428	452.6	407.7	430
I50-FA50		284.5	295.8	290	346.6	391.4	369	411.8	403.7	408
I50SL30		484.0	512.0	484	554.5	555.6	555	497.5	583.1	583
I50SL40		456.9	397.5	457	562.7	513.8	563	591.2	542.3	591
I50SL50		473.8	469.6	472	530.1	515.8	523	587.2	601.4	594
I50SL70	0.50	405.4	412.1	409	454.6	417.9	436	481.1	487.3	484
I50SL30LP5		440.0	464.7	452	499.5	473.0	486	542.3	538.2	540
I50SL30LP10		388.4	383.7	386	495.4	493.4	494	505.6	477.1	506
I50SL30LP15		323.0	420.4	372	534.1	526.0	530	542.3	566.8	555
I50SL50LP5		452.1	464.7	458	526.0	505.6	516	542.3	562.7	552
I50SL50LP10		337.0	338.7	338	391.4	403.7	398	420.0	395.5	408
I50SL50LP15		402.8	386.9	395	489.3	464.8	477	505.6	470.9	488