รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ผลกระทบของการใช้เถ้าลอยเปียกต่อกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต

(Effect of the use of wet fly ash on compressive strength and chloride resistance of concrete)

ผศ.ดร. ทวีชัย สำราญวานิช

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 387142

สัญญาเลขที่ 157/2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ผลกระทบของการใช้เถ้าลอยเปียกต่อกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต

(Effect of the use of wet fly ash on compressive strength and chloride resistance of concrete)

ผศ.ดร. ทวีชัย สำราญวานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มีนาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 157/2560

Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 157/2560)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัตถุประสาน 0.50 และ 0.60 อัตราการแทนที่เถ้าลอยต่อวัตถุประสานร้อยละ 20, 40 และ 60 โดยความชื้นในเถ้าลอยเปียกเท่ากับร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียก 1 เดือน ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 10 x 10 x10 ซม3 สำหรับทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน และหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด ϕ10×20 ซม^2 สำหรับทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.0% เป็นเวลา 28, 56 และ 91 วัน ภายหลังการบ่มน้ำ 28 วัน

จากผลการทดลองพบว่า การใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่บางส่วนของปริมาณวัสดุประสานในคอนกรีตทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีขึ้นและกำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น การใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีที่สุด ขณะที่การใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดดีที่สุด คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง

Abstract

This research aims to study the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete containing wet fly ash. The ratios of water to binder were kept at 0.50 and 0.60. The wet fly ash was used in binder replacement content at 20%, 40% and 60% by weight. The moisture content of wet fly ash was 60% by weight of fly ash. The moisture exposure period of fly ash was one month. Cube specimens of $10\times10\times10$ cm^3 size were cast for compressive strength test of concrete at 28, 56 and 91 days. Cylindrical specimens of 10-cm diameter and 20-cm height were cast for rapid chloride penetration test of concrete at 28, 56 and 91 days and chloride penetration test of concrete submerged in 3.0% solution of sodium chloride for 28, 56 and 91 days after curing in pure water for 28 days.

From the experimental results, it was found that the use of partial replacement of wet fly ash in binder content of concrete results in better chloride penetration resistance and higher compressive strength. The replacement of wet fly ash in concrete at 40% of binder gives the highest chloride penetration resistance, while the replacement of wet fly ash in concrete at 20% of binder gives the highest compressive strength. Concretes containing wet fly ash at low water to binder ratio have better chloride penetration resistance than those at high water to binder ratio.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ก
บทคัดย่อ ข
Abstract ค
สารบัญเรื่อง ง
สารบัญตาราง ฉ
สารบัญรูป ช
บทที่ 1 บทนำ
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
3. ขอบเขตของการศึกษา 2
4. ประโยชน์ที่ได้รับ 3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
1. การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์ 4
2. เถ้าลอย (Fly Ash) 10
3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย
1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง 24
2. ส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง 38
3. วิธีการทดสอบ 39
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล
1. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต 52
2. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของคอนกรีต 61
3. กำลังอัดของคอนกรีต 73
4. ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต 82

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผล

1. สรุปผล 86

2. ข้อเสนอแนะ 87

ผลผลิต (Output)

บรรณานุกรม

ภาคผนวก

ประวัตินักวิจัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 11
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 12
ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014 12
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ 13
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 14
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 24
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง 25
ตารางที่ 3.3 ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยแม่เมาะ และเถ้าลอยระยองตามมาตรฐาน ASTM C618 26
ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง 38
ตารางที่ 4.1 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์อิออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 52
ตารางที่ 4.2 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียก และเถ้าลอยแห้ง เมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน 85
ตารางที่ 4.3 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียก เทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้ง 85

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Hausmann, 1967) 4
รูปที่ 2.2 แหล่งที่มาและประเภทของคลอไรด์ (ทวีชัย สำราญวานิช, 2550) 7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย 10
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนวิธีของ SM และ DM 15
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 25
รูปที่ 3.2 เถ้าลอยแห้ง 26
รูปที่ 3.3 การกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าลอยระยองและทรายแม่น้ำ 26
รูปที่ 3.4 ลักษณะของอนุภาคเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยองที่กำลังขยาย 3,500 เท่า 27
รูปที่ 3.5 เถ้าลอยเปียก 27
รูปที่ 3.6 มวลรวมหยาบ (หิน) 28
รูปที่ 3.7 มวลรวมละเอียด (ทราย) 28
รูปที่ 3.8 แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ 28
รูปที่ 3.9 แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอก 29
รูปที่ 3.10 เครื่องผสมคอนกรีต 29
รูปที่ 3.11 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า 29
รูปที่ 3.12 เซลล์ทดสอบ 30
รูปที่ 3.13 เครื่องตัดคอนกรีต 30
รูปที่ 3.14 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล 30
รูปที่ 3.15 ช้อนตักสาร 31
รูปที่ 3.16 บีกเกอร์ขนาด 250 ml 31
รูปที่ 3.17 บีกเกอร์ขนาด 1000 ml 31
รูปที่ 3.18 กรวย 32
รูปที่ 3.19 ซิลิโคน 32
รูปที่ 3.20 น้ำกลั่น 32
รูปที่ 3.21 ปั๊มดูด (Suction apparatus) 33
รูปที่ 3.22 เครื่องต้ม 33
รูปที่ 3.23 แผ่นกระดาษกรอง 33
รูปที่ 3.24 กรวยสำหรับกรองสารละลาย 34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 3.25 ขวด Suction flask 34
รูปที่ 3.26 เครื่อง Auto titration 34
รูปที่ 3.27 เครื่องเขย่าคอนกรีต 35
รูปที่ 3.28 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 35
รูปที่ 3.29 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 35
รูปที่ 3.30 กรดไนตริก (Nitric acid) 36
รูปที่ 3.31 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 36
รูปที่ 3.32 ซิลเวอร์ไนเตรท 36
รูปที่ 3.33 อีพ็อกซี่ 37
รูปที่ 3.34 ตัวอย่างคอนกรีตที่แห้งแล้ว 39
รูปที่ 3.35 ตัวอย่างคอนกรีตที่นำไปตัด 39
รูปที่ 3.36 นำตัวอย่างมาประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบ 40
รูปที่ 3.37 สารละลาย NaCl 30 กรัม 40
รูปที่ 3.38 สารละลาย NaOH 12 กรัม 40
รูปที่ 3.39 ต่อสายจากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับเซลล์ทดสอบ 41
รูปที่ 3.40 เริ่มการทดสอบ 41
รูปที่ 3.41 ไอคอนโปรแกรมทดสอบ Chloride Ion Penetration Test V2.0 41
รูปที่ 3.42 เข้าสู่โปรแกรมทดสอบ Chloride Ion Penetration Test V2.0 42
รูปที่ 3.43 กรอกข้อมูลเพื่อทำการทดสอบ 42
รูปที่ 3.44 โปรแกรมเริ่มทดสอบ 360 นาที 43
รูปที่ 3.45 ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. 43
รูปที่ 3.46 ชิ้นตัวอย่างที่เคลือบอีพ็อกซี่แล้ว 44
รูปที่ 3.47 คอนกรีตแช่ในสารละลายคลอไรด์ 44
รูปที่ 3.48 คอนกรีตชิ้นหนาประมาณ 1 เซนติเมตร 45
รูปที่ 3.49 ผงคอนกรีต 45
รูปที่ 3.50 ชั่งคอนกรีต 5 กรัม 46
รูปที่ 3.51 เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร พร้อมเติมสารละลาย 25 มิลลิลิตร 46
รูปที่ 3.52 ต้มตัวอย่างประมาณ 2-3 นาที 46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 3.53 กรองตัวอย่าง 47
รูปที่ 3.54 ทดสอบด้วยเครื่อง Potentiometric titration 47
รูปที่ 3.55 คอนกรีตที่บดแล้ว 5 กรัม 48
รูปที่ 3.56 เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร 48
รูปที่ 3.57 ต้มตัวอย่าง 5 นาที 49
รูปที่ 3.58 ทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง 49
รูปที่ 3.59 กรองตัวอย่าง 49
รูปที่ 3.60 เติมกรด Nitric acid 3 ml และ Hydrogen peroxide 3 ml 50
รูปที่ 3.61 ทิ้งคอนกรีตให้แห้งก่อนนำไปทดสอบ 51
รูปที่ 3.62 การทดสอบกำลังอัด 51
รูปที่ 4.1 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 53
รูปที่ 4.2 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 55
รูปที่ 4.3 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 56
รูปที่ 4.4 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 58
รูปที่ 4.5 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 59
รูปที่ 4.6 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ระยะการบ่ม 28, 56 และ 91 วัน 60
รูปที่ 4.7 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 62
รูปที่ 4.8 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 63
รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ w/b 0.50 และ 0.60 65
รูปที่ 4.10 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแห้งที่ w/b 0.50 และ 0.60 67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกที่ w/b 0.50 และ 0.60 68
รูปที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 70
รูปที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 71
รูปที่ 4.14 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 72
รูปที่ 4.15 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 74
รูปที่ 4.16 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 76
รูปที่ 4.17 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยเปียกแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 77
รูปที่ 4.18 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 79
รูปที่ 4.19 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 80
รูปที่ 4.20 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน 81
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 83
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างหลักที่ใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่ส่วนประกอบของคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย หินและน้ำ โดยสภาพแวดล้อมภายนอกที่โครงสร้างคอนกรีตตั้งอยู่จะมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการรับแรงอัดในระยะยาวอาจมีค่าลดต่ำลง หรืออาจจะส่งผลต่อเหล็กเสริมที่อยู่ภายในโครงสร้างของคอนกรีตทำให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมได้ จึงส่งผลให้ต้องมีการซ่อมแซมและบำรุงรักษา เพื่อยืดระยะเวลาการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตออกไป

เกลือคลอไรด์ เป็นส่วนประกอบหลักของน้ำทะเล ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต ดังนั้นการศึกษาการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตจึงมีความสำคัญเพื่อจะได้หาส่วนผสมคอนกรีตที่มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดี โดยอาศัยแนวทางการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ มาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต เพื่อให้คอนกรีตมีกำลังและความคงทนที่เหมาะสมกับการใช้งานภายใต้สภาพแวดล้อมต่างๆ

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นผลพลอยได้ที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยประเทศไทยมีปริมาณเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินปีละประมาณ 3 ล้านตัน ซึ่งที่ผ่านมา เถ้าลอยส่วนใหญ่ได้ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตต่างๆ แล้ว โดยการนำเถ้าลอยมาแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต และใช้ในรูปแบบของเถ้าลอยแห้ง (Dry fly ash) เหมือนวัสดุผงประเภทอื่นๆ ในงานคอนกรีต

การใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์เนื่องด้วยเหตุผลสองประการ ประการแรกเนื่องจากเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลากา อะลูมินา และเหล็กอยู่มาก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ได้ดี และช่วยเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม และประการที่สองเนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลม เมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทราย ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น อย่างไรก็ตาม ในช่วงแรกๆ ของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงนั้น มีการใช้เถ้าลอยในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตเพียงบางส่วน ก่อให้เกิดเถ้าลอยเหลือทิ้งในโรงไฟฟ้า ซึ่งช่วงที่ผ่านมาเถ้าลอยจะถูกทิ้งและไม่มีการนำมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพ โดยเถ้าลอยที่ไม่มีการนำมาใช้จะนำไปทิ้งใกล้บริเวณโรงไฟฟ้า โดยอาจสัมผัสกับความชื้นของสภาพแวดล้อมและน้ำฝน บางครั้งจะต้องมีการใส่น้ำเข้าไปก่อนที่จะนำไปทิ้งเพื่อไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจาย ทำให้เถ้าลอยเหล่านี้อยู่ในรูปแบบเถ้าลอยเปียก (Wet fly ash) ทำให้ต้องการพื้นที่เก็บเถ้า

ลอยเปียกขนาดใหญ่ ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการจัดการเถ้าลอยเปียกอย่างถูกต้องก็คือ การใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตโดยตรง ซึ่งแนวทางนี้มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำ เพราะว่าเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์สูงบางส่วนของเถ้าลอยจะมีคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์อยู่ เมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดการแข็งตัวของเถ้าลอย หากจะนำเถ้าลอยพวกนี้มาใช้ก็ต้องอบให้แห้งและบดให้ละเอียดอีกครั้ง จึงทำให้การนำมาใช้มีความยุ่งยากและไม่คุ้มค่ากับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการอบและการบด ดังนั้น แนวทางการใช้เถ้าลอยเปียกในคอนกรีตก็คือ การใช้เถ้าลอยเปียกที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำแทนที่ปูนซีเมนต์ ซึ่งจะช่วยลดปัญหามลภาวะจากการฟุ้งกระจายของเถ้าลอยได้ด้วย แต่ต้องเตรียมถังเก็บเถ้าลอยเปียกไว้ในโรงงาน

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางในการนำเถ้าลอยเปียกไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและแบบแช่ในสารละลายคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง

2. เพื่อศึกษากำลังอัดและการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง

3. เพื่อหาปริมาณการแทนที่เถ้าลอยเปียกในคอนกรีตที่มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดที่ดี

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง โดยเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อวัตถุประสาน(w/b) เท่ากับ 0.50 และ 0.60 อัตราการแทนที่เถ้าลอยต่อวัตถุประสาน (f/b) 0.20, 0.40 และ 0.60 โดยความชื้นในเถ้าลอยเปียกเท่ากับร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ส่วนระยะเวลาสัมผัสความชื้นในเถ้าลอยเปียกเท่ากับ 1 เดือน ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก โดยใช้ในอัตราส่วนการแทนที่โดยน้ำหนัก และทดสอบที่ระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน

หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 10 x 10 x10 ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อทดสอบกำลังอัดคอนกรีต โดยจะทดสอบคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน และหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร เพื่อทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งจะทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน และการต้านทานคลอไรด์

แบบแช่ในสารละลายคลอไรด์ ใช้ระยะเวลาในการบ่มน้ำ 28 วัน แล้วนำมาแช่ในสารละลายคลอไรด์ที่ 28, 56 และ 91 วัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและแบบแช่ในสารละลายคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง

2. ทำให้ทราบกำลังอัดและการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง

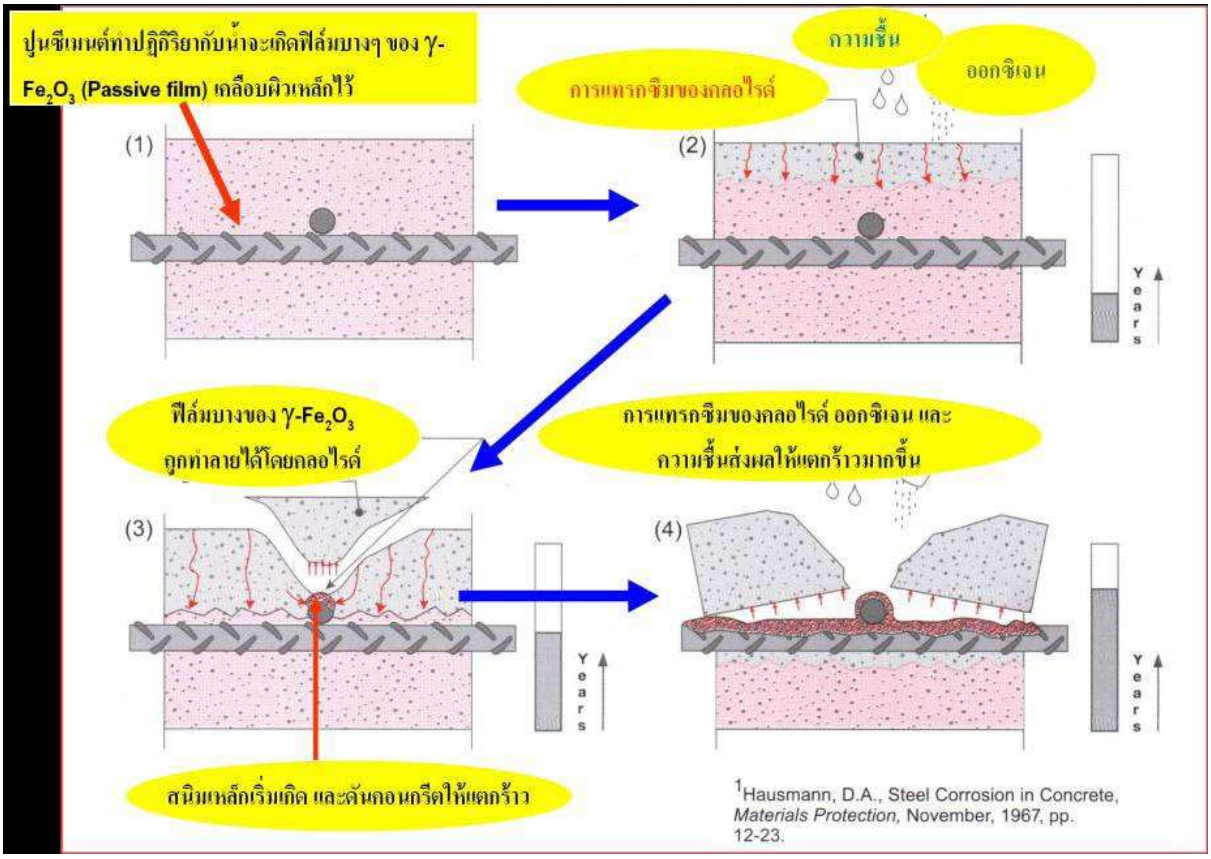
3. ทำให้ทราบปริมาณการแทนที่เถ้าลอยเปียกในคอนกรีตที่มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดที่ดี

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดสนิมของหลักเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุทำให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมและทำให้คอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมเกิดการแตกร้าวและหลุดร่อน เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม และทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดความเสียหาย โดยปกติเมื่อปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบางๆ(Passive film) ที่มีคุณสมบัติเป็นด่างเคลือบผิวเหล็กไว้ ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก และเมื่อคลอไรด์อิออนแทรกซึมเข้ามาในเนื้อคอนกรีตและสะสมที่ผิวเหล็กเสริมจนมีปริมาณมากพอจนถึงปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold content) ของคอนกรีตนั้น ฟิล์มที่เคลือบผิวเหล็กนี้จะถูกทำลาย ประกอบกับมีความชื้นและออกซิเจน จะทำให้เหล็กเสริมที่ไม่มีฟิล์มป้องกันเกิดสนิม



รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Hausmann, 1967)

1. แหล่งที่มาของคลอไรด์ (Chloride)

คลอไรด์ เป็นสารที่สามารถพบอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป ด้วยความเข้มข้นต่างกัน คลอไรด์นั้นแปรผันตามปริมาณเกลือแร่ที่เพิ่มขึ้น น้ำธรรมชาติตามภูเขา หรือในพื้นที่สูงจะมีคลอไรด์น้อย ขณะที่น้ำในแม่น้ำและน้ำใต้ดินมีคลอไรด์สูง และน้ำในทะเลจะมีปริมาณคลอไรด์อยู่ในปริมาณสูงมาก เพราะเป็นแหล่งรวมของน้ำจากที่ต่างๆและมีการระเหยของน้ำตลอดเวลาจึงเกิดตะกอนเกลือปริมาณมาก

น้ำในธรรมชาติได้รับคลอไรด์เพิ่มขึ้นได้หลายทาง เนื่องจากความสามารถในการละลายของน้ำทำให้สามารถละลายคลอไรด์จากชั้นดินต่างๆ ละอองน้ำจากมหาสมุทรถูกพัดเข้ามาสู่แผ่นดินในสภาพของหยดน้ำเล็ก ๆ ซึ่งมีเกลืออยู่ ปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวทำให้ปริมาณคลอไรด์บนพื้นดินสูงขึ้น น้ำจากทะเลและมหาสมุทรไหลขึ้นตามลำน้ำที่ไหลทอดตัวลงสู่มหาสมุทรได้โดยเฉพาะในแม่น้ำที่มีความลึกมากๆ น้ำทะเลมีความหนาแน่นมากกว่าจะไหลทวนน้ำในแม่น้ำขึ้นมาภายใต้น้ำจืดที่ไหลลงทะเลจึงเกิดการผสมกันระหว่างน้ำทะเลกับน้ำจืด

น้ำใต้ดินที่อยู่บริเวณใกล้ๆ กับทะเลและมหาสมุทร จะมีแรงดันของน้ำเท่ากับน้ำทะเลแต่ถ้ามีการดูดเอาน้ำใต้ดินมาใช้ในปริมาณที่มากเกินไปแล้ว จะเกิดความแตกต่างของ Hydrostatic head ทำให้น้ำทะเลมีความดันมากกว่าก็จะไหลขึ้นสู่น้ำจืด

สิ่งขับถ่ายของมนุษย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ ปัสสาวะจะมีคลอไรด์อยู่ในปริมาณเท่ากันกับคลอไรด์ที่บริโภคเข้าไปกับอาหารและน้ำซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 6 กรัมของคลอไรด์ต่อคนต่อวัน ซึ่งจะทำให้น้ำในแม่น้ำลำธารมีปริมาณคลอไรด์สูงขึ้นด้วย น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมก็เป็นอีกแหล่งหนึ่งที่มีคลอไรด์ในปริมาณสูง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมการปนเปื้อนของน้ำผิวดินจากคลอไรด์ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือที่ปนเปื้อนมากับหิน ทราย (โดยเฉพาะทรายที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล) รวมถึงมีแหล่งที่มาจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจากสภาพแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงของการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็ง (De-icing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบที่รุนแรงต่อโครงสร้างนั้นมาจากน้ำทะเล ซึ่งสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลานั้น ถึงแม้ว่าคลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ แต่เนื่องจากไม่มีปริมาณของออกซิเจนที่เพียงพอหรือไม่มี การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็จะไม่เกิดขึ้น

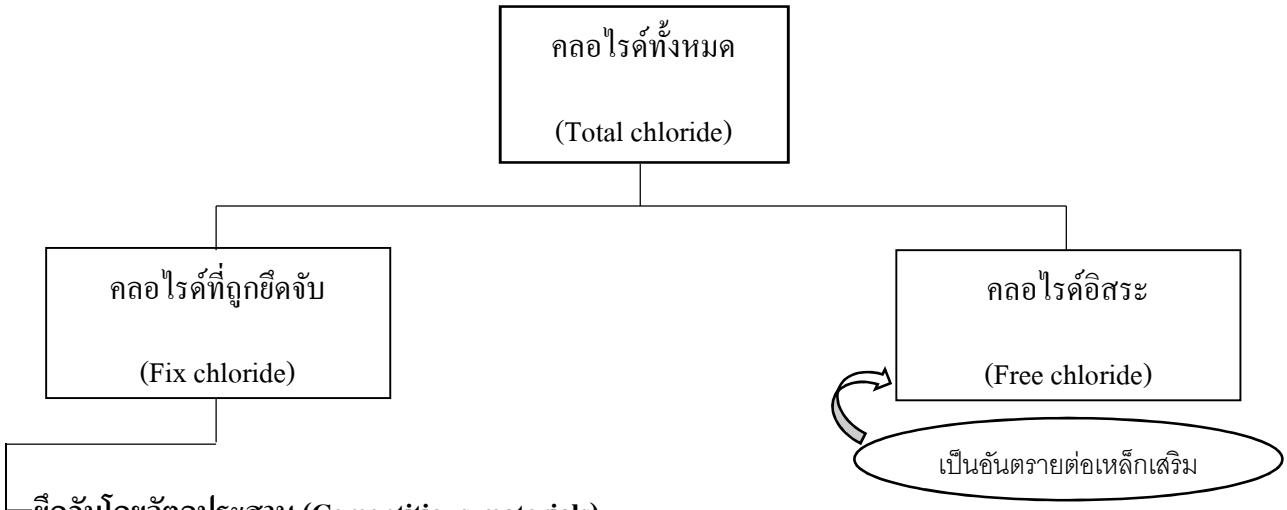
2. ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

โครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ คลอไรด์จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตและเกิดการสะสมในเนื้อคอนกรีต ซึ่งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อของคอนกรีต (Total chloride) ดังกล่าวนั้นเป็นผลรวมของคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์อิออน ซึ่งอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต (Pore solution) ซึ่งเป็นคลอไรด์ที่พร้อมทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดสนิมในเหล็กและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. คลอไรด์ที่ถูกจับหรือถูกกักเก็บ (Fixed chloride) เป็นคลอไรด์ซึ่งถูกจับหรือกักเก็บไว้จึงไม่สามารถไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้ คลอไรด์ชนิดนี้จะถูกจับหรือกักเก็บได้ 2 แบบด้วยกัน คือ การกักเก็บด้วยการดูดซับทางเคมี (Chemical absorption) จากวัสดุที่ทำปฏิกิริยา เช่น ปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานอื่น ๆ และการกักเก็บด้วยการดูดซับทางกายภาพ (Physical absorption) จากวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี เช่น มวลรวม เป็นต้น การดูดซับทางกายภาพนี้คลอไรด์จะถูกดูดซับด้วยแรงดึงดูดที่ผิว (Surface force) ส่วนการดูดซับทางเคมี คลอไรด์จะถูกจับเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง ไตรแคลเซียมอลูมิเนท (C_3A) ในปูนซีเมนต์กับคลอไรด์อิออนก่อให้เกิดเป็นเกลือฟรีเดล (Fridel's salt ,$3CaO.Al_2O_3.Cacl_2.10H_2O$) และนอกจากนั้น คลอไรด์ยังสามารถถูกกักเก็บในโครงสร้าง C-S-H ได้ด้วยคลอไรด์อิสระที่ละลายน้ำได้เท่านั้น ที่จะทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม (ACI 201.2R-92, 2000)

ชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต



ยึดจับโดยวัตถุประสาน (Cementitious materials)

1. คลอไรด์ที่ถูกจับยึดด้วยกระบวนการทางเคมีกลายเป็นส่วนหนึ่งของผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดชั่น

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

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

2. คลอไรด์ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพไว้ที่ผิวของผลผลิตไฮเดชั่นและปอซโซลานิก

C-S-H from hydration of C_3S , C_2S

C-S-H and C-A-H from pozzolanic reaction

C-A-H and C-AF-H from hydration of C_3A , C_4AF

3. คลอไรด์ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพไว้ที่ผิวของผลผลิตไฮเดชั่นอื่นๆ เช่น

โมโนซัลเฟต (Monosulfate) , เอททริงไกต์ (Ettringite) เป็นต้น

ยึดจับโดยวัสดุเฉื่อย (non-reactive materials)

มวลรวมละเอียด , มวลรวมหยาบ และฝุ่นหินปูน

รูปที่ 2.2 แหล่งที่มาและประเภทของคลอไรด์ (ทวีชัย สำราญวานิช, 2550)

3. กลไกการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเลและในน้ำกร่อย ซึ่งมีความสามารถที่จะแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อของคอนกรีตได้ ถ้าหากว่าอยู่ในสภาพหรือมีปัจจัยที่เหมาะสม โดยคลอไรด์ที่มีบทบาทที่สำคัญในการทำลายจะเป็นในส่วนของคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งการทำลายดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

เกลือคลอไรด์จะอยู่ในส่วนผสมของคอนกรีตจากมวลรวม น้ำ หรือสารผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ สามารถเคลื่อนที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตจากสภาพแวดล้อมของโครงสร้าง เช่น น้ำทะเล น้ำใต้ดิน คลอไรด์ในอากาศ เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อความคงทนของคอนกรีตทั้งทางตรงและทางอ้อม เป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้โครงสร้างมีการเสื่อมสภาพ เหล็กเสริมเกิดสนิมและทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว และนำไปสู่การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับคอนกรีตได้ โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ เรียกว่า การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ ดังนั้นการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต สามารถเกิดขึ้นได้จากกลไก เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ ประจุไฟฟ้า และแรงดันน้ำ สามารถแบ่งได้ 4 กลไก ดังนี้

1. การแพร่ (Diffusion) กลไกนี้มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์เข้าไปยังโพรงช่องว่างของคอนกรีตที่อิ่มตัว แรงขับเคลื่อนของเกลือคลอไรด์ในกลไกนี้เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ กล่าวคือ เกลือคลอไรด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ 2.1

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

โดยที่ $C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา 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)

ทั้งนี้ คำตอบของสมการ 2-1 สามารถแสดงได้ด้วยสมการ 2-2 ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

$$C(x,t) = (C_s - C_0)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{C}{2\sqrt{D_a t}}\right)\right] + C_0 \tag{2.2}$$

โดยที่ $C_t(x,t)$ คือ ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระดับความลึก x (cm)

C_s คือ ความเข้มข้นของพื้นผิวคลอไรด์ (% by wt. of binder)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นที่วัดได้ในกลุ่มตัวอย่างคอนกรีต (% by wt. of binder)

t คือ ระยะเวลาการบ่ม (year)

x คือ ความลึกจากพื้นผิวสัมผัส (cm)

D_a คือ สัมผระสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (cm^2/year)

2. การดึงดูดอิออน (Ion adsorption) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ใต้น้ำทะละตลอดเวลาหรือเปียกอยู่ตลอดเวลาพบว่า ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในงานคอนกรีตบริเวณผิวหน้าโครงสร้างจะมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นต่ำของเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล ปรากฏการณ์เช่นนี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยการแพร่ เนื่องจากการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ภายในเท่ากับคอนกรีตเท่ากับสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดอิออนสามารถทำให้ความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวหน้าสูงขึ้นได้เพราะว่าผิวของโพรงช่องว่างเล็กๆในคอนกรีตมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกจึงดึงดูดเกลือคลอไรด์ซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่บริเวณนั้นให้สูงขึ้นได้

3. การดึงดูดคาพิลลารี (Capillary suction) กลไกนี้สามารถดึงน้ำเกลือคลอไรด์ผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตได้ เพราะมีการระเหยของน้ำภายในโพรงช่องว่างคอนกรีตออกไปโดยทั่วไปโครงสร้างส่วนมากจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เกิดขึ้นสลับไปมา เรียกว่า วัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Cycle wetting and drying) เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดูดเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆ ด้วยกลไกการดึงดูดคาพิลลารี กลไกนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและใช้เวลาสั้น ซึ่งผลของกลไกนี้ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากในระหว่างเกิดสภาวะแห้งกับโครงสร้างคอนกรีตในช่วงที่เกิดน้ำลง น้ำจะระเหยเป็นไอจากคอนกรีตเหลือไว้แต่เกลือในโพรงช่องว่างของคอนกรีต เมื่อถึงเวลาน้ำขึ้น น้ำทะเลจากภายนอกจะแทรกเข้าไปในคอนกรีต ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ตลอดในช่วงเวลาวัฏจักรเปียกสลับแห้งนี้

4. แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) สำหรับโครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดินเขื่อน อุโมงค์ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำเกลือ ซึ่งมีเกลือคลอไรด์เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยังคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำกว่าได้

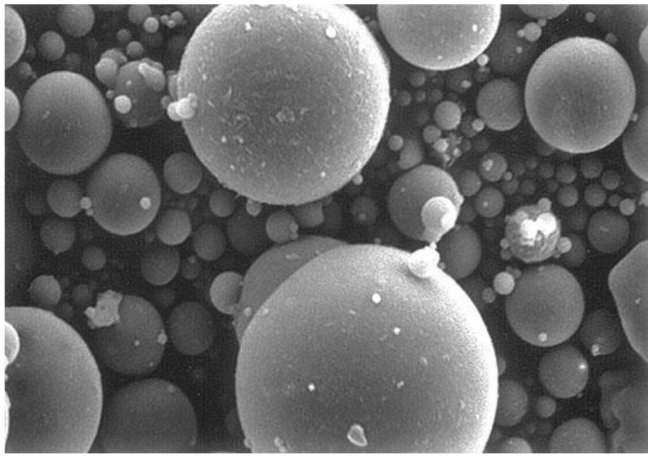
4. ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตในคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold content) หมายถึง ปริมาณเกลือคลอไรด์ในงานคอนกรีตที่ระดับผิวเหล็กเสริมที่มากเพียงพอทำให้เกิดการสูญเสียฟิล์มต้านทานการเกิดสนิม ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม ทั้งนี้ประกอบกับมีความชื้นและออกซิเจนในปริมาณที่เหมาะสมกระบวนการเกิดสนิมจึงเกิดขึ้น ในการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตนั้นสามารถแสดงในค่า

เปอร์เซ็นต์ของปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมดต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต ค่าเปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์อิสระต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์และอัตราส่วน Cl^-/OH^- ซึ่งปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตประเภทต่างๆ มีค่าแตกต่างไปตามชนิดของคอนกรีต ประเภทของวัสดุประสาน และวิธีการในการวัดค่า

2.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา หรือน้ำตาลแล้วแต่แหล่งที่มา มีน้ำหนักเบาเมื่ออยู่สภาพแห้งจะไม่มีสมบัติการเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายได้ดี ขนาดอนุภาคและรูปร่างของเถ้าลอยอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของถ่านหิน ความสม่ำเสมอ ความละเอียดของถ่านหินก่อนเผา ระดับอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนขณะเผา รวมทั้งวิธีการดักจับเถ้าลอย โดยปกติแล้วเถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ลอยไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า จากนั้นเถ้าลอยจะถูกรวบรวมไว้ในถังเก็บเถ้า (Ash hopper) ซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 80 ของเถ้าทั้งหมด มีขนาดประมาณ 1 ไมครอน จนถึง 150 ไมครอน เมื่อนำไปส่องขยายดูด้วยกล้องกำลังขยายสูง จะพบว่า เถ้าลอยมีรูปร่างกลมตันหรือกลวงจนถึงรูปร่างไม่แน่นอน การมีรูพรุนของเถ้าลอยยังแตกต่างกันด้วย ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา เถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำคืออยู่ในช่วง 1.90-2.69 มีความหนาแน่นรวม (Bulk density) อยู่ในช่วง 800-1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความหนาแน่นสูงสุด (Maximal density) เป็น 1,000-1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยปกติแล้วอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้าลอยจะมีส่วนที่มีความเป็นผลึก (Crystal) ผสมอยู่กับส่วนที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous) เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับน้ำ ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต กล่าวคือมีความแข็งแรงและเกาะยึดกันได้ดี ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย

1. ประเภทของเถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับมาตรฐาน ASTM C618 ได้แบ่งเถ้าลอยเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ประเภท F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซด์ และบิทูมินัส ปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferricoxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide: Cao) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (Sio_2) มาจากแร่ดินเหนียว และ ควอรตซ์ ถ่านหินแอนทราไซด์ และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงทำให้เถ้าลอยที่มีซิลิกาออกไซด์ (Sio_2) สูง

2. ประเภท C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอร์ริคออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันมากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide: Cao) สูง สำหรับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำ ทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ต่ำแล้วยังมีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์และเฟอร์ริคออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O, ร้อยละ	1.5	1.5

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวมา ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้นจากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะถ่านลอย Class C มักมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10

ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไปควรใช้เถ้าถ่านลอย Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าลอย Class C เนื่องจากพบว่า เถ้าลอย Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์มากกว่าเพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าเถ้าลอย Class F

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้น	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้น
	คุณภาพ 1	ชนิด ก.	ชนิด ข.	คุณภาพ 3
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อย่างต่ำ, ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) , ร้อยละ	-	<10.0	≥10.0	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างมาก, ร้อยละ	5.0	5.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก, ร้อยละ	3.0	3.0	2.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมาก, ร้อยละ	6.0	6.0	6.0	6.0

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์และเฟอร์ริคออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อย่างต่ำ, ร้อยละ	-	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	5.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O, ร้อยละ	1.5	1.5

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและลักษณะการเผาถ่านหิน อย่างไรก็ดีต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆมีองค์ประกอบทางเคมี ดังตาราง 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ

ตัวอย่างเถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

2. องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางธรณีวิทยาและด้านภูมิศาสตร์ที่สัมพันธ์กับการเกิดถ่านหินเป็นหลัก แต่อาจขึ้นอยู่กับสภาวะการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้และประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมมลภาวะทางอากาศ สารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในเถ้าลอยจะเป็นไปตามชนิดของหินและดินคือมีออกไซด์ของซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และแคลเซียม (Ca) คิดเป็นร้อยละ 95-99 ของส่วนประกอบทั้งหมดและมีส่วนประกอบย่อยอื่นๆ ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) ซัลเฟอร์ (S) และฟอสฟอรัส (P) คิดเป็นร้อยละ 0.5-3.5 ของส่วนประกอบทั้งหมด นอกจากนี้เถ้าลอยจะมีส่วนประกอบของธาตุอื่นที่มีปริมาณน้อยๆ (Trace element) ประมาณ 20-50 ธาตุ

