รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูน

(Chloride resistance of concrete containing ground-granulated blast furnace slag and limestone powder)

โดย

ผศ.ดร. ทวีชัย สำราญวานิช

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

เมษายน 2559

สนับสนุนโดยทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอย และผงหินปูน โดยแบ่งเป็นคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด และคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสามชนิด โดยคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสองชนิดได้แก่ คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 40 50 และ 70 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 ส่วนคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสามชนิด ได้แก่ คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 ร่วมกับผงหินปูนแทนที่ร้อยละ 5 10 และ 15 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 ร่วมกับผงหินปูนแทนที่ร้อยละ 5 และ 10 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 56 วัน และทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

จากผลการศึกษาพบว่า สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 70 มีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำที่สุด แต่ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 มีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานและคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน ที่การแทนที่วัสดุประสานเท่ากัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานมีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำกว่า สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสามชนิด พบว่า คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 ร่วมกับผงหินปูนแทนที่ร้อยละ 5-15 มีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำที่สุด ทั้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 สุดท้ายเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและกำลังอัด พบว่า ทั้งคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสองชนิดและสามชนิดมีกำลังอัดสูงและมีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 มีกำลังอัดสูงแต่มีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ ส่วนคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 ร่วมกับผงหินปูนแทนที่ร้อยละ 5 และ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำแต่ก็มีกำลังอัดต่ำด้วย

Abstract

This research aims to study the rapid chloride penetration and compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag, fly ash and limestone powder. There were two types of binder in concrete which were binary binder concrete and ternary binder concrete. Binary binder concrete were concrete with ground granulated blast-furnace slag replacement at 30%, 40%, 50%, and 70% of binder and concrete with fly ash replacement at 30% and 50% of binder. For ternary binder concrete, there were concrete with ground granulated blast-furnace slag replacement at 30% and 50% of binder and limestone powder replacement at 5%, 10% and 15% of binder and concrete with fly ash replacement at 30% and 50% of binder and limestone powder replacement at 5% and 10% of binder. The water to binder ratio of 0.40 and 0.50 was used. The rapid chloride penetration tests (RCPT) were performed at 28 and 56 days. The compressive strength tests were done at 28 days.

From the experimental results of binary binder concrete, it was found that concrete with ground granulated blast-furnace slag replacement at 70% of binder had the lowest rapid chloride penetration for binary binder concrete at water to binder ratio of 0.40. But**,** at water to binder ratio of 0.50, concrete with fly ash replacement at 50% of binder had the lowest rapid chloride penetration. When the same replacement of ground granulated blast-furnace slag and fly ash in concrete was compared, it showed that concrete with fly ash replacement had lower rapid chloride penetration than concrete with ground granulated blast-furnace slag replacement. For ternary binder concrete, it was found that concrete with ground granulated blast-furnace slag replacement at 50% of binder and limestone powder replacement at 5% -15% of binder had the lowest rapid chloride penetration for both water to binder ratio of 0.40 and 0.50. Finally, when the relationship between the rapid chloride penetration and compressive strength of concrete was considered, both binary binder concrete and ternary binder concrete had higher compressive strength and lower chloride penetration than plain cement concrete. Concrete with ground granulated blast-furnace slag replacement at 50% of binder had high compressive strength and less rapid chloride penetration. Concrete with ground granulated blast-furnace slag replacement at 50% of binder and limestone powder replacement at 5% and 15% of binder had less rapid chloride penetration, but low compressive strength.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต	4
2.2 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด	15
2.3 เถ้าลอย	19
2.4 ผงหินปูน	21
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทดลองและวิธีการทดสอบ	**26**
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	26
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ	33
3.3 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต	39
3.4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	**47**
4.1 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต	47
4.2 กำลังอัดของคอนกรีต	64
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผล	**76**
5.1 สรุปผล	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม	**78**

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของน้ำทะเล (Mindess and Young, 1981)	4
2.2 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุดในคอนกรีตจากมาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ	6
2.3 ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุดในคอนกรีตจากข้อกำหนดต่างๆ	6
2.4 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ระดับต่างๆ (Shamsad, 2003)	14
3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เถ้าลอยและผงหินปูน	30
3.2 ค่ามัธยฐานขนาดคละปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน	31
3.3 ส่วนผสมคอนกรีตที่ศึกษา	41
3.4 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์อิออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202	44

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต	7
2.2 ลักษณะการแพร่ของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต	8
2.3 กลไกการดึงดูดอิออนเข้าไปในคอนกรีต	9
2.4 กระบวนการดึงดูดแบบคาพิวลารี	10
2.5 กลไกการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตโดยแรงดันน้ำ	10
2.6 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์	12
2.7 อิทธิพลของ W/B ต่อการแพร่กระจายคลอไรด์	14
3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	26
3.2 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulated blast-furnace slag)	27
3.3 เถ้าลอย (Fly ash)	27
3.4 ผงหินปูน (Limestone powder)	28
3.5 มวลรวมหยาบ (หิน)	28
3.6 มวลรวมละเอียด (ทราย)	29
3.7 ขนาดคละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน	31
3.8 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	32
3.9 รูปร่างอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหิน	32
3.10 รูปร่างอนุภาคของผงหินปูน	32
3.11 รูปร่างอนุภาคของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด	33
3.12 แบบหล่อชิ้นตัวอย่างคอนกรีตสูง 20 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร	33
3.13 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า	34
3.14 เซลล์ทดสอบ	34
3.15 เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีต	35
3.16 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)	35
3.17 ช้อนตักสาร	36
3.18 บีกเกอร์ขนาด 250 ml	36
3.19 บีกเกอร์ขนาด 1000 ml	37
3.20 น็อตสำหรับล็อคตัวเซลล์ทดสอบ	37

3.21 ซิลิโคน 38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.22 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 38
3.23 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 39
3.24 ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 20 เซนติเมตร × 10 เซนติเมตร 39
3.25 รายละเอียดเซลล์ทดสอบ 41
3.26 การต่อสายไฟ 42
3.27 การเรียกใช้โปรแกรมใช้งาน 43
3.28 การเข้าสู่โปรแกรมใช้งาน 44
3.29 การกรอกข้อมูลสำหรับการทดสอบ 44
3.30 หน้าต่างแสดงรายละเอียดระหว่างทดสอบ 45
3.31 ตำแหน่งที่เก็บบันทึกข้อมูลที่ทดสอบ 45
3.32 ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10 × 10 × 10 ซม.^{3} 46
3.33 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต 46
4.1 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 48
4.2 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ 56 วัน 50
4.3 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 52
4.4 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 40 50 และ 70 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 54
4.5 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 30 และ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 56
4.6 ปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.7 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 60

4.8 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 61

4.9 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและเถ้าลอยกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 63

4.10 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน 64

4.11 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน 65

4.12 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 40 50 และ 70 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน 66

4.13 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน 67

4.14 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน 68

4.15 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.16 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน 70

4.17 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและเถ้าลอยกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน 71

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วันและ 56 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 73

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วันและ 56 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 75

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้โดยแพร่หลายในงานก่อสร้าง ทั้งนี้เพราะคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติหลายประการที่เหมาะสม อาทิเช่น สามารถหล่อตัวอย่างขึ้นรูปร่างตามต้องการได้ มีความคงทนสูง ไม่ติดไฟ สามารถเทหล่อได้ในสถานที่ก่อสร้าง ตกแต่งผิวให้สวยงามได้ มีความสามารถในการต้านทานเป็นอย่างดีกับน้ำ และที่สำคัญ คือ มีราคาไม่แพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเปรียบเทียบกับราคาเหล็กรูปพรรณ

คอนกรีตเป็นวัสดุประกอบจากการผสมกันของ ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และ/หรือ วัสดุผสมเพิ่ม เมื่อแข็งตัวจะเป็นวัสดุพรุน (Porous materials) มีโพรงกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อคอนกรีตและมีความต่อเนื่อง เนื่องจากระบบโพรงของคอนกรีตมีความต่อเนื่อง จึงทำให้ก๊าซ ความชื้น และ อิออน ของสารเคมี สามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลรวมไปถึงโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่น้ำกร่อยด้วย ซึ่งมีโอกาสสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงหรือสัมผัสกับไอเกลือ และความชื้นตลอดเวลา อาจเกิดการเสื่อมสภาพได้จากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น การกัดเซาะ การชะล้าง การตกผลึกของเกลือ และการทำลายโดยซัลเฟต แต่การทำลายเนื่องจากคลอไรด์เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เนื่องจากอิออน ของคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจนถึงเหล็กเสริม อิออนของคลอไรด์จะไปทำลายฟิล์มที่เคลือบเหล็กและเมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำจะก่อให้เกิดสนิม ปริมาตรของเหล็กจะเพิ่มขึ้นและดันคอนกรีตให้แตกร้าวได้ และส่งผลให้ความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงซึ่งต้องสิ้นเปลืองงบประมาณค่อนข้างมากในการซ่อมบำรุง และแก้ไขปัญหา วิธีการหนึ่งที่จะทำให้คอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ให้เคลื่อนที่ช้าลง ยืดอายุของคอนกรีตเสริมเหล็กให้ยาวนานขึ้น ต้องทำให้ผิวของคอนกรีตมีความแข็งแรงขึ้นโดยการบำรุงรักษาหรือการให้มีสิ่งกีดขวางบนผิวของคอนกรีต ซึ่งมีประสิทธิภาพในการจำกัดการแพร่ของคลอไรด์ได้

เนื่องจากที่กล่าวว่าเกลือคลอไรด์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของน้ำทะเลเป็นสาเหตุหลักที่สำคัญอย่างยิ่งในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังนั้นการศึกษาการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อที่จะได้รับทราบถึงอัตราการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน และผลของการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูน ในส่วนผสมของคอนกรีตที่ระยะเวลาต่างๆได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม อาทิเช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูน ให้มีความต้านทานต่อการบุกรุกของเกลือคลอไรด์ได้ดีดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อศึกษาความ

ต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูน ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการหาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูนเป็นสารปอซโซลานในการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เพื่อสามารถนำไปทำนายปริมาณการกระจายตัวของคลอไรด์ในคอนกรีต และทำนายระยะเวลาที่เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเริ่มเป็นสนิมได้ต่อไป

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงคุณสมบัติความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูน โดยมุ่งศึกษาเฉพาะความสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ เพราะเมื่อคอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มาก ก็จะช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ดี และยังสามารถนำผลการวิจัยไปพัฒนาออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเลและคอนกรีตที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ได้รับผลกระทบจากเกลือคลอไรด์ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งตามมาตรฐาน ASTM C1202 ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูน โดยใช้วัสดุประสานแบบสองชนิด และวัสดุประสานแบบสามชนิด

2. เพื่อศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูน

3. เพื่อศึกษาหาส่วนผสมคอนกรีตที่มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีและกำลังอัดที่ดีด้วย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูน ในอัตราส่วนแทนที่วัสดุประสาน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด 30% 40% 50% และ 70% เถ้าลอย 30% และ 50% ผงหินปูน 5% 10% 15% และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

ในการหาความต้านทานการแทกรซึมคลอไรด์แบบเร่ง ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรและสูง 20 เซนติเมตร นำมาตัดเป็นแผ่นหนา 5 เซนติเมตรและในการหากำลังอัดของคอนกรีต ใช้หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร แล้วบ่มตัวอย่างในน้ำประปา เป็นระยะเวลา 28 วัน และ 56 วัน ก่อนทำการทดสอบ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งตามมาตรฐาน ASTMC 1202 ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูนโดยใช้วัสดุประสานแบบสองชนิดและวัสดุประสานแบบสามชนิด

2. ทำให้ทราบค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูน

3. ทำให้ทราบส่วนผสมคอนกรีตที่มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีและกำลังอัดที่ดีด้วย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต

2.1.1 ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์

น้ำทะเลมีสารละลายคลอไรด์อยู่เป็นส่วนใหญ่ (มากกว่า 90 %) เมื่อเปรียบเทียบกับซัลเฟต คลอไรด์ส่วนใหญ่ได้มาจากเกลือแร่ที่สะสมอยู่ในดินหิน แล้วเกิดการสึกกร่อนและละลายโดยน้ำฝนลงสู่ทะเล ซึ่งในน้ำทะเลนั้นประกอบไปด้วยสารประกอบประเภทซัลเฟต และคลอไรด์ของโซเดียมและแมกนีเซียม เป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำทะเล (Mindess and Young, 1981)

Composition of Seawater	Quantity (ppm)
Sodium chloride (NaCl)	27,000
Magnesium chloride ($MgCl_2$)	3,200
Magnesium sulfate ($MgSO_4$)	2,200
Calcium sulfate ($CaSO_4$)	1,100
Calcium chloride ($CaCl_2$)	500
Total dissolved salts	34,000

จากตารางที่ 2.1 พบว่า องค์ประกอบหลักของน้ำทะเลคือ โซเดียมคลอไรด์ ซึ่งมีปริมาณมากถึง 27,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปสะสมในคอนกรีตบริเวณที่ติดกับเหล็กเสริม จนมีค่าเกินกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) เหล็กเสริมก็จะสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation)

ทวีชัย สำราญวานิช (2551) กล่าวว่าปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine Environment) เป็นปัญหาที่พบมากในประเทศไทย โดยโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลนั้น อาจเกิดการเสื่อมสภาพได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน อาทิเช่น การกัดเซาะ การชะล้าง การตกผลึกของเกลือ การทำลายโดยเกลือซัลเฟต แต่สาเหตุหลักคือการทำลายโดยเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลจะส่งผลโดยตรงต่อเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีต ทำให้เหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิม และเนื้อสนิมที่เกิดขึ้นจะดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็วและมีอายุการใช้งานสั้นกว่าที่ควรจะเป็น

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) กล่าวว่าผลกระทบโดยรวมจากการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วคือ กำลังรับแรงต่างๆของคอนกรีตโดยรวมลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางด้านความต้านทานความล้า (Fatigue) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือการเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย รวมถึงความยืดหยุ่น (Stiffness) ก็ลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่ผลข้างเคียงจากการทำลายโดยกระบวนการดังกล่าวคือการแตกร้าวของคอนกรีตเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยเร่งให้น้ำและออกซิเจนสามารถเข้าถึงบริเวณผิวของเหล็กเสริมได้เร็วและมากขึ้น ซึ่งยังผลให้มีการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้น

2.1.2 แหล่งที่มาและประเภทของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

เกลือคลอไรด์ (Chloride) อาจมีอยู่ในเนื้อคอนกรีตตั้งแต่แรกเริ่ม โดยมีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ในหินและทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายที่มาจากแหล่งใกล้ทะเล หรือในน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น สารเร่งการก่อตัวจำพวกแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม มีการกำหนดปริมาณเกลือคลอไรด์เริ่มต้นที่ยอมรับในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ ดังตารางที่ 2.2 และ 2.3 แต่ปัญหาของเกลือคลอไรด์ที่ส่งผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้างส่วนมากจะเข้ามาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งานโครงสร้างไปแล้ว เช่น มาจากน้ำทะเล มาจากดิน หรือมาจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็ง (De-icing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้ในน้ำทะเลประกอบไปด้วยสารประกอบซัลเฟตและคลอไรด์ของโซเดียมและแมกนีเซียมเป็นส่วนใหญ่ โดยเกลือคลอไรด์ถือเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเล โดยทั่วไปมีปริมาณประมาณ 1.8% โดยน้ำหนักของน้ำทะเล

เกลือคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปอยู่ในเนื้อคอนกรีตทั้งหมดถูกเรียกว่า เกลือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ซึ่งเป็นผลรวมของเกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) และเกลือคลอไรด์อิสระ (Free chloride) เกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ หมายถึงเกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยปฏิกิริยาและเปลี่ยนไปในรูปของสารประกอบ Calcium chloroaluminate hydrate (Friedel's salt) และ Calcium chloroferrite หรือถูกยึดจับด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่น (Hydration products) เช่น C-S-H และ C-A-H ไว้ที่ผิว และบางส่วนอาจถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic products) ด้วย ซึ่งเกลือคลอไรด์ประเภทนี้ไม่มีผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต ส่วนเกลือคลอไรด์อิสระหมายถึงเกลือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในสารละลายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) ซึ่งเกลือคลอไรด์ประเภทนี้ถ้ามีปริมาณที่มากพอ จะสามารถทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมขึ้นได้

ตารางที่ 2.2 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุดในคอนกรีตจากมาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ

ประเภทของโครงสร้าง	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุด (% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)			
	BS 8110	ACI 201	ACI 357	ACI 222
คอนกรีตอัดแรง	0.10	-	0.06	0.08
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะเผชิญกับเกลือคลอไรด์	0.20	0.10	0.10	0.20
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้ง หรือไม่มีความชื้น	0.40	-	-	-
คอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	-	0.15	-	-

BS 8110: British Standard for the design and construction of reinforced and prestressed concrete structures

ACI 201: American Concrete Institute for guide for durable concrete

ACI 357: American Concrete Institute for guide for the design and construction of fixed concrete offshore structures

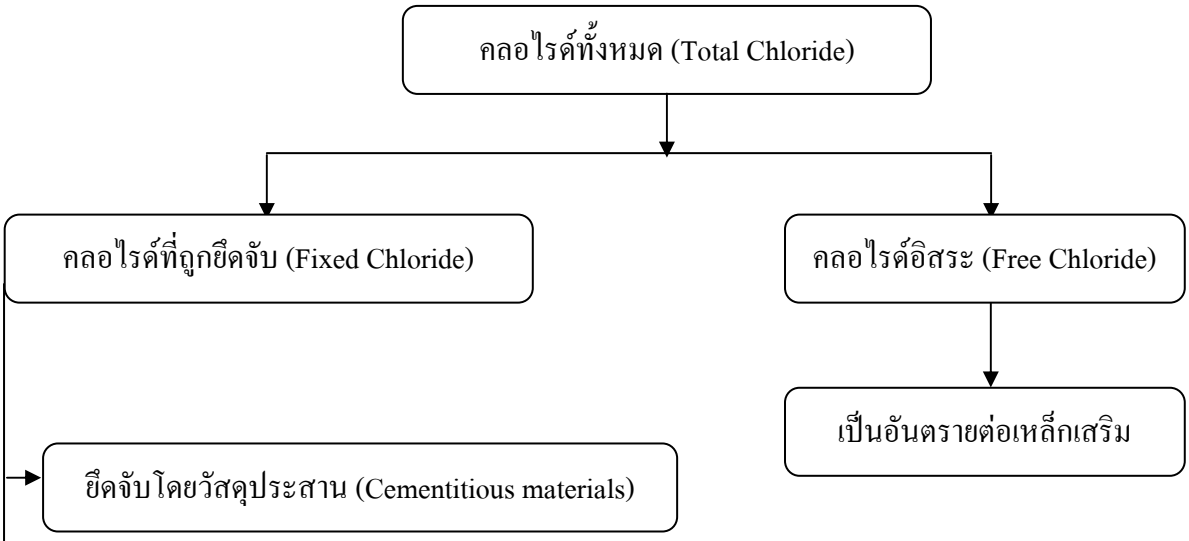
ACI 222: American Concrete Institute for corrosion of metals in concrete

ตารางที่ 2.3 ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุดในคอนกรีตจากข้อกำหนดต่างๆ

ประเภทของโครงสร้าง	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุด (% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)	
	ACI 318	ACI 222
คอนกรีตอัดแรง	0.06	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะเผชิญกับเกลือคลอไรด์	0.15	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้ง หรือไม่มีความชื้น	1.00	-
คอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.30	-

ACI 318: American Concrete Institute for building code requirements for structural concrete and commentary