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SiO_2	41.16
Al_2O_3	22.30
Fe_2O_3	11.51
CaO	15.27
MgO	2.70
SO_3	1.43
LOI	0.20
Na_2O	1.66
K_2O	2.93
TiO_2	0.39
P_2O_5	0.19
Mn_2O_3	-
ZrO_2	-

3. การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย

ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย เกิดจากซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_2) ในเถ้าลอย ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดชันระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์ ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่เพิ่มการยึดประสานระหว่างเพสต์และมวลรวม จึงช่วยเพิ่มคุณสมบัติต้านกำลังให้กับคอนกรีตในระยะยาว สำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานได้แสดงไว้ในสมการ

$$SiO_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow C\text{-}S\text{-}H + H_2O \qquad (2\text{-}3)$$

$$Al_2O_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow C\text{-}A\text{-}H + H_2O \qquad (2\text{-}4)$$

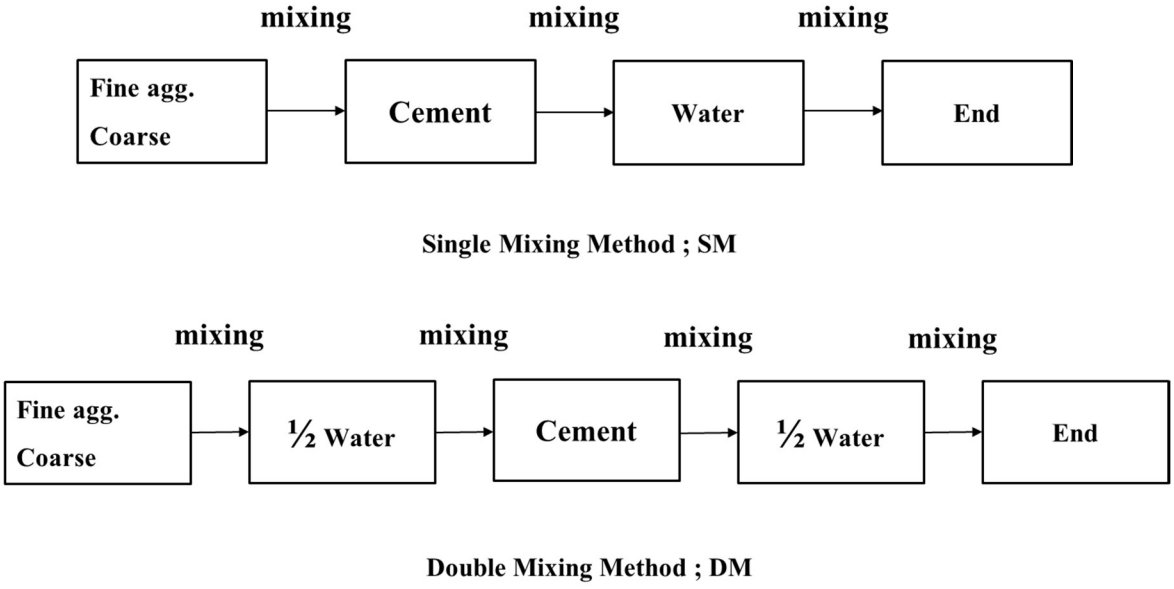
4. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต

ปัจจุบันการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตได้แพร่หลายมากขึ้น โดยอาศัยข้อดีทั้งทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ อีกทั้งเถ้าลอยยังมีอนุภาคที่มีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ จึงทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดช่องว่าง (Filler) ระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ซึ่งปกติแล้วช่องว่างเหล่านี้อาจถูกอุด

ด้วยปริมาณน้ำส่วนที่เกินจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น นอกจากนั้นแล้วเถ้าลอยยังช่วยให้คุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น เช่น คุณสมบัติการรับแรง ความทนทาน ลดการเยิ้มและแยกตัว ลดคุณสมบัติการซึมน้ำ ลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลน์ เป็นต้น

สำหรับการใช้เถ้าลอยนั้นในประเทศไทย จะใช้เถ้าลอยผสมคอนกรีตช่วงที่ทำการผสมคอนกรีต เถ้าลอยจะอยู่ในรูปแบบวัสดุผงแห้ง (Dry powder) ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมในระหว่างขั้นตอนการขนย้ายและผสมคอนกรีต เนื่องจากเถ้าลอยมีความละเอียดที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ มีอนุภาคขนาดเล็กจึงเกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย แต่ที่ในต่างประเทศนั้นได้มีการผสมแยกแล้วโดยการนำเถ้าลอยมาผสมน้ำก่อนให้อยู่ในรูปแบบของเหลวข้น (Slurry) ดังนั้นจึงต้องใช้เถ้าลอยในรูปผสมกับน้ำให้อยู่ในรูปแบบของเหลวข้น (slurry) ซึ่งการนำเถ้าลอยไปผสมน้ำก่อนนั้นเหมือนกับการทำการผสมสองครั้ง (Double mixing method)

โดยทั่วไปการผสมคอนกรีตเป็นการผสมครั้งเดียว (Single mixing method : SM) อย่างไรก็ตามได้มีงานวิจัยได้กล่าวถึงกระบวนการผสมสองครั้ง (Double mixing method : DM) ซึ่งมีรายละเอียดคือแบ่งการผสมน้ำออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยการผสมน้ำ 2 ขั้นตอนนั้นจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน ส่วนขั้นตอนวิธีของ SM และ DM ได้แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนวิธีของ SM และ DM

5. ผลกระทบของเถ้าลอยต่ออัตราส่วนผสมคอนกรีต

วิธีที่ดีที่สุดในการประเมินคุณลักษณะของเถ้าลอยชนิดใดชนิดหนึ่งในส่วนผสมคือ การนำเถ้าลอยมาผสมในคอนกรีตและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เถ้าลอยจากบางแหล่งอาจมีคุณสมบัติตลอดจนคุณภาพที่เหนือกว่าเถ้าลอยจากแหล่งที่อื่น และข้อกำหนดสำหรับคอนกรีตแต่ละชนิดยังแตกต่างกัน ดังนั้นการกำหนดอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจึงไม่สามารถทำนายถึงคุณสมบัติของวัสดุและ

ค่าต่างๆที่ต้องการได้นอกจากนี้ยังจำเป็นที่จะต้องผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยในปริมาณต่างๆกัน เพื่อที่จะได้นำมาทดสอบหาปริมาณวัสดุประสานที่เหมาะสม เพื่อที่จะให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยได้มีการปรับเปลี่ยนการใช้เถ้าลอยในอัตราส่วนที่ต่างกันด้วย โดยทั่วไปแล้วงานคอนกรีตธรรมดาปริมาณที่เหมาะสมของการใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ขณะที่การใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C จะอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 35 ของน้ำหนักวัสดุประสาน แต่อาจเพิ่มการใช้เถ้าให้มากขึ้น ในกรณีที่การเทเป็นแบบคอนกรีตหลา เพื่อลดปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหรือเพื่อเพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนซัลเฟตหรือเพื่อเพิ่มการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างด่างอัลคาไลน์กับมวลรวมหรือเพื่อใช้ในงานคอนกรีตพิเศษอื่นๆ

เถ้าลอยที่ใช้ในงานคอนกรีตอาจเป็นส่วนหนึ่งในปูนซีเมนต์ผสมตามมาตรฐาน ASTM C595 ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (Type IP) ปูนซีเมนต์ปอซโซลานดัดแปลง หรืออาจใส่แยกกันกับปูนซีเมนต์ในเครื่องผสมคอนกรีตก็ได้ ในกรณีที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งในปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ผสมจะกำหนดไว้คงที่จากโรงงานผู้ผลิตเพื่อให้มีคุณภาพตมที่กำหนดในมาตรฐาน การกำหนดอัตราส่วนผสมของคอนกรีตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานประเภท IP ในกรณีที่ผสมเถ้าลอยแยกต่างหากจะต้องเลือกส่วนผสมผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าลอยและปรับส่วนผสมนั้นเพื่อให้เหมาะสมกับงานแต่ละงาน การเลือกใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยนั้นเพื่อออกแบบคอนกรีตให้มีคุณสมบัติตามต้องการ สามารถทำได้โดยการปรับอัตราส่วนปูนซีเมนต์และเถ้าลอยให้เหมาะสม ซึ่งทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีคุณสมบัติเดียวกันแต่ไม่ใช้เถ้าลอยและอาจลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้มากขึ้นเมื่อใช้สารลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต หลักการใช้เถ้าลอยก็คือปริมาณวัสดุประสาน(ปูนซีเมนต์กับเถ้าลอย) ตามปกติแล้วจะต้องมากเกินกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่ไม่ผสมเถ้าลอย เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ปริมาณวัสดุประสานทั้งหมดและสัดส่วนของเถ้าลอยที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตขึ้นอยู่กับชนิดและคุณภาพของเถ้าลอย และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ สารเคมีที่ใช้ สภาพแวดล้อมของคอนกรีตที่ผสม คุณสมบัติตามที่ต้องการของคอนกรีต วิธีการบ่ม สภาพอากาศในขณะที่ผสม ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนมีผลต่อคุณภาพของคอนกรีตทั้งสิ้น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การใช้เถ้าลอยแห้งในงานคอนกรีต

Cheerarot at al. (2004) การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เถ้าลอยที่กำจัดทิ้งซึ่งมีระยะเวลาในการกำจัด 6-24 เดือนนับจากวันที่ทำการฝังกลบของโรงไฟฟ้าแม่เมาะในประเทศไทย เพื่อใช้ทดแทนปูนซีแมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ถูกแทนที่โดยเถ้าลอยที่กำจัดทิ้งที่อัตรา 10% 20% และ 30% โดยน้ำหนักของวัสดุที่เป็นซีเมนต์ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าอนุภาพส่วนใหญ่ของเถ้าลอยที่กำจัดทิ้งแบบดั้งเดิมนั้นเป็นของแข็งและเป็นทรงกลมมีขนาดแตกต่าง

กันบางอย่าง ในขณะที่เถ้าลอยที่ทิ้งลงดินเป็นของแข็งและมีรูปทรงไม่เป็นระเบียบ ส่วนประกอบ CaO และ LOI ของเถ้าลอยที่กำจัดทิ้งที่มีระยะเวลาในการกำจัดที่ต่างต่างกันจะมีความแตกต่างกันสูง มอร์ต้าร์เถ้าลอยที่กำจัดทิ้งแบบดั้งเดิมจะมีความทนแรงอัดต่ำ แต่ปูนเถ้าลอยที่กำจัดลงดินที่ระยะ 7 วันจะมีความทนแรงอัดสูงกว่า 75% ของปูนมาตรฐาน และเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 100% หลังจาก 60 วัน จากผลที่ได้นี้จึงสามารถสรุปได้ว่าเถ้าลอยที่กำจัดลงดินเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีเยี่ยม และสามารถนำมาใช้แทนซีเมนต์ในคอนกรีตได้บางส่วน และยังทนต่อสภาพอากาศได้นานถึง 24 เดือน

Chindaprasirt et al. (2005) เถ้าลอยสามารถทำให้ขนาดโครงการของโพรงเปลี่ยนไป ปฏิกิริยาไฮเดชันในช่วงต้นขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลผลิตไฮเดชันที่เกิดขึ้นเข้าไปแทรกในช่องว่างทำให้โพรงมีขนาดเล็กลงเป็นผลให้โพรงเพสต์มีมากขึ้นเมื่อเทียบกับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยสามารถเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ ลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดชัน ลดการหดตัวแบบแห้ง เพิ่มความต้านทานทางด้านซัลเฟต และอื่นๆ นอกจากนี้ยังช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย ในทางตรงกันข้าม ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น นอกจากนี้การเยิ้มน้ำในคอนกรีตเพิ่มขึ้น

กฤติยา แก้วมณี และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2550) ในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตปูนซีเมนต์และคอนกรีตอยู่หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เถ้าลอย ผงหินปูน ผงซิลิกา เป็นต้น ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ที่เห็นอยู่ก็เช่น พวกปูนก่อ ปูนฉาบที่มีการผสมผงหินปูนและผงซิลิกากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา หรือพวกปูนปอซโซลานที่ใช้กับสภาพแวดล้อมทะเล ซึ่งมีเถ้าลอยผสมอยู่ด้วย เป็นต้น ส่วนในงานคอนกรีต วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่เป็นที่รู้จักกันเป็นอย่างดีก็คือ เถ้าลอย นั่นเอง การใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในงานปูนซีเมนต์และคอนกรีตเป็นสิ่งที่สมควรให้ การสนับสนุน เพราะไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนการผลิตในเรื่องของราคาวัสดุได้ แต่ยังสามารถลดการใช้พลังงานในการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การใช้เชื้อเพลิงในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ได้โดยตรงตามอัตราส่วน ที่ถูกแทนที่ ซึ่งจะมีผลในการลดการปล่อยก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ลงได้อีกด้วย เพราะวัสดุทดแทนเหล่านั้นไม่จำเป็นต้องเผา แต่สามารถผสมกับปูนซีเมนต์ได้เลย

Yerramala at al. (2011) งานวิจัยศึกษาคุณสมบัติในการขนส่งคอนกรีดบดอัด (RCC) ที่เป็นเถ้าลอยปริมาณมาก ส่วนผสมต่างๆจะทำขึ้นโดยการผสานซีเมนต์ 50 - 260 กก./ลบ.ม. และเถ้าลอยปริมาณสูงตั้งแต่ 40% ถึง 85% ตามขนาดของวัสดุที่เป็นซีเมนต์โดยรวม โดยจะมีการตรวจสอบความสามารถของคอนกรีตในการซึมผ่านได้ การดูดซึม การดูดซับ และการแพร่กระจายคลอไรด์ การศึกษาแสดงให้เห็นว่า RCCs ของซีเมนต์ปริมาณปานกลางและส่วนประกอบเถ้าลอยประมาณปานกลางมีค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ การดูดซึม การดูดซับ และการกระจายตัวของคลอไรด์ต่ำกว่า

2. การใช้เถ้าลอยเปียกในงานคอนกรีต

Horiuchi at al. (2000) จากงานวิจัยนี้เป็นการสรุปผลที่ได้สำหรับของเหลวข้นนี้ที่ให้ความสำคัญในเรื่องต่อไปนี้ 1. เถ้าลอยถ่านหินที่ถมโดยทำให้เป็นของเหลวข้นแทนแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถอัดตัวได้น้อยกว่า ความหนาแน่นของดินสูงกว่า และความแข็งแรงสูงกว่าการใช้วิธีอื่นๆ ความแข็งเรงสูงกว่านี้ช่วยเพิ่มความทนต่อแผ่นดินไหว 2. พื้นที่ถมด้วยเถ้าลอยในรูปแบบของเหลวข้นมีความคงตัวสูงกว่า ความหนาแน่นที่สูงกว่าและคุณสมบัติในการแข็งตัวด้วยตัวเอง 3. ความคงตัวของพื้นที่ถมด้วยเถ้าลอยสามารถเติมซีเมนต์ เพื่อเพิ่มเพิ่มความหนาแน่นและโดยการเพิ่มความแข็งตัว 4. ข้อมูลทางเทคนิคที่ได้จากโครงการก่อสร้างเกาะที่ทำด้วยคน แสดงให้เห็นข้อดีของเถ้าลอยในรูปแบบของเหลวข้นในคุณสมบัติทางกลไก เช่น มีความคงทนสูงต่อการเลื่อน ทำให้พื้นมีความแข็งตัวเพียงพอและการประหยัดต้นทุน 5. ความเข้มข้นในน้ำเสียจากของเหลวข้นที่นำมาใช้แทนมีค่าต่ำกว่ากฎหมายว่าด้วยสิ่งแวดล้อมของญี่ปุ่น 6. เพื่อให้มีการนำเถ้าลอยในรูปแบบของเหลวข้นมาใช้กับวัสดุถมที่มีน้ำหนักเบาให้มากขึ้น จะต้องทำการตรวจสอบส่วนประกอบของฟองอากาศ ซีเมนต์และเถ้าลอย ผลการทดสอบปรากฏว่า วัสดุนี้มีความคงทนต่อการเลื่อนตัว วัสดุนี้จึงนำมาใช้เป็นวัสดุถมทางโครงสร้างน้ำหนักเบารอบๆอาคารสูง และแสดงให้เห็นว่ามีคุณภาพเพียงพอ จากข้อมูลข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เถ้าลอยถ่านหินในสภาพที่เป็นของเหลวเหนียวข้นสามารถนำมาใช้ในโครงการวิศวกรรมโยธาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (2550) กรรมวิธีการผสมคอนกรีตมีส่วนช่วยลดปัญหาการเยิ้มน้ำ(Bleeding) ที่ผิวหน้าคอนกรีตได้ พร้อมทั้งยังเพิ่มความสามารถในการทำงาน(Workability)ได้ดีขึ้นด้วย ได้ทำการวิจัยวิธีการผสมที่รียกว่า Double mixing method หรือวิธีการผสมซีเมนต์เพสท์แบบแบ่งน้ำเป็นสองส่วน(DM) ซึ่งสามารถลดการเกิด Bleeding ได้เป็นอย่างดี ได้นำแนวทางของงานวิจัยนี้มาทำการศึกษาเพิ่มเติม และประยุกต์ใช้กับขบวนการในการผสมซีเมนต์เพสท์และคอนกรีตในบ้านเรา เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ของการเกิด Bleeding ความสามารถในการทำงาน การหดตัว และความสามารถในด้านกำลังของซีเมนต์เพสท์และคอนกรีตที่ทำการผสมด้วยวิธีการ แบบ DM โดยการศึกษาได้ทำการศึกษาและนำมาเปรียบเทียบกับการผสมแบบมาตราฐานที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน (Single mixing method, SM)ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(W/C)ต่างๆ เริ่มจาก W/C = 0.4, 0.5 และ 0.6 ตามลำดับ

Perlot at al. (2013) ดินขาวช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีต เพราะดินขาวมีคุณสมบัติปอซโซลานและยังสามารถลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมของคอนกรีต เนื่องจากดินขาวปล่อยสารคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าเม็ดปูน ในข้อมูลใหม่มีการค้นพบการพัฒนาดินขาวละลายน้ำ เช่น ดินขาวละลายน้ำรวมตัวเข้าไปในคอนกรีตที่อัดบดด้วยตนเอง การศึกษาครั้งนี้ได้เปรียบเทียบคอนกรีตที่บดอัดด้วยตนเองของดินขาวที่แตกต่างกันและรูปแบบของดินขาวที่เป็นแบบผงและละลายน้ำ การเติมหินปูนจะประกอบด้วยการศึกษาผลประโยชน์ของพฤติกรรมการผสม จากข้อสรุปหลักพบว่า การใช้ดิน

ขาวโดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปแบบละลายน้ำผสมกับการเติมหินปูน ปรากฏว่าเหมาะสมสำหรับกรรมวิธีการผลิตคอนกรีตที่บดอัดด้วยตนเองกับคุณสมบัติเชิงกลสูงและความทนทาน เหมาะมากสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในการกระบวนการผลิตสำเร็จรูป จะช่วยให้ขั้นตอนการผสมสั้นลงขณะที่ยังมีความประสิทธิภาพในการทำงานสูง และที่สำคัญมีการเพิ่มความแข็งแรงในช่วงแรก เนื่องจากการแยกตัวของอนุภาค การรวมตัวของดินขาวที่ละลายในน้ำ เหมาะสมเป็นอย่างยิ่งในการทำคอนกรีตที่บดอัดด้วยตนเองอย่างละเอียดและเป็นประโยชน์สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปเป็นส่วนหนึ่งของแนวทางในการพัฒนาที่ยั่งยืน

Massana at al. (2013) จุดมุ่งหมายในการศึกษาเรื่องนี้คือ เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ต่างๆที่นำมาใช้งานด้านการปศุสัตว์ในภาคกลางของประเทศสเปน และเพื่อวิเคราะห์ข้อดีของของเหลวข้นจากมูลสุกรที่มีต่อซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอย ในการวิเคราะห์นี้จึงมีการแช่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ลงในบ่อกักเก็บของเหลวข้นจากมูลสุกร โดยมีการทำตัวอย่างปูนขนาด 40 x 40 x160 มม. ทำขึ้นจากซีเมนต์สี่ประเภทที่ใช้กัน ซึ่งซีเมนต์ชนิดต่างๆมีประเภทหนึ่งที่เป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีความคงทนต่อซัลเฟตและซีเมนต์สามชนิดที่ผสมด้วยเถ้าลอยและหินปูน หลังจากที่แช่ไว้เป็นระยะเวลา 3, 6, 12, 24, 36, 48 และ 60 เดือน จึงย้ายตัวอย่างซีเมนต์แต่ละประเภท 3 หรือ 4 ก้อนออกจากบ่อและล้างด้วยน้ำ แล้วจึงทำการตรวจวัดความทนแรงอัดและโครงสร้างขนาดเล็ก พบว่าซีเมนต์ปอร์ทแลนด์ที่มีความคงทนต่อซัลเฟต (SR-PC) มีความทนต่อการย่อยสลายมากกว่าเนื่องจากมีสัดส่วนของรูพรุนขนาดใหญ่สูงกว่าและความเป็นรูพรุนโดยรวมเพิ่มขึ้น จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับกิจการปศุสัตว์ หลังจากแช่ในของเหลวข้นจากมูลสุกรเป็นระยะเวลา 60 เดือน ปูน CEM II-A (40.3%) ยังคงมีความต้านทานแรงอัดสูงที่สุดและพบว่า ปูนที่มีการใช้เถ้าลอยแทนซีเมนต์น้อยกว่า 20% มีความคงทนสูงที่สุด และมีคุณสมบัติทางกลไกที่เหมาะสมที่สุด

เอกราช จำนงรัตน์ และคณะ (2557) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ผลกระทบของความชื้นในเถ้าลอยเปียกและผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อค่าการยุบตัวและกาลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก โดยแทนที่เถ้าลอยเปียกในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยความชื้นในเถ้าลอยเปียกเท่ากับร้อยละ 25, 45 และ 65 โดยน้าหนัก ส่วนระยะเวลาสัมผัสความชื้นใช้เวลาที่ 1 สัปดาห์, 1 เดือน และ 3 เดือน พบว่ากรณีการผสม 2 ครั้งทาให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง ส่วนระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกไม่มีผลต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียก นอกจากนี้กระบวนการผสม 2 ครั้ง ทาให้มวลรวมมีการยึดเกาะเพิ่ม ขึ้นส่งผลให้กาลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้ง ส่วนกาลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกที่มีความชื้นร้อยละ 25, 45 และ 65 มีค่าไม่แตกต่างกัน สุดท้ายพบว่าระยะเวลาสัมผัสความชื้นในเถ้าลอยเปียกไม่มีการเปลี่ยนแปลงสาหรับกาลังอัดประลัยของคอนกรีต

Saengsoy at al. (2014) การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่ปูนซีเมนต์ในวัสดุในคอนกรีต ผลของความชื้นและระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกกับคุณสมบัติของมอร์ต้าจะมุ่งเน้นในขั้นต้น คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเถ้าลอยเปียกจะได้รับการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของมอร์ต้าผสมด้วยเถ้าลอยเปียกจะถูกตรวจสอบและเปรียบเทียบกับมอร์ต้าที่ผสมด้วยเถ้าลอยแห้ง เถ้าลอยเปียกเตรียมในห้องปฏิบัติการที่สัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกที่ 25%, 45%, และ 65% ระยะเวลาที่แช่เถ้าลอยเปียกคือ 1 สัปดาห์, 1 เดือน, 3 เดือน ผลการทดสอบพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยเปียก จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเถ้าลอยแห้งเดิมแม้ว่าอนุภาคบางส่วนของเถ้าลอยเปียกมีแนวโน้มที่จะจับเป็นก้อน ดัชนีความแข็งแรงและการไหลของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยเปียกจะดีขึ้นเล็กน้อย ผลของความชื้นที่แตกต่างกันของเถ้าลอยเปียกสามารถอธิบายได้ด้วยแนวคิดของวิธีการผสมเป็น 2 เท่า ในอีกกรณีหนึ่ง ระยะเวลาในการผสมของเถ้าลอยเปียกมีผลกระทบต่อดัชนีความแข็งแรงแต่องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยเปียกจะไม่เปลี่ยนแปลง

3. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

พีรชล สุภัททธรรม และคณะ (2542) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ในการเตรียมตัวอย่าง ปูนซีเมนต์จะถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างชนิดกัน ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ คือ ชนิดของเถ้าลอย ร้อยละของเถ้าลอยที่ใช้แทนปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 0, 30, 50) และร้อยละของโซเดียมคลอไรด์ที่ผสมน้ำ (ร้อยละ 2, 4, 6) ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ + เถ้าลอย)เท่ากับ 0.4 ปริมาณคลอไรด์อิสระในซีเมนต์เพสต์จะถูกวัดแล้วนำมาคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ถูกเก็บกัก โดยหาจากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ในน้ำผสมหักออกจากคลอไรด์อิสระที่ได้จากการทดสอบและสามารถนำมาคำนวณหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของวัสดุผงโดยอัตราส่วนต่อน้ำหนักของวัสดุผง หลังจากนั้นนำผลมาเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมที่ใส่เถ้าลอยกับส่วนผสมที่ไม่ใส่เถ้าลอย จากผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยดีกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา

ทวีชัย สำราญวานิช และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย และหาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ต้านทานการเกิดสนิทของเหล็กเสริมได้ดี โดยได้ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร และมีเหล็กเสริมแทรกอยู่ตรงกลาง โดยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 0.55 และ 0.60 และมีสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 0.20 0.40 และ 0.60 ของปูนซีเมนต์ และมีการใช้ปูนซีเมนต์จำนวน 2 ประเภท คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ทำการบ่มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 28 วันหลังจากนั้นนำตัวอย่างแช่น้ำเกลือคลอไรด์ของโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 5% ของเกลือคลอไรด์ เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลเปลี่ยนแปลงมาก ทำ

การเก็บก้อนตัวอย่างมาผ่าและนำคอนกรีตบริเวณที่ผิวเหล็กเสริมมาบดเป็นผงเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเกลือคลอไรด์ จากการทดลองและวิเคราะห์พบว่า ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง 0.10% ถึง 0.25% โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่ใช้ในส่วนผสม โดยเมื่อสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ต่ำ ค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสรอมจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) ร้อยละ 20 และ 40 ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมจะมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อแทนที่ปริมาณเถ้าลอยถึงร้อยละ 60 จะพบว่าค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมจะมีค่าต่ำลง ซึ่งลักษณะเช่นนี้พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันทั้งกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 0.55 และ 0.60 และพบว่าที่สัดส่วนผสมคอนกรีตเดียวกันคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ทวีชัย สำราญวานิช และคณะ (2547) โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย และหาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ต้านทานการแพร่ของเกลือคลอไรด์ที่ดี โดยได้ทำการหล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง10 เซนติเมตร ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 0.40 และ0.50 และมีสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 0.20 0.40 และ 0.60 ของปูนซีเมนต์ และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำการบ่มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 7 วันและ 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาแช่เกลือคลอไรด์ของโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 5% ของเกลือคลอไรด์ เมื่ออายุการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ครบ 28 วัน และ 91 วัน ก็นำก้อนตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นและบดเป็นผงเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเกลือคลอไรด์ และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ของทุกสัดส่วนการผสม จากการทดลองและวิเคราะห์พบว่า เมื่อเวลาในการบ่มน้ำเท่ากัน ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ของเกลือคลอไรด์มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์นานมากขึ้น และหากพิจารณาที่ระยะเวลาในการแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ที่เท่ากันพบว่าเมื่อเวลาในการบ่มนานขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ของเกลือคลอไรด์มีค่าลดลง ซึ่งการที่สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ที่ลดลงมีสาเหตุมาจากการที่เนื้อของซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้น

เอกศักดิ์ และคณะ (2551) ทำการศึกษาเรื่องความสามารถการกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.40 และ 0.50 และอัตราการผสมฝุ่นหินปูนที่ 0.05, 0.15, 0.25 พบว่าค่าความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถกักเก็บคลอไรด์ที่อัตราส่วนน้ำ 0.40 มีค่าลดลง และที่อัตราส่วน 0.50 ค่าคามสามารถกักเก็บคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการแพร่ของคลอไรพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำหรืออัตราการแทนที่ของวัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้นสำหรับกำลังรับแรงอัดที่ 91 วันจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานหรืออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น

Cheewaket et al. (2009) ได้ทำการศึกษาเรื่องความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยในสภาพทะเล โดยจะศึกษาจากผลของการแทนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยตั้งแต่ร้อยละ 0, 15, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ โดยนำคอนกรีตทรงลูกบาศก์ไปวางไว้ที่ชายฝั่งทะเลบริเวณมีน้ำขึ้นลงในอ่าวไทย เป็นเวลา 3, 4, 5, และ 7 ปี และจากผลการศึกษาพบว่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยในคอนกรีตมีปริมาณมากขึ้น ขณะเดียวกันเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับสภาพทะเล เปอร์เซ็นต์การกักเก็บคลอไรด์จะลดลงในช่วง 3-4 ปี หลังจากนั้นจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนเกือบจะคงที่ และจากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นผลกระทบที่ไม่สำคัญต่อการกักเก็บคลอไรด์

สุรชาติ ฤกษ์โหรา และคณะ (2553) งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณปูนขาวอิสระสูง (high-freelime) โดยแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และร้อยละ 50 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.50 แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง และแบบแช่ปกติในสารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 5.00% เป็นเวลา 91 วัน ผลการทดสอบพบว่าเถ้าลอยที่มี free lime เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 มีผลกระทบต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ เพียงเล็กน้อย แต่ที่การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 ทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ปกติให้ผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ไปในแนวโน้มเดียวกัน

วสุ และคณะ (2553) ทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 60% บ่มตัวอย่างจนครบ 28 วัน ก่อนทำการทดสอบ จากนั้นไปแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 6 เดือน จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะมีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีต มีผลทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้น

สุรชาติ ฤกษ์โหรา และคณะ (2554) งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยลิกไนต์และเถ้าลอยบิทูมินัสต่อคุณสมบัติต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตและการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.30 และ 0.50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และระยะหุ้มเหล็กเสริม 2 เซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานทาให้คอนกรีตมีสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งเพิ่มขึ้น และระยะเวลาการ

เริ่มเกิดสนิมนานขึ้น แต่ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบชนิดของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยบิทูมินัสมีความต้านทานคลอไรด์ดีกว่าเถ้าลอยลิกไนต์

สำเริง รักซ้อน และคณะ (2556) งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัด ความพรุน การแทรกซึมคลอไรด์ การต้านทานคาร์บอเนชัน และการกัดกร่อนของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย ใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าหนัก มีศักยภาพในการเป็นวัสดุประสานได้ดี การทดสอบแสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนโดยให้กำลังอัดสูงและความพรุนต่ำ วัสดุปอซโซลานสามารถใช้แทนที่ได้ในปริมาณร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าหนัก ใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายให้ค่ากำลังอัดและต้านทานคลอไรด์และการกัดกร่อนได้ดี

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ (Cement)

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement) มีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก.15-2532 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่ใช้ในการผสมทำคอนกรีตในงานโครงสร้างทั่วๆไป ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนัก ให้ความร้อนปานกลาง

รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
Silicon Dioxide (SiO_2)	19.51
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	4.97
Iron Oxide (Fe_2O_3)	3.78
Calcium Oxide (CaO)	65.38
Magnesium Oxide (MgO)	1.08
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.16
Sodium Oxide (Na_2O)	0.01
Potassium Oxide (K_2O)	0.44
Titanium Dioxide (TiO_2)	0.27
Phosphorus Pentoxide (P_2O_5)	0.07
Loss on Ignition (LOI)	2.27

2. เถ้าลอยแห้ง (Fly ash)

เถ้าลอยจากจังหวัดระยอง เถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา

รูปที่ 3.2 เถ้าลอยแห้ง

เถ้าลอยในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าลอยจากจังหวัดระยอง เมื่อพิจารณาองค์ประกอบเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.2 พบว่าเถ้าลอยมีปริมาณซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อเปรียบเทียบเถ้าลอยทั้งสองชนิดพบว่า เถ้าลอยระยองมีองค์ประกอบหลักมากกว่าเถ้าลอยแม่เมาะ

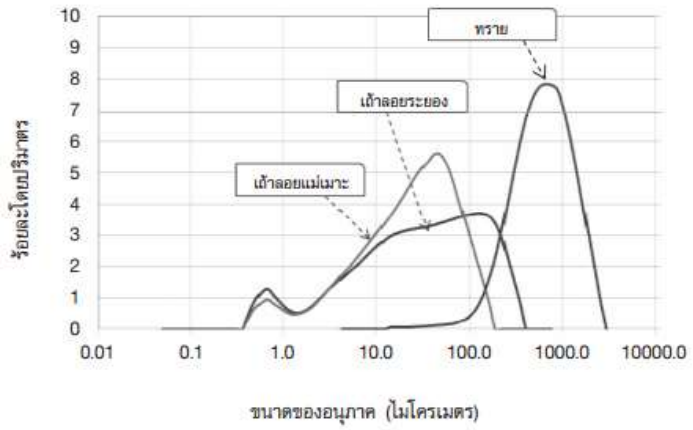
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง

สารประกอบออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	MnO_2	Fe_2O_3
เถ้าลอยแม่เมาะ (Mea-moh fly ash)	1.66	2.70	22.30	41.16	0.31	1.43	2.93	15.27	0.13	11.51
เถ้าลอยระยอง (Rayong fly ash)	0.47	0.74	28.25	45.24	0.35	3.63	0.66	11.80	14.48	2.43

ตารางที่ 3.3 ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยองตามมาตรฐาน ASTM C618

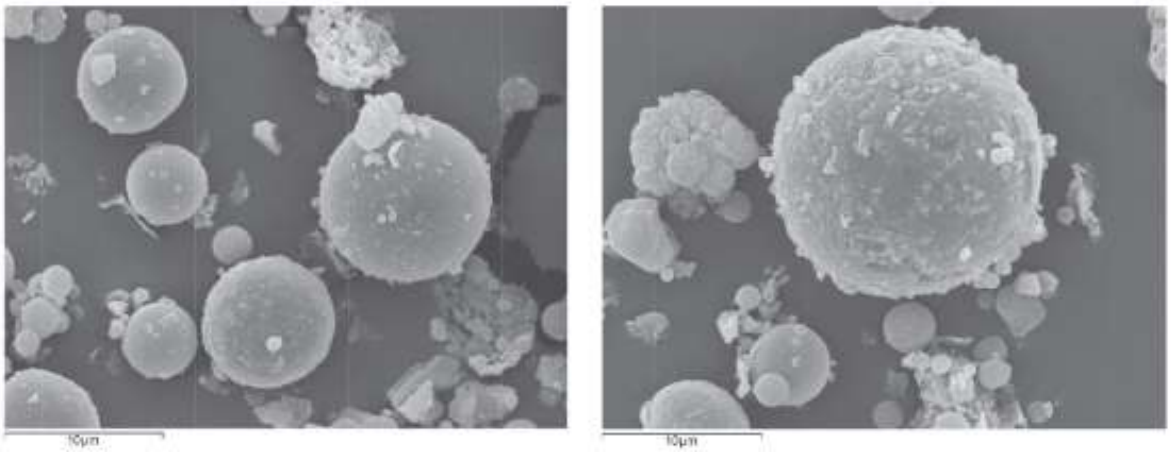
องค์ประกอบเคมี	เถ้าลอยแม่เมาะ	เถ้าลอยระยอง	ประเภทของเถ้าลอย	
			F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์และเหล็กออกไซด์(SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3) ร้อยละต่ำสุด	74.97	75.92	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละต่ำสุด	1.43	3.63	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น ร้อยละสูงสุด	-	-	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละสูงสุด	0.20	2.96	6.0	6.0
อัลคาไลในรูปของโซเดียมออกไซด์ เทียบเท่า (Na_2O) ร้อยละสูงสุด	1.66	0.47	1.50	1.50

สำหรับสมบัติทางกายภาพเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง พบว่าขนาดอนุภาคของเถ้าลอยแม่เมาะมีขนาดโดยเฉลี่ย (d50) อยู่ที่ 37.2 ไมโครเมตร (μm) ส่วนเถ้าลอยระยองอยู่ที่ 71 ไมโครเมตร (μm) ซึ่งเถ้าลอยแม่เมาะมีอนุภาคขนาดเล็กกว่าเถ้าลอยระยอง



รูปที่ 3.3 การกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าลอยระยองและทรายแม่น้ำ

รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่ายขยาย 3,500 เท่าของเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง จากรูปจะเห็นว่าอนุภาคของตัวอย่างเถ้าลอยมีลักษณะรูปทรงกลมคละกัน มีลักษณะทรงกลมผิวเรียบกว่าเถ้าลอยระยองที่มีลักษณะรูปทรงกลมบิดเบี้ยวบ้างและมีผิวขรุขระ



เถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าลอยระยอง

รูปที่ 3.4 ลักษณะของอนุภาคเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยองที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

3. เถ้าลอยเปียก (Wet fly ash)

นำเถ้าลอยแห้งมาผสมน้ำ ให้ความชื้นในเถ้าลอยเปียกเท่ากับร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันแช่ทิ้งไว้ในถัง 1 เดือน คลุมพลาสติก และปิดถังให้เรียบร้อย เพื่อกันน้ำระเหยออกไป

รูปที่ 3.5 เถ้าลอยเปียก

4. น้ำ (Watet)

น้ำที่นำมาใช้ในการทำการทดลอง คือ น้ำประปาในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา ภาควิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา

5. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate)

หินที่ค้างอยู่บนตะแกรงขนาดมาตรฐานเบอร์ 4 หรือหินที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร นำมาล้างให้สะอาด ผึ่งไว้ให้หินเป็นลักษณะอิ่มตัวผิวแห้ง

รูปที่ 3.6 มวลรวมหยาบ (หิน)

6. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate)

ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.7 มวลรวมละเอียด (ทราย)

7. แบบหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีต ทรงลูกบาศก์ ขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร

รูปที่ 3.8 แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์

8. แบบหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีต ทรงกระบอก ขนาดสูง 20 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร

รูปที่ 3.9 แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอก

9. เครื่องผสมคอนกรีต

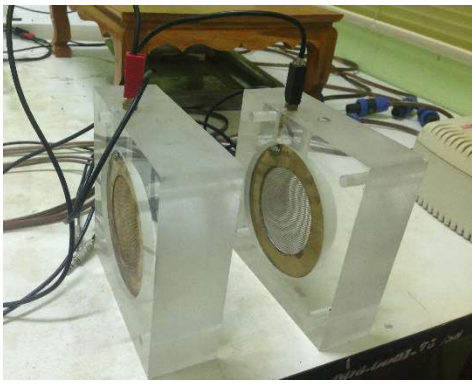
รูปที่ 3.10 เครื่องผสมคอนกรีต

10. เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า

ใช้วัดการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C102 ซึ่งวัดค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านเนื้อคอนกรีตเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง

รูปที่ 3.11 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า

11. เซลล์ทดสอบ RCPT ใช้สำหรับประกอบแบบเข้ากับก้อนตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และหนา 5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.12 เซลล์ทดสอบ

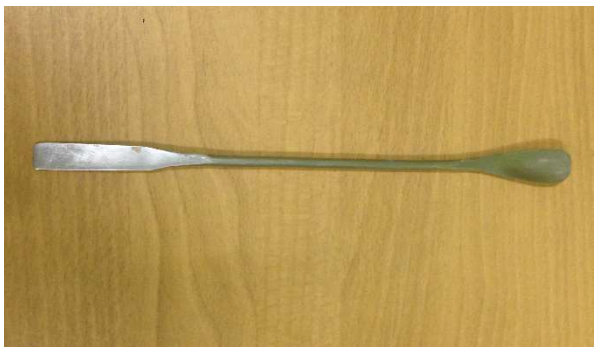
12. เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ ใช้สำหรับตัดตัวอย่างคอนกรีต ออกเป็นแผ่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 5 และ 1 เซนติเมตร

รูปที่ 3.13 เครื่องตัดคอนกรีต

13. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance) มีความละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง

รูปที่ 3.14 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล

14. ช้อนตักสาร ใช้ตักสารละลายและคนสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.15 ช้อนตักสาร

15. บีกเกอร์ขนาด 250 ml ใช้สำหรับใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

รูปที่ 3.16 บีกเกอร์ขนาด 250 ml

16. บีกเกอร์ขนาด 1,000 ml ใช้สำหรับใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเติมน้ำกลั่นจนถึงปริมาณ 1,000 ml

รูปที่ 3.17 บีกเกอร์ขนาด 1000 ml

17. กรวย ใช้สำหรับเทสารละสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงในเซลล์ทดสอบ

รูปที่ 3.18 กรวย

18. ซิลิโคน ใช้สำหรับทาก้อนตัวอย่างทดสอบ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของสารละลาย

รูปที่ 3.19 ซิลิโคน

19.น้ำกลั่น ใช้ผสมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

รูปที่ 3.20 น้ำกลั่น

20. ปั๊มดูด (Suction apparatus) ใช้สำหรับต่อเข้ากับขวดกรองสาร (Suction flask)

รูปที่ 3.21 ปั๊มดูด (Suction apparatus)

21. เครื่องต้ม (Hot plate) ใช้สำหรับให้ความร้อน

รูปที่ 3.22 เครื่องต้ม

22. แผ่นกระดาษกรอง ใช้สำหรับกรองสารละลาย

รูปที่ 3.23 แผ่นกระดาษกรอง

23. กรวยสำหรับกรองสารละลาย ใช้สำหรับกรองสารละลายลงในขวดกรองสาร (Suction flask)

รูปที่ 3.24 กรวยสำหรับกรองสารละลาย

24. ขวดกรองสาร (Suction flask) ใช้สำหรับรองรับสารสะลายที่ผ่านการกรอง

รูปที่ 3.25 ขวดกรองสาร (Suction flask)

25. เครื่อง Auto titration ใช้สำหรับไตเตรท

รูปที่ 3.26 เครื่อง Auto titration

26. เครื่องเขย่าคอนกรีต ใช้สำหรับให้คอนกรีตลงแบบหล่อได้

รูปที่ 3.27 เครื่องเขย่าคอนกรีต

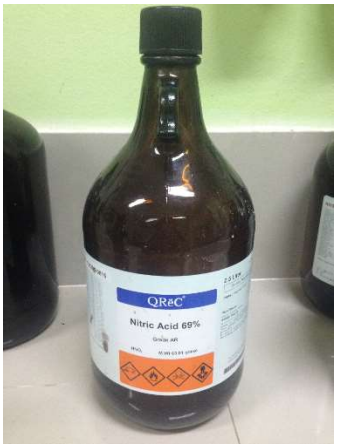
27. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ใช้เติมสารละลายในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วลบ

รูปที่ 3.28 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

28. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใช้เติมสารละลายในช่องเซลล์ทดสอบที่ขั้วบวก

รูปที่ 3.29 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

29. กรดไนตริก (Nitric acid) เข้มข้น 69%



รูปที่ 3.30 กรดไนตริก (Nitric acid)

30. ไฮโดรเจนร์เปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้น 35%

รูปที่ 3.31 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

31. สารละลายมาตรฐาน 0.1M ซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$)

รูปที่ 3.32 ซิลเวอร์ไนเตรท

32. สารกันซึมเคลือบชิ้นผิวตัวอย่างทดสอบ อีพ็อกซี่ (Epoxy)

รูปที่ 3.33 อีพ็อกซี่

3.2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง

Mix	เถ้าลอย (ร้อยละ)	Mix proportion of concrete (kg/m^3)					
		Cement	Wet fly ash	Dry fly ash	Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
I50	-	404	-	-	202	761	965
I50-WFA20	20	312	125	-	148	761	965
I50-DFA20	20	312	-	78	195	761	965
I50-WFA40	40	227	242	-	98	761	965
I50-DFA40	40	227	-	151	189	761	965
I50-WFA60	60	147	352	-	51	761	965
I50-DFA60	60	147	-	220	183	761	965
I60	-	360	-	-	216	761	965
I60-WFA20	20	279	110	-	169	761	965
I60-DFA20	20	279	-	70	210	761	965
I60-WFA40	40	204	214	-	125	761	965
I60-DFA40	40	204	-	136	204	761	965
I60-WFA60	60	132	307	-	89	761	965
I60-DFA60	60	132	-	198	198	761	965

หมายเหตุ : I หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

WFA หมายถึง เถ้าลอยเปียก (Wet fly ash)

DFA หมายถึง เถ้าลอยแห้ง (Dry fly ash)

3.3 วิธีการทดสอบ

1. การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

1.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยใช้ส่วนผสมตามที่แสดงในตาราง 3.4

รูปที่ 3.34 ตัวอย่างคอนกรีตที่แห้งแล้ว

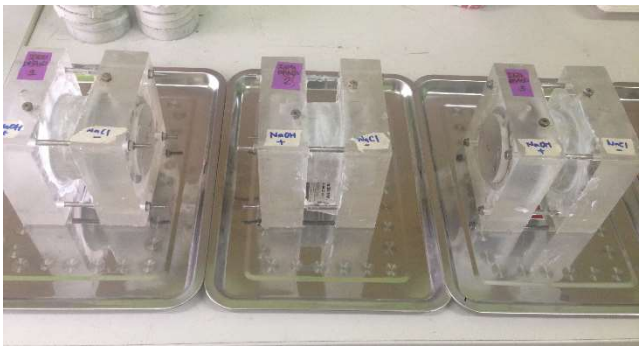
1.2 วิธีการทดสอบ

1. นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการบ่มน้ำที่อายุครบ 28, 56 และ 91 วัน ขึ้นจากน้ำ ทิ้งไว้ให้คอนกรีตแห้ง

2. นำตัวอย่างไปตัดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร

รูปที่ 3.35 ตัวอย่างคอนกรีตที่นำไปตัด

3. นำตัวอย่างมาประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบ (Apply voltage cell) ทาซิลิโคนรอบตัวอย่าง และรอจนกว่าซิลิโคนที่ทาไว้จะแห้ง

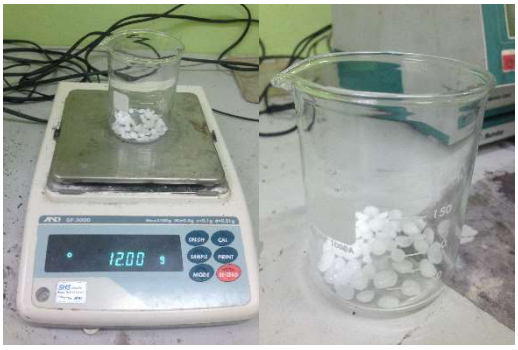


รูปที่ 3.36 นำตัวอย่างมาประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบ

4. เตรียมสารละลาย NaCl เข้มข้น 3% ชั่งน้ำหนัก NaCl 30 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร ผสมสารละลาย NaCl กับน้ำกลั่น ใช้แท่งคนสาร จนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

รูปที่ 3.37 สารละลาย NaCl 30 กรัม

5. เตรียมสารละลาย NaOH 0.3 M ชั่งสารละลาย NaOH 12 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร ผสมสารละลาย NaOH กับน้ำกลั่น ใช้แท่งคนสาร จนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 3.38 สารละลาย NaOH 12 กรัม

6. เติมสารละลาย NaCl เข้มข้น 3% ที่ขั้วลบและเติมสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.3M ในช่องเซลล์ทดสอบ RCPT ตรวจสอบที่ขั้วบวกและลบว่าเกิดรอยรั่วหรือไม่

7. ต่อสายจากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับเซลล์ทดสอบ โดยต่อสายไฟขั้วบวกเข้ากับเซลล์ทดสอบที่ขั้วบวกและต่อสายไฟขั้วลบเข้ากับเซลล์ที่ขั้วลบ

รูปที่ 3.39 ต่อสายจากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับเซลล์ทดสอบ

8. เปิดเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า จากนั้นกดปุ่ม “Reset” ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น 60 โวลต์ ตั้งเวลาในการทดสอบทั้งหมด 360 นาที จากนั้นเลือกช่องสัญญาณที่จะทดสอบ สังเกตไฟสัญญาณสีแดงสว่างขึ้น แสดงว่าเครื่องเริ่มต้นทดสอบแล้ว

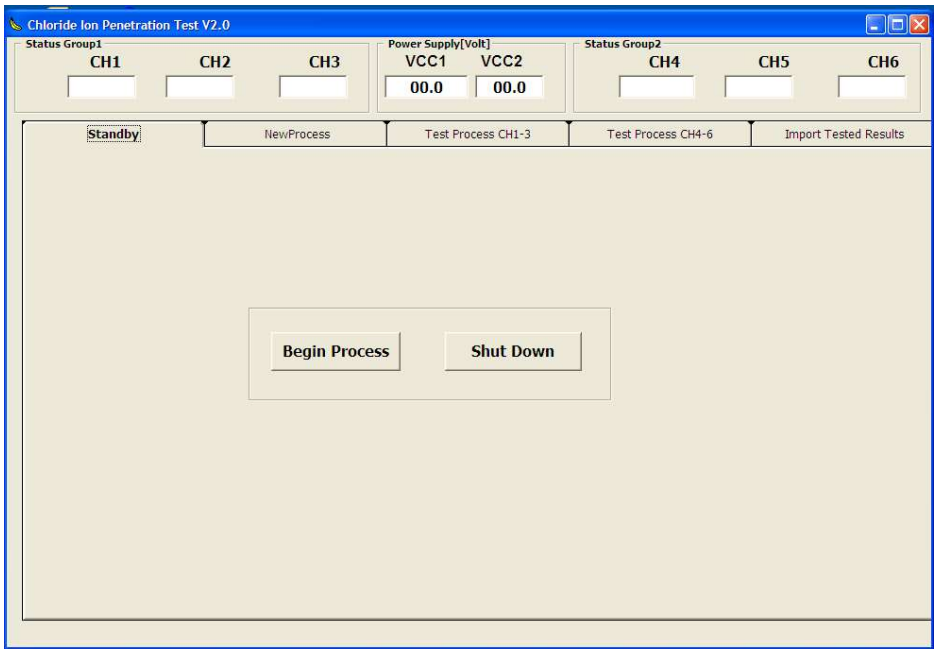
รูปที่ 3.40 เริ่มการทดสอบ

9. ให้ต่อสัญญาณ RS – 332 จากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับ Serial port ของเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อถ่ายข้อมูลที่ได้จากการทดสอบและแสดงผลการทดสอบในรูปแบบตารางและกราฟ

10. เปิดโปรแกรมทดสอบ Chloride Ion Penetration Test V2.0

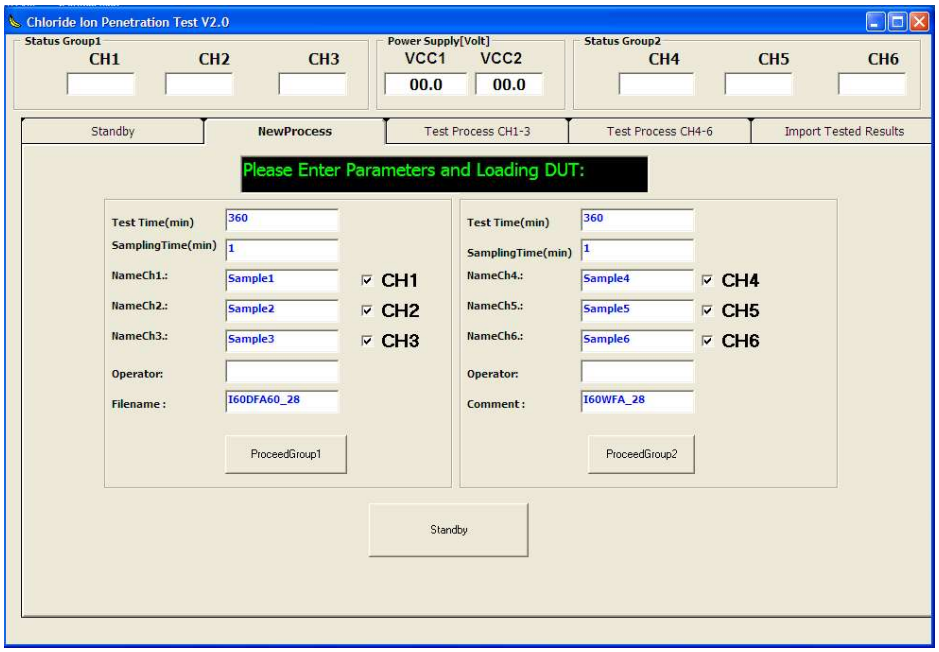
รูปที่ 3.41 ไอคอนโปรแกรมทดสอบ Chloride Ion Penetration Test V2.0

11. เริ่มการใช้งานโปรแกรม คลิกปุ่ม “Begin Process” ดังรูป และกรอกรายละเอียดข้อมูลสำหรับการทดสอบลงไป ดังรูปที่ 3.40

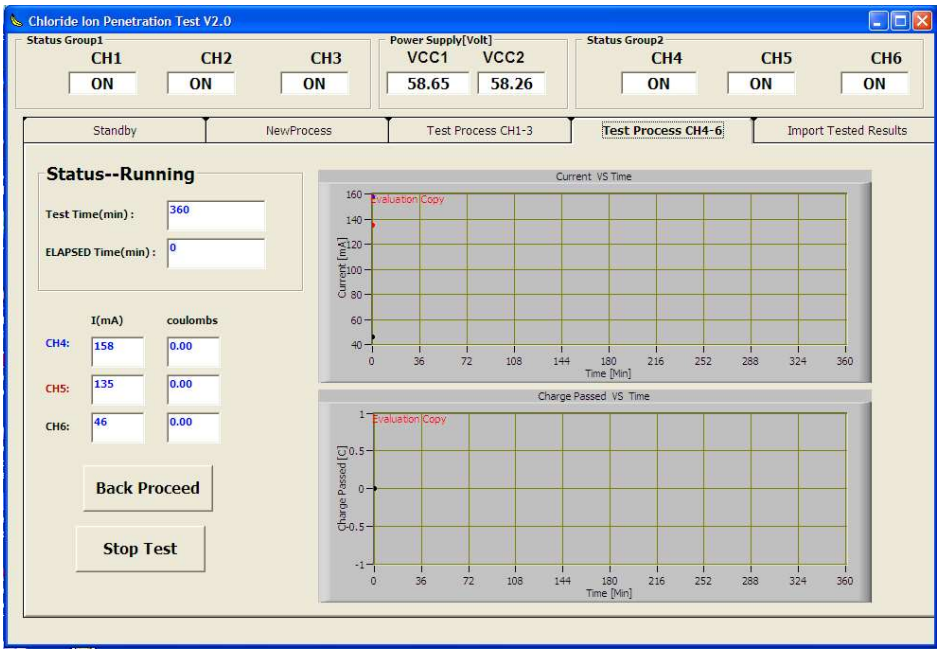


รูปที่ 3.42 เข้าสู่โปรแกรมทดสอบ Chloride Ion Penetration Test V2.0

12. กดปุ่ม PreceedGroup1 สำหรับช่องสัญญาณ 1-3 เพื่อเริ่มการทดสอบ และกดปุ่ม PreceedGroup2 สำหรับช่องสัญญาณ 4-6 เพื่อเริ่มการทดสอบ



รูปที่ 3.43 กรอกข้อมูลเพื่อทำการทดสอบ



รูปที่ 3.44 โปรแกรมเริ่มทดสอบ 360 นาที

13. หลังจากทดสอบเสร็จสิ้นให้คลิกที่ “back process” และคลิกที่ Shut down เพื่อปิดการใช้งานโปรแกรม

14. ข้อมูลที่ได้จะจากการทดสอบจะถูกเก็บบันทึกไว้ใน Result

15. นำตัวอย่างออกจากเซลล์ทดสอบ ทำความสะอาดอุปกรณ์การทดสอบ

2. การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายคลอไรด์

2.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยใช้ส่วนผสมตาราง 3.4 ส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง

รูปที่ 3.45 ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม.

2.2 วิธีการทดสอบ

1. ถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในน้ำ 28 วัน

2. นำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบอีพ็อกซี่ ยกเว้นบริเวณด้านบน แล้วจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0% โดยชั่ง NaCl 49.44 g ละลายในน้ำ 1,000 cm^3 เป็นเวลา 28, 56 และ 91 วัน เพื่อให้เกิดการแพร่ของสารละลายคลอไรด์เข้าสู่ตัวอย่าง

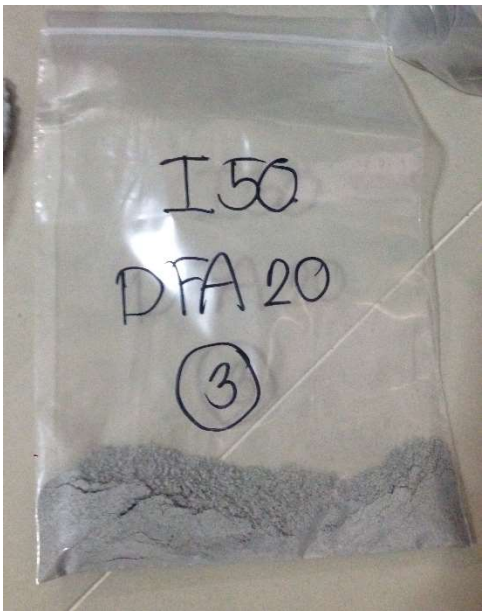
รูปที่ 3.46 ชิ้นตัวอย่างที่เคลือบอีพ็อกซี่แล้ว

รูปที่ 3.47 คอนกรีตแช่ในสารละลายคลอไรด์

3. นำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตรที่แช่ในสารละลายคลอไรด์ครบระยะเวลาตามที่กำหนด 28, 56 และ 91 วัน มาตัดเป็นชิ้นหนาประมาณ 1 เซนติเมตร จำนวน 10 ชิ้น ที่ระดับความลึก 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 เซนติเมตร จากผิวด้านนอก

รูปที่ 3.48 คอนกรีตชิ้นหนาประมาณ 1 เซนติเมตร

4. นำชิ้นคอนกรีตที่ตัดมาตำให้เป็นผง แยกผงคอนกรีตตามระดับชั้นความลึก

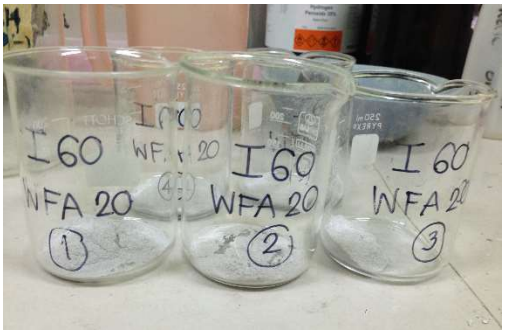


รูปที่ 3.49 ผงคอนกรีต

5. นำผงคอนกรีตมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ตามวิธี ASTM C1152 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่สารละลายในกรด (Acid-soluble chloride) และทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ตามวิธีการทดสอบ ASTM C1218 เป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble chloride)

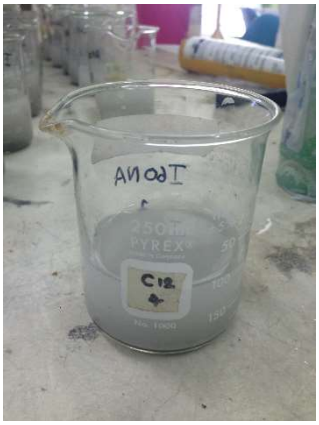
2.3 การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดในระบบ

1. นำตัวอย่างคอนกรีตที่บดเป็นผงแล้ว ชั่งน้ำหนัก 5 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์



รูปที่ 3.50 ชั่งคอนกรีต 5 กรัม

2. เติมน้ำกลั่นลงไปในบีกเกอร์ 100 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 69% ที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.51 เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร พร้อมเติมสารละลาย 25 มิลลิลิตร

3. นำบีกเกอร์ไปวางในเครื่องต้ม (hot plate) ต้มให้เดือดประมาณ 2-3 นาที

รูปที่ 3.52 ต้มตัวอย่างประมาณ 2-3 นาที

4. นำบีกเกอร์ที่ต้มจนเดือด มาวางทิ้งไว้ในอ่างที่ใส่น้ำเย็น

5. นำกระดาษกรองมาวางในกรวย ติดตั้งวางบนขวด (Suction Flask) โดยทำให้กระดาษกรองเปียก

6. เสียบสายยางต่อเข้ากับเครื่องดูด (Suction apparatus) ทำการเปิดสวิตซ์ เทสารในบีกเกอร์ลงในกรวยกรอง ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารในบีกเกอร์ลงกรวยให้หมด

7. เทสารจากขวด (Suction Flask) ที่ได้จากการกรองเสร็จแล้ว เทลงในบีกเกอร์

รูปที่ 3.53 กรองตัวอย่าง

8. นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Potentiometric titration ซึ่งเครื่องจะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้า เมื่อถึงจุด End point จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้และประจุ

รูปที่ 3.54 ทดสอบด้วยเครื่อง Potentiometric titration

9. ทำการจดบันทึกผลที่ได้

2.4 การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระในระบบ

การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1218

1. นำตัวอย่างทดสอบที่บดแล้ว 5 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์

รูปที่ 3.55 คอนกรีตที่บดแล้ว 5 กรัม

2. เติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ที่มีตัวอย่างทดสอบที่บดแล้ว 5 กรัม จนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

รูปที่ 3.56 เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร

3. นำบีกเกอร์ไปต้มในเครื่องต้ม (hot plate) จนเดือดประมาณ 5 นาที แล้วจึงนำออกจากเครื่องต้ม

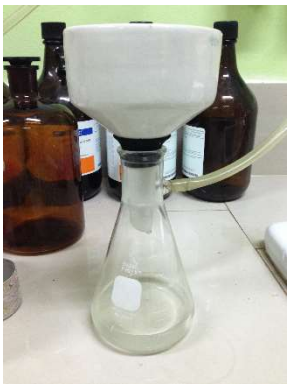
รูปที่ 3.57 ต้มตัวอย่าง 5 นาที

4. ตั้งบีกเกอร์ตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 3.58 ทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง

5. นำกระดาษกรองมาวางในกรวย ติดตั้งวางบนขวด (Suction Flask) โดยทำให้กระดาษกรองเปียก

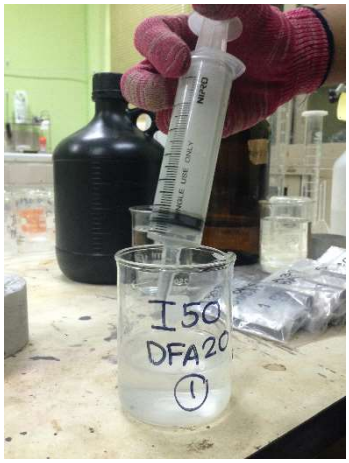
6. เสียบสายยางต่อเข้ากับเครื่องดูด (Suction apparatus) ทำการเปิดสวิตซ์ เทสารในบีกเกอร์ลงในกรวยกรอง ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารในบีกเกอร์ลงกรวยให้หมด



รูปที่ 3.59 กรองตัวอย่าง

7. เทสารจากขวด (Suction Flask) ที่ได้จากการกรองเสร็จแล้ว เทลงในบีกเกอร์

8. เติมกรด Nitric acid 3 ml และ Hydrogen peroxide 3 ml ลงในบีกเกอร์



รูปที่ 3.60 เติมกรด Nitric acid 3 ml และ Hydrogen peroxide 3 ml

9. นำบีกเกอร์ลงบนเครื่องต้ม (hot plate) ประมาณ 2-3 นาที

10. ตัวอย่างที่ต้มเสร็จแล้ว นำไปแช่ในอ่างน้ำเย็น ทิ้งไว้ให้เย็น

11. นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Potentiometric titration ซึ่งเครื่องจะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้า เมื่อถึงจุด End point จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้และประจุ

12. ทำการจดบันทึกผลที่ได้

2.5 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์

จากผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลาย สามารถนำมาคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (D_a) ในคอนกรีตได้จากการคำนวณ โดยใช้คำตอบของกฎการแพร่ในสมการ 2-2 ในกรณีที่ D_a มีค่าต่ำ หมายความว่า การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าน้อย

$$C(x,t) = (C_s - C_0)\left[1 - \text{erf}\left(\frac{C}{2\sqrt{D_a t}}\right)\right] + C_0 \qquad (2.2)$$

โดยที่ $C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา 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)

3. การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร โดยผสมตัวอย่างตามอัตราส่วนผสม ดังตาราง 3-2

3.2 วิธีการทดสอบ

1. นำตัวอย่างไปบ่มน้ำ ตามระยะเวลาที่กำหนด 28, 56 และ 91 วัน

รูปที่ 3.61 ทิ้งคอนกรีตให้แห้งก่อนนำไปทดสอบ

2. นำตัวอย่างที่ผ่านการบ่มจนครบอายุแล้ว ไปทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต อ่านและบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง

รูปที่ 3.62 การทดสอบกำลังอัด

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

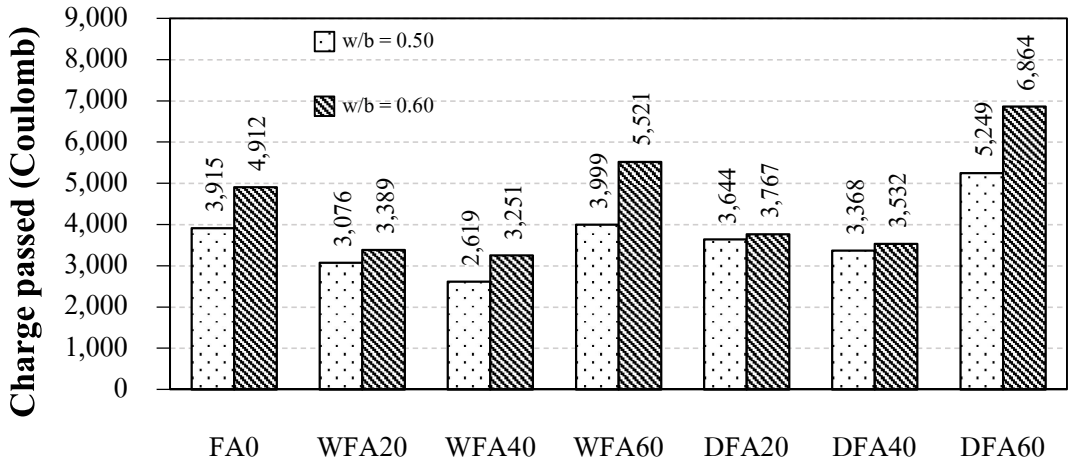
การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต สามารถพิจารณาได้จากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 ซึ่งถูกแสดงด้วยค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตในหน่วยคูลอมป์ โดยเมื่อมีปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตต่ำ หมายถึงมีการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งต่ำ แสดงว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์อิออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202

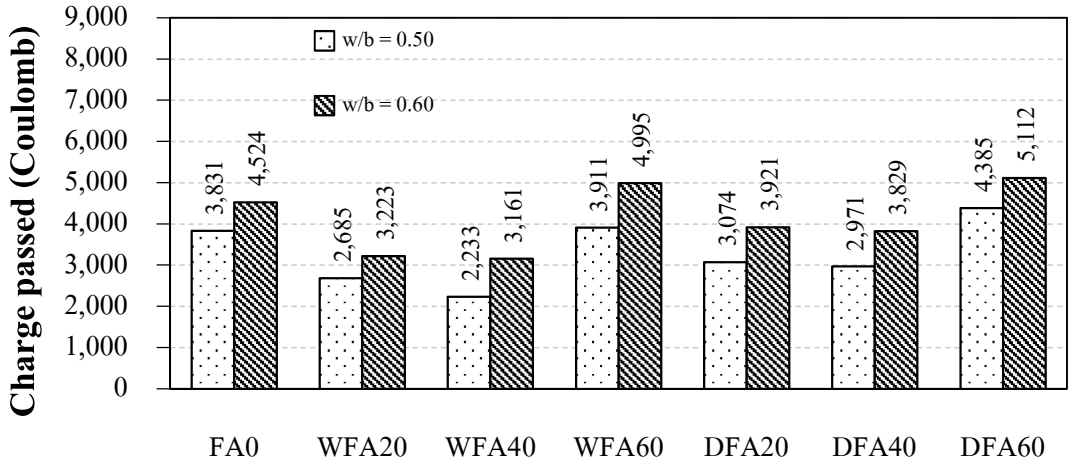
Charge passed (Coulombs)	Chloride ion penetrability
>4000	High
2,000-4,000	Moderate
1,000-2,000	Low
100-1,000	Very low
<100	Negligible

4.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

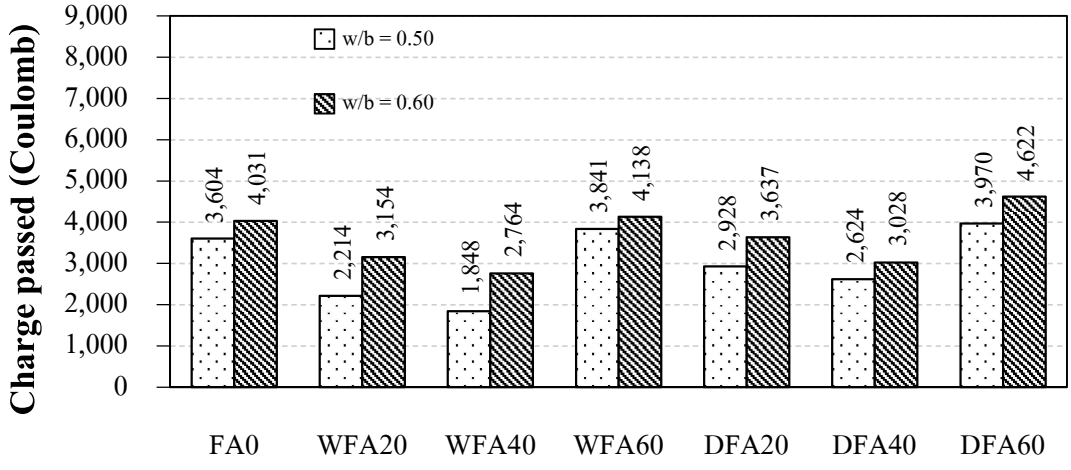
จากรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีความต้านานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ทั้งที่อายุการบ่ม 28, 56 และ 91 วัน ดังแสดงได้จากการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีปริมาณน้ำน้อยกว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประมาณ 0.60 ทำให้คอนกรีตมีความพรุนที่น้อยกว่า และยิ่งใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในคอนกรีต เถ้าลอยเป็นสารปอซโซลานที่ทำให้เกิดผลผลิตปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้ความพรุนลดลง และขนาดอนุภาคที่เล็กของเถ้าลอยช่วยเติมแทรกลดความพรุนของคอนกรีตลงด้วย



(ก) ระยะบ่มที่ 28 วัน



(ข) ระยะบ่มที่ 56 วัน



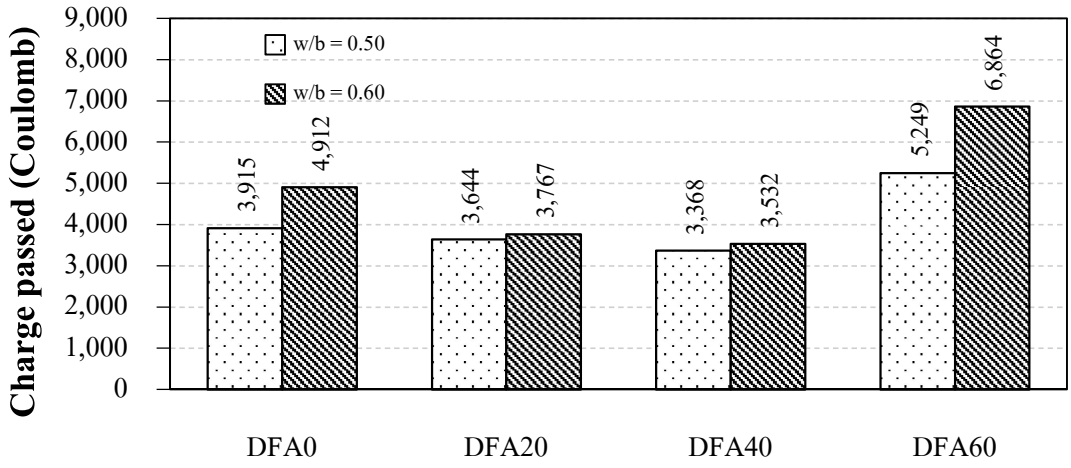
(ค) ระยะบ่มที่ 91 วัน

รูปที่ 4.1 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60

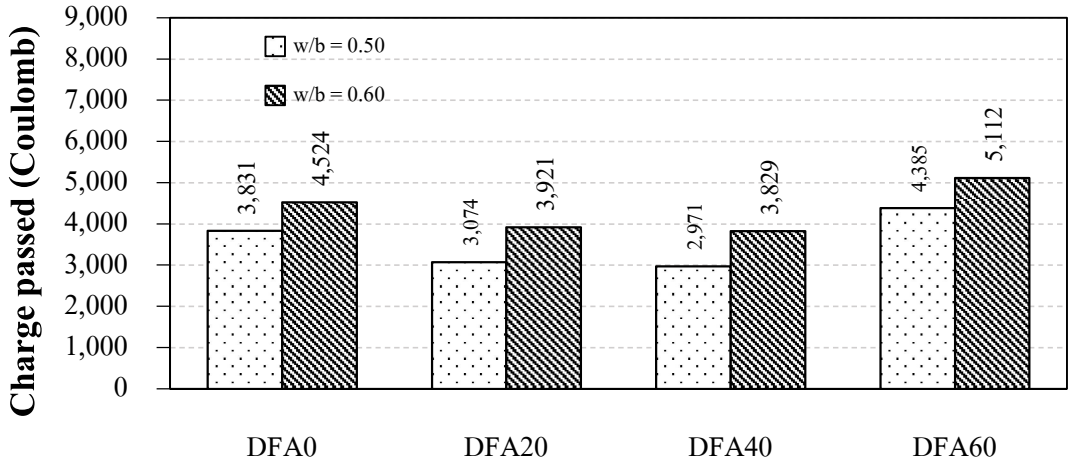
4.1.2 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.2 แสดงอัตราส่วนต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 การแทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้งในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40 และ 60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28, 56 และ 91 วัน พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้งนั้นมีการปริมาณประจุน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเป็นอย่างเดียว เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $Ca(OH)_2$ และก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การแทนที่เถ้าลอยร้อย 40 นั้นมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด แต่ในทางกลับกันการใส่เถ้าลอยในปริมานร้อยละ 60 กลับส่งผลให้คอนกรีตมีประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตนั้นมีปริมาณประจุที่มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเป็นอย่างเดียว เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่ใช้มีปริมาณมากกว่าวัสดุประสาน จึงทำให้เถ้าลอยส่วนที่เหลือไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ได้หมดส่งผลให้คอนกรีตเกิดความพรุนที่มากขึ้น จึงส่งผลให้คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 60 มีการแทรกซึมคลอไรด์ได้มากที่สุด