ACI 222: American Concrete Institute for corrosion of metals in concrete



1. คลอไรด์ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางเคมีกลายเป็นส่วนหนึ่งของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

$3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Calcium chloroaluminate, Friedel's salt)

$3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Calcium chloroferrite)

} Adsorbed chloride

2. คลอไรด์ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพไว้ที่ผิวของผลผลิตไฮเดรชั่นและปอซโซลานิก

C-S-H from Hydration of C_3S, C_2S

C-S-H and CAH from Pozzolanic reaction

CAH and CAFH from Hydration of C_3A, C_3AF

} Adsorbed chloride on pore

3. คลอไรด์ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพไว้ที่ผิวของผลผลิตไฮเดรชั่นอื่นๆ เช่น โมโนซัลเฟต (Monosulfate), เอททริงไจ (Ettringite) เป็นต้น

ยึดจับโดยวัสดุเฉื่อย (Non-reactive materials)

- มวลรวมละเอียด, มวลรวมหยาบ และหินปูน ⟶ Adsorbed chloride on surface

รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต (ที่มา: ทวีชัย 2553)

2.1.3 การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์จากภายนอกเข้าสู่เนื้อคอนกรีต

การเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์จากภายนอกเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตถือเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้โครงสร้างเสื่อมสภาพ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับคอนกรีต ซึ่งมีผลต่อความคงทนของคอนกรีตทั้งทางตรงและทางอ้อม และนำไปสู่การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เรียกว่า การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ (Chloride penetration) ซึ่งเกิดขึ้นจากกลไกต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ ประจุไฟฟ้า และแรงดันน้ำ นอกจากนั้นยังอาจเกิดขึ้นจากแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนผ่านด้วย ดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไกหลักๆ ดังนี้

1. การแพร่ (Diffusion) กลไกนี้มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์เข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อิ่มตัว แรงขับเคลื่อนของเกลือคลอไรด์ ในกลไกนี้เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ กล่าวคือ เกลือคลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำดังแสดงรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อสองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางและเวลา ดังสมการที่ 2.1

$$\frac{\partial C_t(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial^2 x} \qquad (2.1)$$

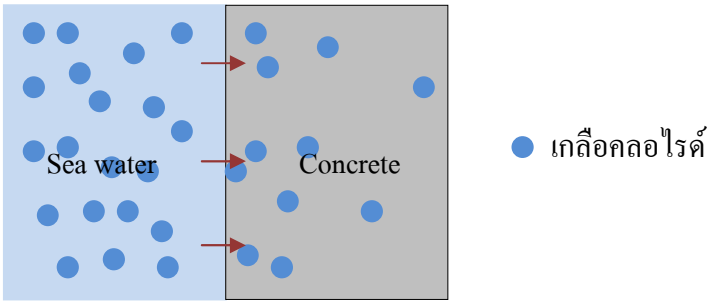
โดยที่ $C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

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

D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.^{2}/ปี)

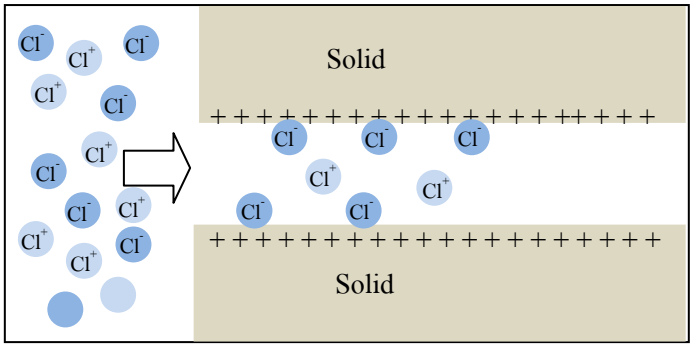
X คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)

t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)



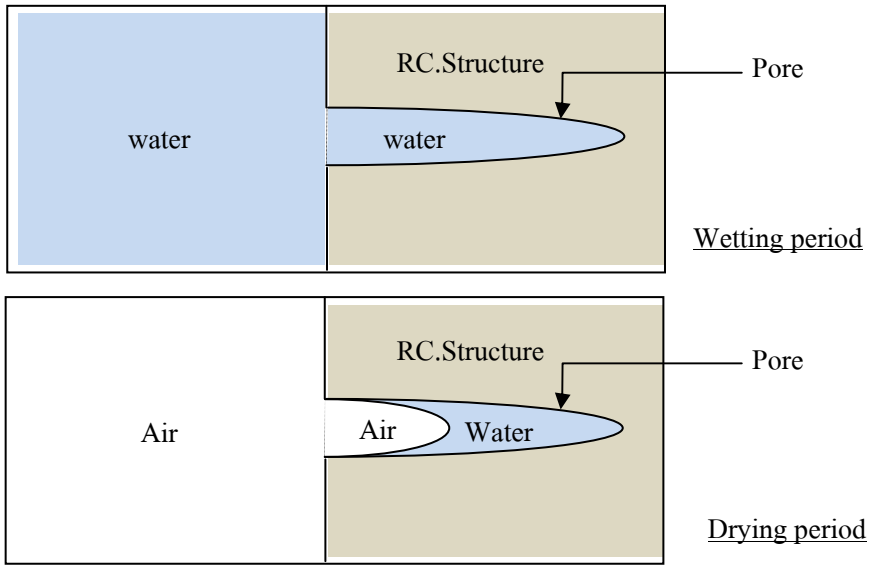
รูปที่ 2.2 ลักษณะการแพร่ของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต

2. การดึงดูดอิออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดอิออนจะเกิดสูงขึ้น เนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีต จะดึงดูดคลอไรด์อิออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้นให้สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.3



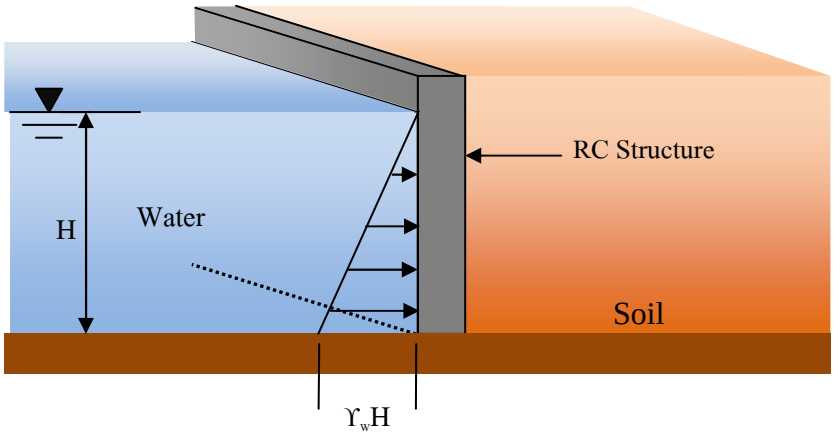
รูปที่ 2.3 กลไกการดึงดูดอิออนเข้าไปในคอนกรีต

3. การดึงดูดคาพิวลารี (Capillary suction) สามารถดึงน้ำเกลือคลอไรด์ผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆ บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตได้ โดยทั่วไปโครงสร้างส่วนมากจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงดูดเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆ ด้วยกลไกการดึงดูดคาพิวลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและใช้เวลาสั้นดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการดึงดูดแบบคาพิวลารี

4. แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) สำหรับโครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน เขื่อน อุโมงค์ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำเกลือซึ่งมีเกลือคลอไรด์เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยังคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำกว่าได้



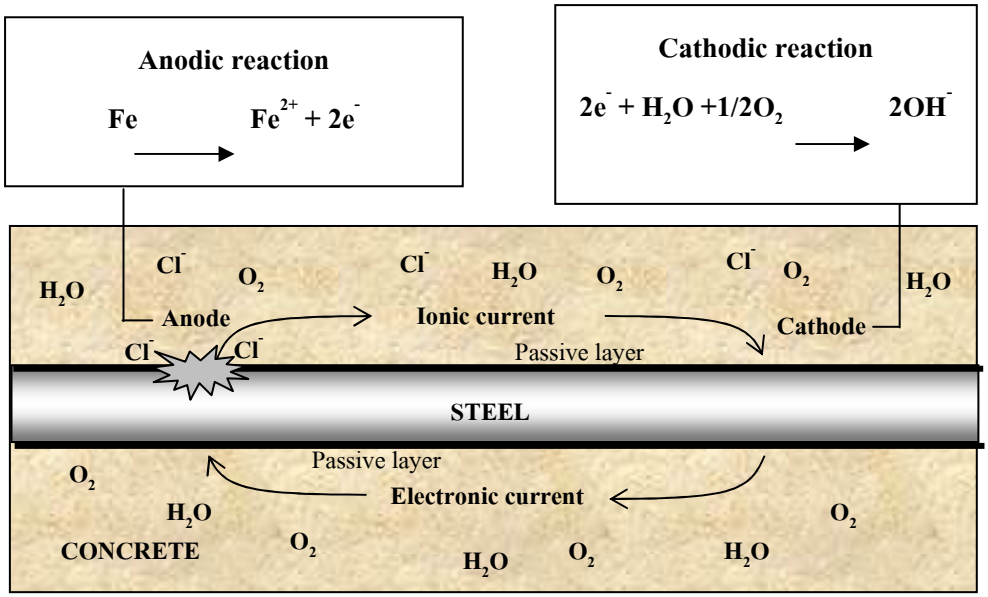
รูปที่ 2.5 กลไกการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตโดยแรงดันน้ำ

2.1.4 กลไกการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยน้ำทะเล

การทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยน้ำทะเลนั้น จะเกิดขึ้นได้ทั้งจากเกลือซัลเฟต และเกลือคลอไรด์ โดยสาเหตุของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างนั้น จะมีสาเหตุจากเกลือคลอไรด์เป็นหลัก เนื่องจากน้ำทะเลมีสารละลายคลอไรด์อยู่เป็นส่วนใหญ่ (มากกว่า 90 %) เมื่อเปรียบเทียบกับซัลเฟตเมื่อคลอไรด์อิออนอิสระแทรกซึมลึกเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตจนถึงระดับหนึ่งจะทำให้ค่าความเป็นด่าง (หรือค่า pH) ของคอนกรีต ในส่วนนั้น ลดลงจากระดับปกติคือ ค่า pH เท่ากับ 12.5-13.5 ลงไปสู่ระดับ ค่า pH เท่ากับ 9.0 - 11.0 สารละลายที่มีความเป็นด่างนี้ จะมีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ เคลือบผิวของเหล็กเสริม โดยฟิล์มนี้จะช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมถูกทำลายด้วยปฏิกิริยา Electrolysis ซึ่งจะทำให้เนื้อเหล็กถูกกัดกร่อนอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความเป็นด่างลดลงถึงระดับวิกฤต (มีค่า pH ต่ำกว่า 9.0) แต่การทำลายเนื้อของเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วน Molar ratio ระหว่างคลอไรด์อิออนต่อไฮดรอกซิลอิออน (Cl^-/OH^-) เป็นสำคัญ ดังนั้น ถึงแม้ค่า pH ในคอนกรีตจะสูงกว่า 11.5 เหล็กเสริมก็ยังมีโอกาสที่สนิมได้ ถ้าค่าอัตราส่วน molar ratio นี้สูงกว่า 0.6

2.1.5 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมและเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์

เกลือคลอไรด์เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีชั้นของฟิล์มออกไซด์ (Protective Passivity Layer) บางๆ เคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กเสริม เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก (γ -Fe_2O_3) แต่เมื่อใดก็ตามหากคลอไรด์อิออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้ แสดงดังรูปที่ 2.6 ชั้นของฟิล์มออกไซด์จะถูกทำลาย จนกระทั่งเมื่อใดที่ชั้นฟิล์มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤต (Critical value) เหล็กเสริมในบริเวณนั้นจะเกิดสนิม ซึ่งเราเรียกว่า Depassivation และถ้าหากมีปริมาณของเกลือคลอไรด์ในปริมาณที่มากพอในระหว่างการผสมคอนกรีต อาจส่งผลทำให้ฟิล์มออกไซด์ไม่เกิดขึ้นได้ และในขณะเดียวกัน หากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ก็จะเกิดขึ้น



รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์ (ที่มา: ทวีชัย 2553)

กล่าวคือ บริเวณที่ฟิล์มออกไซด์ถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ ซึ่งเรียกว่า “ปฏิกิริยาอาโนด” (Anodic reaction) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \quad \text{(Anodic reaction)} \qquad (2.2)$$

อิเล็กตรอน (e^{-}) ที่เกิดขึ้นนี้ จะวิ่งผ่านไปยังฟิล์มที่ไม่ได้ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Catholic) หากสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ และออกซิเจนได้ ก็จะเกิดเป็น “ไฮดรอกซิลอิออน”($(OH)^{-}$) ดังสมการทางเคมี ดังนี้

$$4e^{-} + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4(OH)^{-} \quad \text{(Cathodic reaction)} \qquad (2.3)$$

และในขณะเดียวกัน Fe^{2+}ที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบ ส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนจนกระทั่งได้ เฟอริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide) ดังสมการทางเคมี ดังนี้

$$Fe^{2+} + 2(OH)^{-} \longrightarrow Fe(OH)_2 \qquad (2.4)$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3 \qquad (2.5)$$

จากนั้น Fe^{2+} ที่เหลืออยู่อีกส่วนหนึ่งที่ขั้วลบนั้น จะทำปฏิกิริยากับ Cl^{-} เกิดเป็น เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) และเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดสนิมเพิ่มเติมขึ้นมา ดังสมการทางเคมี ดังนี้

$$Fe^{2+} + 2Cl^{-} \longrightarrow FeCl_2 \qquad (2.6)$$

$$FeCl_2 + 2H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl \qquad (2.7)$$

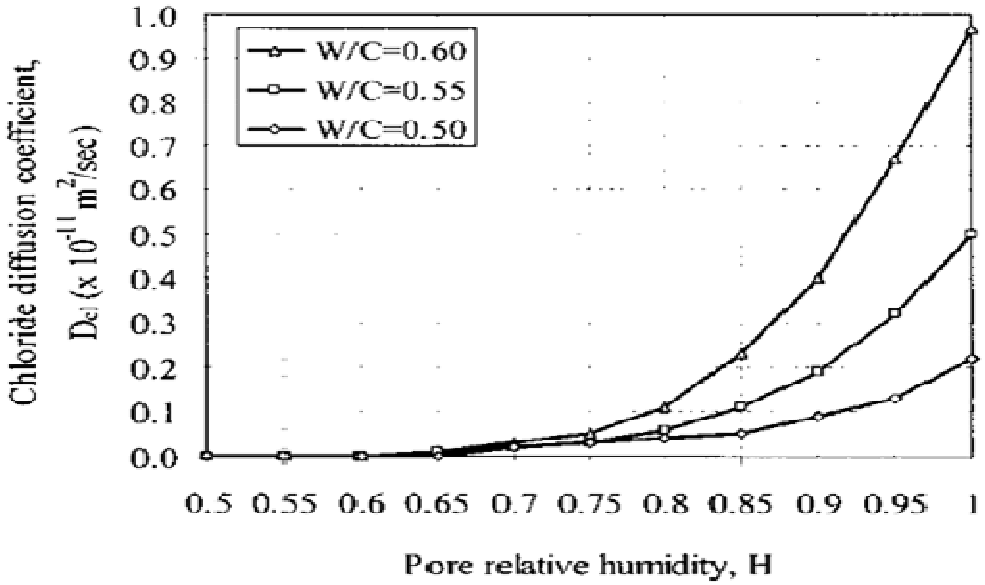
2.1.6 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยคลอไรด์ (Steel corrosion due to chloride)

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ โดยคลอไรด์อิออนเป็นตัวการที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เมื่อคลอไรด์อิออนเข้าไปสะสมที่ผิวของเหล็กเสริมมากจนถึงจุดวิกฤตเหล็กเสริมจะเริ่มเกิดสนิมและพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ โดยกระบวนการในการเกิดสนิมจากสาเหตุการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์อิออนผ่านเนื้อคอนกรีตนั้น สามารถแบ่งได้เป็นสองขั้นตอนคือ

1. Initial period หรือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มหล่อคอนกรีตเสร็จจนถึงช่วงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วงนี้คลอไรด์อิออนจะแพร่ผ่านเข้ามาสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤตนอกจากนั้น O_2 และ H_2O จะซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปหาเหล็กเสริมแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นซึ่งระยะเวลาช่วงแรกนี้จะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ ความสามารถซึมผ่านของคอนกรีต กำลังคอนกรีต และความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม

2. Propagation period หรือ ระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง หมายถึง ช่วงระยะเวลาของการพัฒนา การเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตคือเป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างเกิดการวิบัติ หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งานจะเห็นได้ว่า คลอไรด์อิออนที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อยนั้นจะไปมีผลในการกระตุ้นให้เกิดสนิมได้ แต่สนิมเหล็กเองกลับไม่ได้มีคลอไรด์อิออนเป็นส่วนประกอบเลย

กระบวนการไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น จะทำให้เหล็กเสริมบริเวณขั้วลบถูกกัดกร่อนให้มีขนาดหน้าตัดเล็กลงและเหล็กเสริมบริเวณขั้วบวกก็จะเกิดเป็นสนิม ซึ่งสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตที่เกิดขึ้นนี้จะมีการพัฒนาเพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ประมาณ 4-6 เท่า ดันให้คอนกรีตที่หุ้มอยู่กะเทาะออก เมื่อการกัดกร่อนเกิดเพิ่มมากยิ่งขึ้น เปลือกหุ้มคอนกรีตก็จะหลุดร่อนออกเป็นชั้นๆ ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตและทำให้โครงสร้างของอาคารสูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่นคงแข็งแรงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง อัตราการพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมรอบๆโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของ W/B ต่อการแพร่กระจายคลอไรด์ (ที่มา: Ababneh, 2003)

นอกจากการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์อิออนผ่านเนื้อคอนกรีตจะเป็นสาเหตุของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตแล้ว ปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นนี้จะลดความเป็นด่างของคอนกรีตลง ซึ่งความเป็นด่างของคอนกรีตนี้เองจะเป็นตัวช่วยป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิม โดยปกติค่า pH ของคอนกรีตจะอยู่ระหว่าง 12-13 หากค่า pH ของคอนกรีตลดลงจนถึงจุดวิกฤต รวมทั้งมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ ซึ่งค่า pH ก็จะเป็นตัวที่สามารถบอกได้ว่ามีโอกาสเกิดสนิมได้มากน้อยเพียงใด ดังแสดงในตาราง 2.4

ตารางที่ 2.4 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ระดับต่างๆ (Shamsad, 2003)

ค่า pH ของคอนกรีต	สภาพของสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต
ต่ำกว่า 9.5	เริ่มเกิดสนิมเล็กน้อยที่ผิว (ฟิล์มยังไม่หาย)
8.0	ฟิล์มที่เคลือบผิวเหล็กหายไป
ต่ำกว่า 7.0	เกิดสนิมอย่างรุนแรงที่ตัวของเหล็กสนิม

2.2 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulated blast-furnace slag)

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulated blast-furnace slag) คือ ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและอื่นๆซึ่งเกิดขึ้นในขณะหลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็กนอกจากนี้ยังให้คำจำกัดความของเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulated blast-furnace slag) หมายถึง เม็ดวัสดุที่ไม่เป็นผลึกซึ่งได้จากการทำตะกรันที่หลอมเหลวในเตาถลุงเหล็กให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดเพื่อให้ตะกรันเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วตะกรันเตาถลุงเหล็กบดนอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้วยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาวอิ่มตัว (hydrated lime) ยิปซัม หรือ แอนไฮไดรต์ (anhydrite) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีตมีข้อดี 2 ประการคือ 1. สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และ 2.สามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้เนื่องจากในปัจจุบันมีการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็กบดในประเทศไทย ดังนั้นจึงขอให้รายละเอียดที่เกี่ยวกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเพื่อเป็นวัสดุอีกทางเลือกหนึ่งในส่วนผสมของคอนกรีต