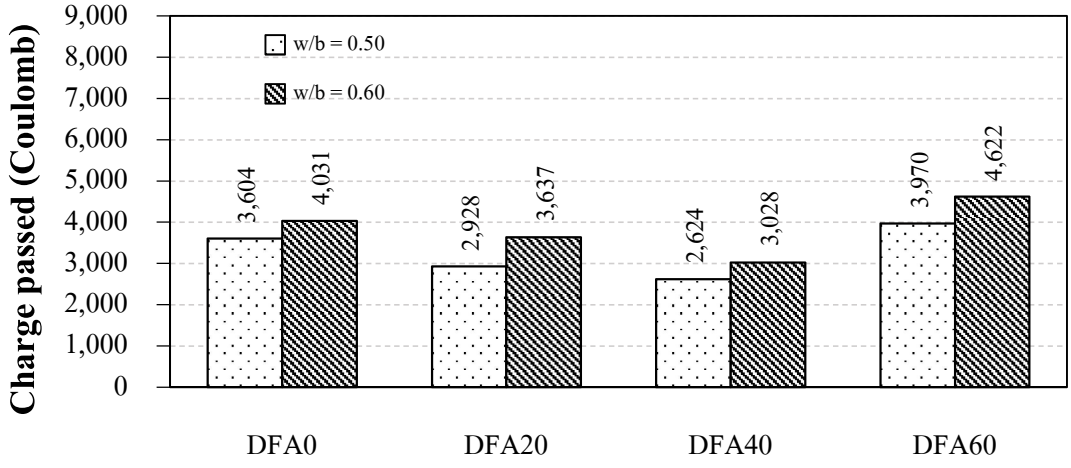
จากรูปที่ 4.3 แสดงอัตราส่วนต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 การแทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียกในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40 และ 60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28, 56 และ 91 วัน พบว่า ผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแห้ง เนื่องจากอัตราส่วนในการใช้เถ้าลอยเปียกนั้นใช้เท่ากับเถ้าลอยแห้งจึงทำให้ส่งผลไปในทิศทางเดียวกัน



(ก) ระยะบ่มที่ 28 วัน

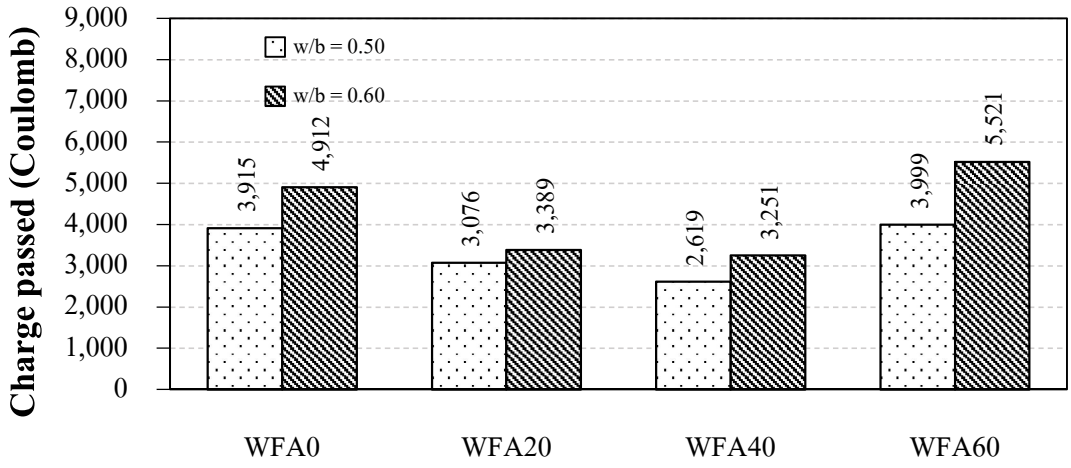


(ข) ระยะบ่มที่ 56 วัน

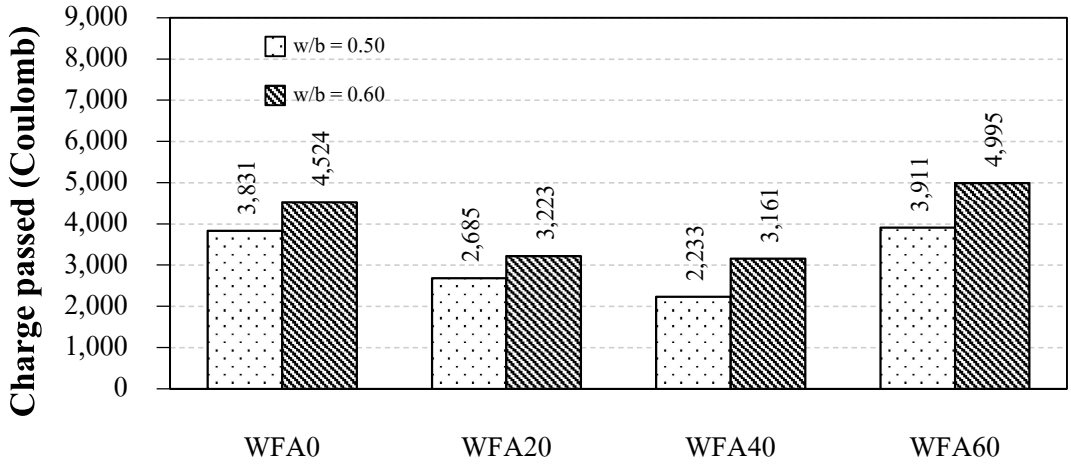


(ค) ระยะบ่มที่ 91 วัน

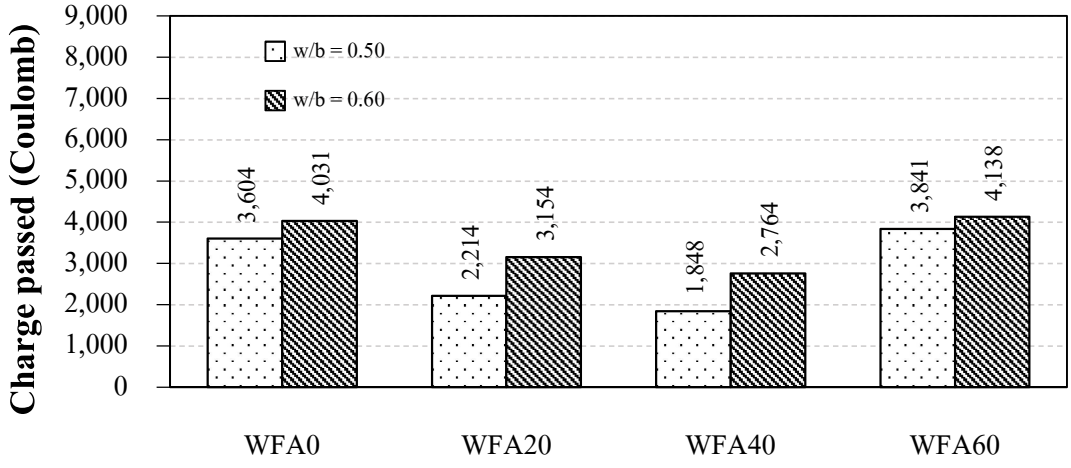
รูปที่ 4.2 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60



(ก) ระยะบ่มที่ 28 วัน



(ข) ระยะบ่มที่ 56 วัน

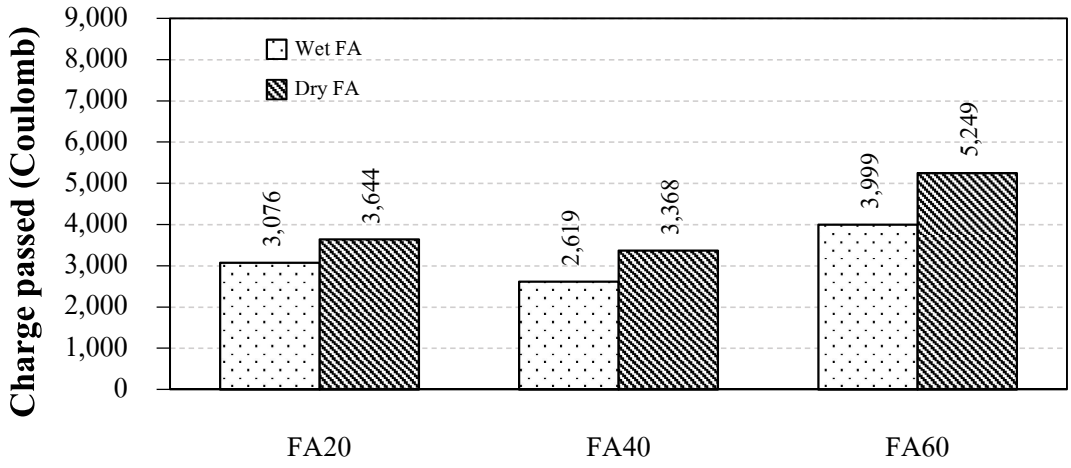


(ค) ระยะบ่มที่ 91 วัน

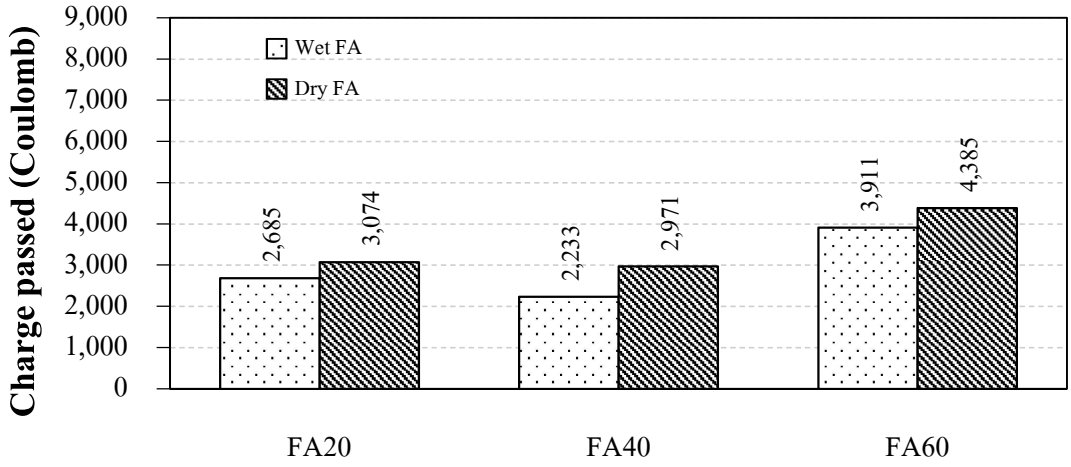
รูปที่ 4.3 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60

4.1.3 ผลกระทบของสภาวะความชื้นของเถ้าลอย

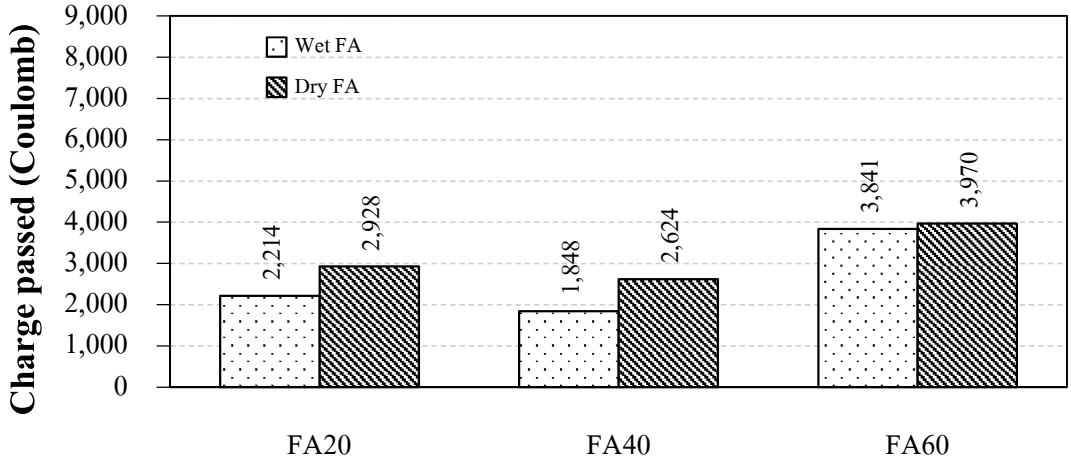
จากรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 แสดงอัตราส่วนต่อวัสุประสาน 0.50 และ 0.60 การแทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้งเปรียบเทียบกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียกในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40 และ 60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28, 56 และ 91 วัน พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียกนั้นมีปริมาณประจุน้อยกว่าคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแห้ง เนื่องจากผลของการผสมแบบผสม 2 ครั้ง (Double mixing) ส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมแบบ 2 ครั้งนั้น มีการทึบน้ำที่ดีขึ้น คอนกรีตมีความแน่นขึ้น ความพรุนที่ลดน้อยลง เนื่องจากการจับตัวของเถ้าลอยเปียกเข้าไปจับตัวกับมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดก่อน ส่งผลให้การใช้เถ้าลอยเปียก นั้นมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด



(ก) ระยะบ่มที่ 28 วัน

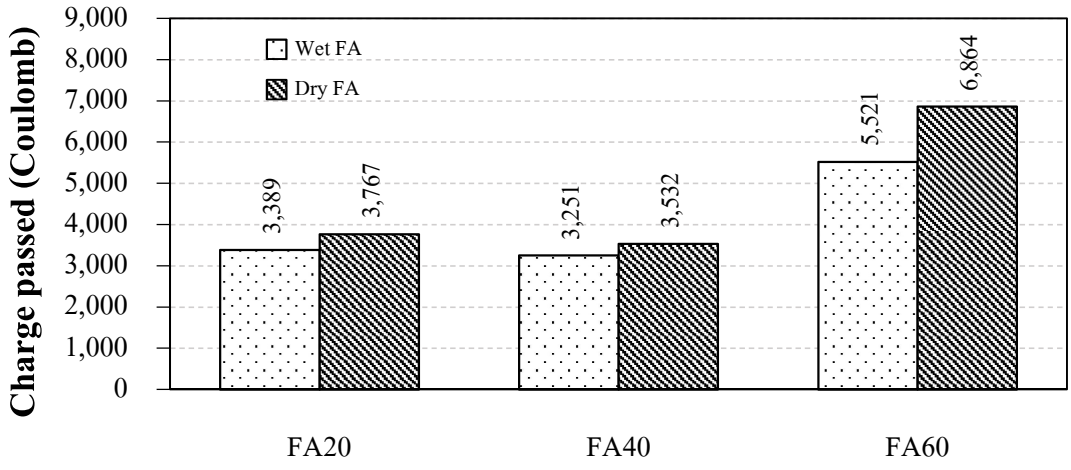


(ข) ระยะบ่มที่ 56 วัน

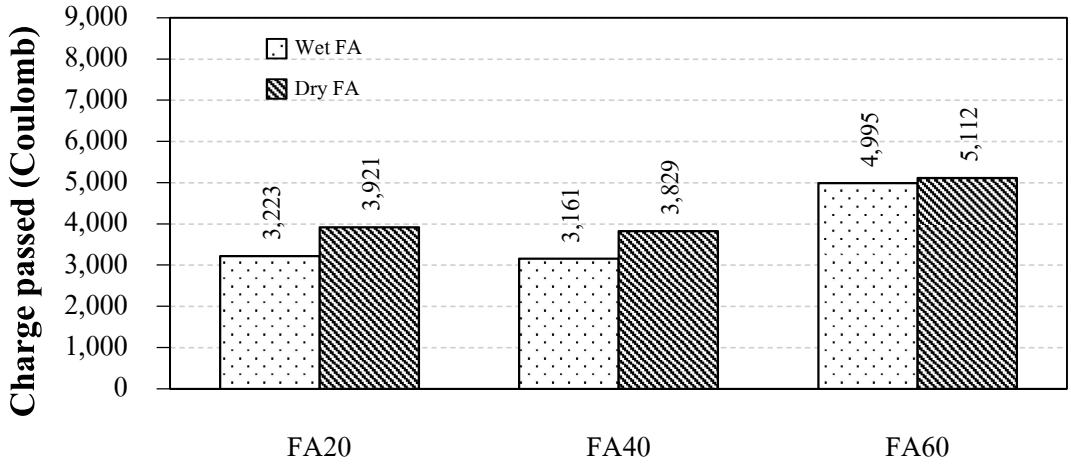


(ค) ระยะบ่มที่ 91 วัน

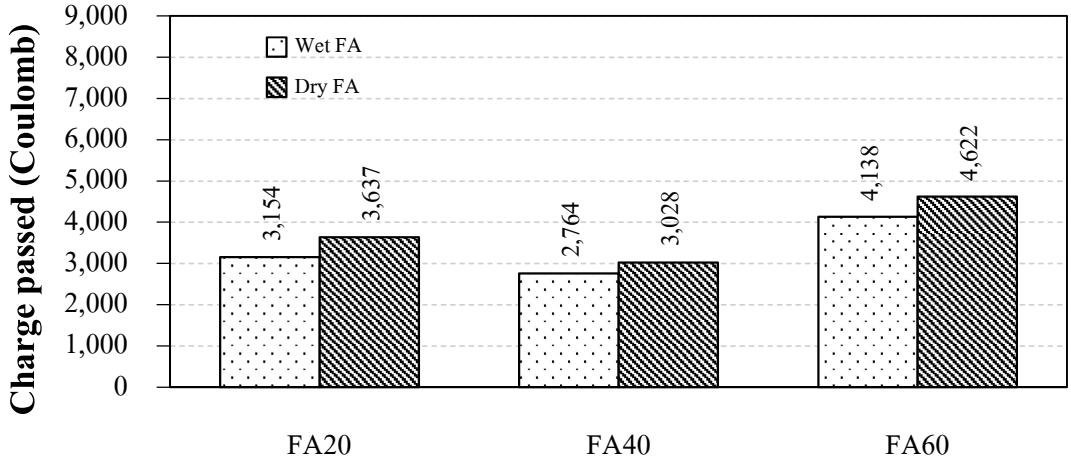
รูปที่ 4.4 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ก) ระยะบ่มที่ 28 วัน



(ข) ระยะบ่มที่ 56 วัน

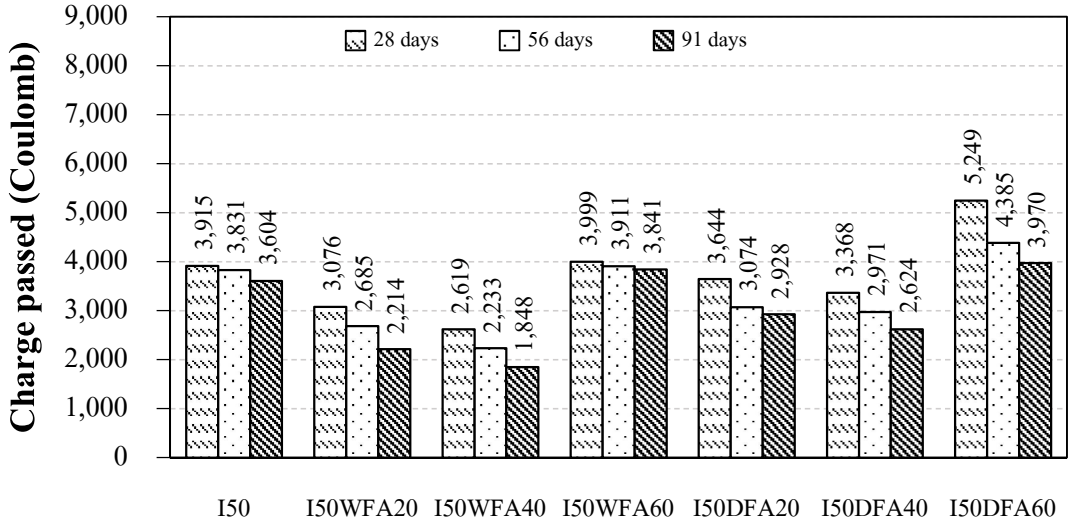


(ค) ระยะบ่มที่ 91 วัน

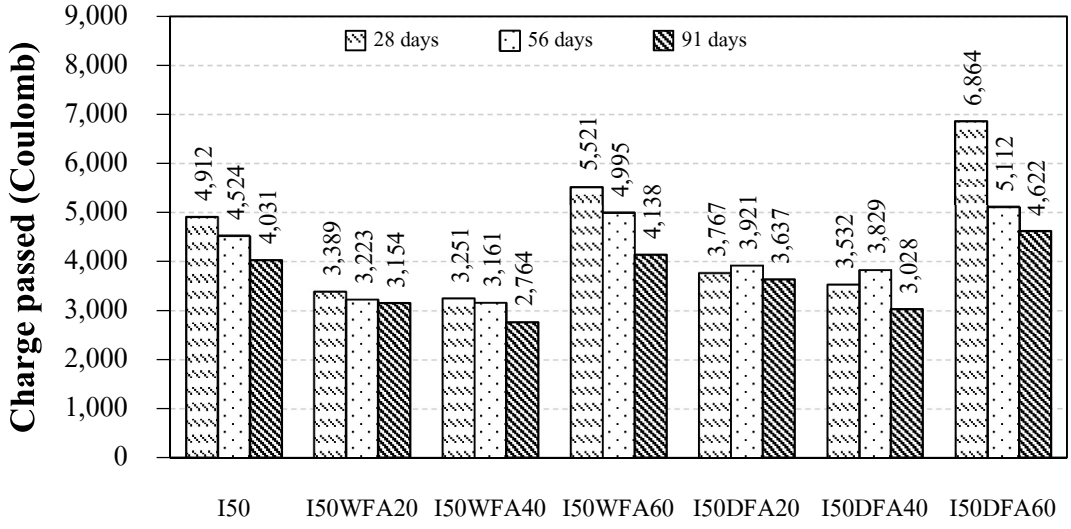
รูปที่ 4.5 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

4.1.4 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม

จากรูปที่ 4.6 พิจารณาระยะเวลาการบ่มที่ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลา 91 วันดีที่สุด เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานนิกเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ ทำให้คอนกรีตมีความแน่นที่มากขึ้น ความพรุนน้อยลง เป็นผลให้การแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านได้น้อยลง



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

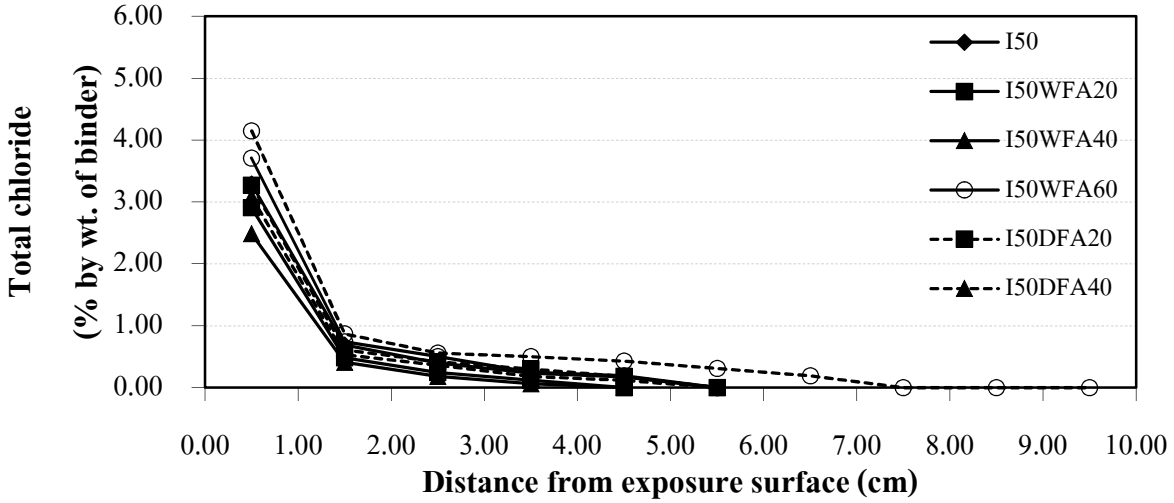


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

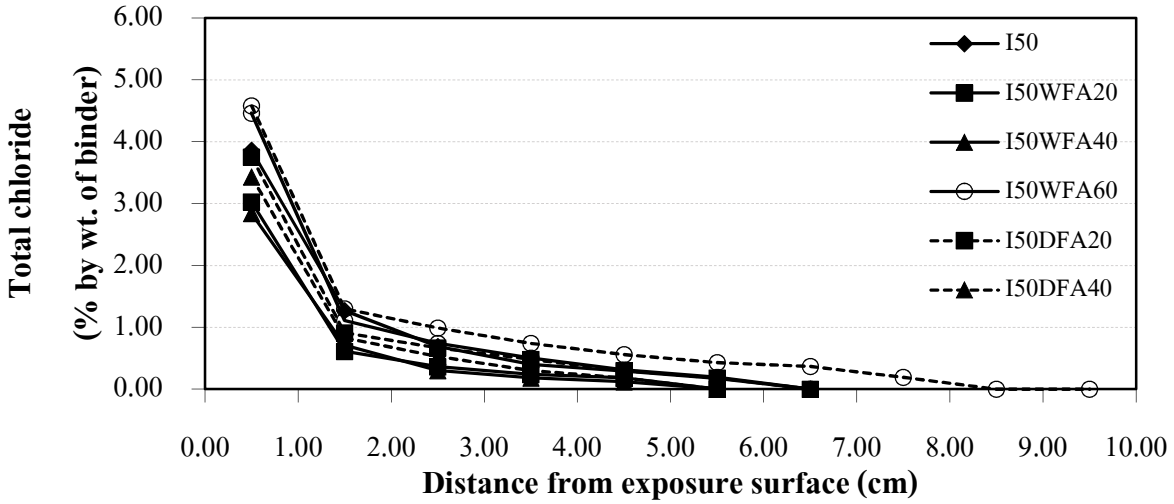
รูปที่ 4.6 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ระยะการบ่ม 28, 56 และ 91 วัน

4.2 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของคอนกรีต

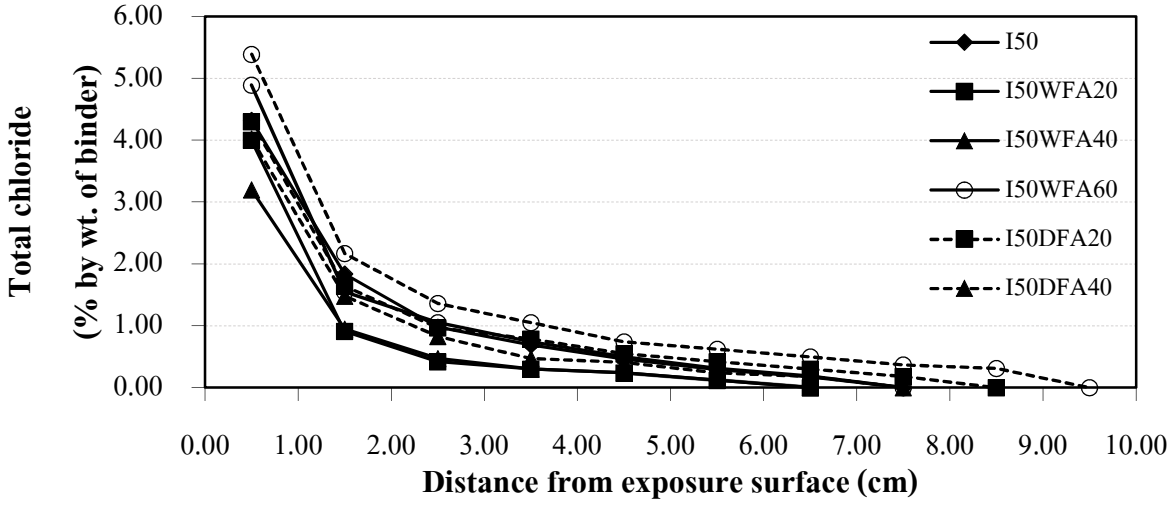
การแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของคอนกรีต หาได้จากการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในช่วงความลึกต่างๆ กัน ภายหลังแช่คอนกรีตในสารละลายคลอไรด์เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน นำค่าปริมาณคลอไรด์ที่ได้มาแสดงในรูปแบบการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต แล้วจึงคำนวณหา สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_a) ของคอนกรีต โดยใช้สมการคำตอบของกฎการแพร่ข้อที่ 2



(ก) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ที่ 28 วัน

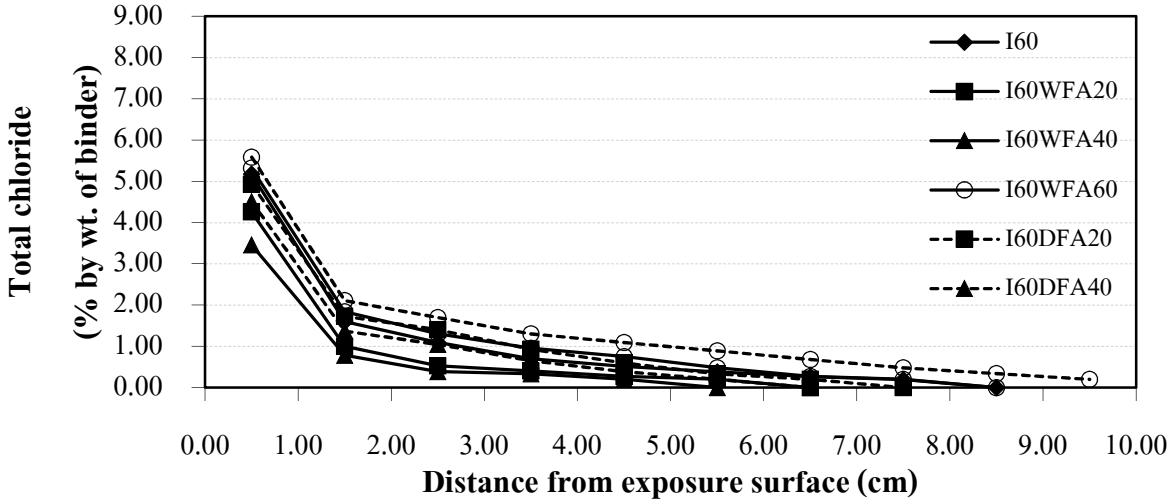


(ข) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ที่ 56 วัน

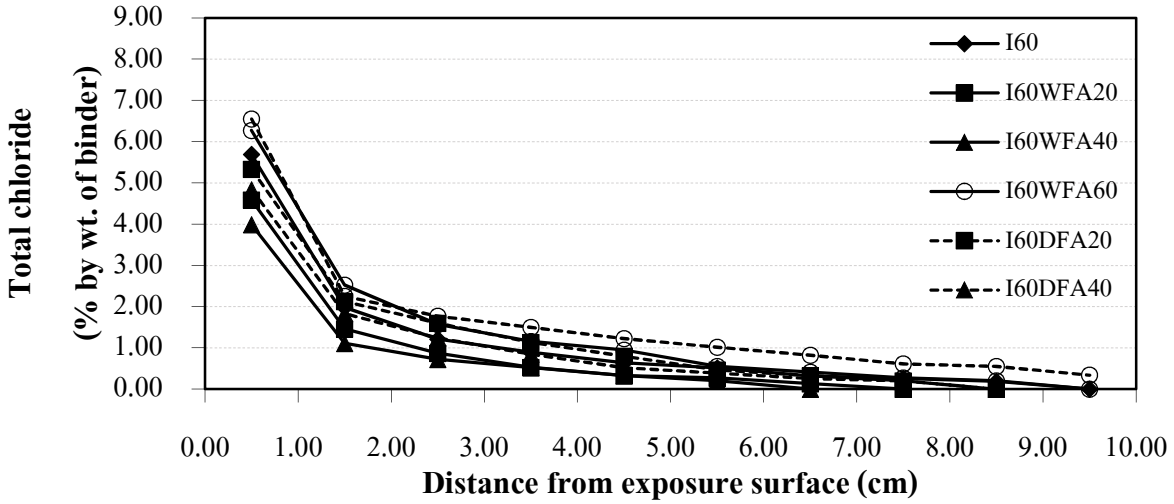


(ค) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ที่ 91 วัน

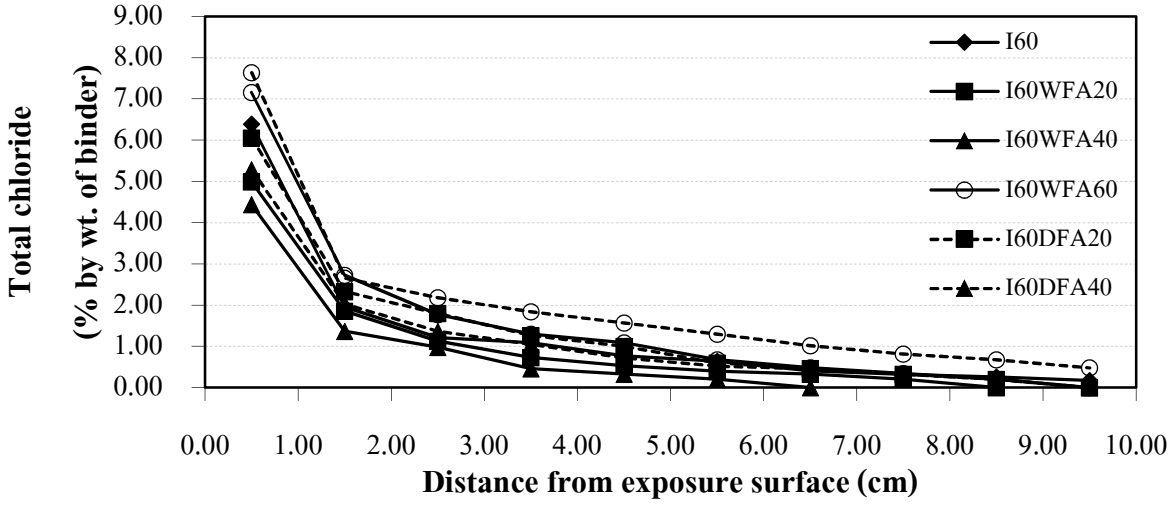
รูปที่ 4.7 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ก) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 28 วัน