2.2.1 กระบวนการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

ในกระบวนการถลุงเหล็กโรงงานจะใส่สินแร่เหล็กเข้าในเตาถลุงรวมทั้งใส่สารที่เป็นฟลักซ์ (flux) ซึ่งได้แก่หินปูนและหินโดโลไมต์ เพื่อลดอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวลงเพื่อประหยัดพลังงาน การเผาจะใช้ถ่านโค้ก (ถ่านโค้กคือถ่านหินที่เผาจนหมดควัน) เป็นเชื้อเพลิง หลังจากเผาจนอุณหภูมิสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียล จะได้ผลิตภัณฑ์ 2 อย่างเกิดขึ้นในเตาเผาพร้อมกันคือเหล็กที่หลอมจนเหลวซึ่งตกอยู่ก้นเตาและตะกรันเหลวซึ่งลอยอยู่เหนือเหล็กเหลว การทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเย็นตัวอย่างรวดเร็วช่วยป้องกันการเกิดผลึกในตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเป็นเม็ดที่มีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่า 4.75 มม. จึงเรียกว่าเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ในทางตรงกันข้ามถ้าปล่อยให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่ออกจากเตาเผาเย็นตัวลงอย่างช้าๆจะทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดอยู่ในรูปที่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่และไม่มีคุณสมบัติทางวัสดุประสานกระบวนทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเพื่อไม่ให้เป็นผลึก ทำได้โดยการฉีดน้ำที่มีความเร็วสูงไปกระทบกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเหลวที่ยังร้อนอยู่ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อตะกรันเตาถลุงเหล็กบดประมาณ 10:1 โดยมวล ซึ่งทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเป็นเม็ดและอยู่ในรูปไม่เป็นผลึกสูงมาก ภายหลังที่ได้เม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดจึงทำให้แห้งและบดให้ละเอียดโดยใช้วิธีการเดียวกับการบดเม็ดปูนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในช่วงก่อนและระหว่างการบดเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดจะนำแม่เหล็กมาดูดแร่เหล็กที่ยังติดมาหรือตกค้างอยู่ออกก่อนเพื่อนำแร่เหล็กกลับไปใช้ใหม่ ตะกรันเตา

ถลุงเหล็กบดจะบดให้ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์เพราะการทำปฏิกิริยาจะเกิดเร็วขึ้นตามความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเพิ่มขึ้น

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักซึ่งปนมากับสินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูนและหินโดโลไมต์ องค์ประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่าร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นๆที่ติดมา เช่น SO_3, Fe_2O_3 และ MnO อยู่เล็กน้อย ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในตารางที่ 3.1จะแตกต่างกันมาก แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะแต่ละโรงงานจะพบว่ามีค่าแตกต่างกันไม่มากการที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป) จึงทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ

2.2.3 ข้อกำหนดสำหรับตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

ASTM C989 ได้กำหนดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 80 100 และ 120 ซึ่งแต่ละชั้นคุณภาพจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (Slag activity index) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มีชั้นคุณภาพสูงจะค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันสูงโดย ค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันหาได้จาก

$$\text{ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ)} = [SP/P] \times 100 \qquad (2.8)$$

เมื่อ SP = ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดผสมอยู่ร้อยละ 50

P = ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน

2.2.4 การทำปฏิกิริยากับน้ำ

เมื่อผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำจะได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือได้ C-S-H โดยในกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะได้ C-S-H มาจาก C_3S เป็นส่วนมาก ส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะได้ C-S-H มาจาก C_2S เป็นส่วนใหญ่ และ C-S-H ที่ได้จากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความหนาแน่นสูงกว่ากรณีที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับการแตกตัวและการละลายของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ไม่เป็นผลึกเมื่อสัมผัสกับอิออนของไฮดรอกไซด์ (OH^-) ซึ่งได้มาจากกระบวนการไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะทำปฏิกิริยาทำให้ได้สาร C-S-H ซึ่งเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คอนกรีต นอกจากนี้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดยังสามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลได้อีกด้วยโดยเฉพาะในกรณีของอัลคาไลไฮดรอกไซด์

พบว่า ไฮเดรตของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ได้มีความแข็งแรงสูงกว่าไฮเดรตที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่

1. องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
2. ความเข้มข้นของด่างอัลคาไลในระหว่างทำปฏิกิริยา
3. ปริมาณที่ไม่เป็นผลึกของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
4. ความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
5. อุณหภูมิในขณะที่ทำปฏิกิริยา

ปัจจัยเหล่านี้มีผลซึ่งกันและกันจึงเกิดความยุ่งยากในการพิจารณาหาความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังนั้น ASTM C989 จึงแนะว่าควรใช้ค่าดัชนีของตะกรันเป็นดัชนีชี้ถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยานอกจากนี้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดควรได้รับการทดสอบก่อนเพื่อให้แน่ใจว่าได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติและคุณภาพตามต้องการ

2.2.5 ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตสด

โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีความสามารถในการเทและเขย่าหรือทำให้แน่นได้ง่ายกว่าคอนกรีตธรรมดา การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะยืดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตออกไปในกรณีที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ เวลาการก่อตัวที่ยืดออกไปจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคอนกรีตปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปเวลาการก่อตัวจะยืดออกไปราว ½ ถึง 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียสเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา การใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อเร่งการก่อตัวของคอนกรีตจะสามารถชดเชยผลกระทบของการก่อตัวที่ยืดออกไปได้ดีการเยิ้มน้ำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด กล่าวคือ ถ้าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้การเยิ้มน้ำลดลง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์การเยิ้มน้ำของคอนกรีตจะสูงขึ้น อัตราการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันหรือลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

2.2.6 ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

การบ่มคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพเพราะคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะมีปัญหาเรื่องการสูญเสียกำลังหากหยุดบ่มภายหลังจากหล่อ 3 วันไปแล้ว ซึ่งจะคล้ายกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 และอัตราการสูญเสียกำลังของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ทั้ง 2

ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสูงกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป มีแนวโน้มที่จะเสี่ยงอันตรายมากกว่าคอนกรีตธรรมดาในกรณีที่ไม่มีการบ่มที่ดี

การพัฒนากำลังคอนกรีตของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับคุณภาพ กล่าวคือ การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120 จะทำให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาเล็กน้อยในช่วงอายุ 1 ถึง 3 วันและให้กำลังอัดสูงกว่าเมื่ออายุเกิน 7 วันไปแล้วแต่การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 80 และ 100 จะให้กำลังที่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นส่วนใหญ่ แสดงให้เห็นว่าปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตมีผลต่อกำลังอัดอย่างมาก กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่อายุต่ำกว่า 28 วันจะลดลงเมื่อปริมาณตะกรันถลุงเหล็กบดละเอียดเพิ่มขึ้น แต่หลังจากอายุ 28 วันการพัฒนากำลังของส่วนผสมที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่สูงจะพัฒนาได้ดีกว่า โดยกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมตะกรันถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 จะให้กำลังสูงสุด การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดอุณหภูมิของคอนกรีตได้ เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลง และทำให้คอนกรีตทึบน้ำขึ้นและการซึมผ่านน้ำจะลดลงอย่างมากตามอายุที่เพิ่มขึ้นยิ่งปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากจะยิ่งลดการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตได้มากขึ้นเพราะโครงสร้างของโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีแนวโน้มทึบน้ำมากกว่ากรณีของซีเมนต์เพสต์ล้วน

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์และซัลเฟตได้ดี การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมี C_3A ถึงร้อยละ 12 ให้ผลการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (C_3A ไม่เกินร้อยละ 5) ซึ่งความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเนื่องมาจากคอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำ การที่ $Ca(OH)_2$ และอัลคาไลทำปฏิกิริยากับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดได้เป็น C-S-H จึงเหลืออัลคาไลและ $Ca(OH)_2$ น้อยลงในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟต การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาของอัลคาไลซิลิกาแต่มักต้องใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณสูงถึงร้อยละ 40 ถึง 65 ของวัสดุประสานจึงจะสามารถลดปัญหานี้ได้ดี ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและการต้านทานสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันของคอนกรีต ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดพบว่ามีความสามารถเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปแต่การคืบและการหดตัวมีแนวโน้มว่าคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีค่าสูงกว่าของคอนกรีตธรรมดา ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีสีจางกว่าสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังนั้นเมื่อหล่อเป็นคอนกรีตแล้วจึงอาจมีสีออกไปทางเขียวอ่อนได้นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมี ของกำมะถันจากซัลไฟด์กับส่วนผสมอื่นๆในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปรับปรุงด้วยตะกรันหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด Type

IS ถือว่าเป็นปูนซีเมนต์เทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นจึงสามารถใช้กับงานทุกประเภทที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยกเว้นในกรณีที่ต้องการกำลังสูงในช่วงอายุต้นของคอนกรีตนอกจากนี้ยังสามารถใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมกับปูนซีเมนต์ในขณะผสมคอนกรีตก็ได้โดยปริมาณและอัตราส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดขึ้นอยู่กับชนิดของงานคอนกรีตแต่ละงาน

2.3 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะนำไปเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงมายังก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ลักษณะส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน (0.001 มม.) จนถึง 0.15 มม. ความละเอียดของถ้าถ่านหินขึ้นอยู่กับการบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบดและชนิดของเตาเผา ถ่านหินที่เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะมีความละเอียดสูงและมีทรงกลม แต่กรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของเถ้าถ่านหินจะไม่แน่นอน เถ้าถ่านหินที่ละเอียดจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า

องค์ประกอบหลักของเถ้าถ่านหินคือ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดขึ้นอยู่กับ ชนิดของเถ้าถ่านหิน, อุณหภูมิ และ สภาพแวดล้อมขณะเผา ASTM C 618 จึงแยกเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภทคือ Class F และ Class C โดยเถ้าถ่านหิน Class F มีปริมาณ SiO_2+ Al_2O_3+Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ขณะที่ Class C มีปริมาณผลรวมของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่ถ่านหินชนิดแอนทราไซด์ (Anthracite) และบิทูมินัส (Bituminous) เมื่อเผาแล้วจะได้เถ้าถ่านหิน Class F ส่วนถ่านหินสับบิทูมินัส (Sub-bituminous) และถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เมื่อเผาแล้วจะได้เถ้าถ่านหิน Class C

โดยทั่วไปเถ้าลอยเป็นวัสดุที่นิยมใช้มากเพราะมีลักษณะเป็นผงละเอียด และมีคุณสมบัติที่ดีสามารถใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตได้ เช่น เพิ่มความสามารถเทได้ ลดปริมาณน้ำ ลดปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เพิ่มกำลังในระยะยาว ลดการหดตัว เพิ่มความทึบน้ำ และเพิ่มความคงทนต่อสารเคมี เป็นต้น แต่เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยจะเปลี่ยนแปลงตามชนิด แหล่งของถ่านหิน และกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้นเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต จึงควรมีคุณสมบัติสอดคล้องกับข้อกำหนดส่วนข้อเสียของเถ้าลอยคือ ให้กำลังต่ำในอายุแรกๆ

2.3.1 ลักษณะการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในงานคอนกรีต

ปัจจุบันการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตได้แพร่หลายมากขึ้น โดยอาศัยข้อดีทั้งทางกายภาพ และทางเคมีของเถ้าลอยมาเป็นประโยชน์ กล่าวคือ เถ้าลอยมีอนุภาคกลมส่งผลดีต่อความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต อีกทั้งอนุภาคมีความละเอียดสูงกว่าซีเมนต์ จึงทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดช่องว่าง (Filler) ระหว่างอนุภาคซีเมนต์ซึ่งโดยปกติแล้วช่องว่างเหล่านี้อาจถูกอุดด้วยปริมาณน้ำส่วนที่เกินจากการใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น นอกจากนั้นแล้วเถ้าลอยยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้นเช่น เพิ่มคุณสมบัติการรับแรง ความทนทาน คุณสมบัติการรับแรงดัด ลดคุณสมบัติการซึมน้ำ ลดการเยิ้มและการแยกตัว ลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลน์ เป็นต้น

การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในงานคอนกรีตสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะตามหน้าที่การทำงานของเถ้าลอย คือ

การแทนที่ เถ้าลอยที่ใช้เป็นส่วนผสมจะทำหน้าที่ทดแทนในส่วนของปูนซีเมนต์ โดยทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH_2)$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ เกิดสารที่ให้ความแข็งแรง (C-S-H) เช่นเดียวกันกับปฏิกิริยาที่เกิดจากปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิก นอกจากนี้ปฏิกิริยาของเถ้าลอยกับ $Ca(OH)_2$ ยังมีส่วนทำให้คอนกรีตสามารถทนทานต่อสารเคมีสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้น สามารถลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ซึ่งเป็นสารประกอบที่จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบพวกซัลเฟต ซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้

การผสมเพิ่ม เถ้าลอยที่เหลือจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะทำหน้าที่เป็นมวลละเอียดอุดตามช่องว่างของเนื้อคอนกรีต และเนื่องจากอนุภาคที่มีลักษณะกลมของเถ้าลอยจึงทำให้เนื้อคอนกรีตมีการไหลลื่นดี มีความต้องการน้ำลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัด และความทึบน้ำของคอนกรีตสูงขึ้น

การแทนที่และการผสมเพิ่มร่วมกัน เถ้าลอยจะแบ่งการทำหน้าที่เป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกจะทำหน้าที่ทำปฏิกิริยาแทนปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือก็จะทำหน้าที่เป็นมวลละเอียดอุดตามช่องว่างของเนื้อคอนกรีต

2.3.2 ผลกระทบของเถ้าลอยต่ออัตราส่วนผสมคอนกรีต

วิธีการที่ดีที่สุดในการประเมินคุณลักษณะของเถ้าลอยชนิดใดชนิดหนึ่งในส่วนผสมคือ การนำเถ้าลอยมาผสมในคอนกรีตและทดสอบคุณสมบัติต่างๆเถ้าลอยจากบางแหล่งอาจมีคุณสมบัติตลอดจนคุณที่เหนือกว่าเถ้าลอยจากแหล่งอื่น และข้อกำหนดสำหรับคอนกรีตแต่ละชนิดยังแตกต่างกัน ดังนั้นการกำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจึงไม่สามารถทำนายถึงคุณสมบัติของวัสดุและค่าต่างๆ ที่ต้องการได้นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยในปริมาณต่างๆกัน เพื่อทดสอบหาประมาณวัสดุประสานที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดตามต้องการ โดยมีการปรับเปลี่ยนการใช้เถ้าลอยในอัตราส่วนต่างกันด้วย โดยทั่วไปสำหรับงานคอนกรีตธรรมดาปริมาณที่เหมาะสมของการใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 25

โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ขณะที่การใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C จะอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 35 ของน้ำหนักวัสดุประสาน แต่อาจเพิ่มปริมารเถ้าลอยขึ้นได้อีกหากเป็นการเทคอนกรีตหลา เพื่อลดปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหรือเพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของซัลเฟตหรือเพื่อควบคุมปฏิกิริยาระหว่างด่างอัลคาไลน์และมวลรวมหรือเพื่อใช้ในงานคอนกรีตพิเศษอื่นๆ

2.4 ผงหินปูน (Limestone powder)

ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้ (By product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_2$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive material) มีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงและ/หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10

$$CaCO_3 + H_2O + \text{heat} \longrightarrow Ca(OH)_2 + CO_2 \qquad (2.9)$$

$$MgCO_3 + H_2O + \text{heat} \longrightarrow Mg(OH)_2 + CO_2 \qquad (2.10)$$

2.4.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.11

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 \qquad (2.11)$$

ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาวอย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์มอร์ต้าร์และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต

2.5.1 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

Yeau and Kim (2005) ได้ศึกษาความต้านทานการเกิดสนิมของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โดยมีชุดวิธีการทดสอบดังนี้

1) การทดสอบการซึมผ่านอย่างรวดเร็วของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 เพื่อหาปริมาณความสามารถแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน

2) การทดสอบการแพร่แบบเร่งของคลอไรด์ไอออน เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ไอออนที่แทรกซึมผ่านคอนกรีต

3) การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมแบบเร่งโดยใช้เทคนิควัฏจักรเปียกสลับแห้ง

4) การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C 876 เพื่อประเมินความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

5) การทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต เพื่อยืนยันผลการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการแทรกซึมผ่านของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 คอนกรีตที่ทุกส่วนผสมที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีต

ที่ไม่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กยิ่งกว่านั้นความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 สูงกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากพื้นฐานของผลการทดสอบทั้งหมดมีข้อเนอแนะว่า ความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีเพิ่มขึ้นมากเมื่อใช้ปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กสูงขึ้นในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากกว่าเมื่อใช้ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

Bagheri et al. (2012) ได้ศึกษาการใช้ซิลิกาฟูมในการเพิ่มอัตราการพัฒนากำลังและลักษณะความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด คือคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 15 30 และ 50 และคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 2.5 3 7.5 และ 10 คอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสามชนิด คือคอนกรีตที่ใช้ทั้งตะกรันเตาถลุงเหล็กและซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานที่อัตราการแทนที่ต่างๆ กำหนดใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.38 และปริมาณวัสดุประสานทั้งหมดเท่ากับ 420 kg/m^3 คงที่ทุกส่วนผสม ทำการประเมินกำลังอัด ความต้านทานไฟฟ้า ความสามารถซึมผ่านคลอไรด์ (การทดสอบ RCPT ตาม ASTM C1202) และการดึงดูดคลอไรด์ (การทดสอบ RCMT ตาม ASTM TP64) ที่อายุต่างๆถึง 180 วัน จากผลการทดลองปรากฏว่าการใช้ซิลิกาฟูมในทันทีมีผลกระทบระดับปานกลางในการปรับปรุงอัตราการได้มาของกำลังของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประเภทสองชนิด การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกาฟูมมีความเป็นไปได้ ทำให้ได้คอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสามชนิดที่มีกำลังที่อายุ 28 วัน เทียบเท่าคอนกรีตควบคุม และช่วยปรับปรุงความคงทนในระยะยาวทั้งนี้ส่วนผสมของคอนกรีตที่มีวัสดุประสานสามชนิดมีข้อได้เปรียบจากกรณีลดการใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตลง

Sharfuddin et al. (2008) ได้ศึกษาความรวดเร็วในการซึมผ่านของคลอไรด์ 2 วิธีการทดสอบ คือ การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง AASHTO's (RCPT) และ การทดสอบการเหนี่ยวนำคลอไรด์ ตามมาตรฐานมหาวิทยาลัย Cape Town (UCT) ทำการทดสอบเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่หล่อโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.48 และทำการบ่มเป็นเวลา 7 วัน มีการใช้เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็ก โดยใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 25 50 และ70 นอกจากนี้ยังได้ผสมซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ดังนั้นจึงมีการใช้วัสดุประสานแบบสองชนิด (Binary blend) และการใช้วัสดุประสานแบบสามชนิด (Ternary blend)ในการศึกษา จากผลการทดลองที่ได้มีการใช้วิธีการทางสถิติตามมาตรฐานด้วยเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุประสานสามชนิดที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 และซิลิกาฟูมแทนที่ร้อยละ 10 มีส่วนช่วยลดปริมาณประจุไฟฟ้าให้ต่ำกว่ากรณีที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 ชนิดเดียว ในทำนองเดียวกันปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุประสานสามชนิดที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 25 และ 50 ร่วมทั้งการใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ร้อยละ 10 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านต่ำกว่าการใช้วัสดุประสานสองชนิด ในการทดสอบตามมาตรฐานมหาวิทยาลัย Cape Town (UCT) มีความรวดเร็วกว่าและสะดวกในการใช้งานมากกว่าการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้วัสดุ