(ข) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 56 วัน



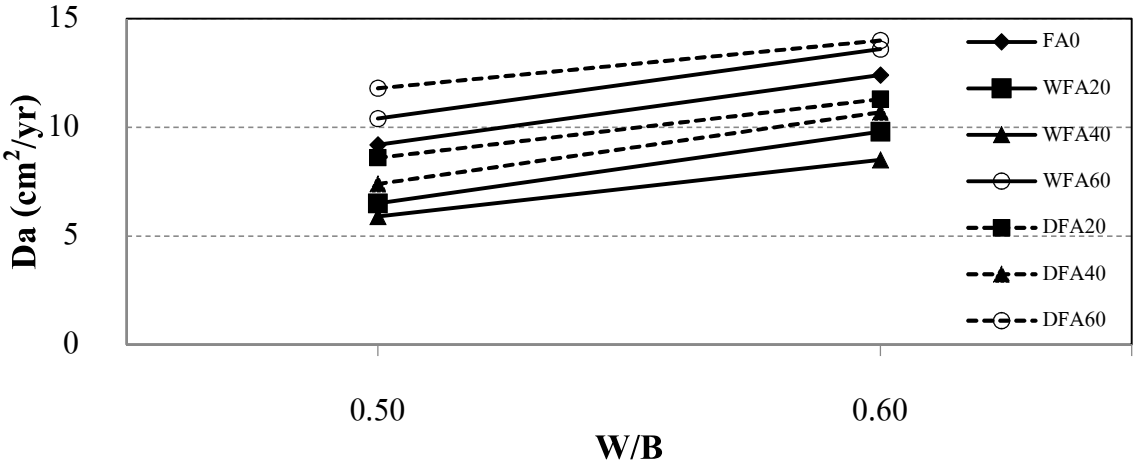
(ค) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 91 วัน

รูปที่ 4.8 การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

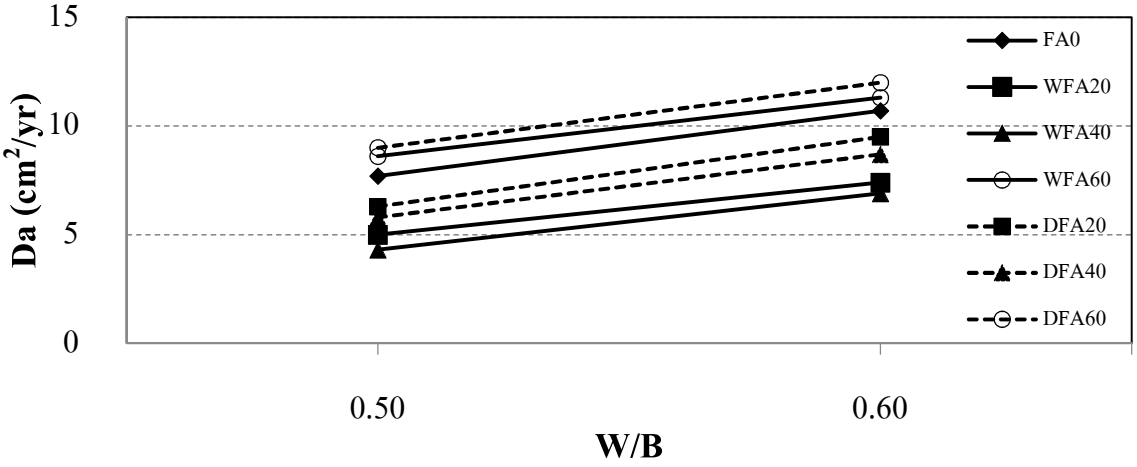
เพื่อให้การเปรียบเทียบต่างๆ มีความชัดเจนขึ้น จึงนำค่าการกระจายตัวการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_a) ของคอนกรีต แล้วนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ในการศึกษาวิจัยดังนี้

4.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

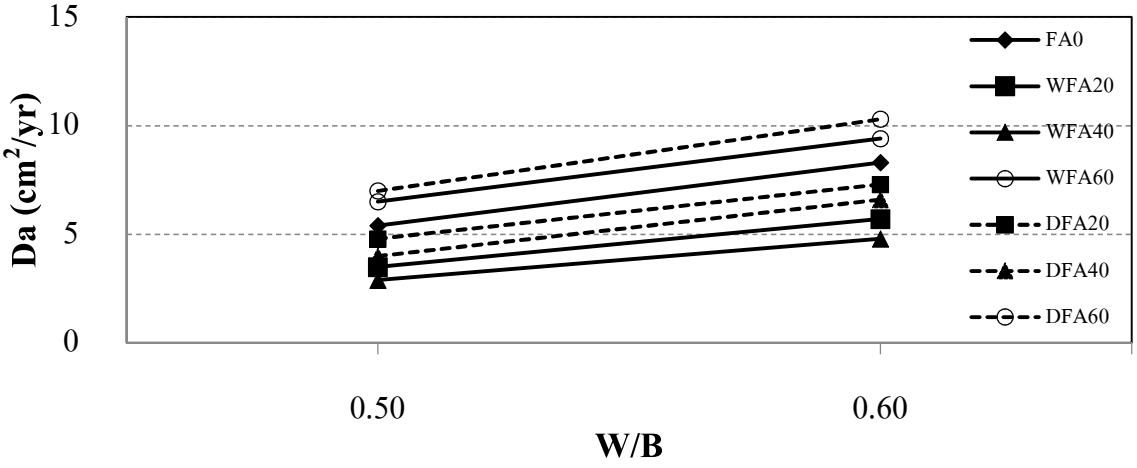
จากรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ทั้งที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน ดังแสดงได้จากสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ต่ำกว่า เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 นั้นมีการใช้ปริมาณน้ำที่น้อยกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประมาณ 0.60 ทำให้คอนกรีตมีความพรุนที่น้อยกว่า และยิ่งเมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ซึ่งเป็นสารปอซโซลานและมีขนาดอนุภาคที่เล็ก ความพรุนของคอนกรีตจึงลดลง



(ก) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 28 วัน



(ข) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 56 วัน



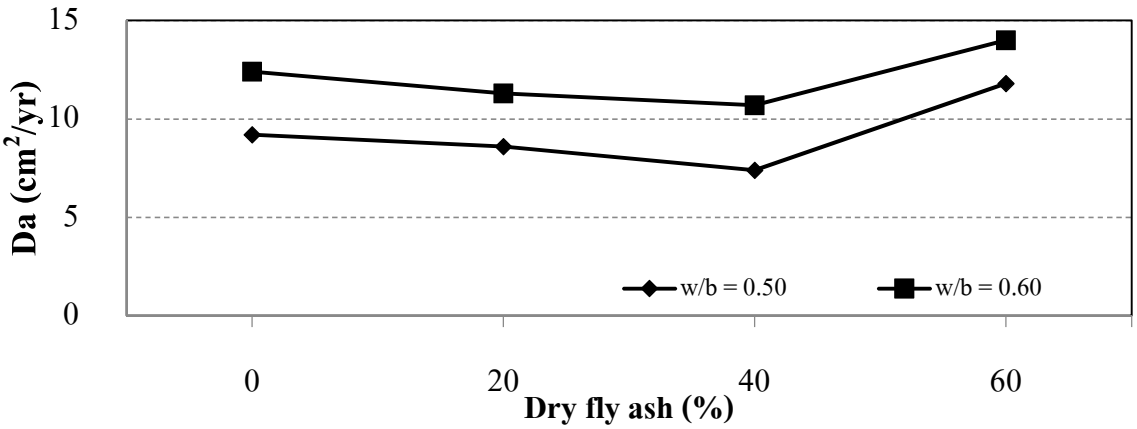
(ค) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 91 วัน

รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ w/b 0.50 และ 0.60

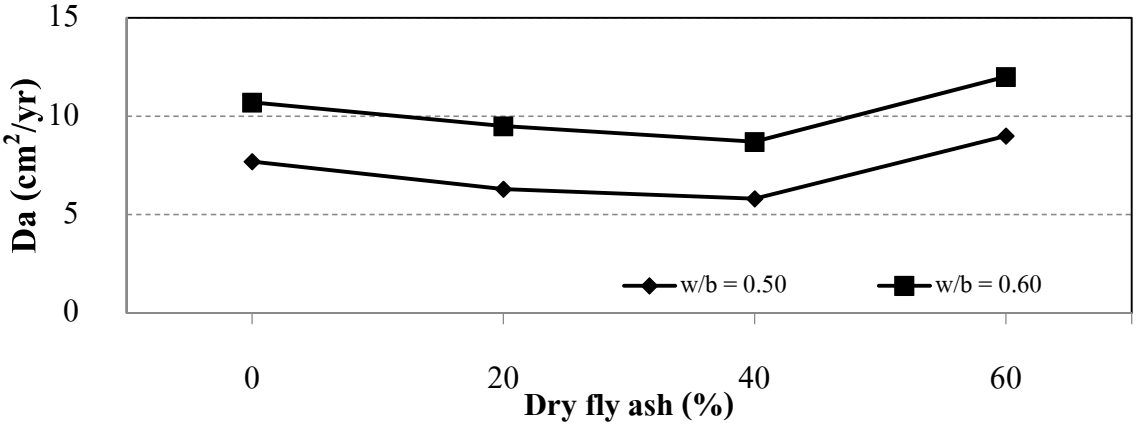
4.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.10 แสดงอัตราส่วนต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 การแทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้งในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40 และ 60 ที่ระยะเวลาการแช่ในสารละลายคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน คอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้งนั้นมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเป็นอย่างเดียว เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ และก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่งผลให้การแทนที่เถ้าลอยร้อย 40 นั้นมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด แต่ในทางกลับกัน การใส่เถ้าลอยในปริมานสูงถึงร้อยละ 60 กลับส่งผลให้คอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักเป็นอย่างเดียว เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่ใช้มีปริมาณมากกว่าวัสดุประสาน จึงทำให้เถ้าลอยส่วนที่เหลือไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ได้หมด หรือ $Ca(OH)_2$ มีไม่เพียงพอ ส่งผลให้คอนกรีตเกิดความพรุนมากขึ้น ทำให้คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 60 นั้นมีการแทรกซึมคลอไรด์ได้มากที่สุด

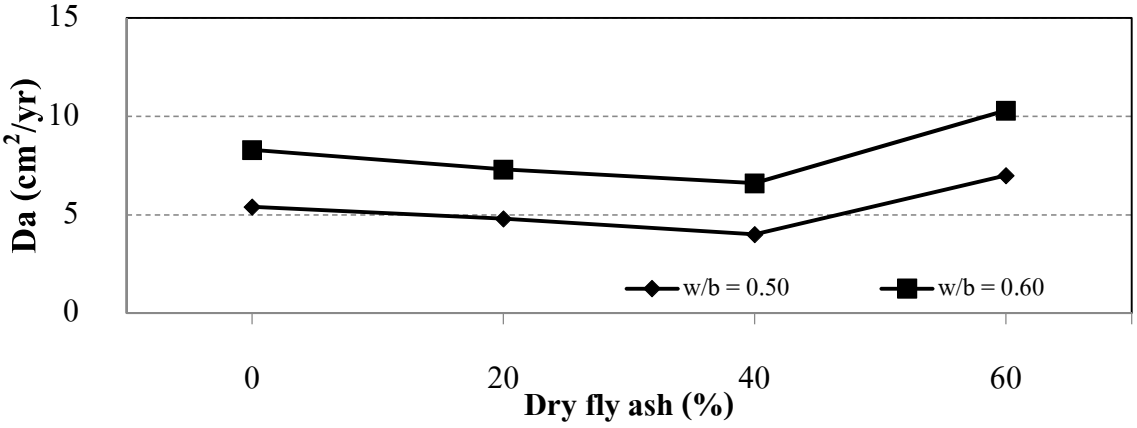
จากรูปที่ 4.11 แสดงอัตราส่วนต่อวัสุประสาน 0.50 และ 0.60 การแทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียกในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40 และ 60 ที่ระยะเวลาการแช่สารละลายคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า ผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแห้ง เนื่องจากอัตราส่วนในการใช้เถ้าลอยเปียกนั้นใช้เท่ากับเถ้าลอยแห้งจึงทำให้ส่งผลไปในทิศทางเดียวกัน



(ก) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 28 วัน

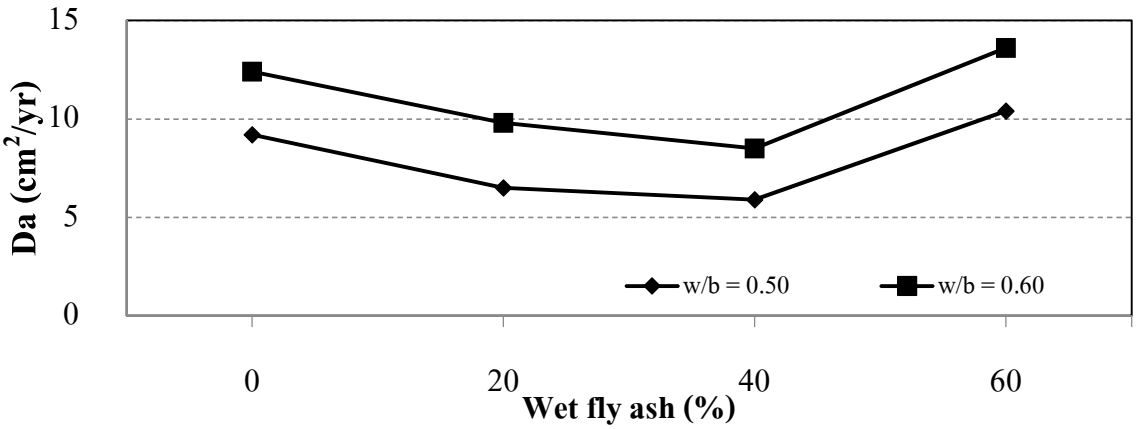


(ข) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 56 วัน

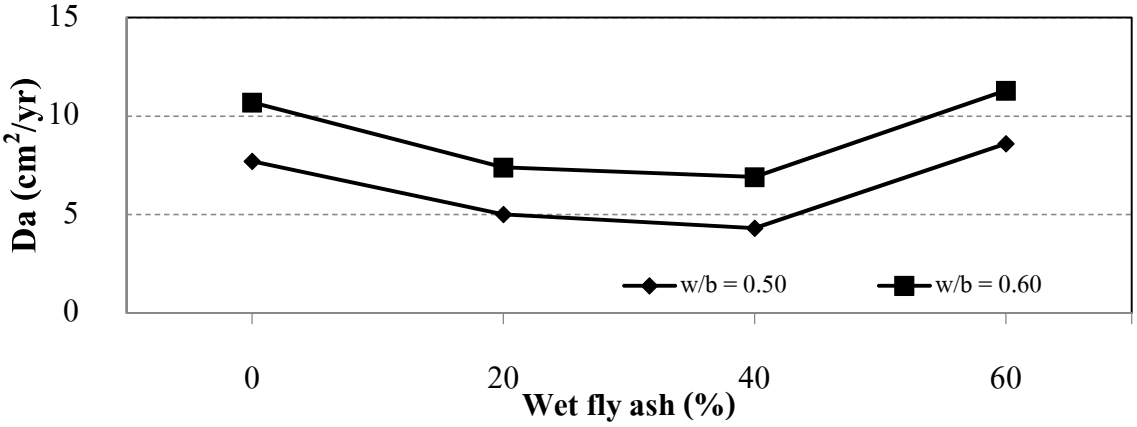


(ค) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 91 วัน

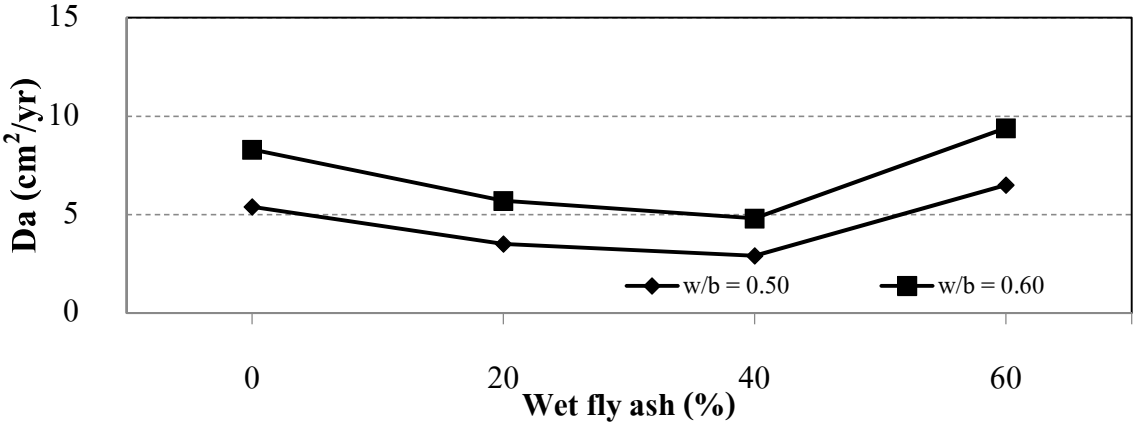
รูปที่ 4.10 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแห้งที่ w/b 0.50 และ 0.60



(ก) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 28 วัน



(ข) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 56 วัน

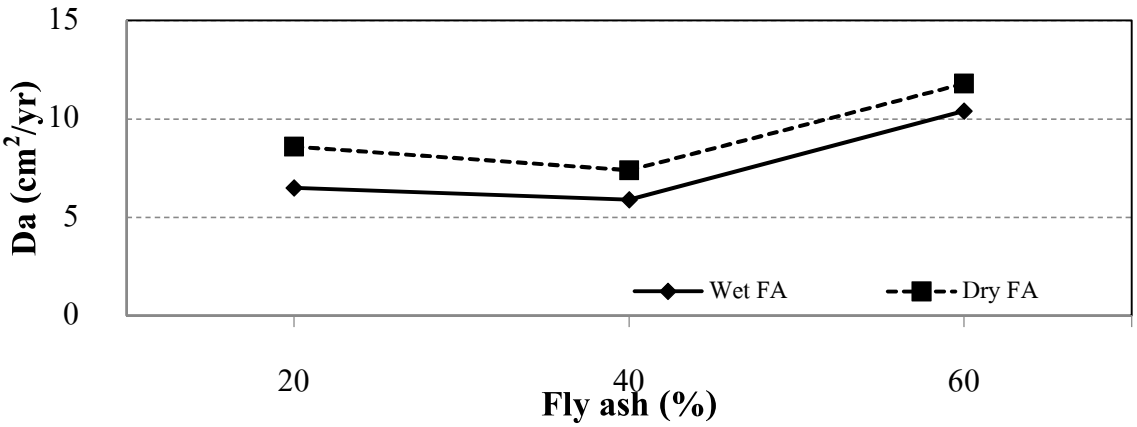


(ค) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 91 วัน

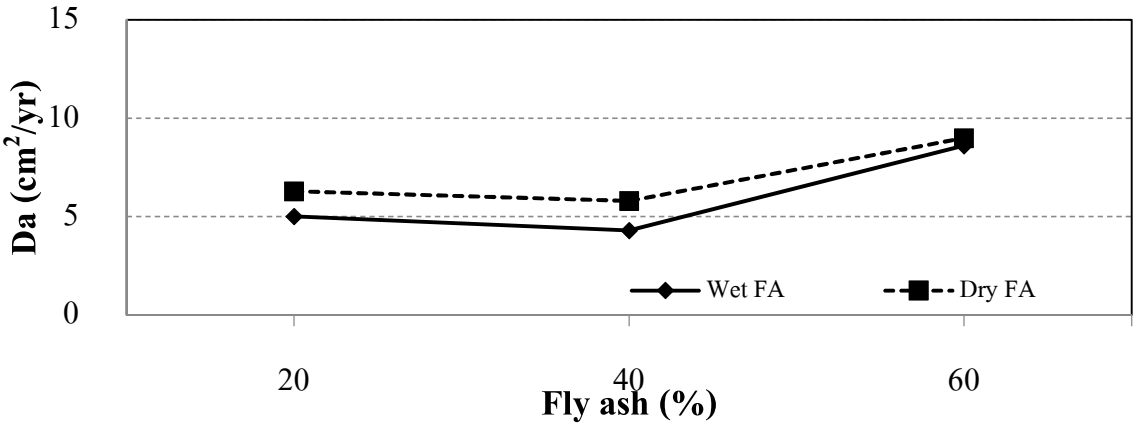
รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกที่ w/b 0.50 และ 0.60

4.2.3 ผลกระทบของสภาวะความชื้นของเถ้าลอย

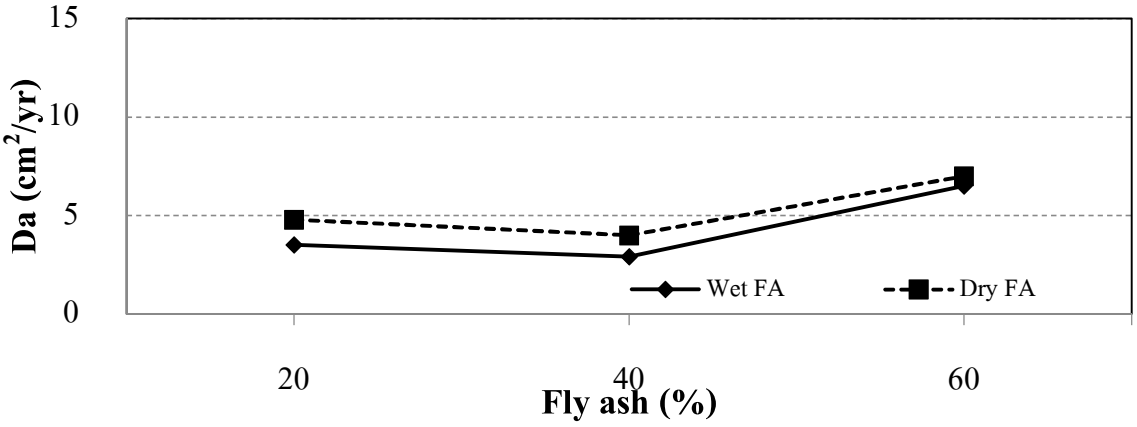
จากรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 แสดงอัตราส่วนต่อวัสุประสาน 0.50 และ 0.60 การแทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้งเปรียบเทียบกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียกในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40 และ 60 ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียกนั้นมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแห้ง เนื่องจากผลของการผสมแบบผสม 2 ครั้ง (Double mixing) ส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมแบบ 2 ครั้งนั้น มีการทึบน้ำที่ดีขึ้น คอนกรีตมีความแน่นขึ้น ความพรุนน้อยลง เนื่องจากการจับตัวของเถ้าลอยเปียกเข้าไปจับตัวกับมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดก่อน ส่งผลให้การใช้เถ้าลอยเปียกมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด



(ก) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 28 วัน

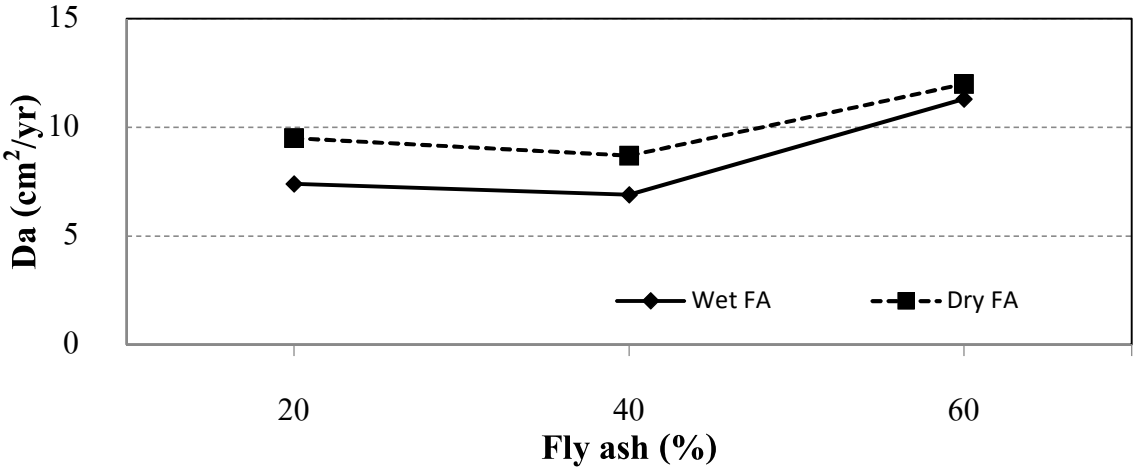


(ข) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 56 วัน

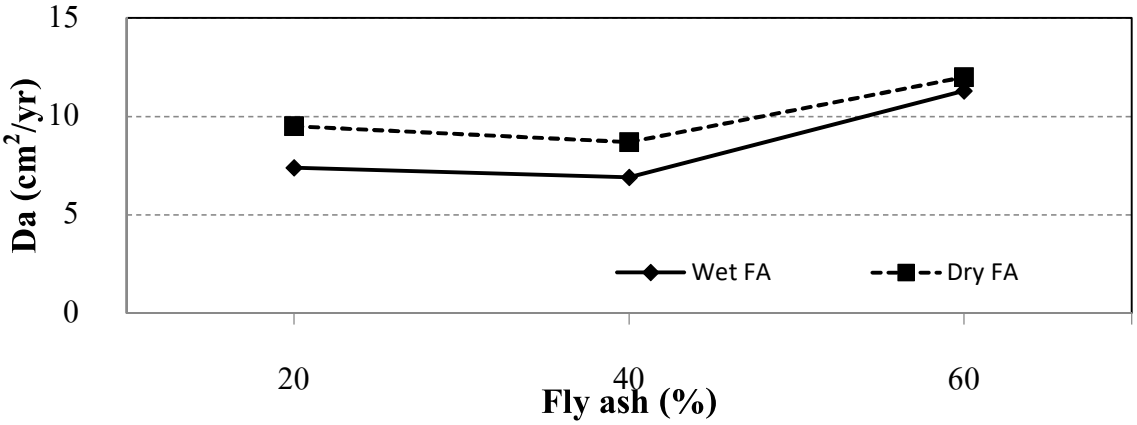


(ค) ระยะเวลาแช่สารละลายคลอไรด์ 91 วัน

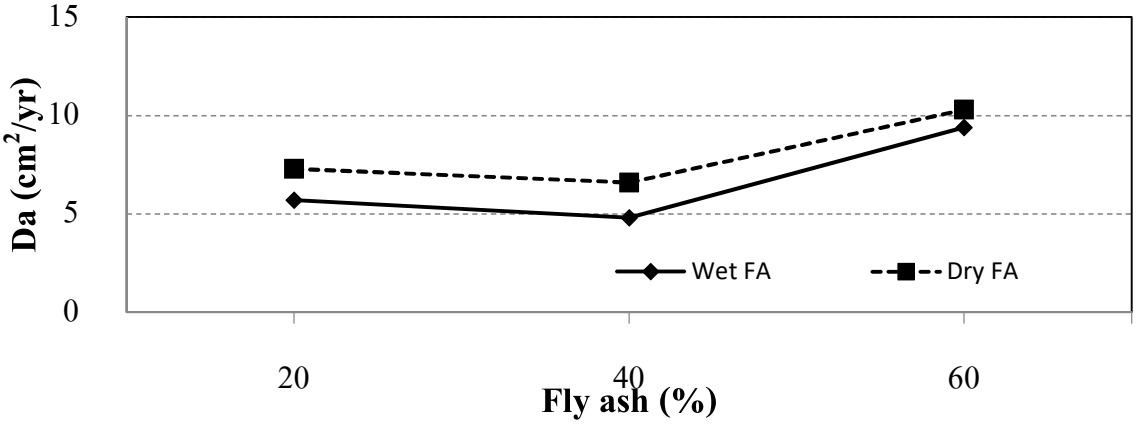
รูปที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ก) ที่ระยะเวลาแช่ 28 วัน



(ข) ที่ระยะเวลาแช่ 56 วัน

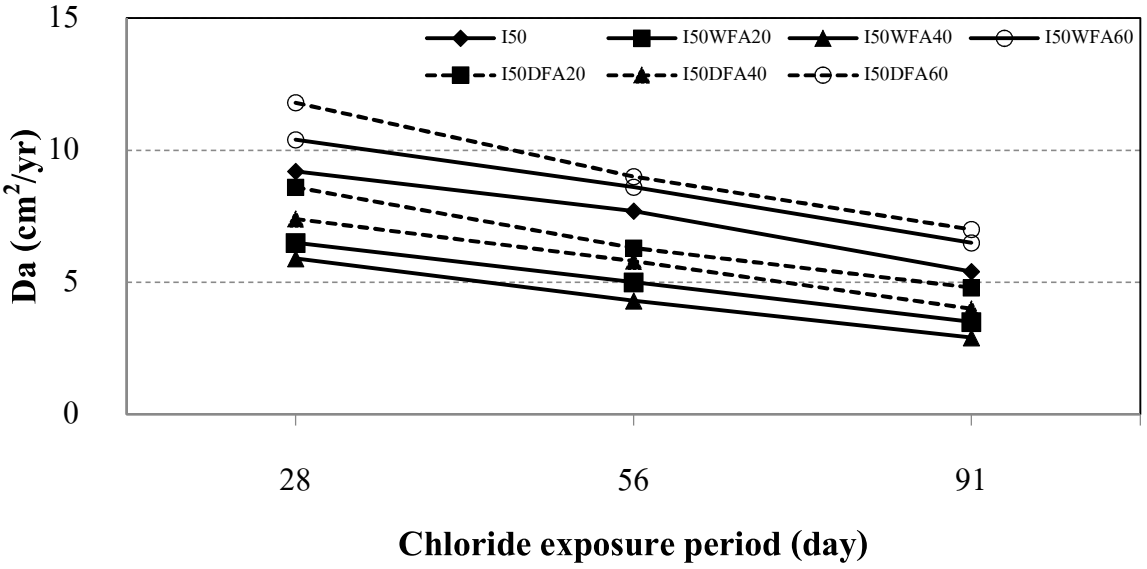


(ค) ที่ระยะเวลาแช่ 91 วัน

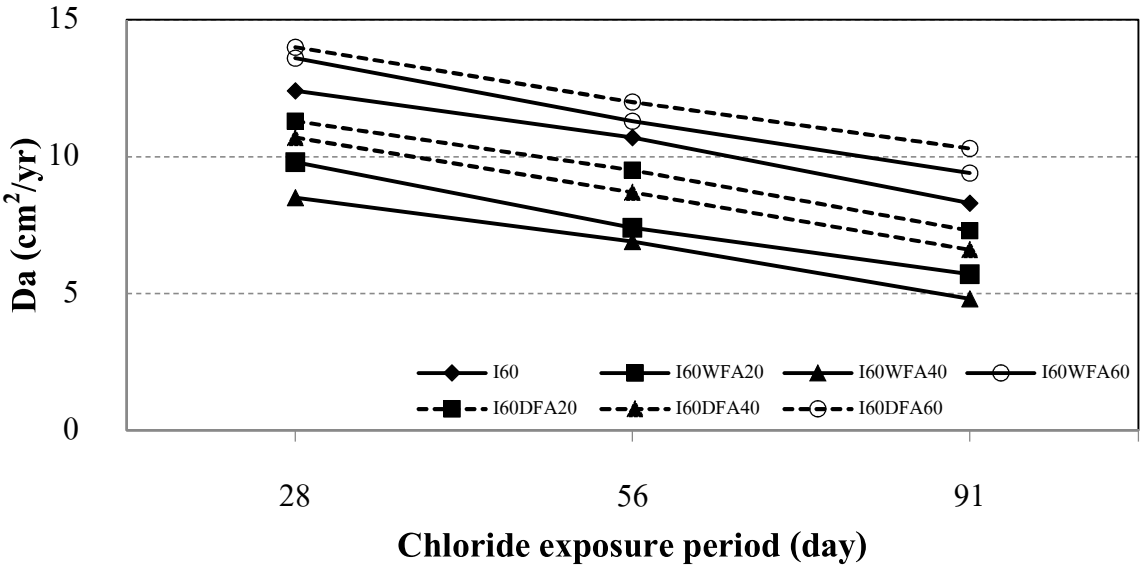
รูปที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

4.2.4 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม

จากรูปที่ 4.14 พิจารณาระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ที่ระยะเวลาเผชิญ 91 วัน มีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาที่นานขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานนิกเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ ทำให้คอนกรีตมีความแน่นที่มากขึ้น ความพรุนน้อยลง ทำให้การแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยลง



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



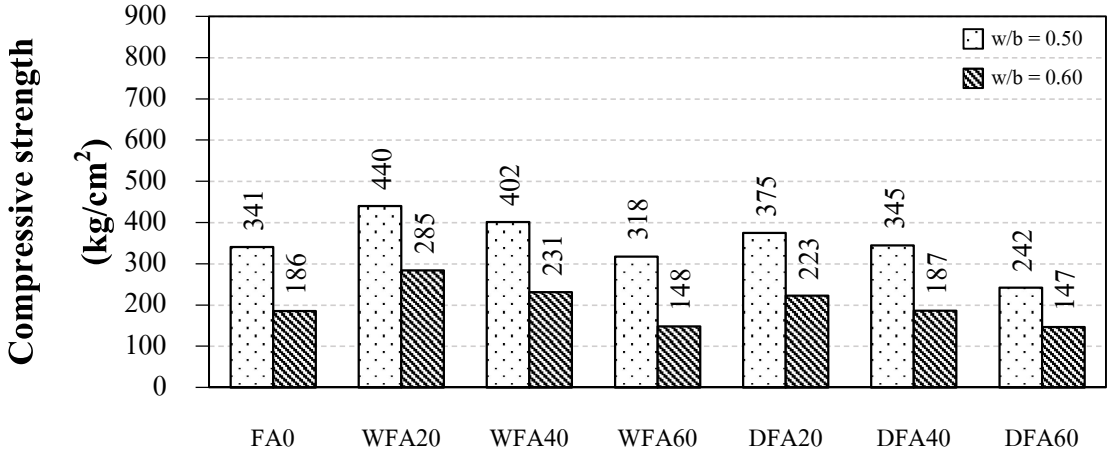
(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 4.14 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ0.60

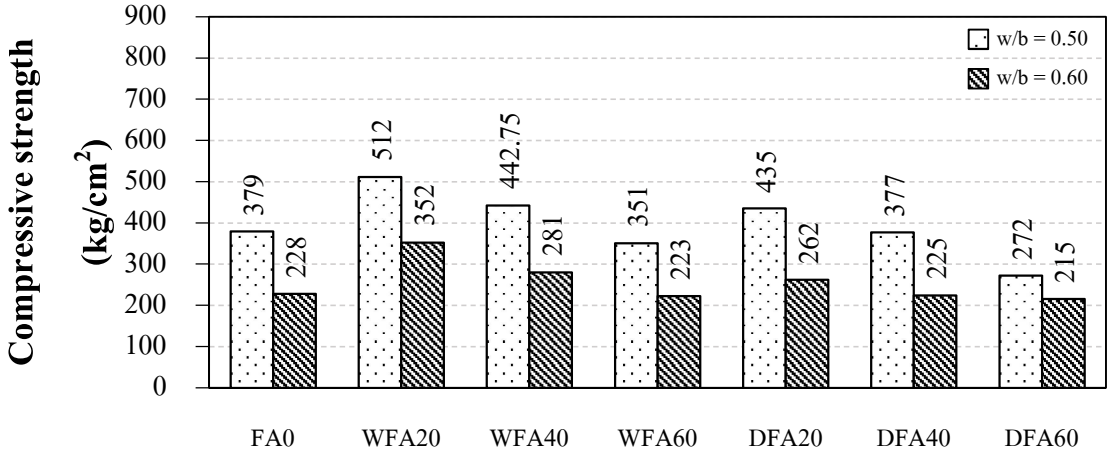
4.3 กำลังอัดของคอนกรีต

4.3.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

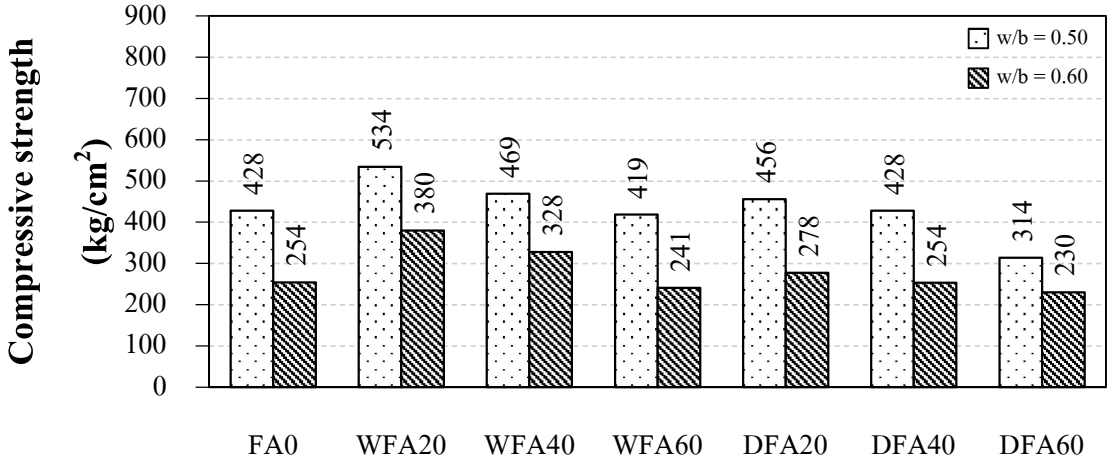
จากรูปที่ 4.15 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน พบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 ให้กำลังอัดสูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.60 เนื่องจากการอัตราส่วนน้ำที่น้อยลงทำให้เกิดช่องว่างในโพรงคอนกรีตที่น้อยลง และเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีอนุภาคที่เล็กเข้าไป ยิ่งส่งผลให้คอนกรีตมีช่องว่างที่น้อยลงไปอีก จึงทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่า



(ก) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



(ข) ระยะเวลาบ่ม 56 วัน



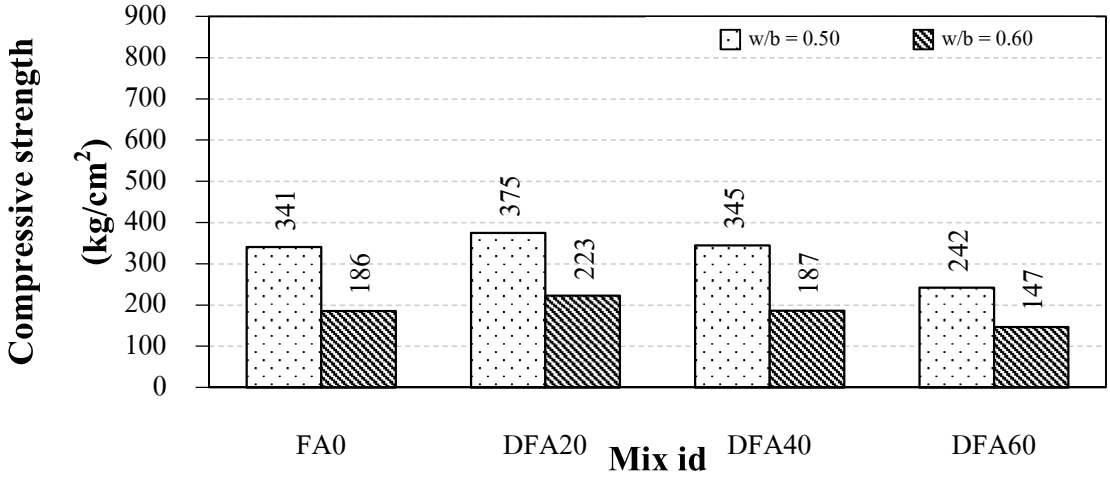
(ค) ระยะเวลาบ่ม 91 วัน

รูปที่ 4.15 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60

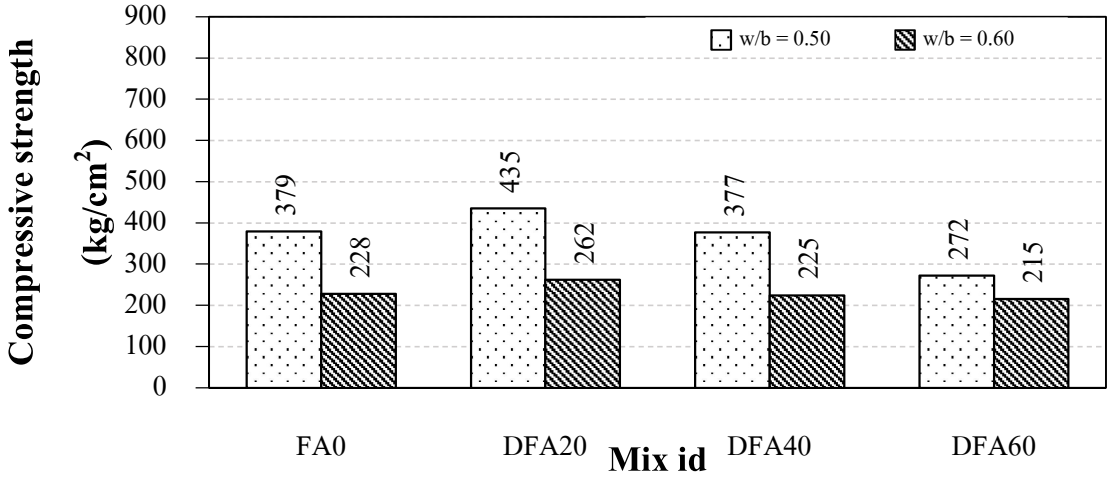
4.3.2 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน

รูปที่ 4.16 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยแห้ง ที่อัตราส่วนต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 การแทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้งในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40 และ 60 ระยะเวลาบ่ม 28, 56 และ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแห้งที่ร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าการแทนที่ในอัตราส่วนอื่นๆ เนื่องจากการใช้เถ้าลอยต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เพราะเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานที่เมื่อทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ซึ่งช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น

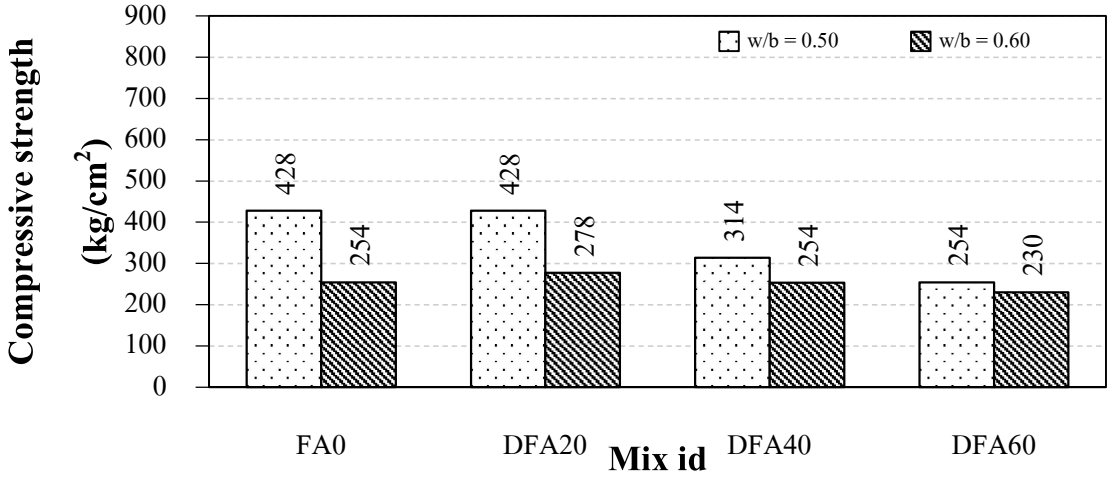
รูปที่ 4.17 แสดง กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยเปียก ที่อัตราส่วนต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 การแทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียกในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40 และ 60 ระยะเวลาบ่ม 28, 56 และ 91 วัน พบว่า ผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแห้ง เนื่องจากอัตราส่วนในการใช้เถ้าลอยเปียกนั้นใช้เท่ากับเถ้าลอยแห้ง จึงทำให้ส่งผลไปในทิศทางเดียวกัน



(ก) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

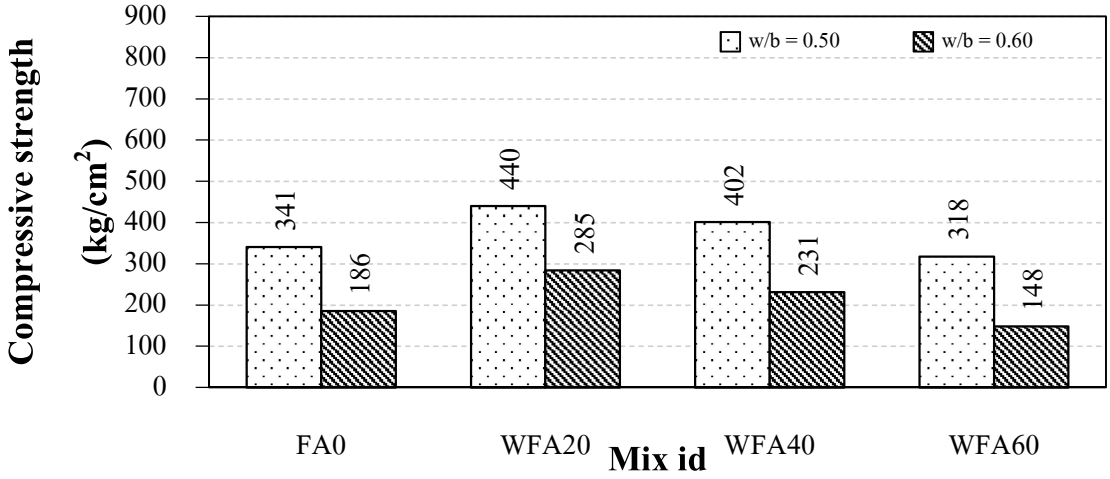


(ข) ระยะเวลาบ่ม 56 วัน

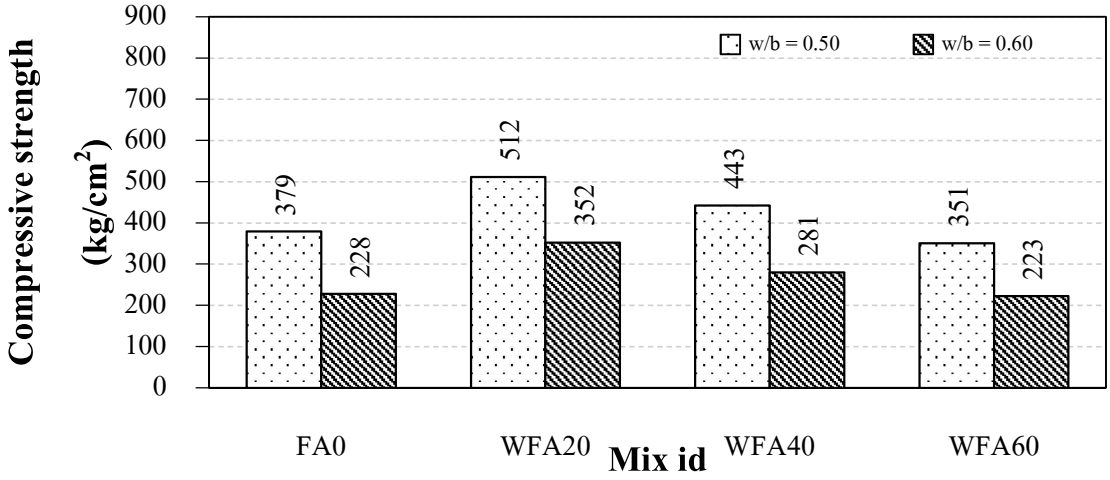


(ค) ระยะเวลาบ่ม 91 วัน

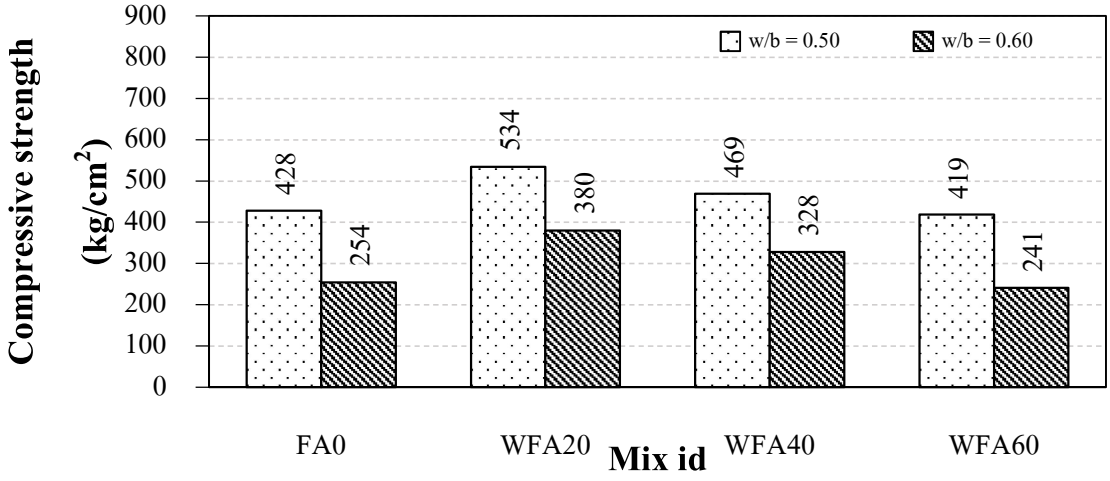
รูปที่ 4.16 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60



(ก) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



(ข) ระยะเวลาบ่ม 56 วัน

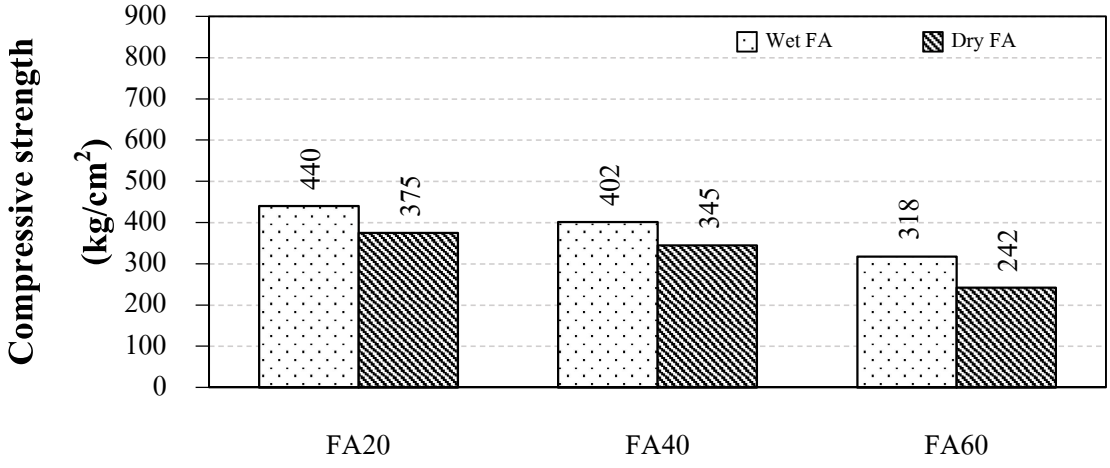


(ค) ระยะเวลาบ่ม 91 วัน

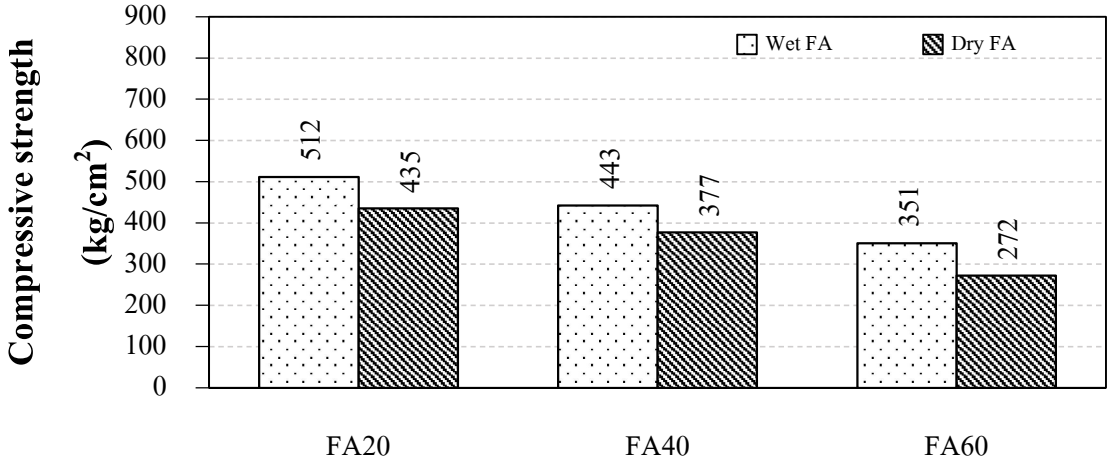
รูปที่ 4.17 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยเปียกแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60

4.3.3 ผลกระทบของสภาวะความชื้นของเถ้าลอย

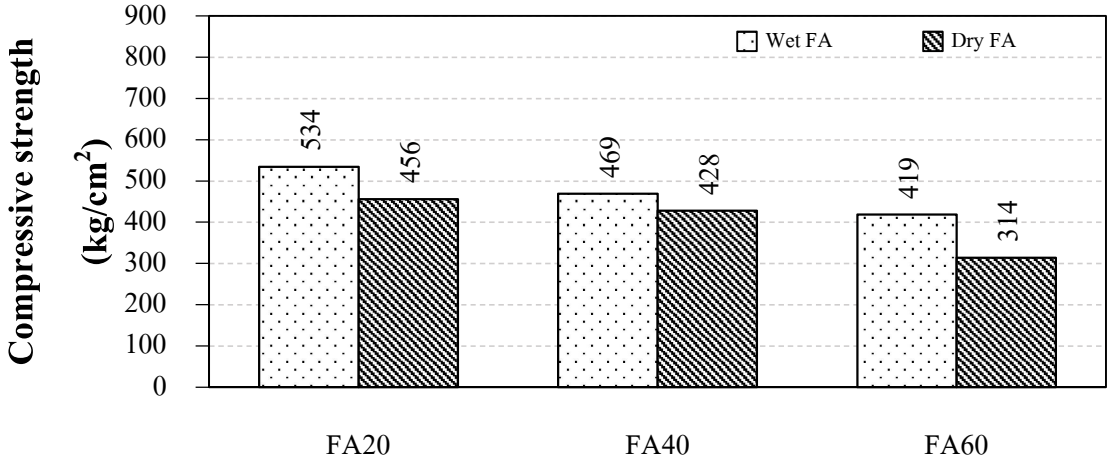
จากรูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19 แสดงกำลังอัดคอนกรีตที่เปรียบเทียบระหว่างการใช้เถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก ที่อัตราส่วนต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 การแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20, 40 และ 60 ระยะเวลาบ่ม 28, 56 และ 91 วัน พบว่า กำลังของอัดคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียกนั้นมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแห้ง เนื่องจากผลของการผสมแบบผสม 2 ครั้ง (Double mixing) ส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมแบบ 2 ครั้งนั้นมีการทึบน้ำที่ดีขึ้น คอนกรีตมีความแน่นที่แน่นขึ้น ความพรุนลดลง เนื่องจากการจับตัวของเถ้าลอยเปียกเข้าไปจับตัวกับมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดก่อน ส่งผลให้การใช้เถ้าลอยเปียกมีกำลังอัดที่ดีขึ้น



(ก) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

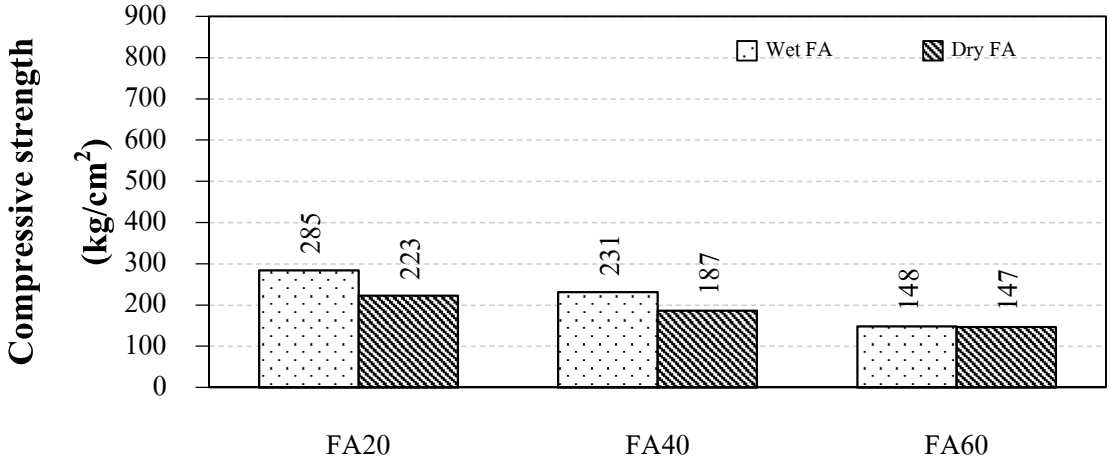


(ข) ระยะเวลาบ่ม 56 วัน

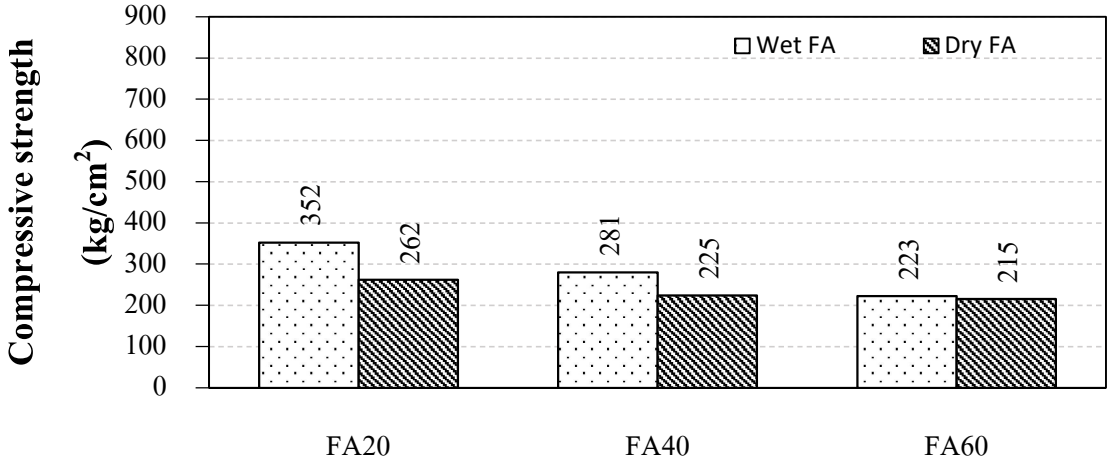


(ค) ระยะเวลาบ่ม 91 วัน

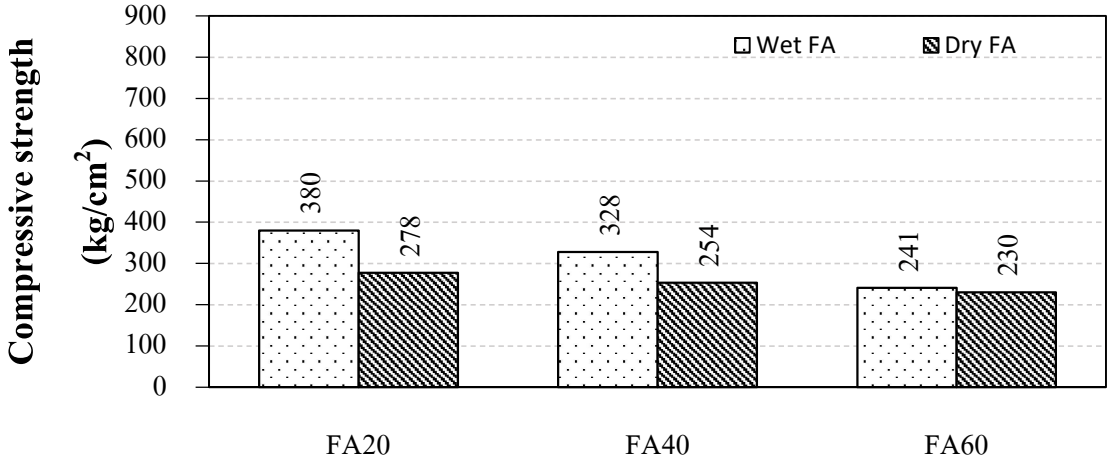
รูปที่ 4.18 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ก) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



(ข) ระยะเวลาบ่ม 56 วัน

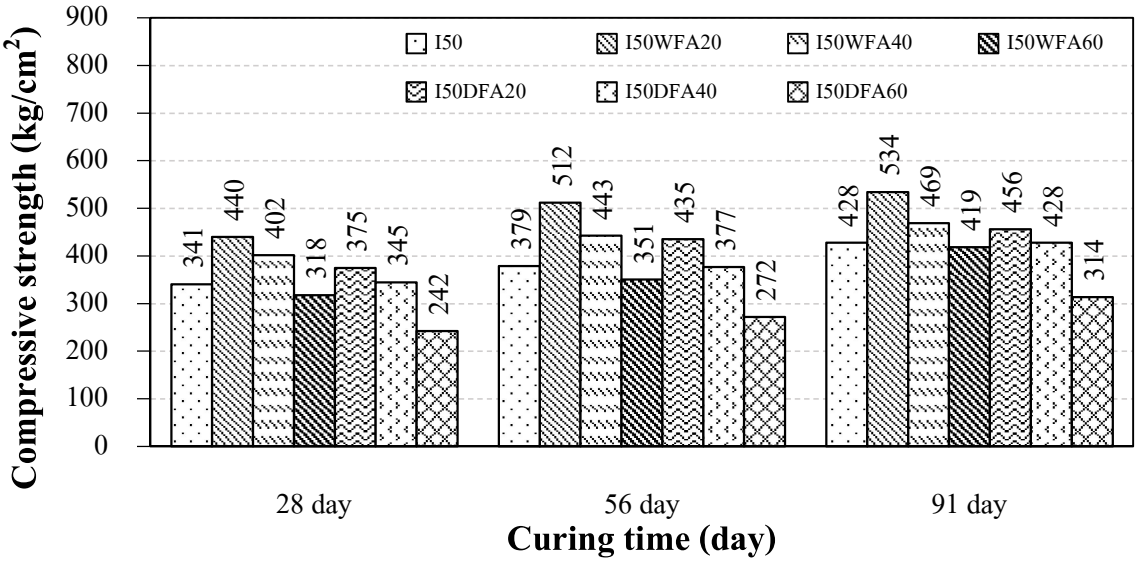


(ค) ระยะเวลาบ่ม 91 วัน

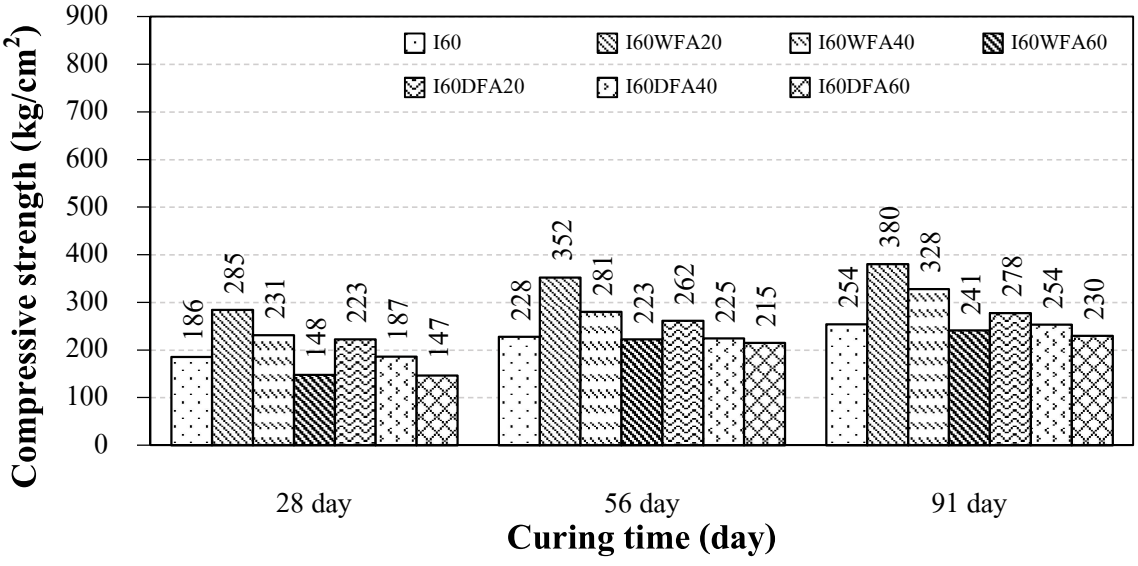
รูปที่ 4.19 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานหลักร้อยละ 20, 40 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

4.3.5 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม

จากรูปที่ 4.20 พิจารณาระยะเวลาการบ่มที่ 28, 56 และ 91 วัน พบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลา 91 วันดีที่สุด เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานนิกเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ ทำให้กำลังของคอนกรีตมีความหนาแน่นที่มากขึ้น ความพรุนน้อยลง เป็นผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 4.20 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาบ่มน้ำ 28, 56 และ 91 วัน

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

เนื่องด้วยตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งที่ระยะเวลาบ่ม 28, 56 และ 91 วัน และตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายคลอไรด์ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญสารละลายคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน มีระยะเวลาไม่เท่ากัน จึงไม่สามารถเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์กันได้โดยตรง แต่สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับการแทรกซึมคลอไรด์ และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์แทน

จากรูป 4.21 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งสามารถหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตได้ เมื่อกำหนดค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$RCPT = -12.018f_c' + 7{,}924.3 \quad (4.1)$$

โดยที่ f_c' คือ กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม^2)

RCPT คือ ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (คูลอมป์)

$$D_a = -0.0237f_c' + 17.925 \quad (4.2)$$

โดยที่ f_c' คือ กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ซม.^{2})

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

จากรูป 4.22 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ซึ่งสามารถหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตได้ เมื่อกำหนดค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$RCPT = -22.026f_c' + 8{,}889.5 \quad (4.3)$$

โดยที่ f_c' คือ กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม^2)

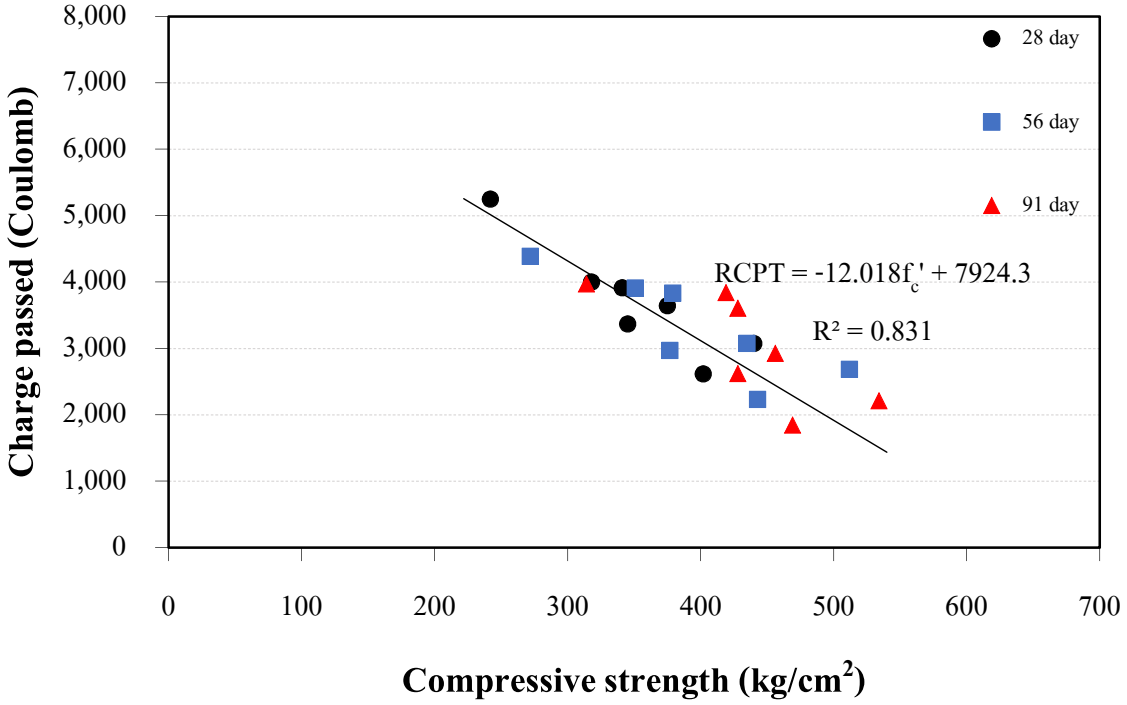
RCPT คือ ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต (คูลอมป์)

$$D_a = -0.0286f_c' + 18.774 \quad (4.4)$$

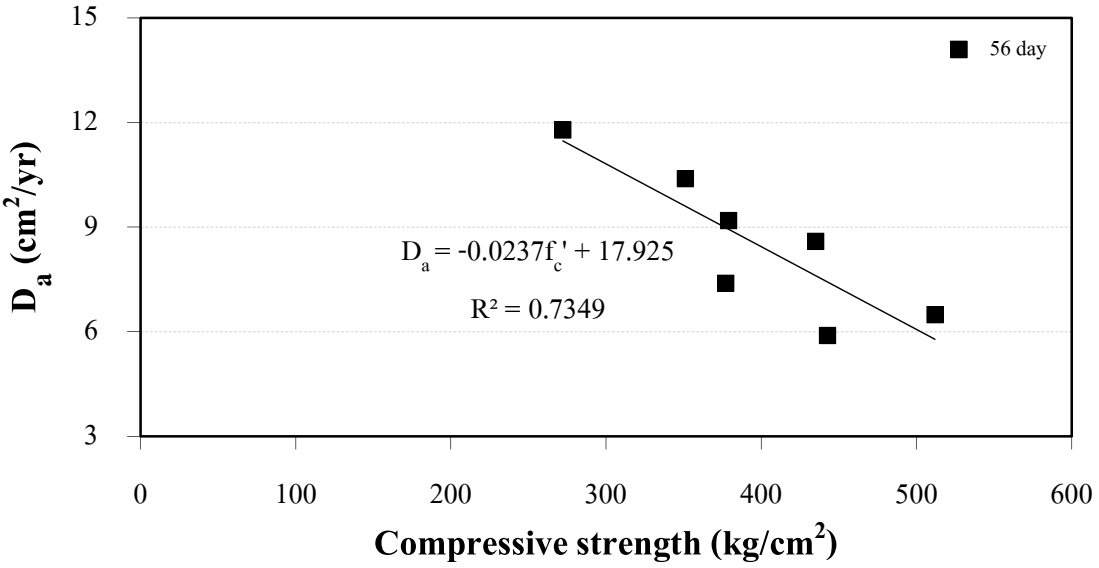
โดยที่ f_c' คือ กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ซม.^{2})

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

ตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงข้อสรุปของคุณสมบัติความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งเมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้ง ตามลำดับ

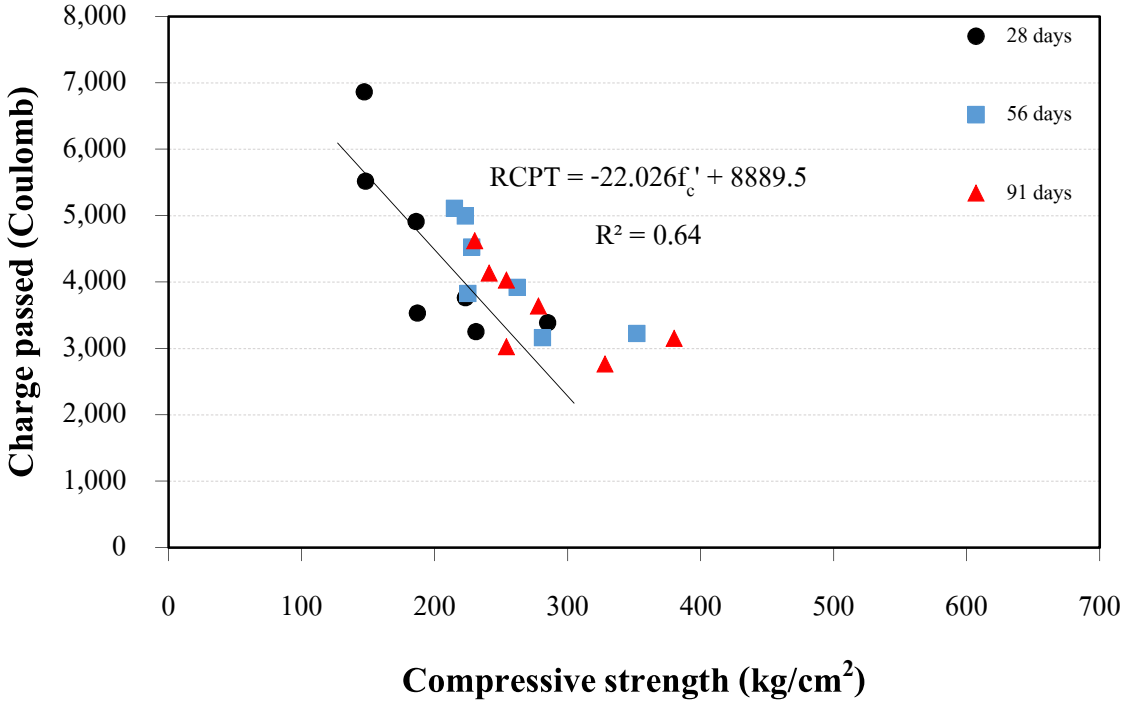


(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต

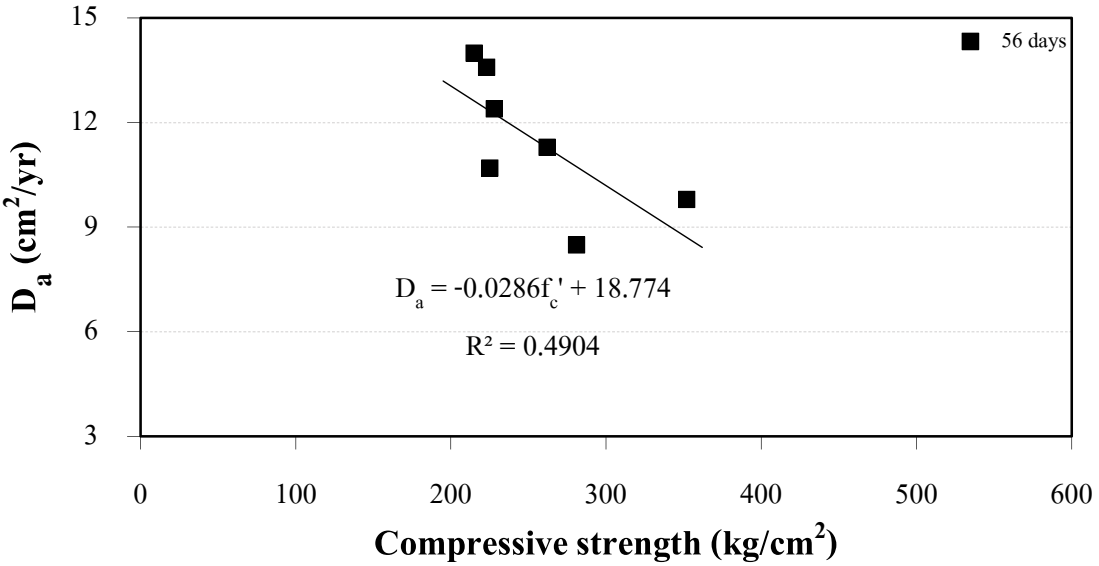


(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ตารางที่ 4.2 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง เมื่อเทียบกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