ประสานสองชนิดและการใช้วัสดุประสานสามชนิดด้วยกัน พบว่า การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT) มีผลการทดสอบที่แตกต่างและว่องไว ในขณะที่ความแตกต่างดังกล่าวนั้นจะเริ่มสำคัญเมื่อเริ่มใช้การทดสอบการเหนี่ยวนำคลอไรด์ ตามมาตรฐานมหาวิทยาลัย Cape Town (UCT)

Medeiros et al. (2009) ได้ทำการศึกษาการทดสอบการดึงดูดอิออนซึ่งถูกใช้เพื่อวัดความสามารถของคอนกรีตในการต้านทานการทำลายจากเกลือคลอไรด์ มีนักวิจัยจำนวนมากที่ได้ใช้การทดสอบนี้ โดยใช้แผ่นคอนกรีตที่ตัดออกมาจากส่วนกลางของตัวอย่างทรงกระบอก โดยทิ้งชิ้นส่วนคอนกรีต 75% ออกไป จึงทำให้เกิดคำถามขึ้นว่าจะเป็นไปได้หรือไม่ที่จะเอาชิ้นส่วนแผ่นคอนกรีตจำนวนมากขึ้นจากตัวอย่างชิ้นเดิมโดยไม่ทำให้สูญเสียความเชื่อมั่น ดั้งนั้นจุดมุ่งหมายหลักของการทดสอบนี้คือ การหาคำตอบเพื่อตอบคำถามดังกล่าว ยิ่งไปกว่านั้นจุดมุ่งหมายอีกประการหนึ่งก็คือ เพื่อแสดงความแตกต่างของการแทรกซึมคลอไรด์ระหว่างผิวหน้าที่หล่อเสร็จและพื้นผิวของแบบหล่อของคานและพื้นคอนกรีต จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ที่จะใช้จำนวนแผ่นคอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้นในตัวอย่างเดียวกันในการทดสอบการดึงดูดคลอไรด์ นอกจากนั้นพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของแทรกซึมคลอไรด์ระหว่างพื้นผิวที่หล่อเสร็จและพื้นผิวของแบบหล่อของชิ้นตัวอย่าง

2.5.2 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบปกติ

Bouikni et al. (2009) ได้ทำการศึกษาวิธีการใช้ตะกรันที่มีความละเอียดปกติในคอนกรีต มีความต้านทานที่สำคัญต่อคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตนั้น ในงานวิจัยนี้ได้รายงานการทดสอบหาความคงทนของคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยตะกรันร้อยละ 50 และ 65 โดยเผชิญสภาพสิ่งแวดล้อมการบ่มที่แตกต่างกัน การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมตะกรันได้กำหนดให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำและมีความสามารถในการทำงานที่ดี และมีการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่เหมือนกับคอนกรีตที่ไม่มีการใช้ตะกรันผสมตั้งแต่อายุ 3 วัน เป็นต้นไป และทำการทดสอบการกระจายของขนาดของโพรงโครงสร้างขนาดเล็ก และการแทรกซึมคาร์บอเนรชั่นอันเนื่องมาจากผลของรูปแบบการบ่มต่างๆ ของคอนกรีตรวมถึงความต้านทานต่อปฏิกิริยาอัลคาไรด์ซิลิกา จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การบ่มน้ำในช่วงต้นเป็นเวลา 7 วัน ก่อนที่จะเผชิญสภาพสิ่งแวดล้อมแบบแห้งมีความสำคัญในการลดความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตผสมตะกรัน จากข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แม้ว่าคอนกรีตผสมตะกรันเผชิญอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงก็ตามโครงสร้างจุลภาคโพรงของคอนกรีตผสมตะกรันมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ และมีการต้านทานต่อการเกิดการเสื่อมสภาพที่ดีกว่า

Leng et al. (2000) ได้ใช้สมการ Nernst-Einstein ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์อิออนของคอนกรีตสมรรถนะสูง (HPC) โดยได้วิเคราะห์และอภิปรายคุณสมบัติของสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์อิออนของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็ก จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์อิออนเพิ่มขึ้นเมื่อ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นและลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถบอกได้ว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์อิออนไม่ได้ขึ้นอยู่กับเฉพาะค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแต่เพียงเท่านั้นแต่ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารผสมเพิ่ม ทั้งคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กมีความต้านทานต่อคลอไรด์อิออนที่ดี และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์อิออนมีค่าต่ำกว่า 10^{-9} cm^2 / s

Lubeck et al. (2012) รายงานว่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของคอนกรีต เพราะสามารถใช้ประเมินความสามารถในการแทรกซึมเข้าไปของสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตก่อนที่กระบวนการการเกิดสนิมจะเริ่มขึ้นและใช้ประมาณการขยายตัวของการเกิดสนิมอีกด้วย ในการศึกษานี้ทำการตรวจสอบความต้านทานไฟฟ้าของส่วนผสมคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวและทั้งมีและไม่มีตะกรันเตาถลุงเหล็ก โดยวิธีขั้วอิเล็กโทด 4 ขั้วของเวนเนอร์ (Wenner's four-electrode) ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกและการนำไฟฟ้าของสารละลายในโพรงช่องว่าง (Pore solution) ปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ใช้คือร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนัก นำผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวล้วนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เทาล้วน รวมทั้งส่วนผสมที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เทาในปริมาณที่เท่ากัน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กเพิ่มมากขึ้นทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของสารละลายในโพรงช่องว่างลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตอ้างอิง สำหรับส่วนที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 50 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 50 มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดตั้งแต่ 35-60 MPa ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าประมาณ 5 เท่า และราคาน้อยกว่า 14.6% ต่อลูกบาศก์เมตร และมีความขาวเทียบเท่ากับคอนกรีตอ้างอิง จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวสามารถใช้ร่วมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กแทนที่บางส่วนได้

Maslehuddin et al. (2003) กล่าวว่าตะกรันของเหล็กเป็นผลพลอยได้จากการออกซิเดรชั่นของแท่งเหล็กในเตาหลอมเหล็กแบบไฟฟ้า ซึ่งผลพลอยได้นี้มีส่วนประกอบหลักคือ แคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเล็กๆที่ถูกใช้ในงานแอสฟัลท์ในงานคอนกรีต ตะกรันเหล็กมีประโยชน์อย่างยิ่งในพื้นที่ที่ยากในการหามวลรวมที่มีคุณภาพดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำขึ้นเพื่อประเมินคุณสมบัติเชิงกลและคุณลักษณะความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมตะกรันเหล็ก (Steel slag aggregate concrete) เทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหินปูนย่อย (Crushed limestone aggregate concrete) ทำการประเมินสมรรถนะความคงทนของทั้งคอนกรีตที่ใช้มวลรวมตะกรันเหล็กและคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหินปูนย่อย โดยประเมินจากความสามารถซึมผ่านของน้ำ ความเร็วคลื่นแบบพัลส์ ความคงตัวของขนาดและการเกิดสนิมของเหล็กเสริม จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าทั้งคุณสมบัติบางส่วนและคุณลักษณะความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมตะกรันเหล็กดีกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหินปูนย่อย แม้ว่าค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมตะกรันเหล็กสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหินปูนย่อยก็ตาม

บทที่ 3
วัสดุที่ใช้ในการทดลองและวิธีการทดลอง

ขอบเขตของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย การศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูน ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด 30% 40% 50% และ 70% เถ้าลอย 30% 50% ผงหินปูน 5% 10% 15% และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

ในการหาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรและสูง 20 เซนติเมตร นำมาตัดเป็นแผ่นหนา 5 เซนติเมตรและในการหากำลังอัดของคอนกรีต ใช้หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร บ่มตัวอย่างในน้ำประปา เป็นระยะเวลา 28 วัน และ 56 วัน ก่อนทำการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก. 15-2555 ดังรูปที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งค่ามัธยฐานขนาดคละของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าขนาดอนุภาคของเถ้าลอยและผงหินปูน โดยใช้ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 50 เล็กกว่า ในการเปรียบเทียบ ดังตารางที่ 3.2 และแสดงในรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 องค์ประกอบทางเคมี และทางกายภาพของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulated blast-furnace slag) แสดงในตารางที่ 3.1 ลักษณะของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแสดงในรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (Ground granulated blast-furnace slag)

3.1.3 องค์ประกอบทางเคมี และทางกายภาพของเถ้าลอย (Fly ash) แสดงในตารางที่ 3.1 ลักษณะของเถ้าลอยแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งมีค่ามัธยฐานขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคของผงหินปูน โดยใช้ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 50 เล็กกว่า ในการเปรียบเทียบ ดังตารางที่ 3.2 และแสดงในรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.3 เถ้าลอย (Fly ash)

3.1.4 องค์ประกอบทางเคมี และทางกายภาพของผงหินปูน (Limestone powder) แสดงในตารางที่ 3.1 ลักษณะของผงหินปูนแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งมีค่ามัธยฐานขนาดคละของขนาดอนุภาคผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย โดยใช้ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 50 เล็กกว่า ในการเปรียบเทียบ ดังตารางที่ 3.2 และแสดงในรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.4 ผงหินปูน (Limestone powder)

3.1.5 น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้ในการทดลอง เป็นน้ำประปาที่ได้จากห้องปฏิบัติการคอนกรีตภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา

3.1.6 มวลรวม (Aggregates)

มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) คือ หินที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.5

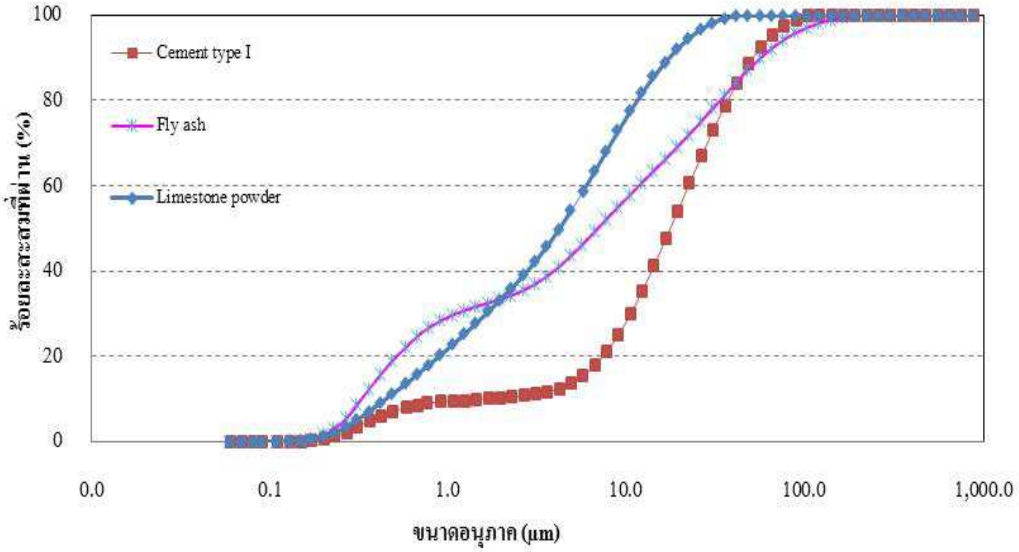
รูปที่ 3.5 มวลรวมหยาบ (หิน)

มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) คือ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 มวลรวมละเอียด (ทราย)

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูน

Chemical Compositions (%)	Portland cement Type 1	Ground granulated blast - furnace slag	Mae Moh Fly Ash	Limestone powder
Silicon dioxide, SiO_2	20.80	34.06	36.10	2.48
Aluminum oxide, Al_2O_3	5.50	16.27	19.40	1.13
Iron oxide, Fe_2O_3	3.16	1.70	15.10	0.38
Calcium oxide, CaO	64.97	36.05	17.40	55.13
Magnesium oxide, MgO	1.06	7.38	2.97	0.77
Sulfur Trioxide, SO_3	2.96	2.16	0.77	0.03
Sodium oxide, Na_2O	0.08	0.21	0.55	<0.01
Potassium oxide, K_2O	0.55	1.09	2.17	0.05
Titanium Dioxide, TiO_2	-	0.47	-	0.04
Phosphorus Pentoxide P_2O_5	-	0.01	-	0.01
Loss on ignition, LOI	2.89	1.44	2.81	39.73
Physical properties				
Blaine fineness (cm^2/g)	3,480	4,600	2,460	9,260
Specific gravity	3.11	2.96	2.27	2.70



รูปที่ 3.7 ขนาดคละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน

ตารางที่ 3.2 ค่ามัธยฐานขนาดคละปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน

Mean diameters	Cement type 1 (µm)	Fly ash (µm)	Limestone power (µm)
D (v, 0.1)	1.46	0.33	0.45
D (v, 0.5)	17.54	6.88	4.21
D (v, 0.9)	50.97	56.27	17.28
D [4 , 3]	23.09	19.80	6.81
D [3 , 2]	2.85	1.11	1.34

เมื่อ

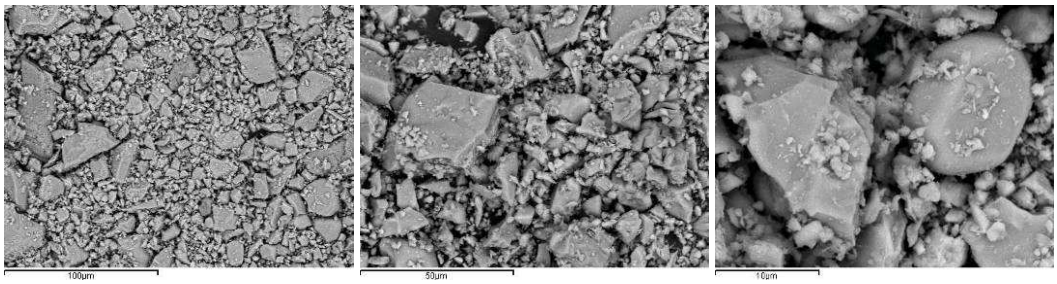
D (v,0.1) ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 10 เล็กกว่า

D (v,0.5) ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 50 เล็กกว่า

D (v,0.9) ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ปริมาตรอนุภาคจำนวนร้อยละ 90 เล็กกว่า

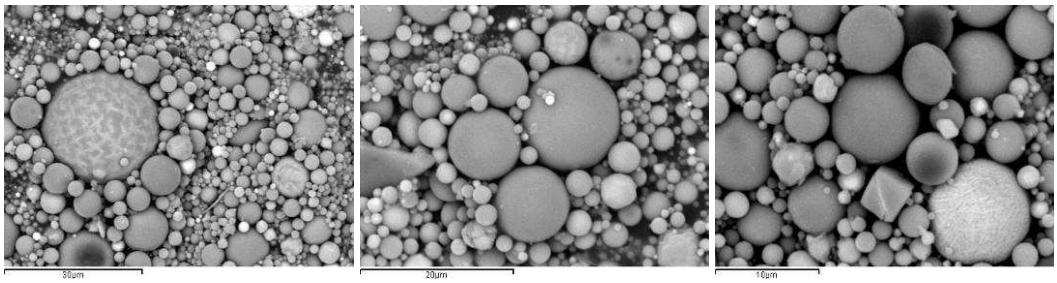
D [4,3] ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคเทียบเท่าโดยปริมาตร

D [3,2] ค่ามัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคเทียบเท่าโดยพื้นที่ผิว



x500 x1,000 x2,000

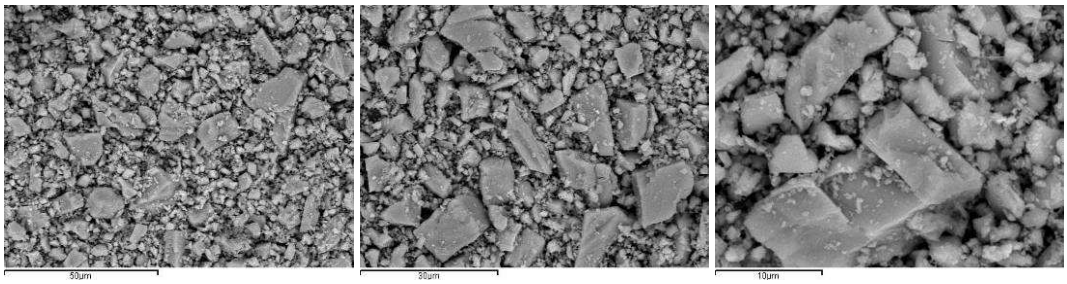
รูปที่ 3.8 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



x1,500 x2,500 x3,500

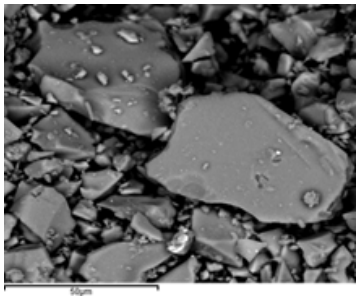
รูปที่ 3.9 รูปร่างอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหิน

อนุภาคเถ้าลอยเกือบทั้งหมดของแม่เมาะเป็นอนุภาคทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ แสดงในรูปที่ 3.7



x1,000 x1,500 x3,500

รูปที่ 3.10 รูปร่างอนุภาคของผงหินปูน



x1,000

รูปที่ 3.11 รูปร่างอนุภาคของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบหล่อชิ้นตัวอย่างคอนกรีตสูง 20 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 3.12

รูปที่ 3.12 แบบหล่อชิ้นตัวอย่างคอนกรีตสูง 20 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร

2. เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า

เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ใช้วัดความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งวัดค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านเนื้อคอนกรีตเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 60 โวลต์

รูปที่ 3.13 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า

3. เซลล์ทดสอบ

เซลล์ที่ใช้ประกอบเข้ากับก้อนตัวอย่างที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และหนา 5 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 3.14

รูปที่ 3.14 เซลล์ทดสอบ

4. เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ

ตัดตัวอย่างคอนกรีตออกเป็นแผ่นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และหนา 5 เซนติเมตร ลักษณะเครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีตแสดงในรูปที่ 3.15

รูปที่ 3.15 เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีต

5. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)

เครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งมีความละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 3.16

รูปที่ 3.16 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)

6. ช้อนตักสาร

ตักสารละลายและคนสารละลายที่ใช้ทดสอบ ลักษณะช้อนตักสารแสดงในรูปที่ 3.17

รูปที่ 3.17 ช้อนตักสาร

7. บีกเกอร์ขนาด 250 ml

ใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลักษณะบีกเกอร์ขนาด 250 ml แสดงในรูปที่ 3.18

รูปที่ 3.18 บีกเกอร์ขนาด 250 ml

8. บีกเกอร์ขนาด 1000 ml

ใช้ละลายสารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเติมน้ำกลั่นจนถึงปริมาณ 1000 ml ลักษณะบีกเกอร์ขนาด 1000 ml แสดงในรูปที่ 3.19

รูปที่ 3.19 บีกเกอร์ขนาด 1000 ml

9. น๊อตสำหรับล๊อคตัวเซลล์ทดสอบ

ล็อคตัวเซลล์ทดสอบเข้ากับก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ แสดงในรูปที่ 3.20