วัสดุประสานที่ใช้ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1		ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์		กำลังอัดของคอนกรีต
		แบบเร่ง	แบบแช่ในสารละลายคลอไรด์	
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยเปียก	สูงกว่า	สูงกว่า	สูงกว่า
	เถ้าลอยแห้ง	สูงกว่า	สูงกว่า	สูงกว่า

หมายเหตุ : คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกหรือเถ้าลอยแห้งจะมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดสูงว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน เมื่อใช้เถ้าลอยไม่เกินร้อยละ 40

ตารางที่ 4.3 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้ง

วัสดุประสานที่ใช้ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าลอยแห้ง		ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์		กำลังอัดของคอนกรีต
		แบบเร่ง	แบบแช่ในสารละลายคลอไรด์	
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยเปียก	สูงกว่า	สูงกว่า	สูงกว่า

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียก สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้ง ทั้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 และทุกอัตราส่วนแทนที่วัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มคอนกรีต

2. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้ง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ที่ต่ำกว่า ทั้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 และทุกอัตราส่วนแทนที่วัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มคอนกรีต

3. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ทั้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 และทุกอัตราส่วนแทนที่วัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มคอนกรีต

4. คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกร้อยละ 40 ของวัสดุประสานมีความแทรกซึมความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดที่ดีเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกร้อยละ 20 และ 60 และสูงกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องมาจากผลกระทบของการผสมแบบ 2 ครั้ง (Double mixing) ทั้งนี้อาจเนื่องจากวัสดุประสาน (เถ้าลอยเปียกและปูนซีเมนต์) เข้าไปเคลือบผิวของมวลรวมก่อน ทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและเพสต์ (Transition zone) มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ การยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับวัสดุประสานดีขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตดีขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียก มีข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไป ดังนี้

1. การใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในคอนกรีตสามารถช่วยปรับปรุงคอนกรีตให้มีความต้านทานคลอไรด์ดีขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะเถ้าลอยเปียกเข้าไปเคลือบผิวของมวลรวมก่อน ทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและเพสต์ (Transition zone) มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่าเพสต์ส่วนที่อยู่ห่างออกมา และมีความพรุนระหว่างรอยต่อมวลรวมและเพสต์น้อยกว่า ส่งผลให้มีการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่าและมีกำลังอัดสูงกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วนและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้ง ทั้งนี้ในการผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกนั้นมีผลกระทบจากการผสม 2 ครั้ง (Double mixing) แต่การผสมคอนกรีตล้วนและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้งเป็นการผสมครั้งเดียว (Single mixing) ซึ่งผลกระทบจากการผสม 2 ครั้งของเถ้าลอยเปียกในคอนกรีต ถือเป็นเทคนิคการผสมคอนกรีตที่สามารถส่งเสริมให้มีการนำเถ้าลอยเปียกที่ถูกกองไว้โรงไฟฟ้ามาใช้งานได้ แต่อย่างไรก็ดี ในอนาคตอาจศึกษาเพื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้งแต่แบ่งน้ำผสม 2 ครั้ง กับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกที่มีผลกระทบจากการผสม 2 ครั้ง เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของการผสม 2 ครั้ง ด้วยการใช้เถ้าลอยเปียก กับการใช้เถ้าลอยแห้งแต่แบ่งน้ำผสม 2 ครั้ง ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่

2. เนื่องจากการใช้เถ้าลอยเปียกมีผลกระทบของการผสม 2 ครั้ง ซึ่งวัสดุประสาน (เถ้าลอยเปียกและปูนซีเมนต์) เข้าไปเคลือบผิวของมวลรวมก่อน ทำให้เชื่อว่าบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและเพสต์มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ดังนั้น จึงควรทำการตวจสอบกำลังบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและเพสต์กับกำลังของเพสต์ส่วนที่ห่างออกมาด้วยวิธีเทคนิค Micro hardness เพื่อยืนยัน

3. การศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าลอยระยองซึ่งพบว่า ปริมาณความชื้นของเถ้าลอยระยองเพื่อให้อยู่ในรูปแบบของเหลวข้นคือร้อยละ 60 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย แต่เถ้าลอยที่ใช้ในงานคอนกรีตในปัจจุบันมีแหล่งที่มาหลายแห่ง ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน ดังนั้น จึงควรมีการศึกษาเถ้าลอยจากแหล่งอื่นด้วยว่าต้องมีปริมาณความชื้นเของเถ้าลอยเท่าใดจึงทำให้อยู่ในรูปแบบของเหลวข้นและไม่ตกตะกอน

ผลผลิต (Output)

ผลงานตีพิมพ์

มีแผนเผยแพร่ผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ

บรรณานุกรม

ทวีชัย สำราญสำราญวานิช สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย(สคท.) 2556 ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงการอบรมการป้องกันและแก้ไขปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ:สมาคมคอนกรีตไทย.

ทวีชัย สำราญวานิช. (2550). เอกสารประกอบการสอนความคงทนของวิชาคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (2550). คู่มืออินทรีย์คอนกรีต.กรุงเทพฯ: บริษัทเซอร์คัสเพลสจำกัด.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

วสุ วิทยเขตปภา, ทวีชัย สำราญวานิช, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล. (2553). ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 12 – 14 พฤษภาคม 2553.

ปิติศานต์ กร้ำมาตร. (2553). คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน.ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สำเริง รักซ้อน, ทง ลานธารทอง และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2556). นวัตกรรมคอนกรีตต้นทุนต่ำไหลเข้าแบบง่ายโดยการใช้เถ้าทิ้ง.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

สุรชาติ ฤกษ์โหรา, ทวีชัย สำราญวานิช, พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์, วรางคณา แสงสร้อย และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล. (2554). ผลกระทบของเถ้าลอยที่มีปูนขาวอิสระสูงต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7, ระยองรีสอร์ท, ระยอง, 19-21 ตุลาคม 2554

สุรชาติ ฤกษ์โหรา, ทวีชัย สาราญวานิช, วรางคณา แสงสร้อย และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล. (2555). ผลกระทบของเถ้าลอยลิกไนต์และเถ้าลอยบิทูมินัสต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต และระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 8, โรงแรมอมารี ออคิดพัทยา, ชลบุรี, 22-24 ตุลาคม 2555

Warangkana Saengsoy, Thuy Bich Thi Nguyen and Somnuk Tangtermsirikul, 2014. A study on basic properties of mortar made with wet fly ash. International Conference of Asian Concrete Federation.

Céline Perlot, Patrick Rougeau, Sylvain Dehaud (2013) Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Allée du Parce Montaury, France

ASTM C876-09, Standard Test Method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.02.

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

ASTM C1202-12, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Annual Book of ASTM Standard, Volume 04.02.

ASTM C1218, Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. Annual Book of ASTM Standard, Volume 04.02.

ASTM G109-07, Standard test method for determining the effects of chemical admixture on the corrosion of embedded steel in concrete exposed chloride environments Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.02.

Alonso, C., Andrade, C., Castllote, M., & Castro, P. (2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. Cement and Concrete research 30, 1047-1055.

Ann, K. Y., & Song, H. W. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. Corrosion Science 49, 4113-4133.

Castellote, M., Andrade, C., & Alonco, C. (1999), Chloride-binding isotherms in concrete submitted to non-steady-state migration experiments. Cement and Concrete Research, 29, 1799-1806.

Cengiz, D. A., Alaettin K., & Umur K. S. (2004). Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash. Cement and concrete research 34, 99 – 102.

Chindaprasirt, P., Rukzon, S., & Sirivivatnanon, V. (2008). Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash rice husk ash and fly ash. Construction and Building Material 22, 932-938.

Harald Justnes. (1998). A Review of chloride binding in cementitious systems. Nordic Concrete Research, 21, 1-6

Jensen H., U., & Pratt, F. L. (1989). The binding chloride ions by pozzolanic product in fly ash cement blends, Advance in Cement Research 2, 121-129.

Raungrut Cheerarot , Chai Jaturapitakkul. (2004). A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement, Waste Management, 24, 701-709.

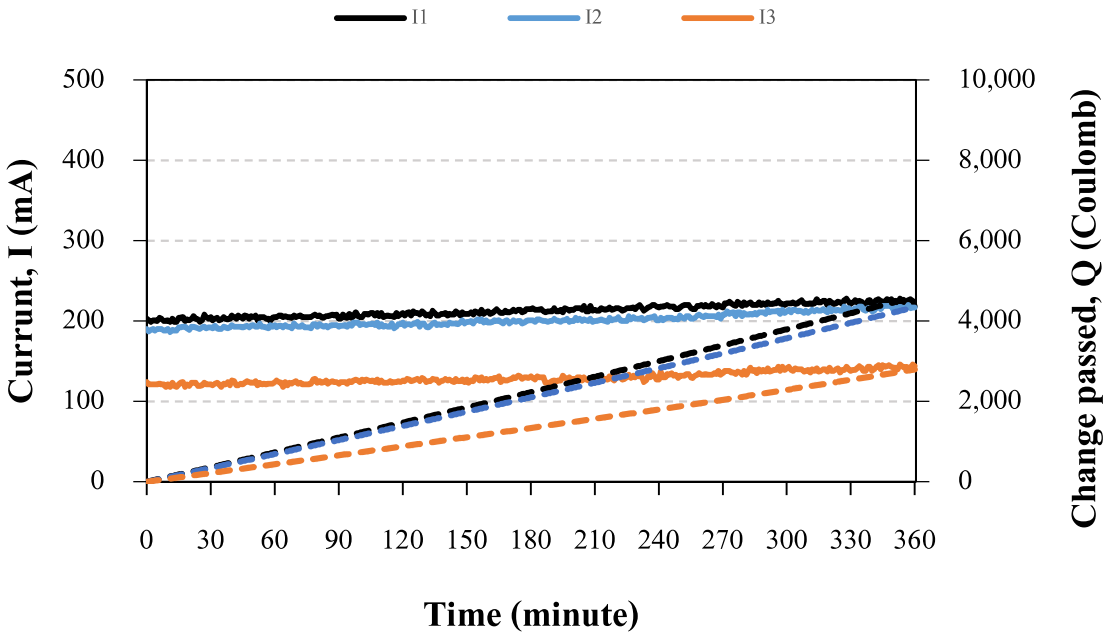
Amarnath Yerramala , K. Ganesh Babu. (2011). Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete, Cement and Concrete Composites, 33, 1057-1062.

Thuy Bich Thi Nguyen. (2014). Utilization of Wet Fly Ash in Concrete. Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University.

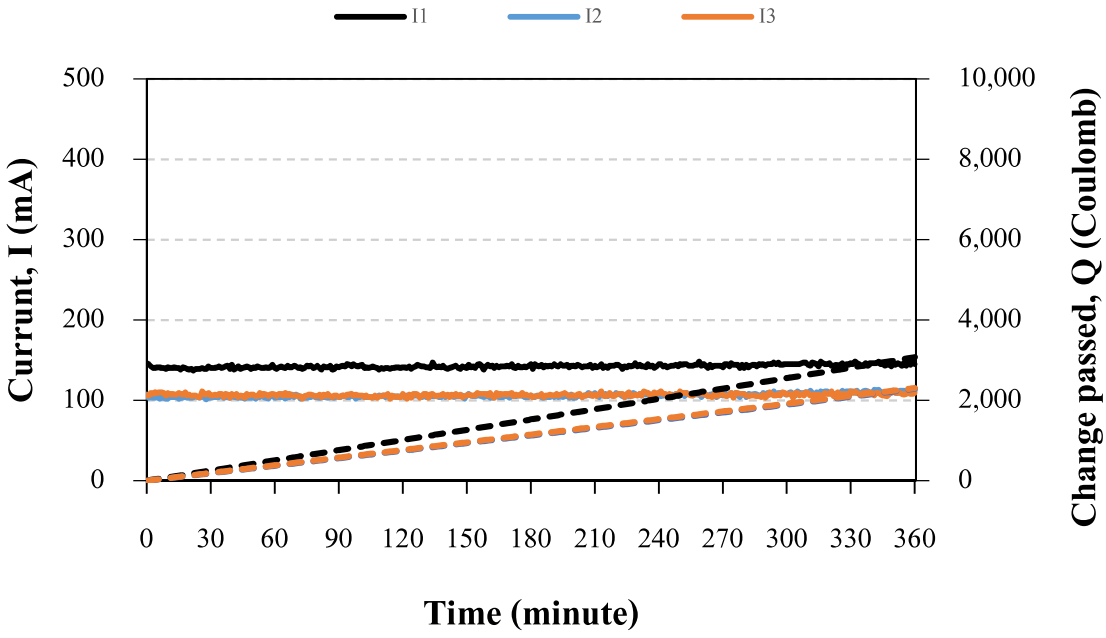
ภาคผนวก

ภาคผนวก

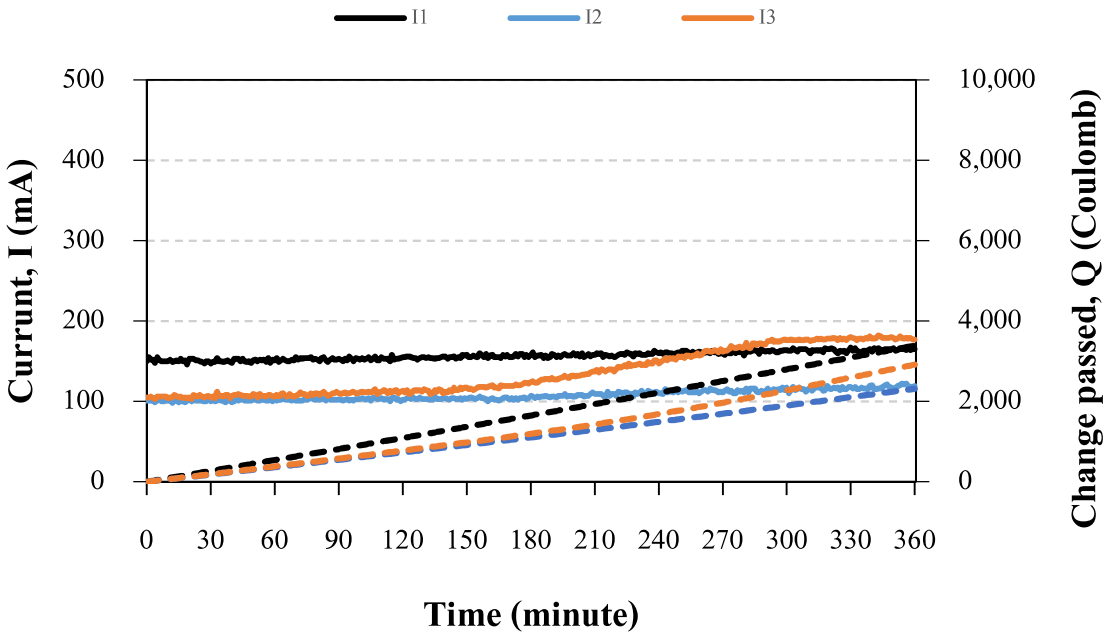
ภาคผนวก ก กราฟแสดงค่ากระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ ที่ระยะเวลาการบ่มต่างกัน



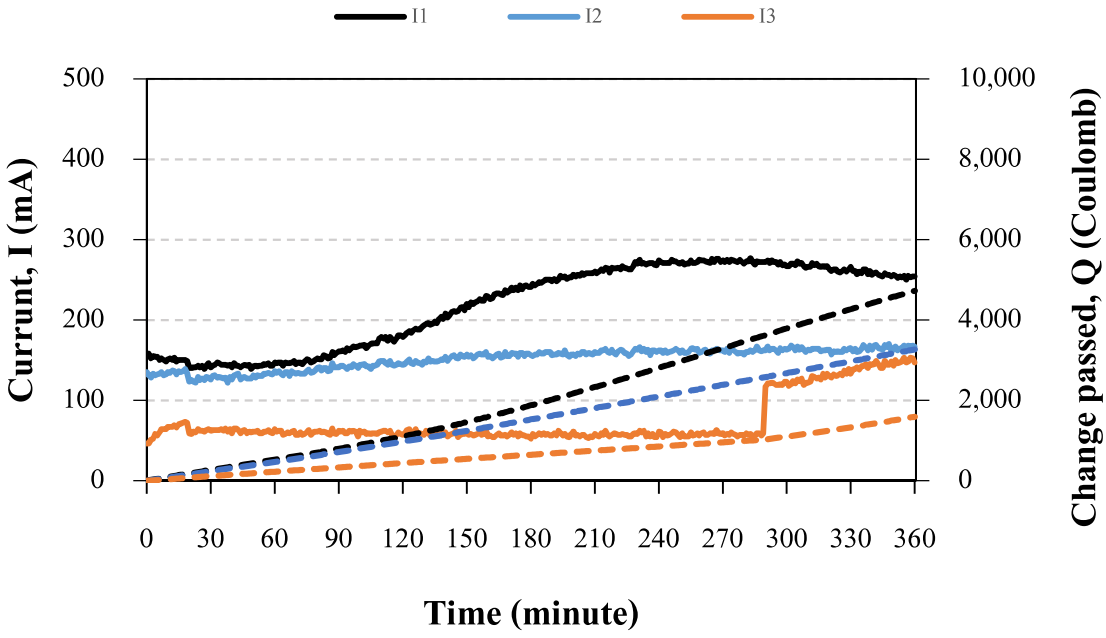
รูปที่ ก-1 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



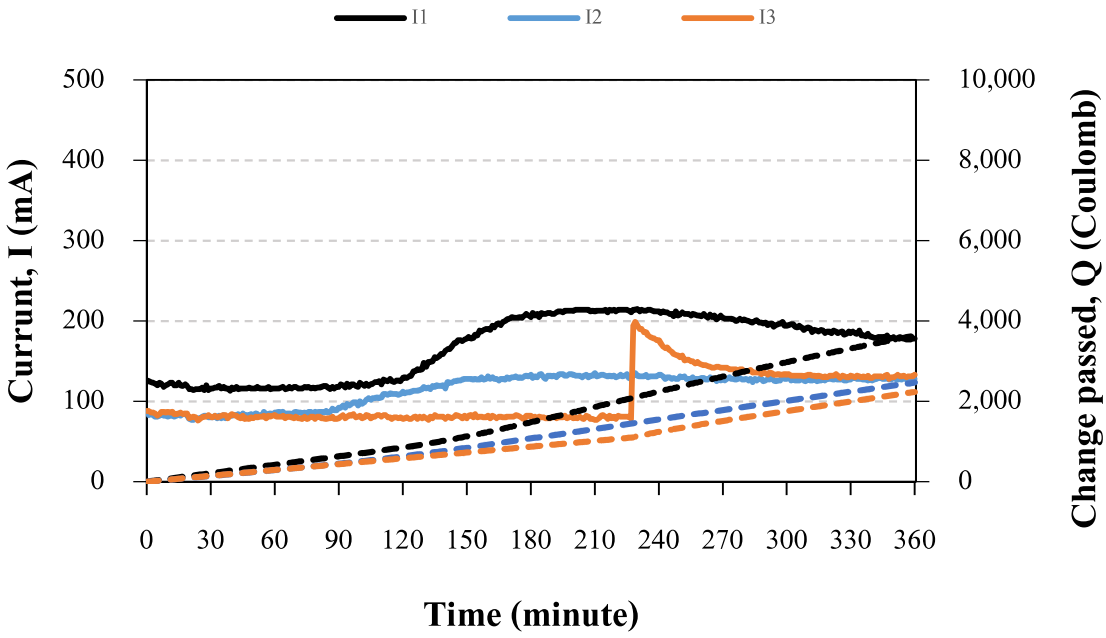
รูปที่ ก-2 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50WFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



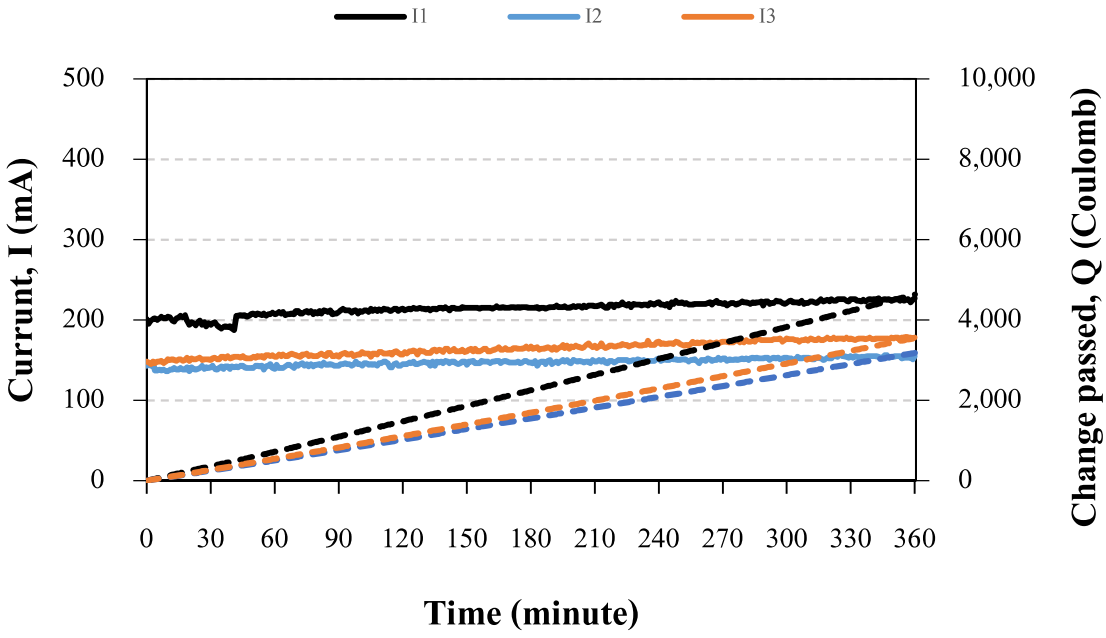
รูปที่ ก-3 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50WFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



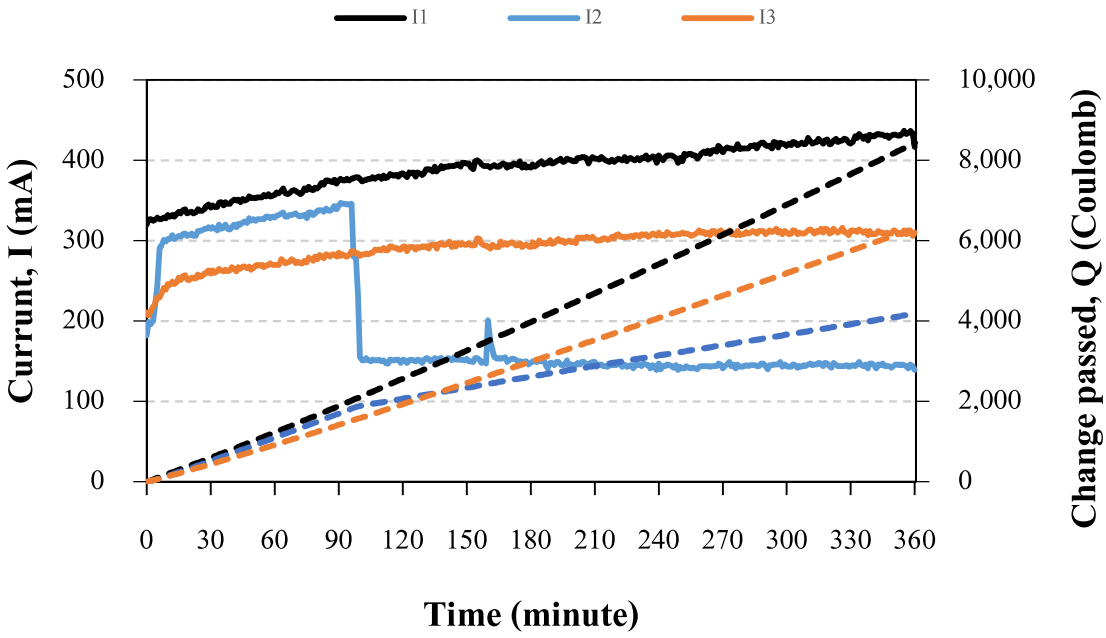
รูปที่ ก-4 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50WFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



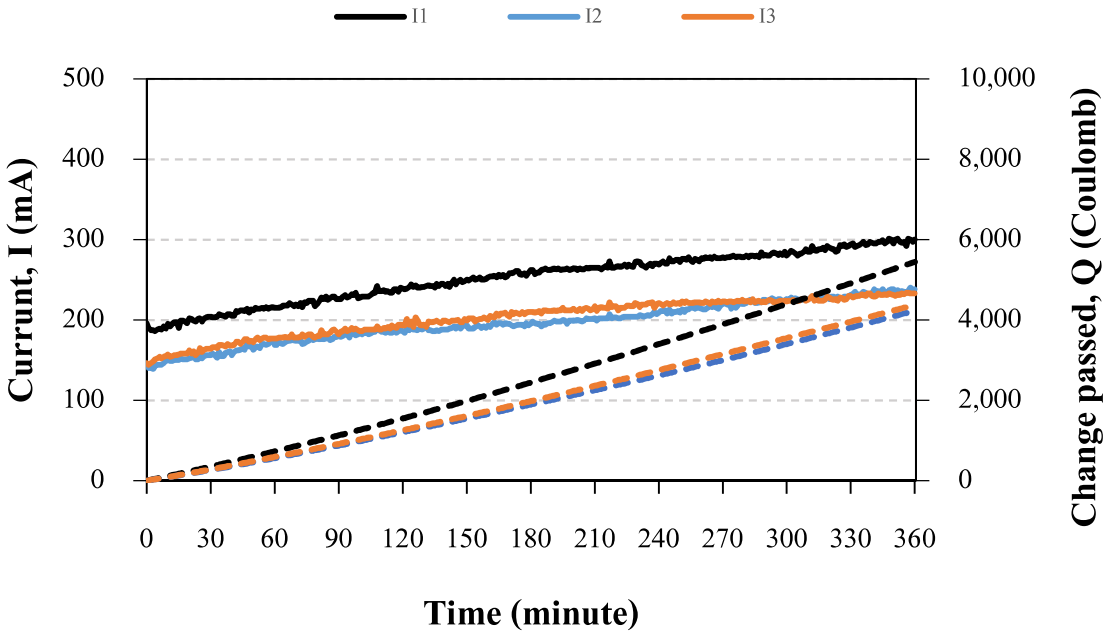
รูปที่ ก-5 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50DFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



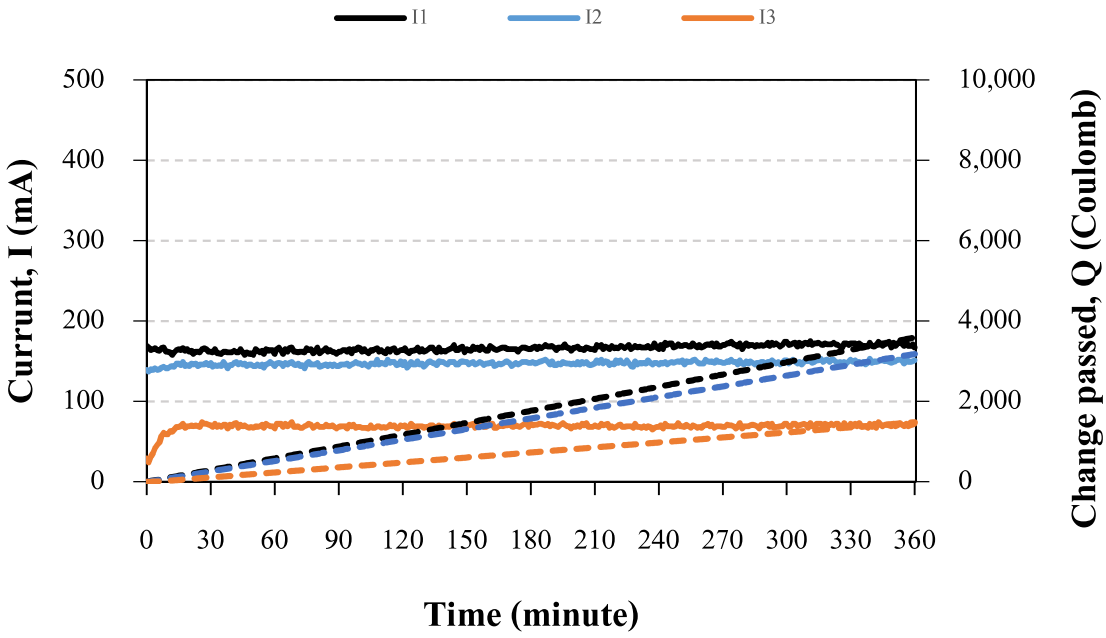
รูปที่ ก-6 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50DFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



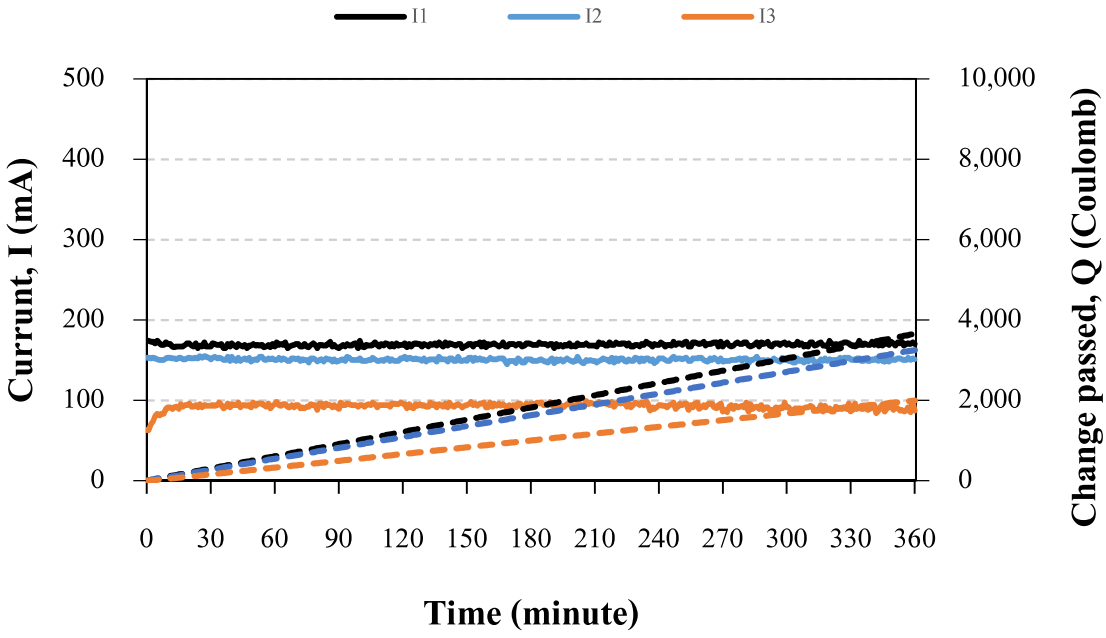
รูปที่ ก-7 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50DFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



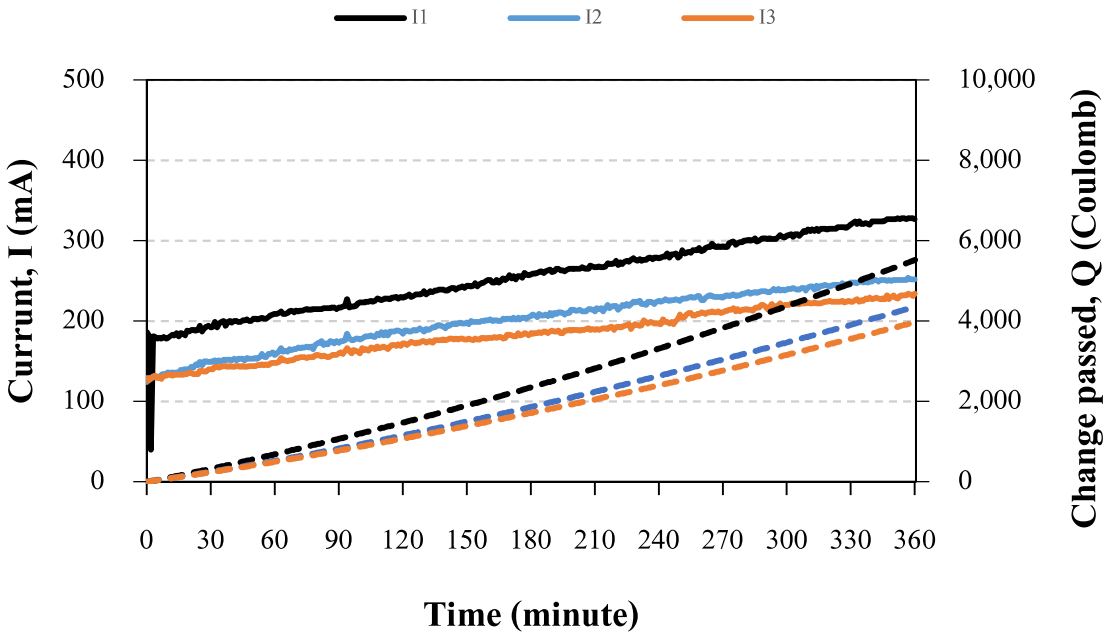
รูปที่ ก-8 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



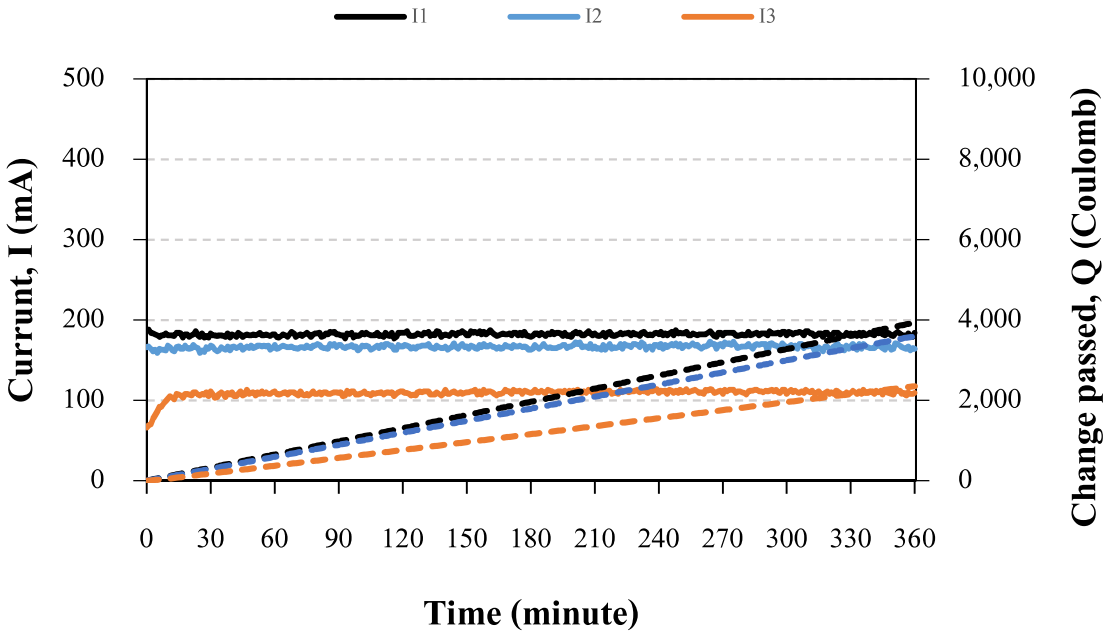
รูปที่ ก-9 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60WFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