รูปที่ 3.20 น็อตสำหรับล็อคตัวเซลล์ทดสอบ

10. ซิลิโคน

ทาก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของสารละลาย ลักษณะซิลิโคน แสดงในรูปที่ 3.21

รูปที่ 3.21 ซิลิโคน

11. น้ำกลั่น

ใช้ละลายสารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ใช้เติมสารละลายในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วลบ ลักษณะสารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แสดงในรูปที่ 3.22

รูปที่ 3.22 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ใช้เติมสารละลายในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วบวก ลักษณะสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แสดงในรูปที่ 3.23

รูปที่ 3.23 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.3 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาด 20 เซนติเมตร × 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.24 โดยผสมตัวอย่างตามอัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 3.3

รูปที่ 3.24 ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 20 เซนติเมตร × 10 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

No.	Mix id.	Mix proportion of concrete (kg/m^3)						
		Binder				Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
		Cement	Slag	Fly ash	LP			
1	I40	400	-	-	-	160	793	1048
2	I40-SL30	280	120	-	-	160	788	1041
3	I40-SL40	240	160	-	-	160	786	1039
4	I40-SL50	200	200	-	-	160	786	1039
5	I40-SL70	120	200	-	-	160	782	1034
6	I40-SL30-LP5	260	120	-	20	160	787	1040
7	I40-SL30-LP10	240	120	-	40	160	785	1038
8	I40-SL30-LP15	220	120	-	60	160	783	1035
9	I40-SL50-LP5	180	200	-	20	160	784	1036
10	I40-SL50-LP10	160	200	-	40	160	782	1034
11	I40-SL50-LP15	140	200	-	60	160	780	1031
12	I50	400	-	-	-	200	747	988
13	I50-FA30	280	-	120	-	200	728	963
14	I50-FA50	200	-	200	-	200	717	947
15	I50-SL30	280	120	-	-	200	743	982
16	I50-SL40	240	160	-	-	200	742	980
17	I50-SL50	200	200	-	-	200	740	978
18	I50-SL70	120	280	-	-	200	736	973
19	I50-SL30-LP5	260	120	-	20	200	741	980
20	I50-SL30-LP10	240	120	-	40	200	739	976
21	I50-SL30-LP15	220	120	-	60	200	737	975
22	I50-SL50-LP5	180	200	-	20	200	738	976
23	I50-SL50-LP10	160	200	-	40	200	736	973
24	I50-SL50-LP15	140	200	-	60	200	735	971
25	I50-FA30-LP5	260	-	120	20	200	726	959
26	I50-FA30-LP10	240	-	120	40	200	725	958
27	I50-FA50-LP5	180	-	200	20	200	715	944
28	I50-FA50-LP10	160	-	200	40	200	713	942

หมายเหตุ : “I” หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

“SL” หมายถึง ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

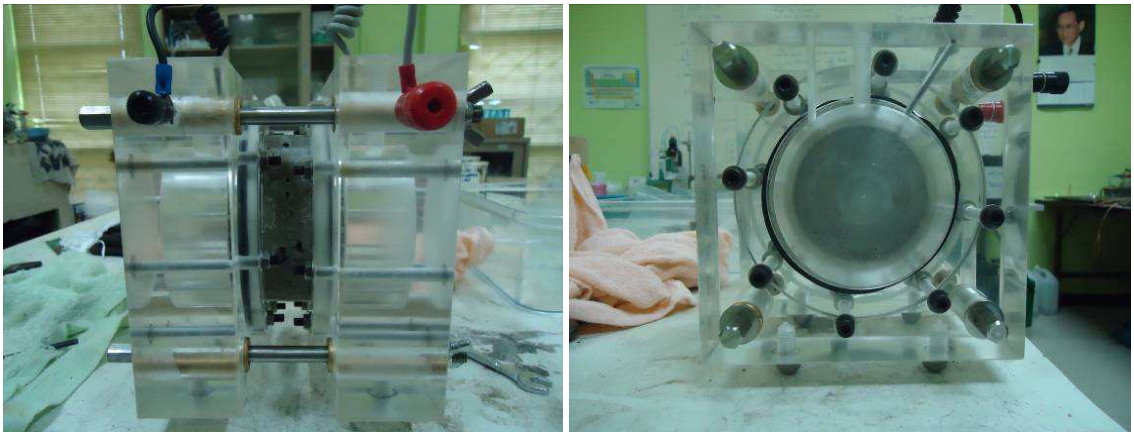
“FA” หมายถึง เถ้าลอย

“LP” หมายถึง ผงหินปูน

2. หลังจากตัวอย่างแข็งตัวแล้วให้นำตัวอย่างที่ได้บ่มในน้ำประปา เพื่อนำไปทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีแบบเร่ง ตามระยะเวลาที่กำหนด คือ ที่ตัวอย่างอายุ 28 วัน และ 56 วัน ตามลำดับ

3. นำตัวอย่างที่ตัดออกเป็นแผ่นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และหนา 5 เซนติเมตร ผ่านการบ่มครบอายุตามที่กำหนด ทำให้ชิ้นงานมีความชื้นในเนื้อของคอนกรีต

4. นำตัวอย่างที่ซับน้ำออกจนแห้งมาทำการทาซิลิโคนรอบตัวอย่าง และรอจนกว่าซิลิโคนที่ทาไว้จะแห้ง และทำการประกอบเซลล์ทดสอบกับตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปด้านข้าง รูปด้านหน้า

รูปที่ 3.25 รายละเอียดเซลล์ทดสอบ

3.3.2 การเตรียมสารละลาย

1. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ชั่งสารโซเดียมคลอไรด์ 30 กรัม โดยให้ละเอียดถึงตำแหน่งทศนิยม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร ใช้แท่งคนสารคนสารโซเดียมคลอไรด์จนละลายได้หมด สำหรับการเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์1,000มิลลิลิตรสามารถใช้ในการทดสอบได้ประมาณ 3 ตัวอย่างการทดสอบ

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 M ชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัม โดยให้ละเอียดถึงตำแหน่งทศนิยม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร ใช้แท่งคนสารคนสารโซเดียมคลอไรด์จนละลายได้หมด

3.3.3 วิธีการทดสอบ

1. เติมสารละลาย

เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3% ในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วลบ (-) และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 M ในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วบวก (+)

2. การต่อสายไฟ

ต่อสายไฟจากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับเซลล์ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.26 โดยต่อสายไฟขั้วบวกเข้ากับเซลล์ทดสอบขั้วบวก และสายไฟขั้วลบเข้ากับเซลล์ทดสอบขั้วลบ

รูปที่ 3.26 การต่อสายไฟ

3. การตั้งค่าเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า และการเรียกใช้งานโปรแกรมการทดสอบ

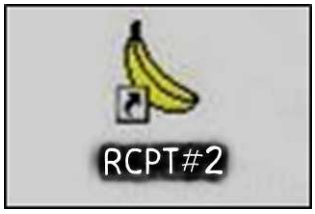
1. เปิดสวิตซ์เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าไปที่ตำแหน่ง ON (ควรเปิดเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าก่อนทำการทดสอบเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที) จากนั้นกดปุ่ม “Reset” ที่เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น 60 โวลต์ ตั้งค่าช่วงการบันทึกค่า ทุกๆ 30 นาที และตั้งเวลาในการทดสอบทั้งหมด 360 นาที จากนั้นเลือกช่องสัญญาณที่จะทดสอบ สังเกตไฟสัญญาณสีแดงสว่างขึ้น แสดงว่าเครื่องได้เริ่มต้นทดสอบแล้ว

2. หลังจากการทดสอบครบ 360 นาที ให้ต่อสายสัญญาณ RS – 232 จากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับ Serial port ของเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อถ่ายโอนข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ และแสดงผลการทดสอบในรูปแบบของตารางและกราฟ

ตารางที่ 3.4 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์อิออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202

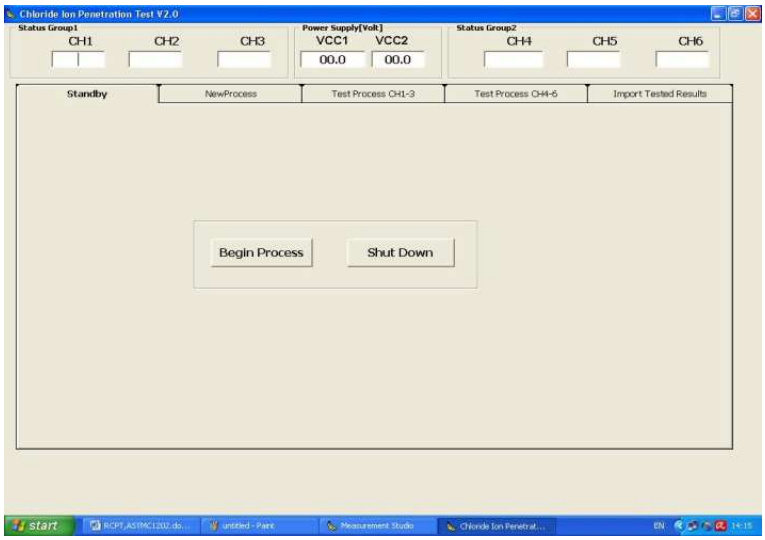
Charge passed (Coulombs)	Chloride ion penetrability
> 4,000	High
2,000–4,000	Moderate
1,000–2,000	Low
100-1,000	Very low
< 100	Negligible

3. เรียกใช้งานโปรแกรมการทดสอบโดยดับเบิ้ลคลิ๊กที่ RCPT#2 ดังรูปที่ 3.27



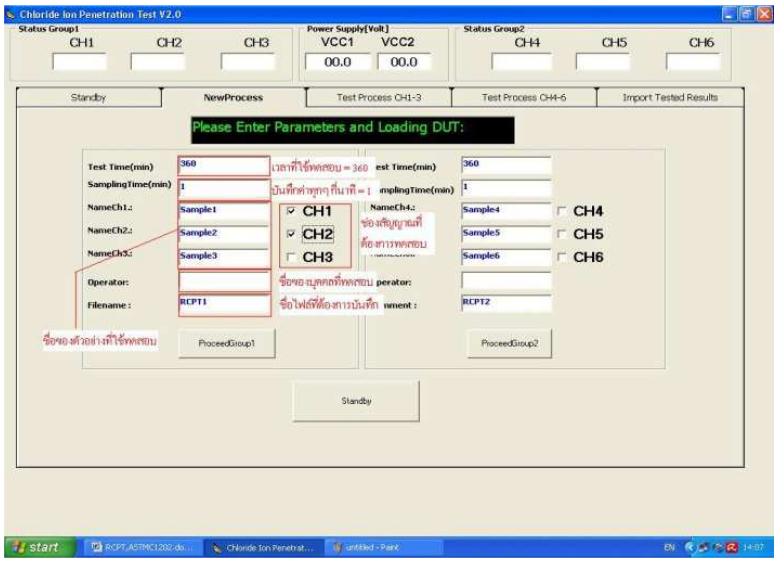
รูปที่ 3.27 การเรียกใช้โปรแกรมใช้งาน

4. หลังจากเรียกโปรแกรมใช้งานแล้ว จะขึ้นหน้าต่างดังแสดงในรูปที่ 3.28 จากนั้นให้คลิ๊กที่ “Begin Process”



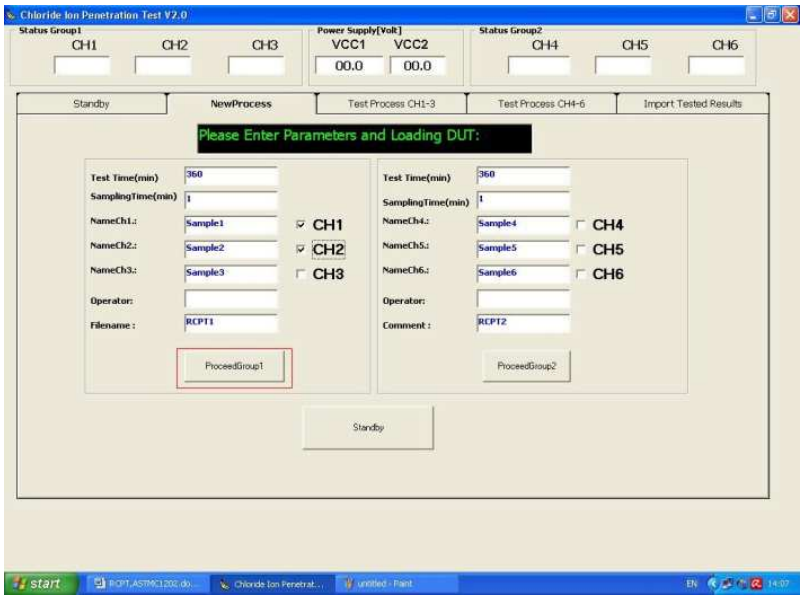
รูปที่ 3.28 การเข้าสู่โปรแกรมใช้งาน

5. กรอกรายละเอียดสำหรับการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การกรอกข้อมูลสำหรับการทดสอบ

6. กดปุ่ม ProceedGroup1 สำหรับช่องสัญญาณ 1 – 3 และ ProceedGroup 2 สำหรับช่องสัญญาณที่ 4 –6 เพื่อเริ่มการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 หน้าต่างแสดงรายละเอียดระหว่างทดสอบ

7. หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นให้คลิ๊ก “back process” และคลิ๊ก “Shut down” เพื่อปิดโปรแกรม

8. สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะถูกบันทึกอยู่ใน “Result”

รูปที่ 3.31 ตำแหน่งที่เก็บบันทึกข้อมูลที่ทดสอบ

9. ให้นำตัวอย่างออกจากเซลล์ทดสอบเพื่อทำความสะอาดอุปกรณ์ต่อไป

*หมายเหตุ สำหรับสกูลที่ใช้ให้ชโลมด้วยน้ำมัน แล้วใช้ผ้าสะอาดเช็ดให้แห้งก่อนเก็บทุกครั้ง

3.4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่มีขนาด 10 × 10 × 10 ซม.^{3} ดังแสดงรูปที่ 3.32 โดยผสมตัวอย่างตามอัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 3.3

รูปที่ 3.32 ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10 × 10 × 10 ซม.^{3}

2. หลังจากตัวอย่างแข็งตัวแล้วให้นำตัวอย่างที่ได้บ่มในน้ำประปา เพื่อนำไปทดสอบความสามารถรับกำลังอัดของคอนกรีต ตามระยะเวลาที่กำหนด คือ ที่ตัวอย่างอายุ 28 วัน

3. นำตัวอย่างที่ผ่านการบ่มครบอายุตามที่กำหนด ไปทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต อ่านและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่องดังแสดงในรูปที่ 3.33

รูปที่ 3.33 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

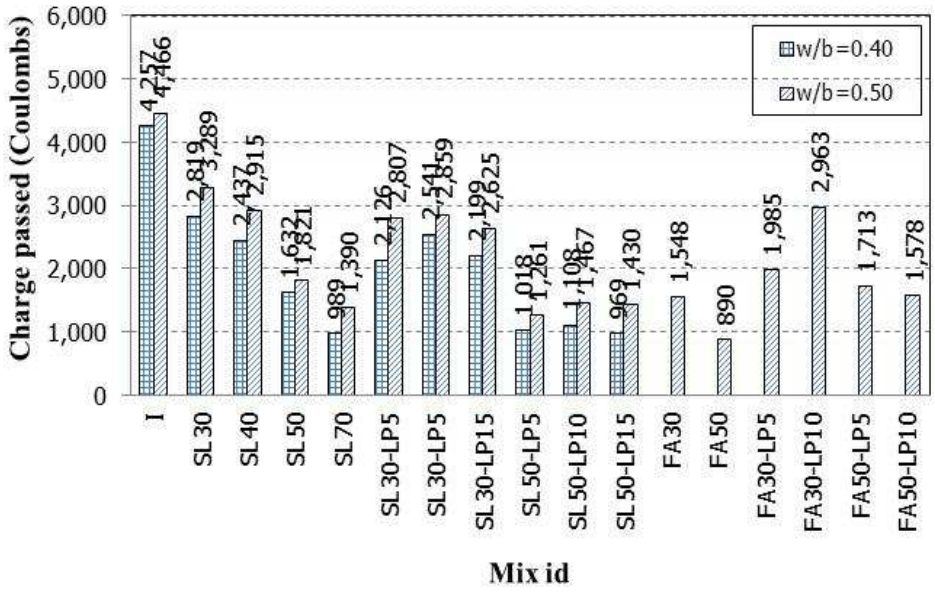
บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

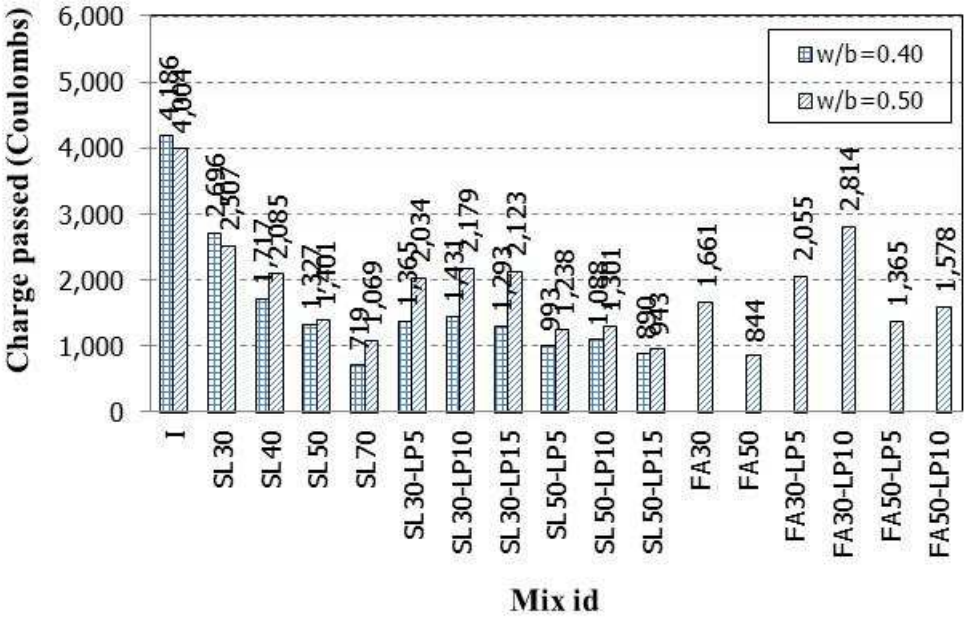
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตพิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งในคอนกรีตตามมาตราฐาน ASTM C1202 ซึ่งถูกแสดงด้วยค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านคอนกรีต หน่วยเป็นคูลอมป์ โดยเมื่อปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตต่ำ หมายถึงมีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำ ดังนั้นทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดี

4.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ทั้งที่อายุการบ่ม 28 วัน และ 56 วัน ดังแสดงได้จากการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งที่ต่ำกว่า (ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต) เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง ทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลงและเกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยาก จึงทำให้มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่า



(ก) ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

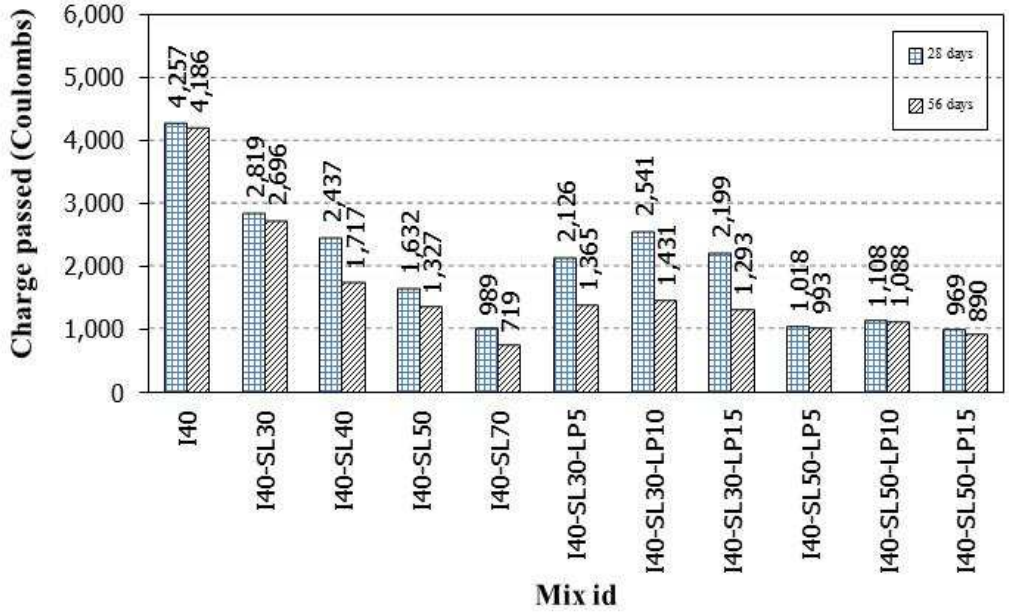


(ข) ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน

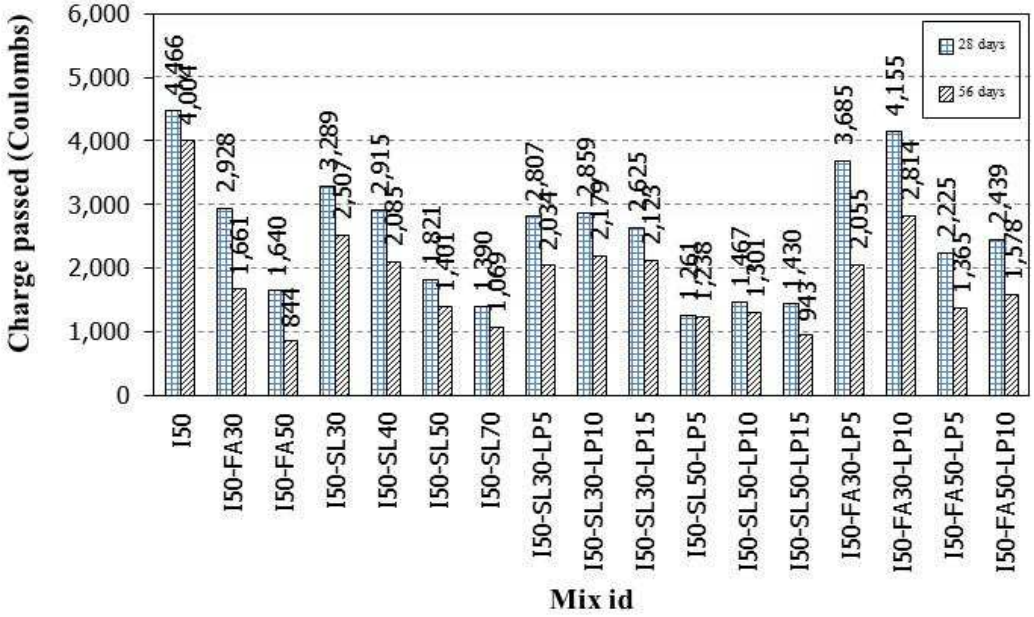
รูปที่ 4.1 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

4.1.2 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม

จากรูปที่ 4.2 พิจารณาระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน และ 56 วัน พบว่า ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 56 วัน ดีกว่าระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน เนื่องจากเมื่อคอนกรีตมีการบ่มน้ำนานขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดต่อเนื่องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อย เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยาก ส่งผลทำให้ปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านลดลง



(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



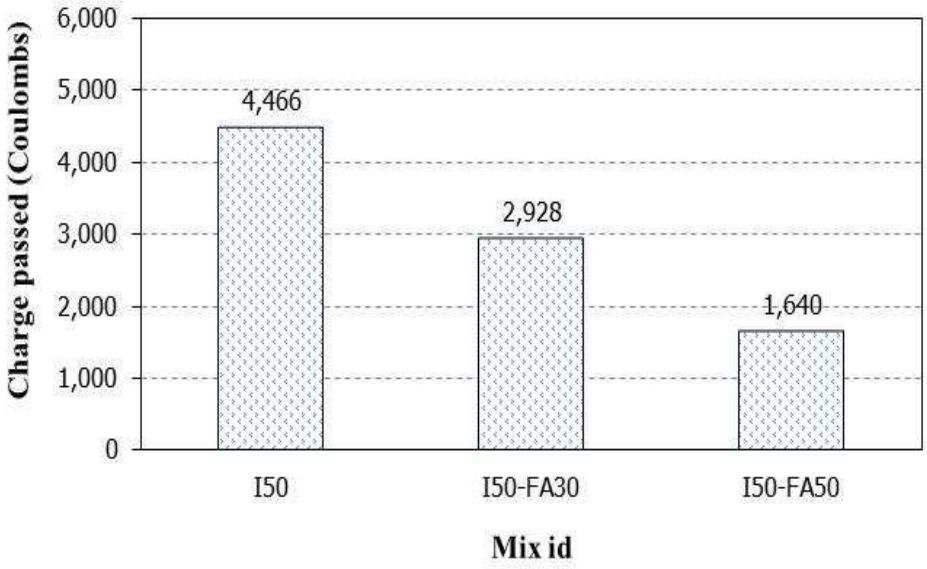
(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

รูปที่ 4.2 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ 56 วัน

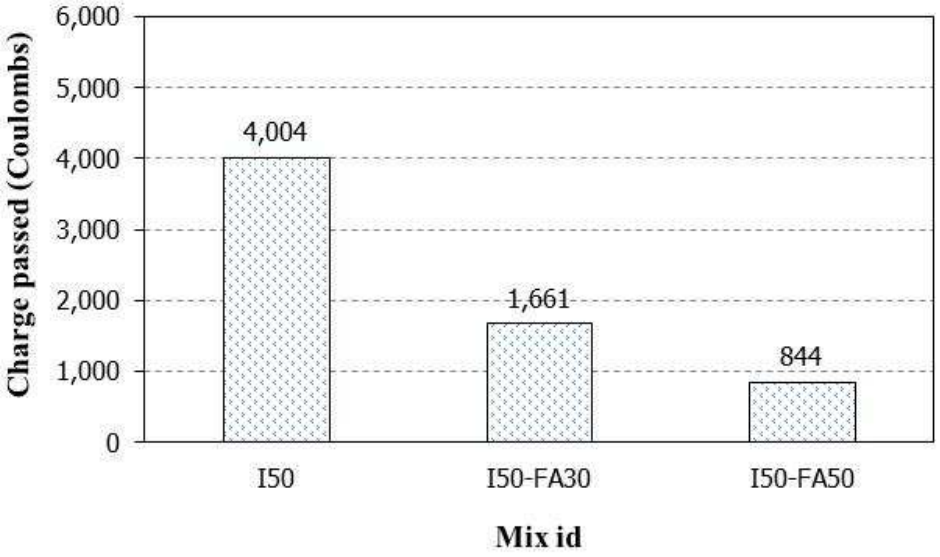
4.1.3 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.3 พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานมีปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียว ทั้งคอนกรีตที่อายุ 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ซึ่งปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านนั้นแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานช่วยทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานช่วยทำให้ช่องว่างในคอนกรีตลดลงด้วยขนาดอนุภาคที่เล็กของเถ้าลอย รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต(C-A-H) ทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์จึงสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาที่อายุ 28 วัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านอยู่ในช่วง 2,000-5,000 คูลอมป์ ส่วนคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านอยู่ในช่วง 1,000-2,000 คูลอมป์ แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในประมาณที่เพิ่มมากขึ้น (จากการแทนที่ร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 50) ทำให้ปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตมีค่าลดลง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากขึ้น เนื่องมาจากปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่มากขึ้นทำให้ปริมาณซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น และยังมีปริมาณ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ที่เพียงพอทำให้ปริมาณ C-S-H และ C-A-H จากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มมากขึ้น ทำให้เนื่อคอนกรีตแน่นขึ้น ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านลดลง ทั้งนี้กรณีอายุการบ่ม 56 วัน ก็เช่นเดียวกับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30



(ก) ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

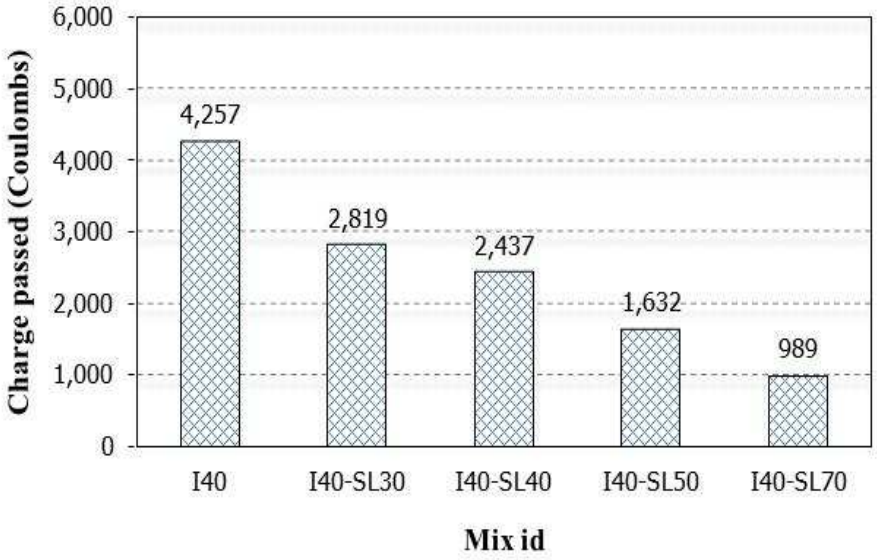


(ข) ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน

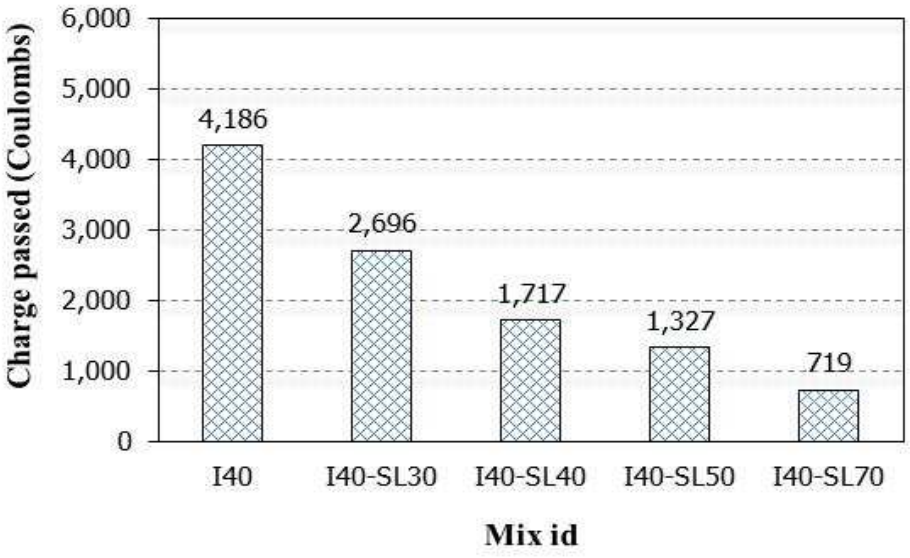
รูปที่ 4.3 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50

4.1.4 ผลกระทบของอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดในอัตราส่วนร้อยละ 30 40 50 และ 70 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ 56 วัน พบว่า การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 70 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีที่สุด เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เมื่อทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้เกิดเป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ช่วยอุดโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลง และทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์เกิดขึ้นได้ยากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียว



(ก) ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

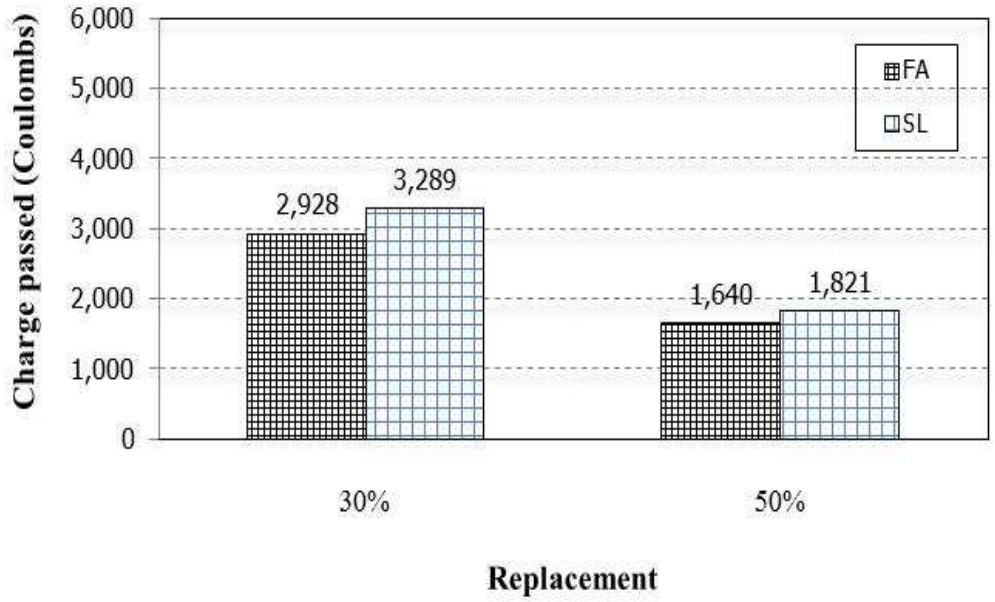


(ข) ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน

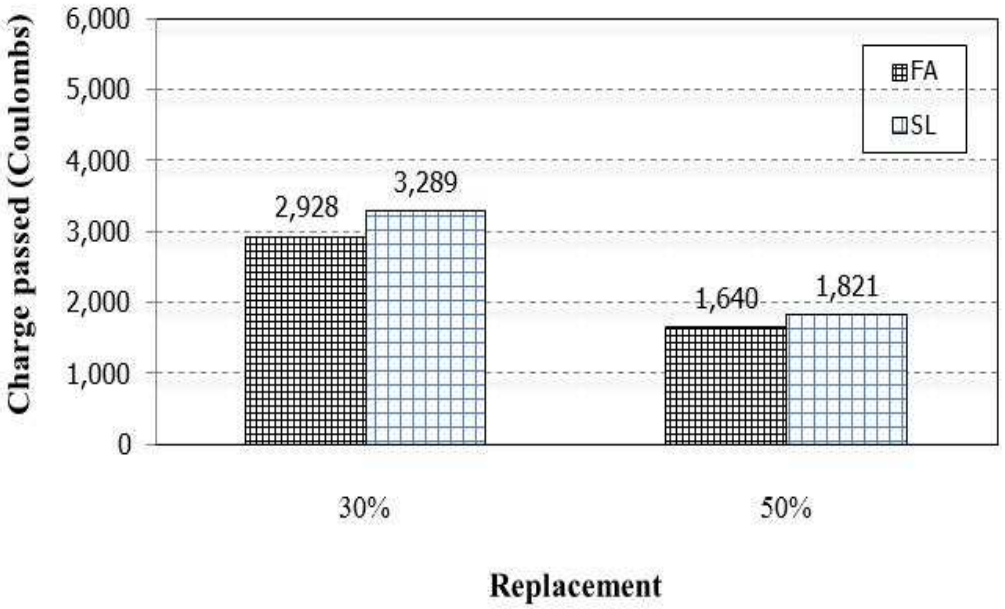
รูปที่ 4.4 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 40 50 และ 70 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

4.1.5 ผลกระทบของชนิดวัสดุปอซโซลาน

จากรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาค่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วันและ 56 วัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยทั้งร้อยละ 30 และ 50 มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้การแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เนื่องจากเถ้าลอยมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาที่มากกว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เมื่อปริมาณอลูมินาและซิลิกามีมาก และยังมีปริมาณ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ที่เพียงพอ ทำให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) จากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น ทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ก็สูงขึ้นด้วย



(ก) ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

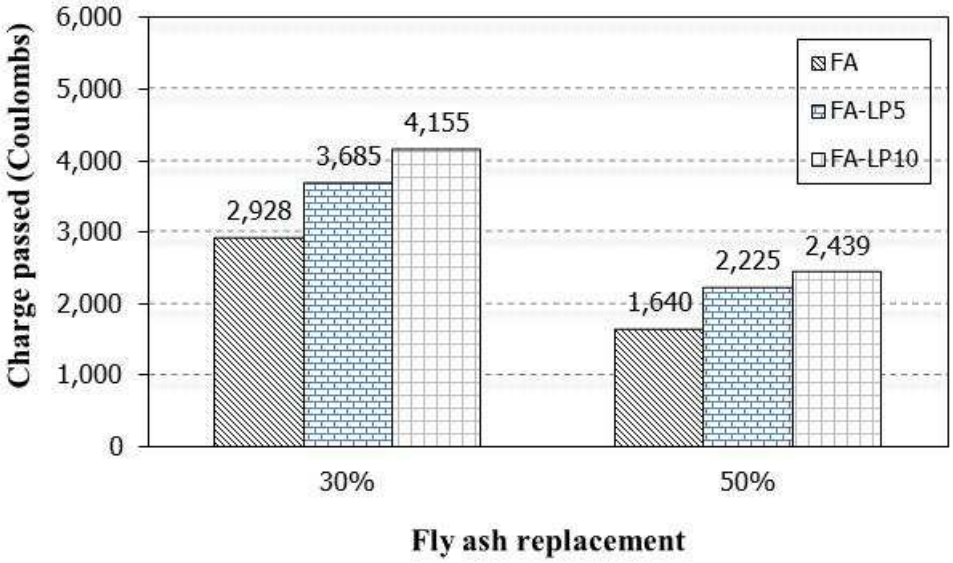


(ข) ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน

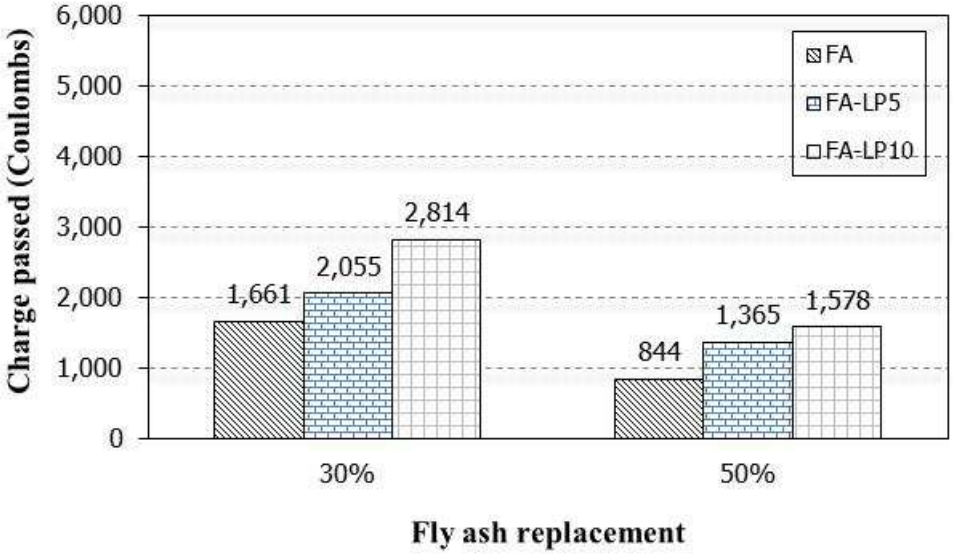
รูปที่ 4.5 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

4.1.6 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยกับผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาค่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนที่ร้อยละ 30 และร้อยละ 50 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และระยะเวลาในการบ่มที่ 28 วัน และ 56 วัน พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน จากปริมาณผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 5 และ ร้อยละ 10) ทำให้มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตต่ำลง เนื่องจากเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน โดยมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาออกไซด์สูง (ร้อยละ 70.60) เมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนที่เป็นวัสดุเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยาในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 ส่งผลให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงลดลง ทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านมีปริมาณสูงขึ้น ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์จึงต่ำลง



(ก) ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



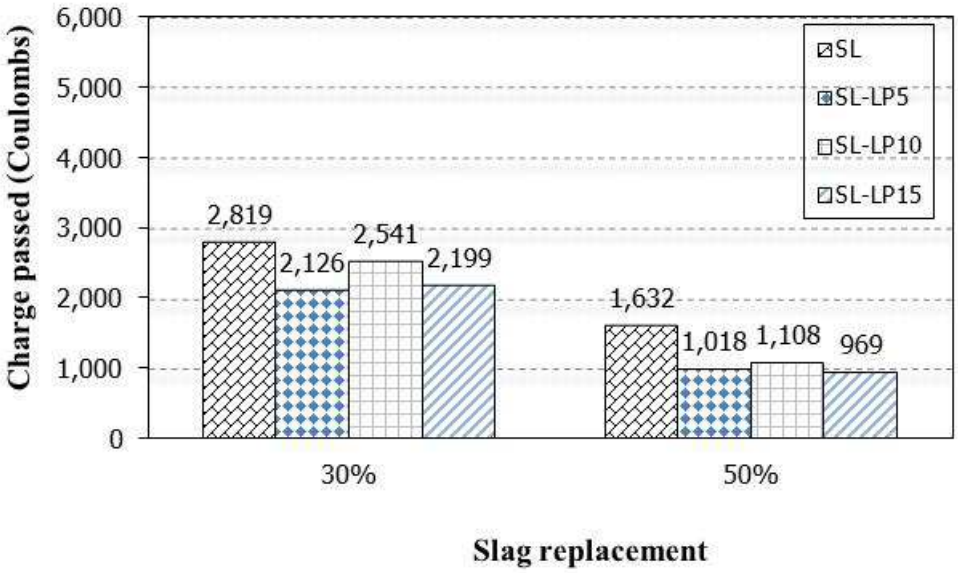
(ข) ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน

รูปที่ 4.6 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

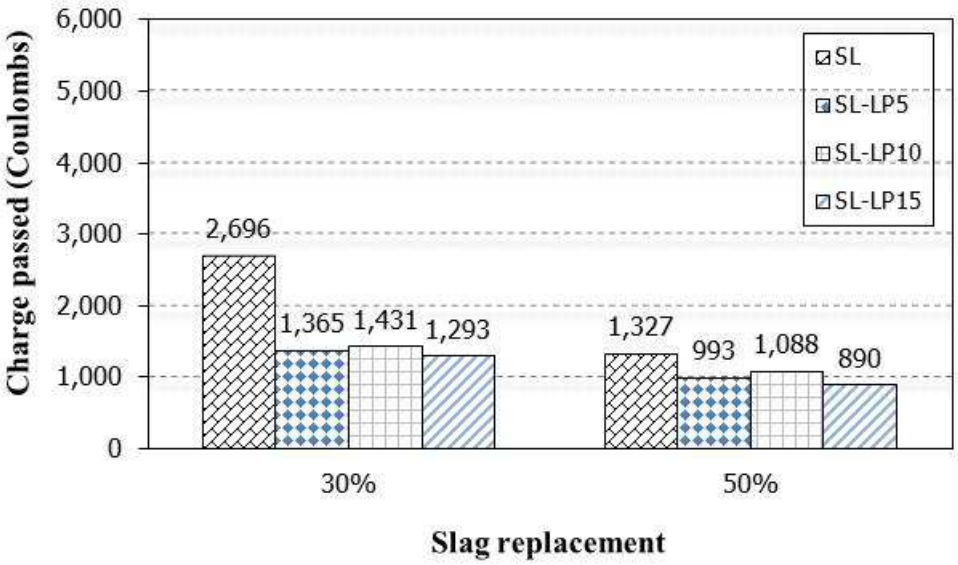
4.1.7 ผลกระทบของอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.7 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 ร่วมกับผงหินปูนอัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน และ 56 วัน พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 50 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 10 และ 15 แทนที่วัสดุประสาน ทั้งระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน และ 56 วัน มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลง ส่งผลทำให้มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน โดยมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาออกไซด์สูง (ร้อยละ 52.03) เมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนที่เป็นวัสดุเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยาร้อยละ 5 10 และ 15 ส่งผลให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง แต่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดสามารถทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ที่มีเพียงพอ ทำให้เกิดเป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) และผงหินปูนช่วยในการอุดโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีตและทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลง ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์จึงสูงขึ้น

และจากรูปที่ 4.8 แสดงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 50 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 10 และ 15 แทนที่วัสดุประสาน ทั้งระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน และ 56 วัน มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลง ส่งผลทำให้มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง

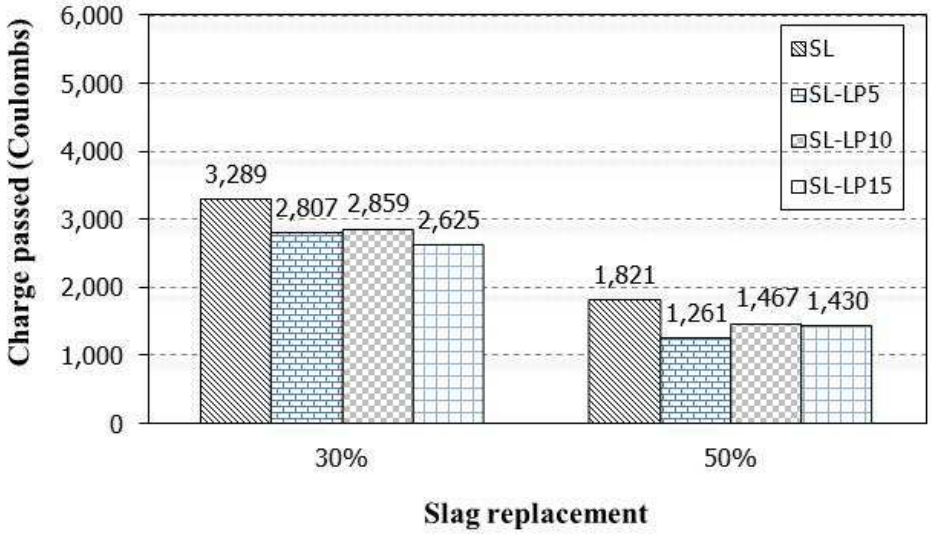


(ก) ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

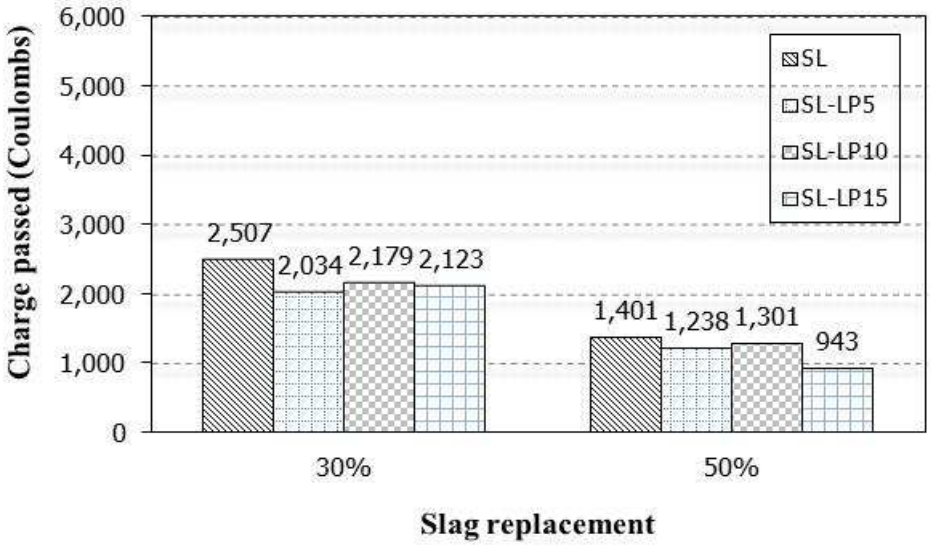


(ข) ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน

รูปที่ 4.7 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



(ก) ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

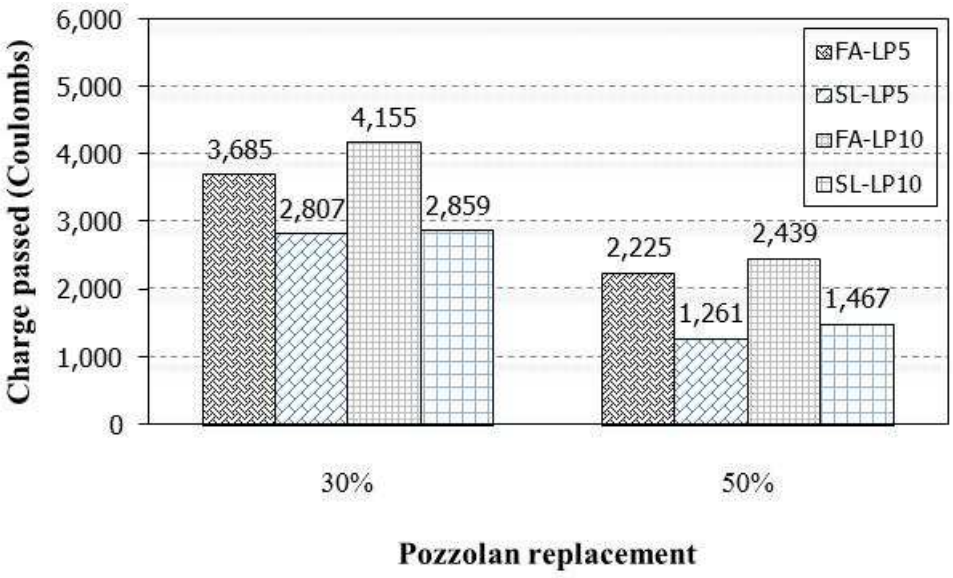


(ข) ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน

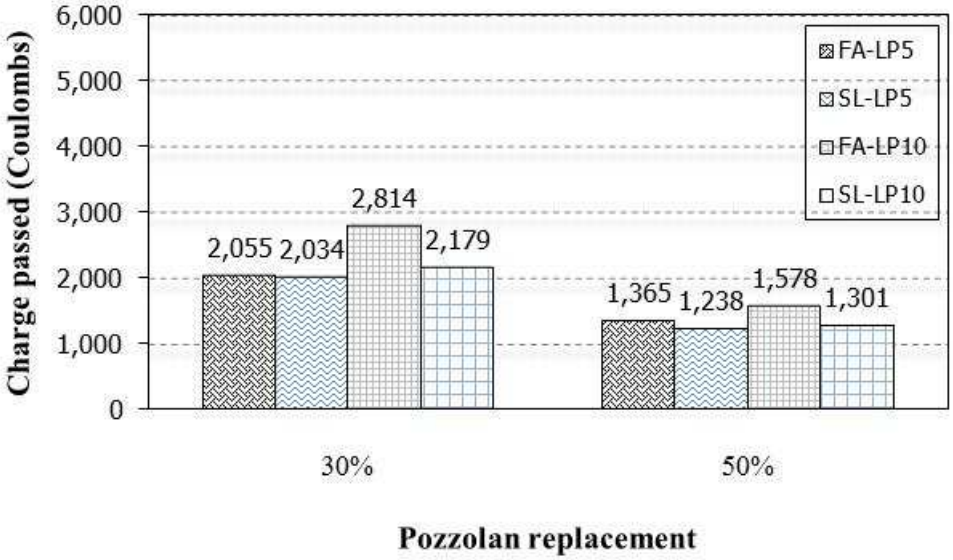
รูปที่ 4.8 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

4.1.8 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยกับผงหินปูนต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.9 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 ร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน และ 56 วัน พบว่า ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่ด้วยวัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอย อาจเนื่องจากผงหินปูนสามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย แม้ว่าเถ้าลอยจะมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาออกไซด์สูงกว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดก็ตาม จึงช่วยลดความพรุนของคอนกรีตให้น้อยลง ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ก็สูงขึ้น



(ก) ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



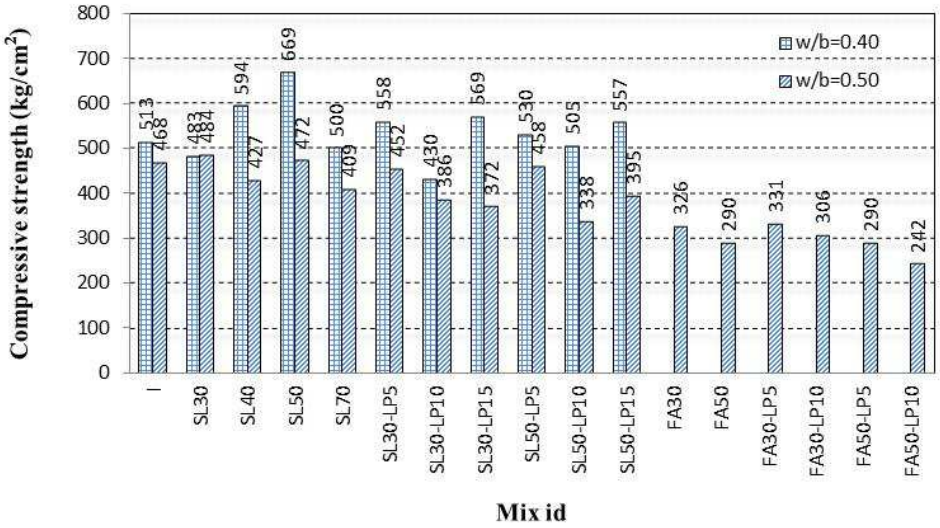
(ข) ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน

รูปที่ 4.9 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและเถ้าลอยกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

4.2 กำลังอัดของคอนกรีต

4.2.1. ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

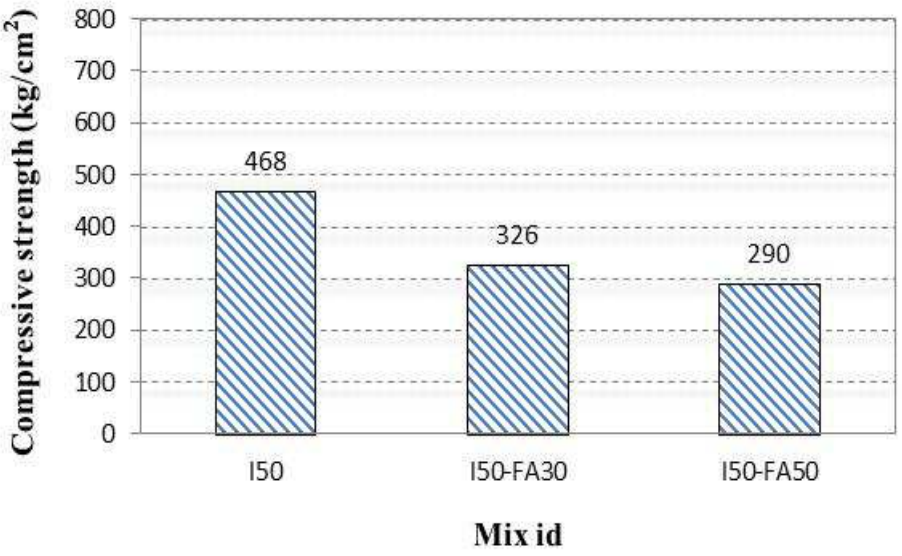
จากรูป 4.10 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง ทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลง จึงทำให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่า



รูปที่ 4.10 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน

4.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

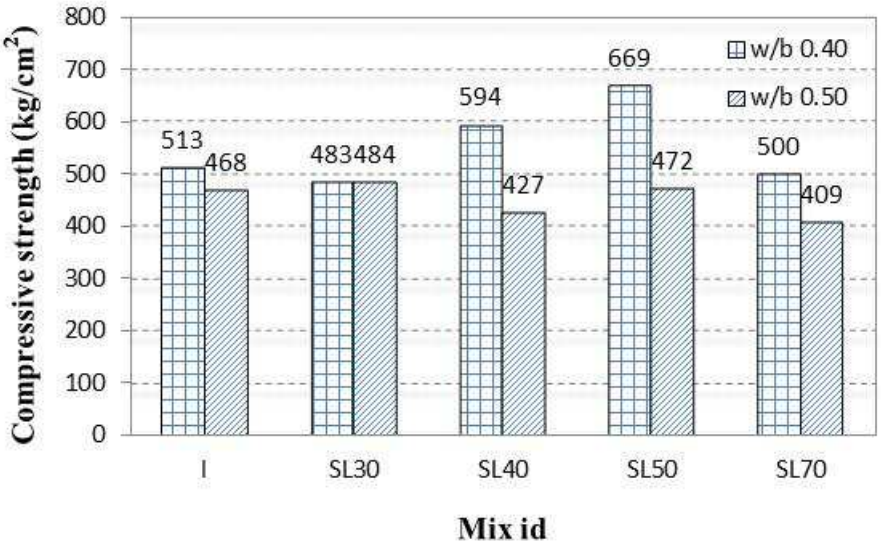
จากรูปที่ 4.11 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า เมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีกำลังอัดสูงกว่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 เนื่องจากการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 จะไปลดปริมาณ C_3S และ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำ และเมื่อคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานต่ำ (ร้อยละ 30) สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดสาร C-S-H gel ช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานสูง (ร้อยละ 50)



รูปที่ 4.11 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน

4.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดต่อวัสดุประสาน

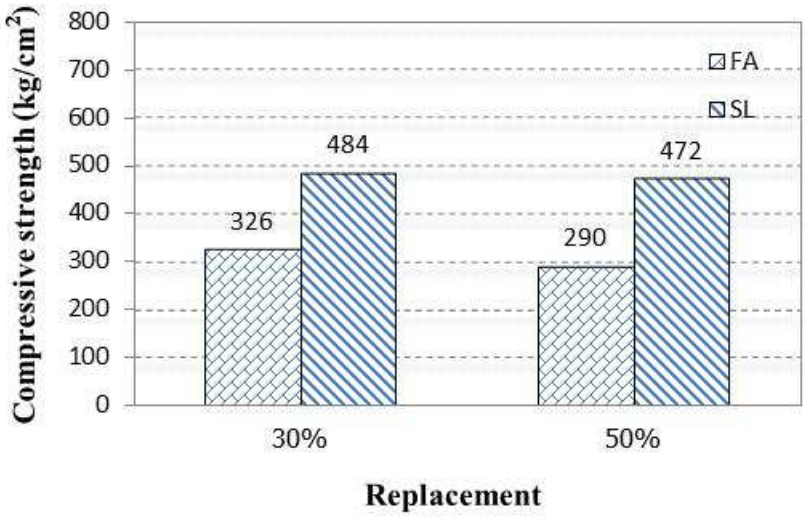
จากรูปที่ 4.12 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 40 50 และ 70 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 คอนกรีตที่ใช้ตะกรันถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 และ 50 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว สำหรับการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันถลุงเหล็กบดร้อยละ 30 และ 70 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเกิดมากขึ้น ทำให้เกิดสาร C-S-H gel ช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต กำลังอัดจึงมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่า คอนกรีตที่ใช้ตะกรันถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานมีค่าที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการบ่มที่ช่วงระยะต้น (28 วัน) การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังทำได้ไม่ดีนัก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



รูปที่ 4.12 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 40 50 และ 70 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน

4.2.4 ผลกระทบของชนิดวัสดุปอซโซลาน

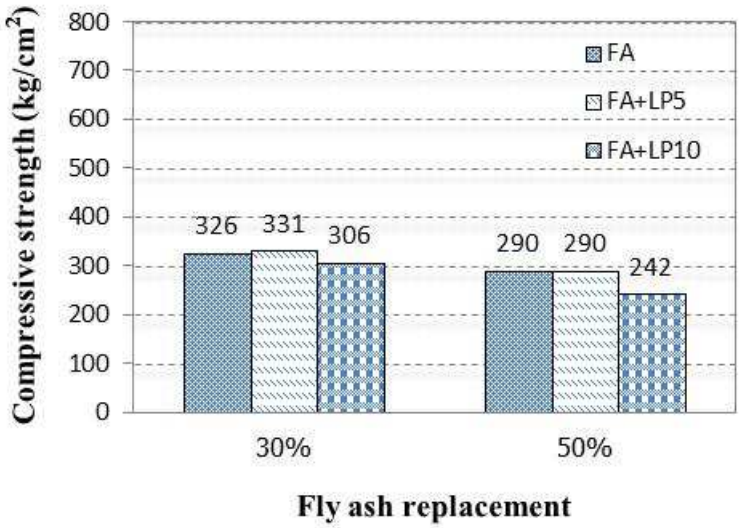
จากรูปที่ 4.13 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า การแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 30 และ 50 มีกำลังอัดสูงกว่า เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเกิดมากขึ้น ทำให้เกิดสาร C-S-H gel ช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลง กำลังอัดจึงสูงกว่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย



รูปที่ 4.13 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน

4.2.5 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยกับผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

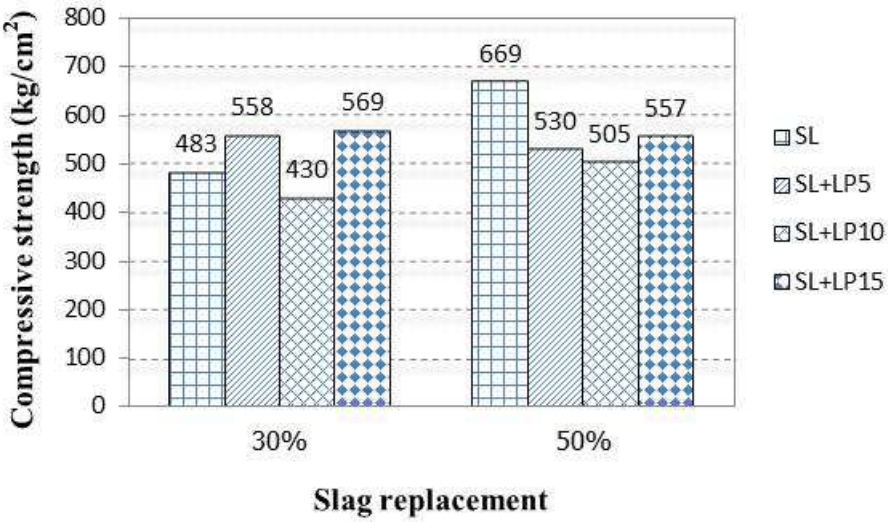
จากรูปที่ 4.14 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 ร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า เมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มีกำลังอัดสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เนื่องจากการบ่มที่ช่วงระยะต้น (28 วัน) การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังทำได้ไม่ดีนัก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าลอย



รูปที่ 4.14 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน

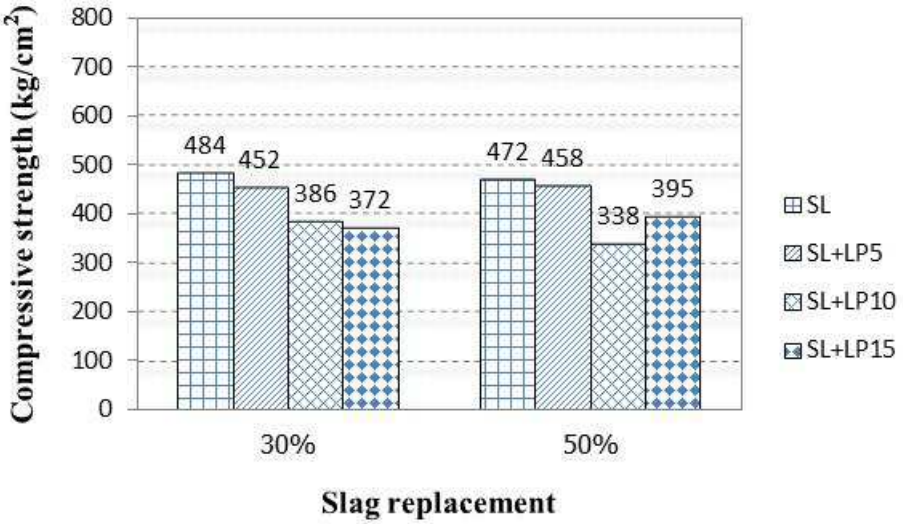
4.2.6 ผลกระทบของอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.15 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (ยกเว้นที่การแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 30 มีกำลังอัดใกล้เคียงกัน) เนื่องจากการบ่มที่ช่วงระยะต้น (28 วัน) การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังทำได้ไม่ดีนัก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดต่ำกว่าการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับตะกรันเตาถลุงเหล็กบด



รูปที่ 4.15 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน

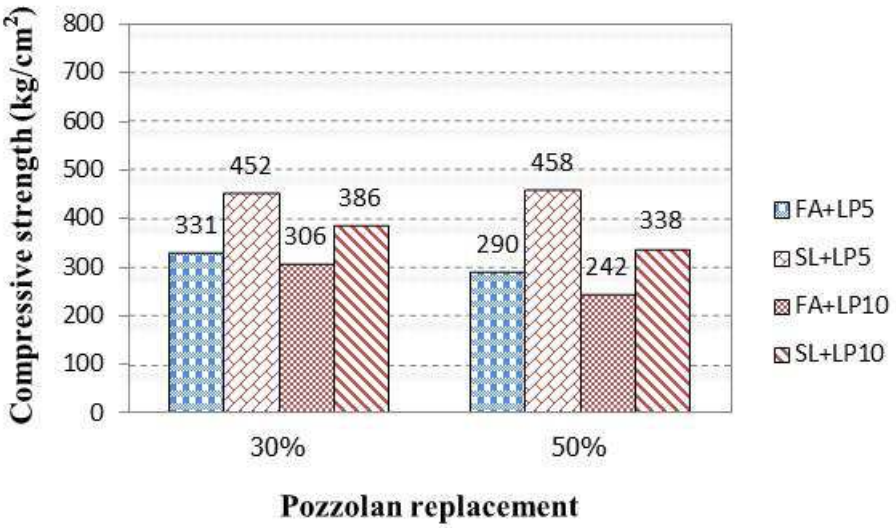
จากรูปที่ 4.16 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 ร่วมกับผงหินปูนอัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 พบว่า คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เช่นเดียวกับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เนื่องจากการบ่มที่ช่วงระยะต้น (28 วัน) การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังทำได้ไม่ดีนัก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดต่ำกว่าการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับตะกรันเตาถลุงเหล็กบด



รูปที่ 4.16 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 10 และ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน

4.2.7 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยกับผงหินปูนต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดกับผงหินปูนต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.17 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 และ 50 ร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เกิดเป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ทำให้ช่วยในการเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีตและทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลง ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น



รูปที่ 4.17 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดและเถ้าลอยกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5 และ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

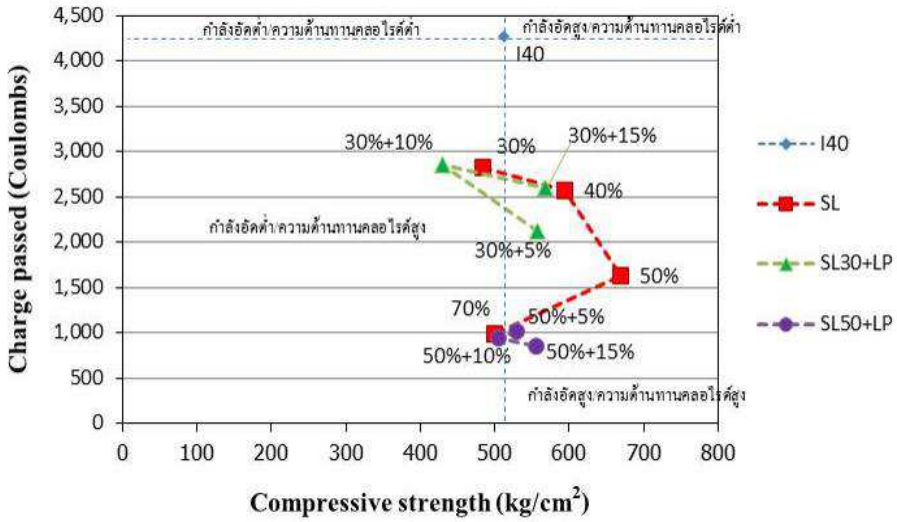
ในการศึกษาความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตซึ่งเป็นคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต จำเป็นต้องพิจารณาควบคู่ไปกับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตด้วย เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ได้ในความคงทนและกำลังที่ดี ซึ่งต้องเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วๆไป ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวเป็นตัวอ้างอิง โดยให้แกนนอนแสดงค่ากำลังอัดคอนกรีตส่วนแกนตั้งแสดงค่าการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

จากรูปหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ แล้วพบว่า บริเวณด้านบนขวาของรูปมีกำลังอัดสูง/ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ บริเวณด้านบนซ้ายมีกำลังอัดต่ำ/ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ บริเวณด้านล่างขวามีกำลังอัดสูง/ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง และบริเวณด้านล่างซ้ายมีกำลังอัดต่ำ/ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง

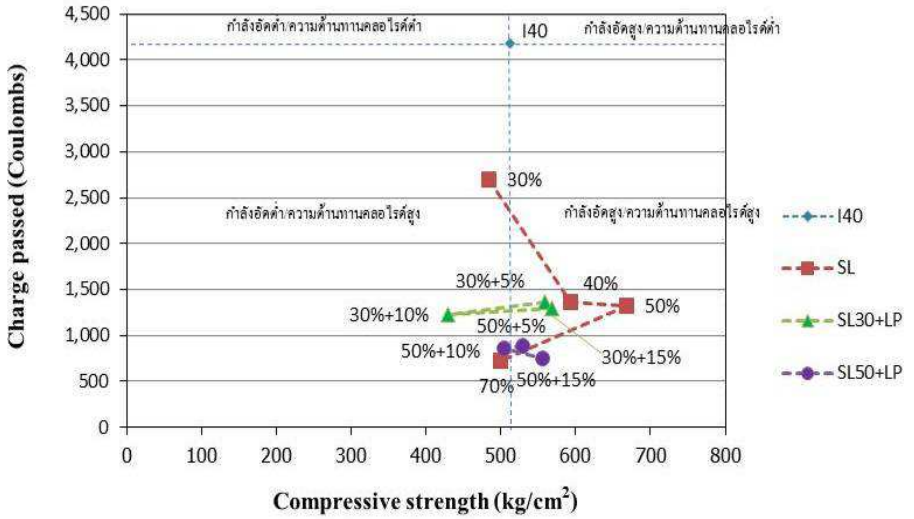
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

จากรูปที่ 4.18 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 พบว่า การแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 50 และการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 50 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และ 15 มีกำลังอัดสูงและมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง และการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 70 การแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 50 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำและมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เมื่อทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ที่เพียงพอ เกิดเป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) เมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนที่เป็นวัสดุเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำร้อยละ 5 10 15 ทำให้ช่วยในการเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีตและทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลงส่งผลให้มีกำลังอัดสูงและมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง และเนื่องจากการบ่มที่ช่วงระยะต้น (28 วัน) การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังทำได้ไม่ดีนัก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดต่ำและมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง

จากรูปที่ 4.18 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน ผลที่ได้เป็นเช่นเดียวกับที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน เนื่องจากการบ่มที่ช่วงระยะต้น (28 วัน) การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังทำได้ไม่ดีนัก ส่งผลให้มีกำลังอัดต่ำและมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่า



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



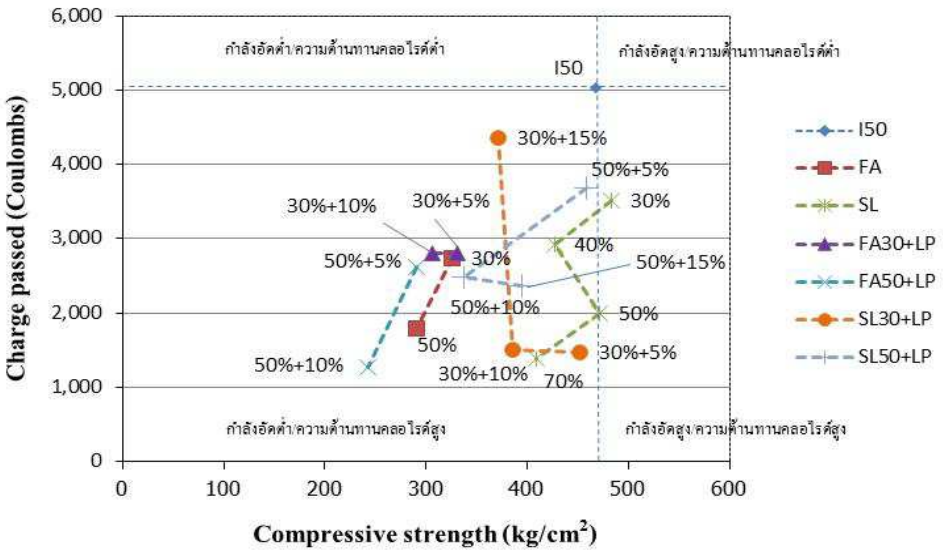
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วันและ 56 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

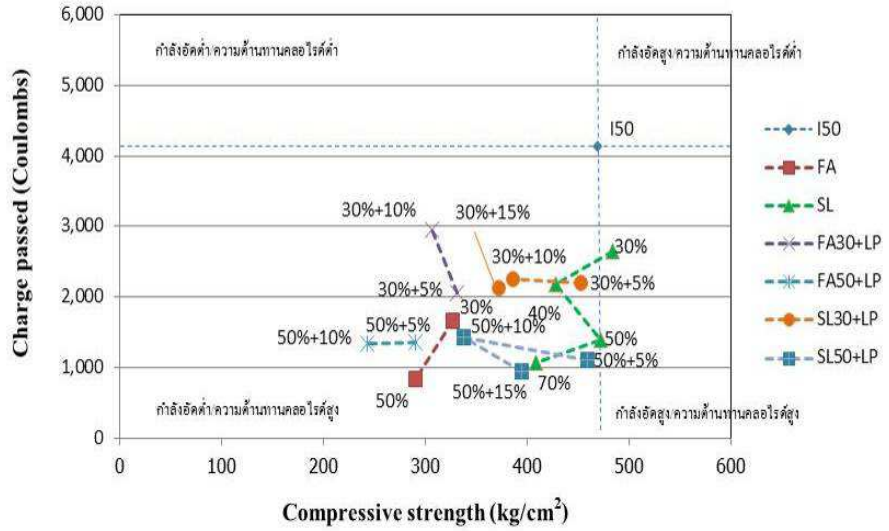
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

จากรูปที่ 4.19 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่า การแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 50 มีกำลังอัดสูงและมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง และการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 70 การแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 มีกำลังอัดต่ำและมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานเมื่อทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ที่เพียงพอ เกิดเป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) เมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนที่เป็นวัสดุเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำร้อยละ 5 10 และ 15 ทำให้ช่วยในการเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีตและทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลงส่งผลให้มีกำลังอัดสูงและมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง และเนื่องจากการบ่มที่ช่วงระยะต้น (28 วัน) การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังทำได้ไม่ดีนัก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดต่ำและมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง

จากรูปที่ 4.19 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่า การแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 50 มีกำลังอัดสูงและมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง และการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 70 การแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดร้อยละ 50 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และ 15 การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 มีกำลังอัดต่ำและมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วันและ 56 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

บทที่ 5
สรุปผล

5.1 สรุปผล

1. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 70 มีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำที่สุด แต่ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 มีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำที่สุด

คอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสามชนิด คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 -15 มีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำที่สุด ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

2. กำลังอัดของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 - 50 มีกำลังอัดสูงที่สุด

คอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสามชนิด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนแทนที่ร้อยละ 5 - 15 มีกำลังอัดสูงที่สุด

3. ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและกำลังอัดของคอนกรีต

ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 มีกำลังอัดสูงแต่มีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ ส่วนคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 ร่วมกับผงหินปูนแทนที่ร้อยละ 5 และ 15 มีกำลังอัดต่ำและมีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ

4. ประสิทธิภาพของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดเทียบกับเถ้าลอยต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

คอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานและคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานมีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำกว่า เพราะเถ้าลอยมีปริมาณซิลิกาและอลูมินามากกว่าตะกรันเตาถลุงเหล็ก

บด และยังมีปริมาณ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ที่เพียงพอ ทำให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) จากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มมากขึ้น

คอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานสามชนิด คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร่วมกับผงหินปูนแทนที่ และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร่วมกับผงหินปูนแทนที่ พบว่า คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่วัสดุประสานร่วมกับผงหินปูนแทนที่ มีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำกว่า เพราะผงหินปูนสามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย แม้ว่าเถ้าลอยจะมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาออกไซด์สูงกว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดก็ตาม จึงช่วยลดความพรุนของคอนกรีตให้น้อยลง ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ก็สูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่นๆ เช่น ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน เพื่อศึกษาผลกระทบของปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย เป็นต้น

2. ควรศึกษาระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น เช่นที่ 91 วัน และ 182 วัน เพื่อศึกษาผลกระทบของระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้นต่อความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

3. ควรศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตด้วยวิธีอื่น เช่น ความต้านทานการแพร่ของคลอไรด์แบบปกติ เพื่อเปรียบเทียบวิธีการทดสอบแบบเร่งและแบบปกติว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร

บรรณานุกรม

ทวีชัย สำราญวานิช. (2553). การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์ โยธาสาร วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, ปีที่ 22 ฉบับที่ 3, พฤษภาคม-มิถุนายน 2553, 79-85.

ทวีชัย สำราญวานิช. (2551). คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 4 เดือนสิงหาคม.

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

ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete1.

ASTM C876 – 09, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.

ASTM C989-99,Standara Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars.

Bagheri, A.R., Zanganeh, H. & Moalemi, M. M. (2004). Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag. *Cement & Concrete Composites*, 34,663-670.

Bouikni, A., Swamy, R.N. & Bali, A. (2009). Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag. *Construction and Building Material*, 23,2836-2845.

Leng, F., Feng, N. & Lu, X. (2000). 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*, 30,989-992.

Lubeck, A., Gastaldini, A.L.G., Barin, D.S. & Siqueira, H.C. (2012).Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. *Cement & Concrete Composites*, 34,392-399.

Maslehuddin, M., Sharif, A. M., Shameem, M., Ibrahim, M. & Barry, M.S. (2003). Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 17,105-112.

Medeiros, M.H.F., Filho H. J. & Helene P. (2009). Influence of slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions. *Marine Structures*, 22, 128 - 141

Sharfuddin Ahmed, M., Kayali, O. & Anderson, W. (2008). Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretesas measured by two different rapid methods. *Cement & Concrete Composites*, 30,576-582.

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