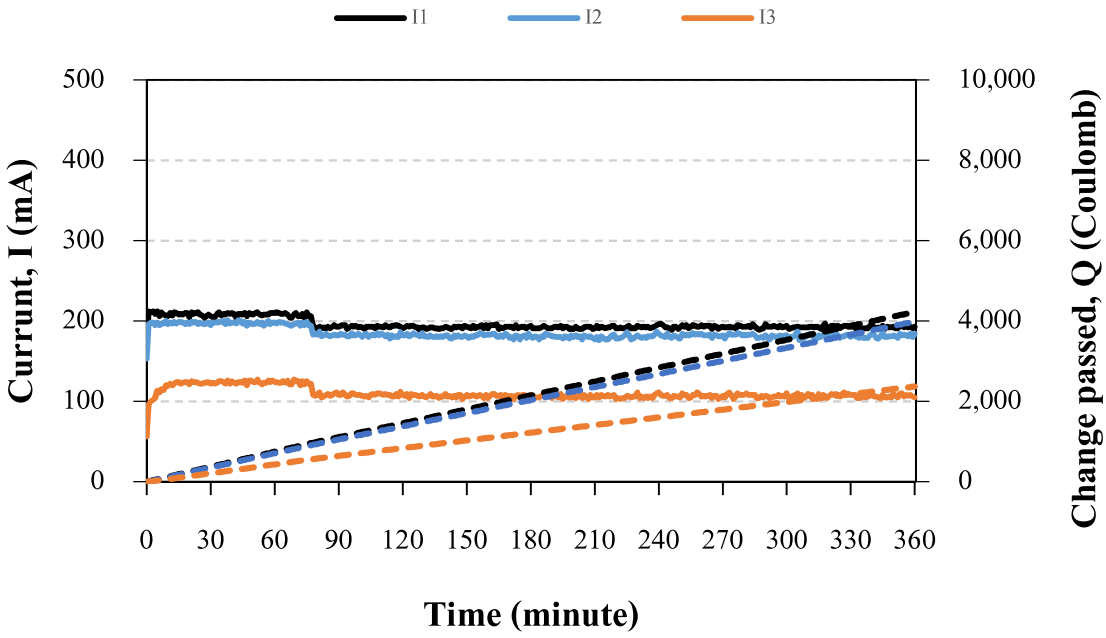
รูปที่ ก-10 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60WFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



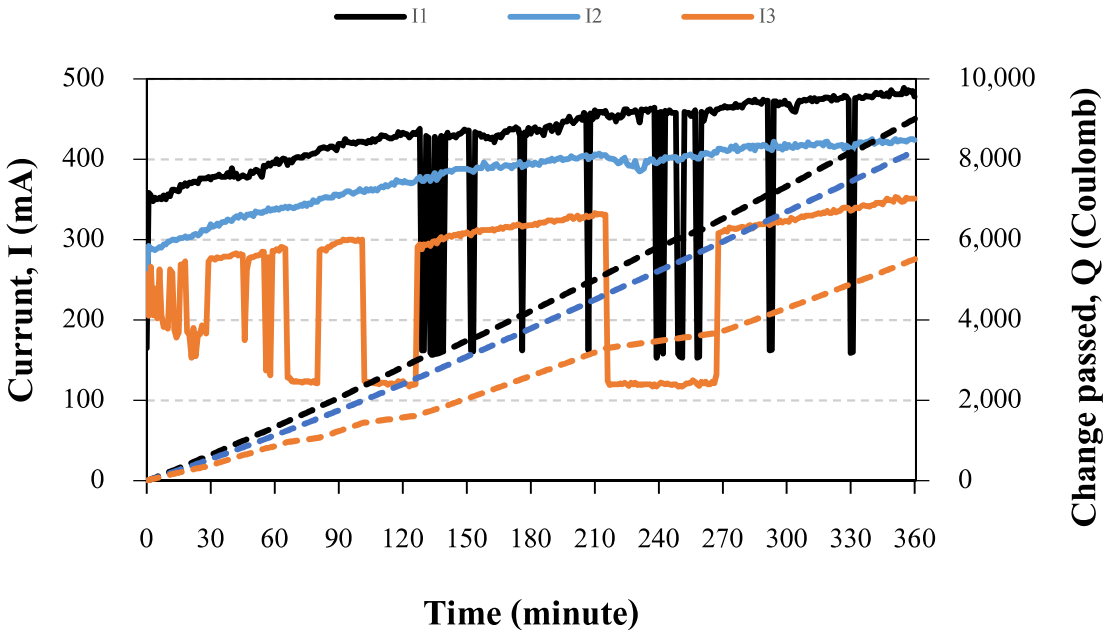
รูปที่ ก-11 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60WFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



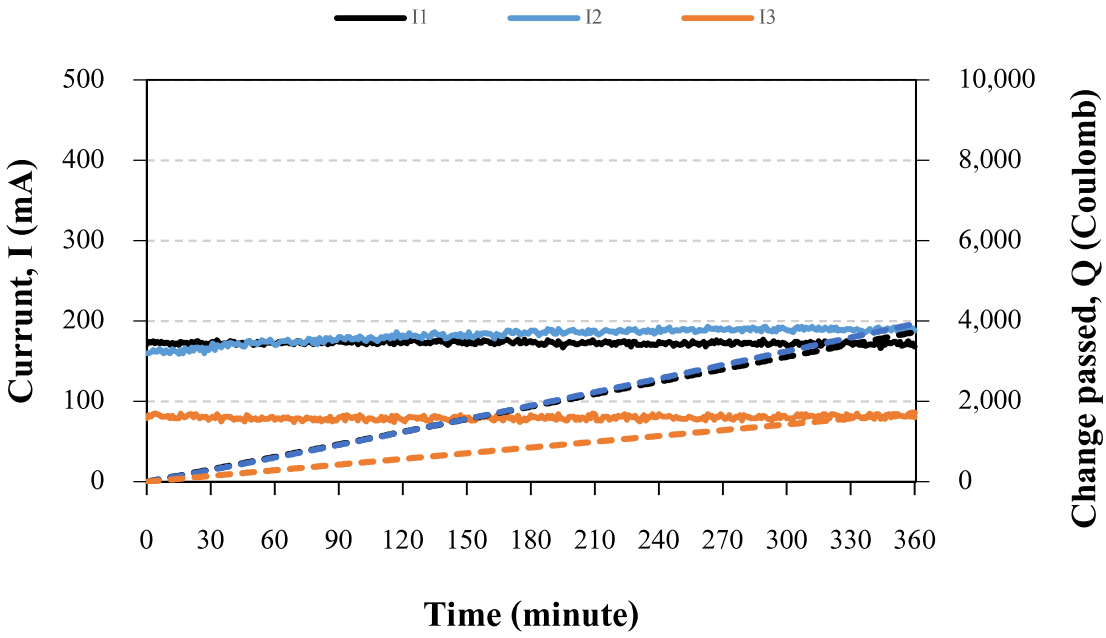
รูปที่ ก-12 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60DFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



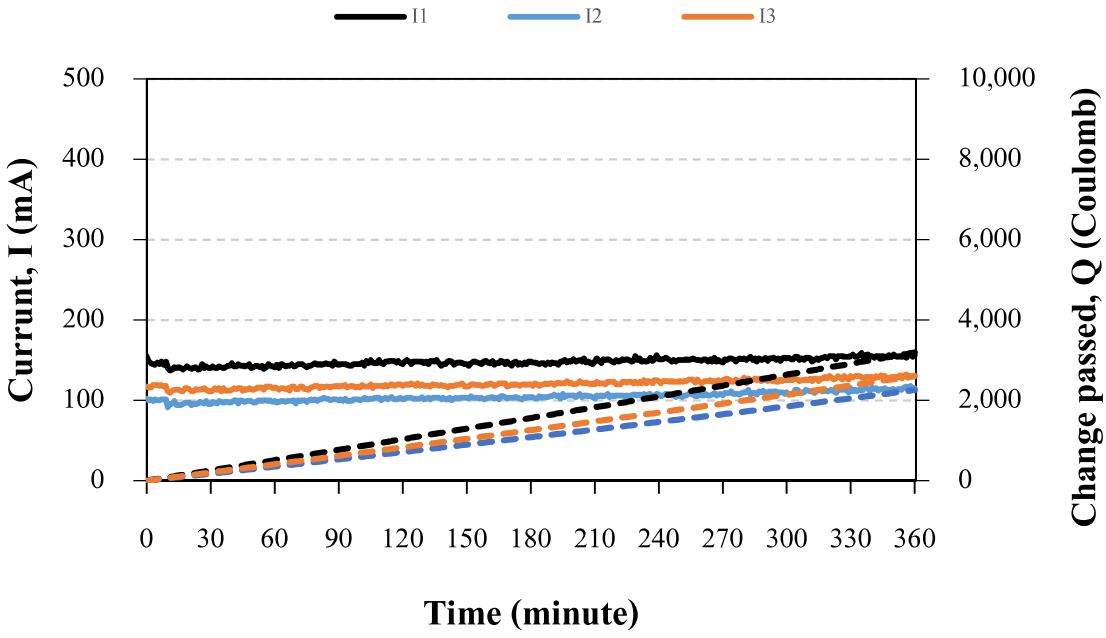
รูปที่ ก-13 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60DFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



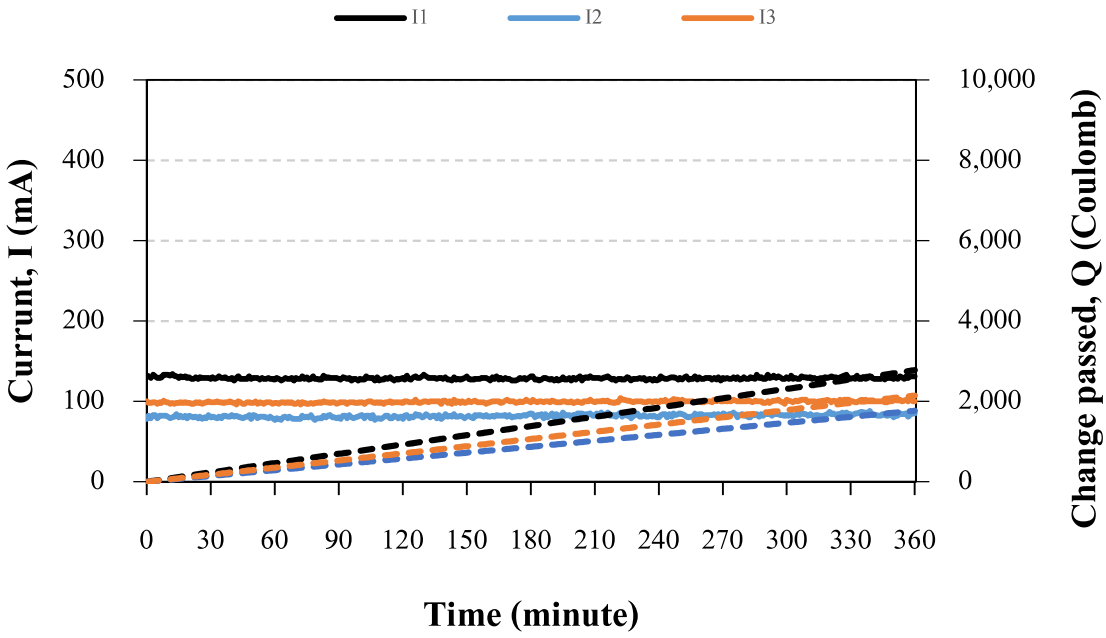
รูปที่ ก-14 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60DFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



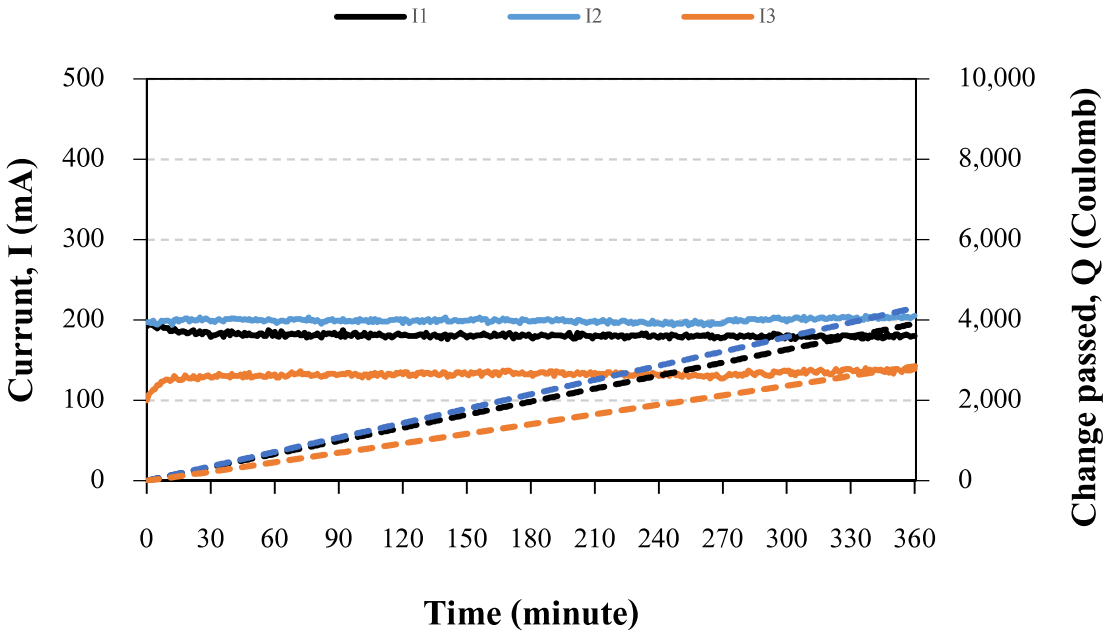
รูปที่ ก-15 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



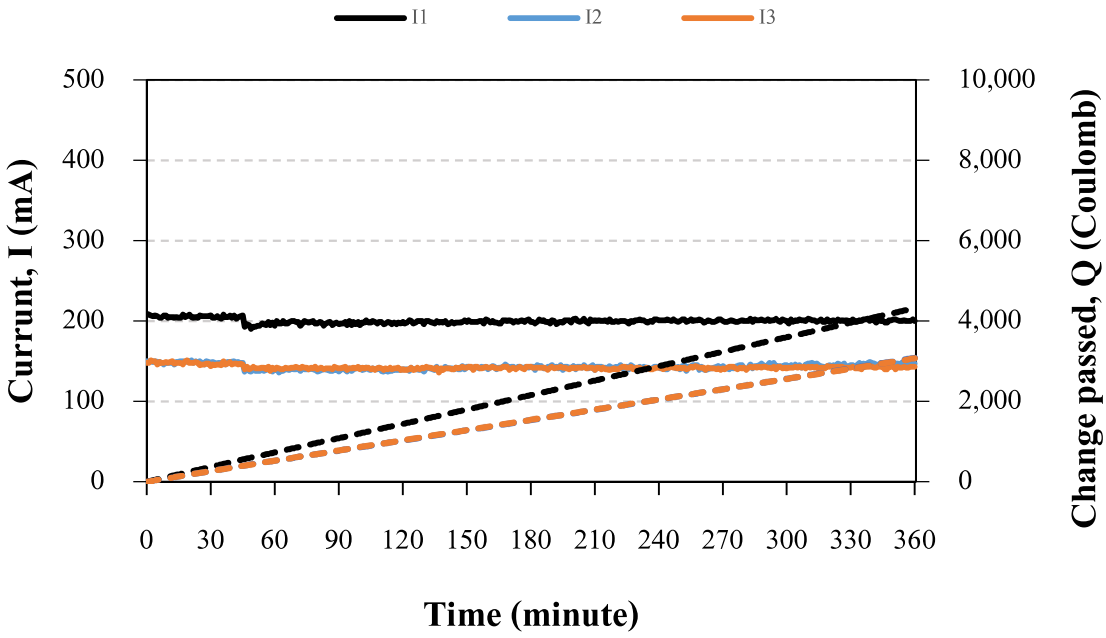
รูปที่ ก-16 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50WFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



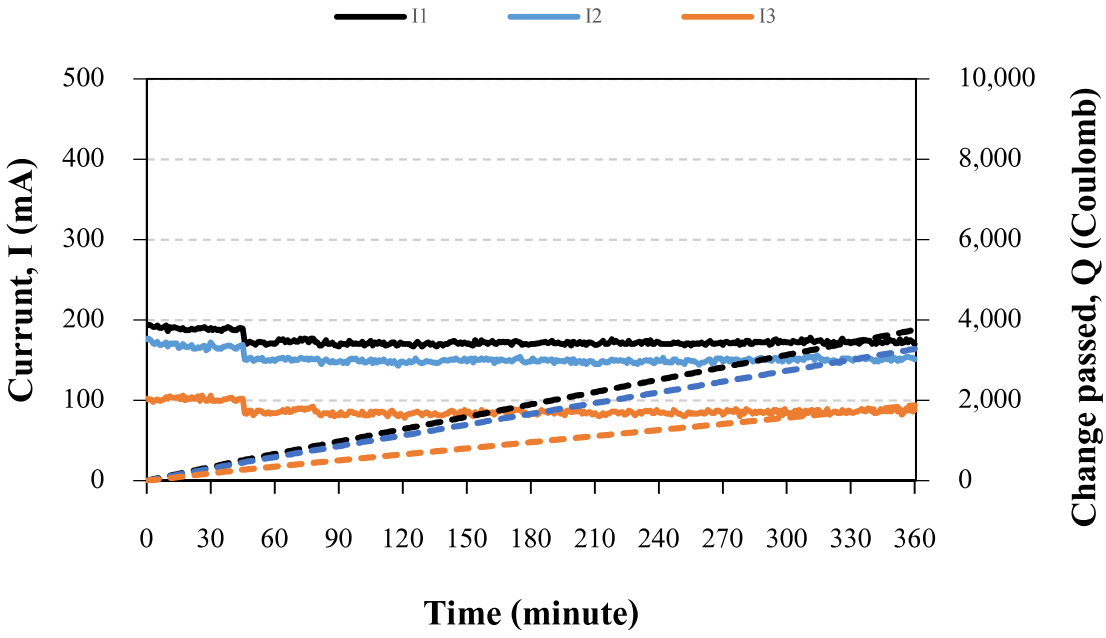
รูปที่ ก-17 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50WFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



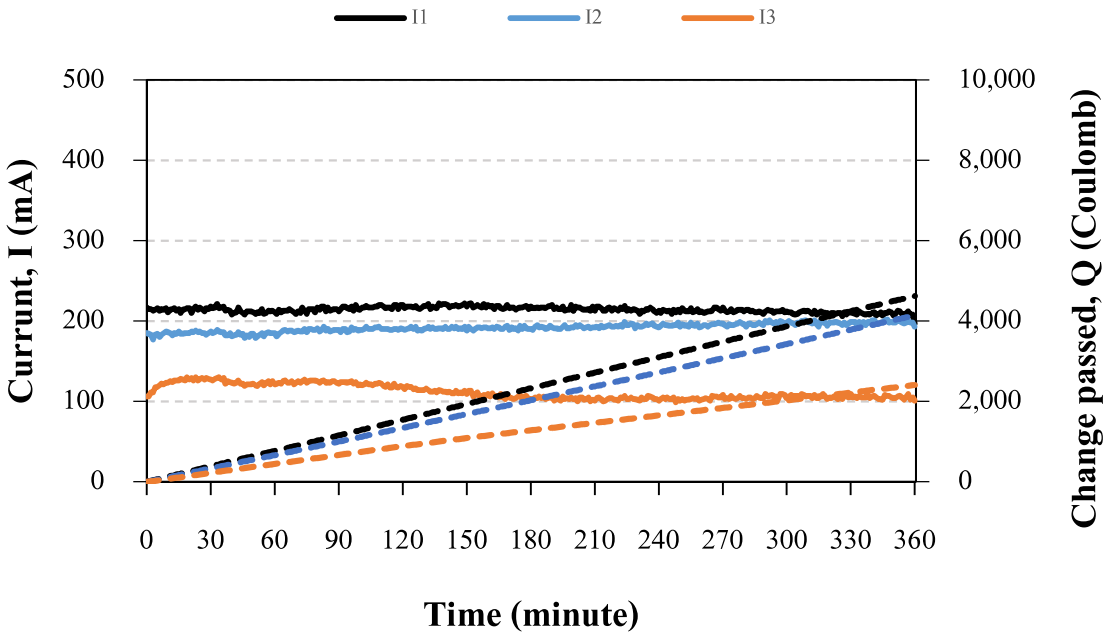
รูปที่ ก-18 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50WFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



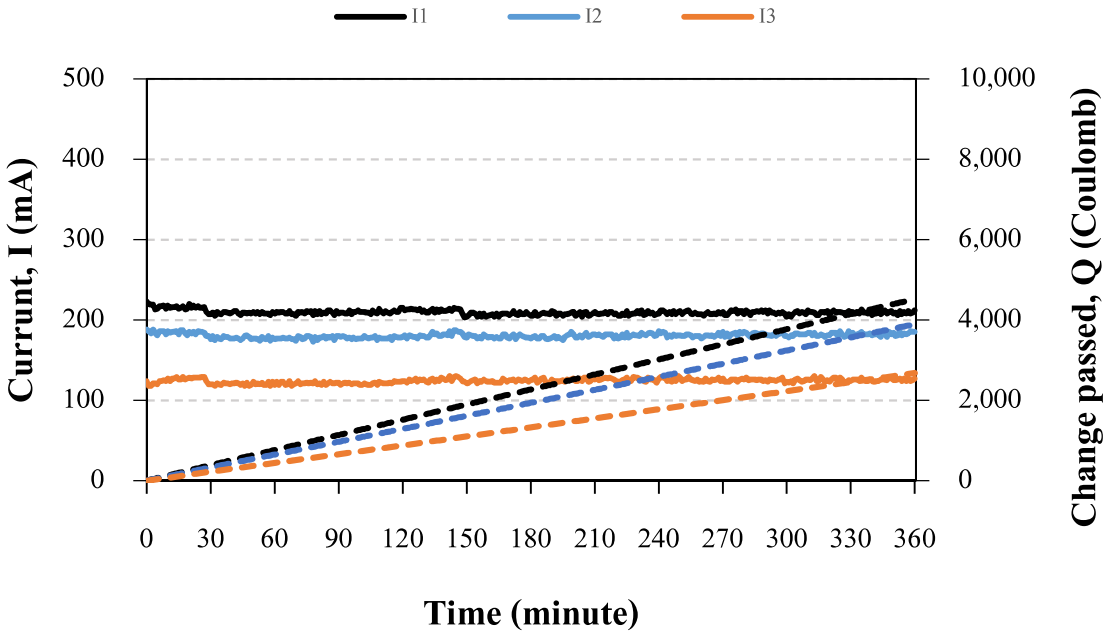
รูปที่ ก-19 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50DFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



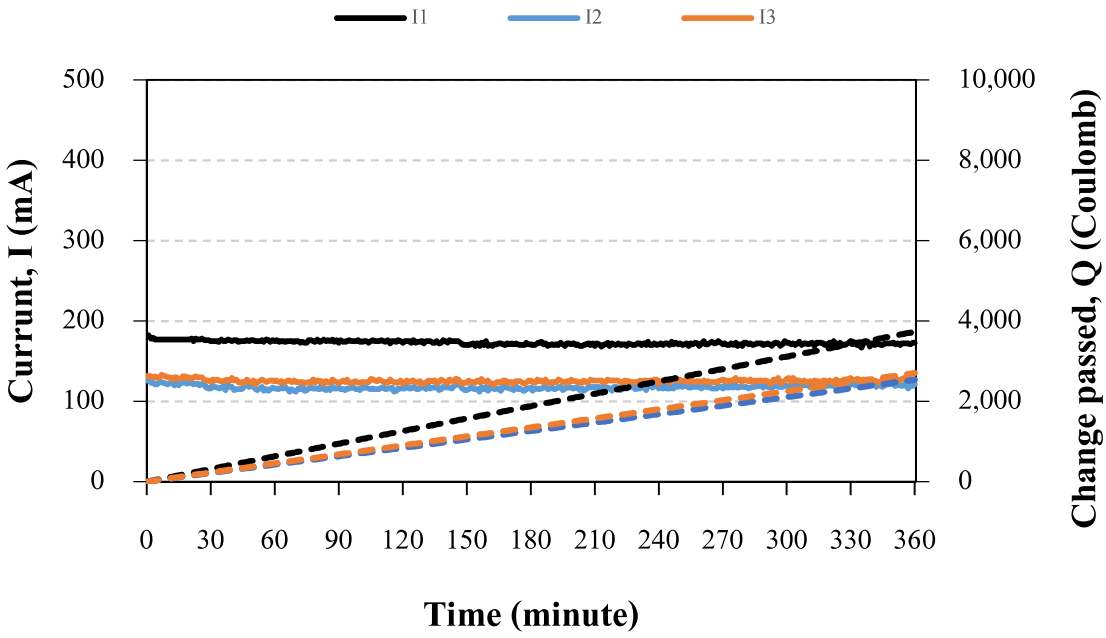
รูปที่ ก-20 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50DFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



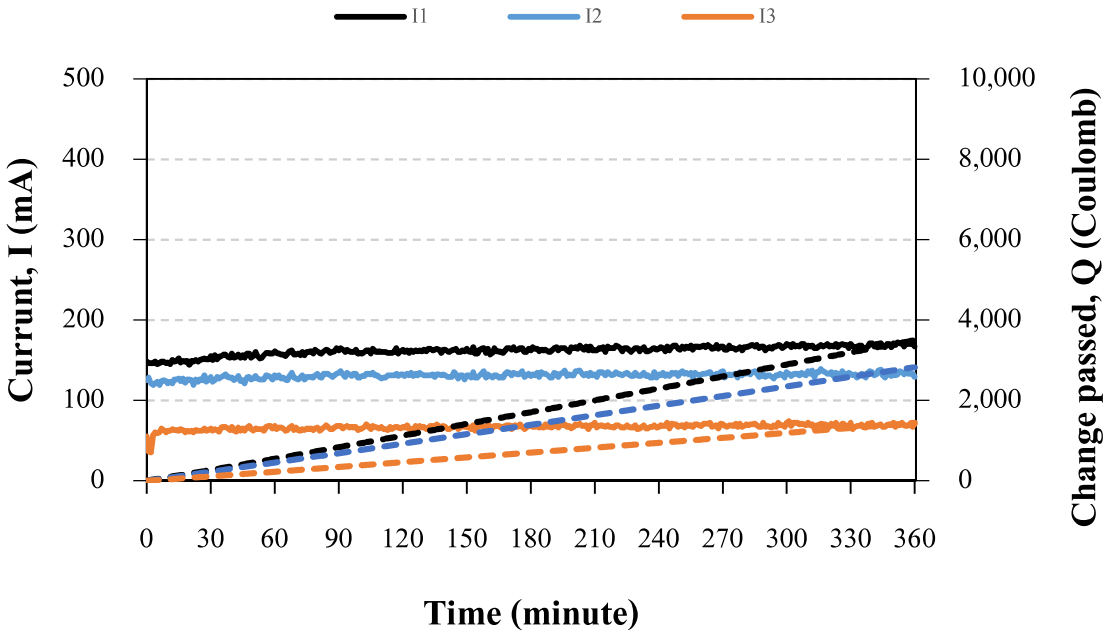
รูปที่ ก-21 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50DFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



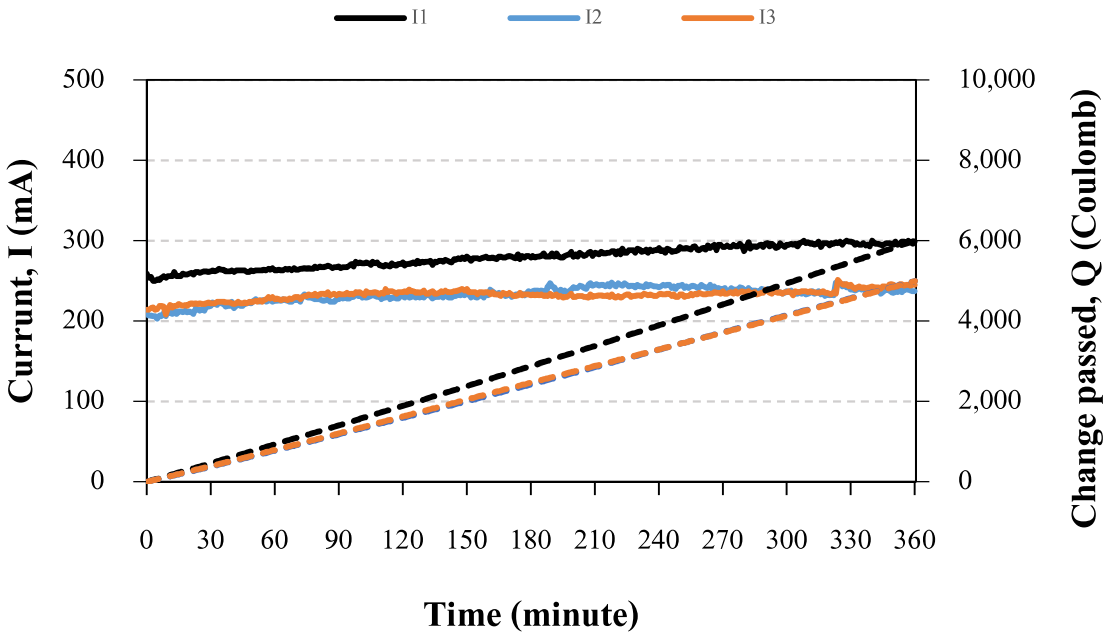
รูปที่ ก-22 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



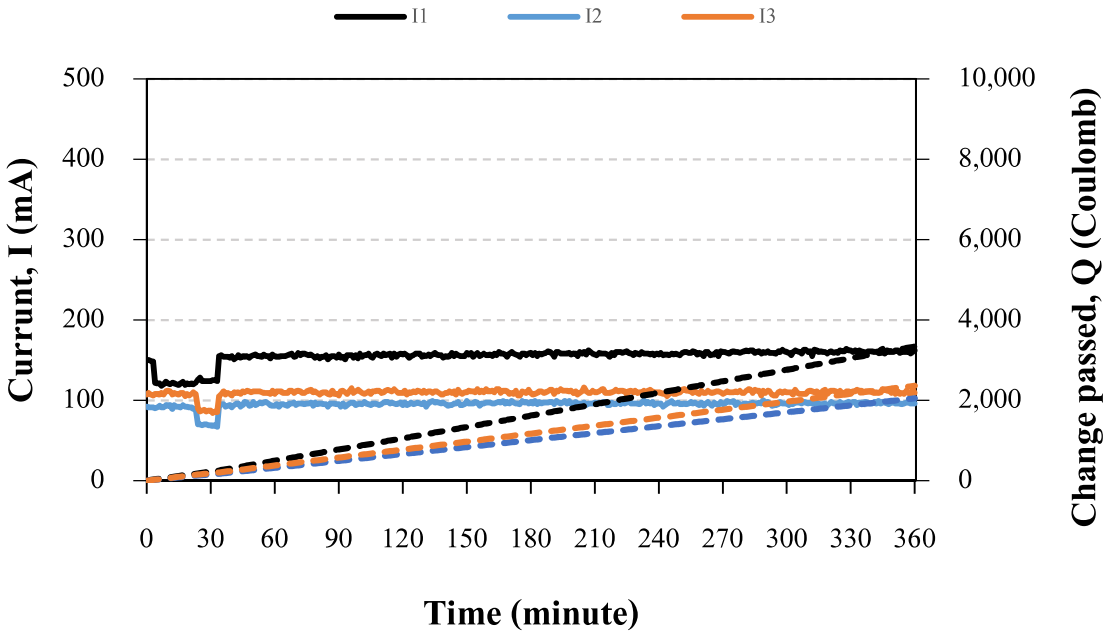
รูปที่ ก-23 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60WFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



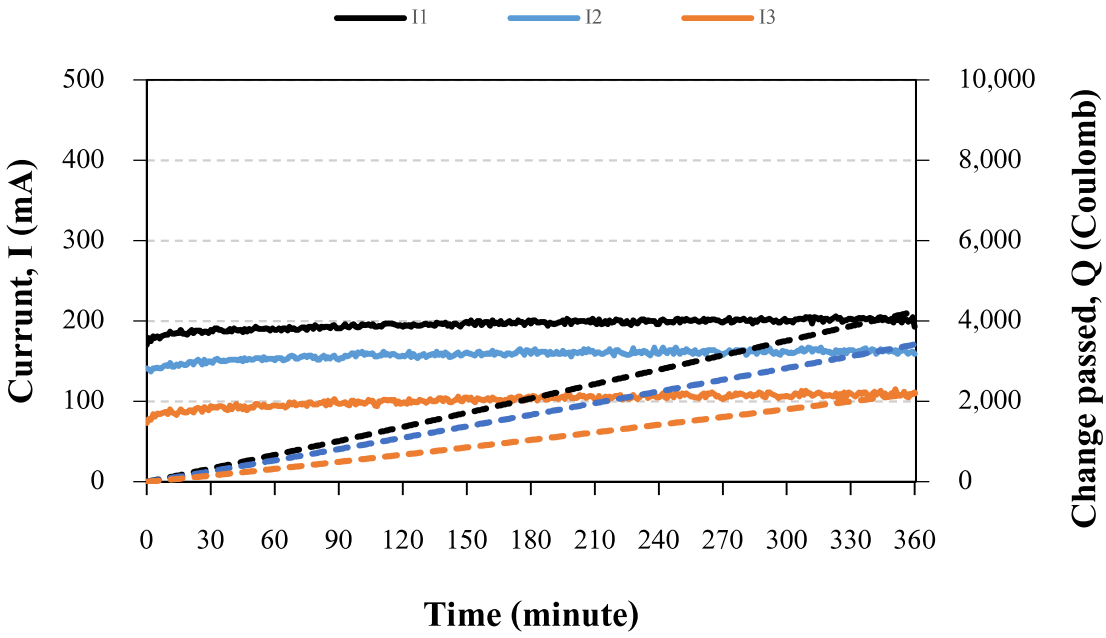
รูปที่ ก-24 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60WFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



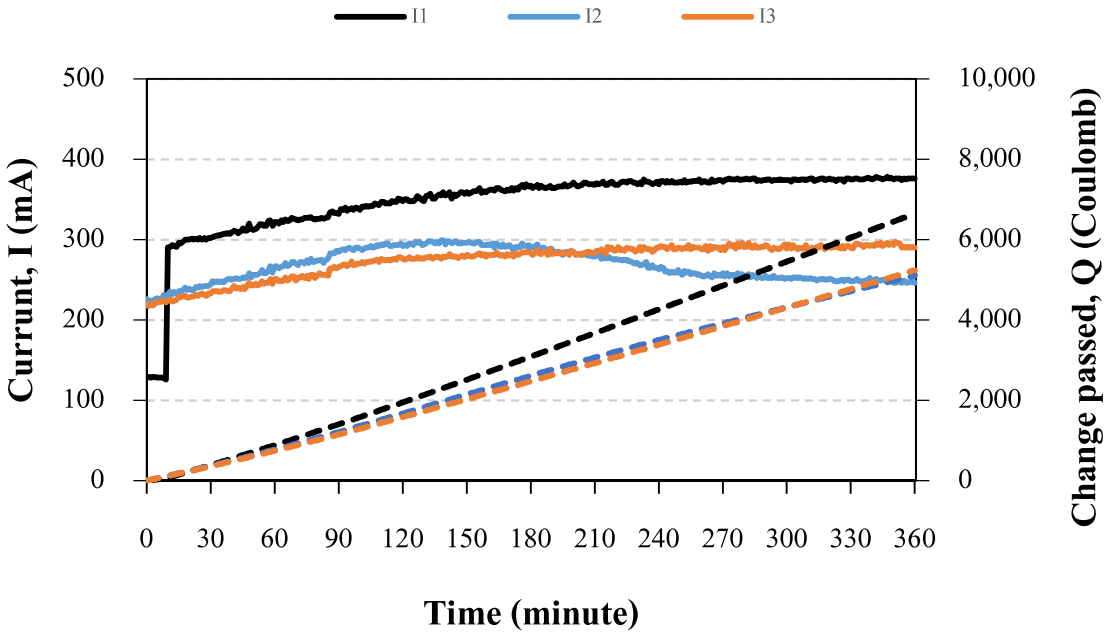
รูปที่ ก-25 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60WFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



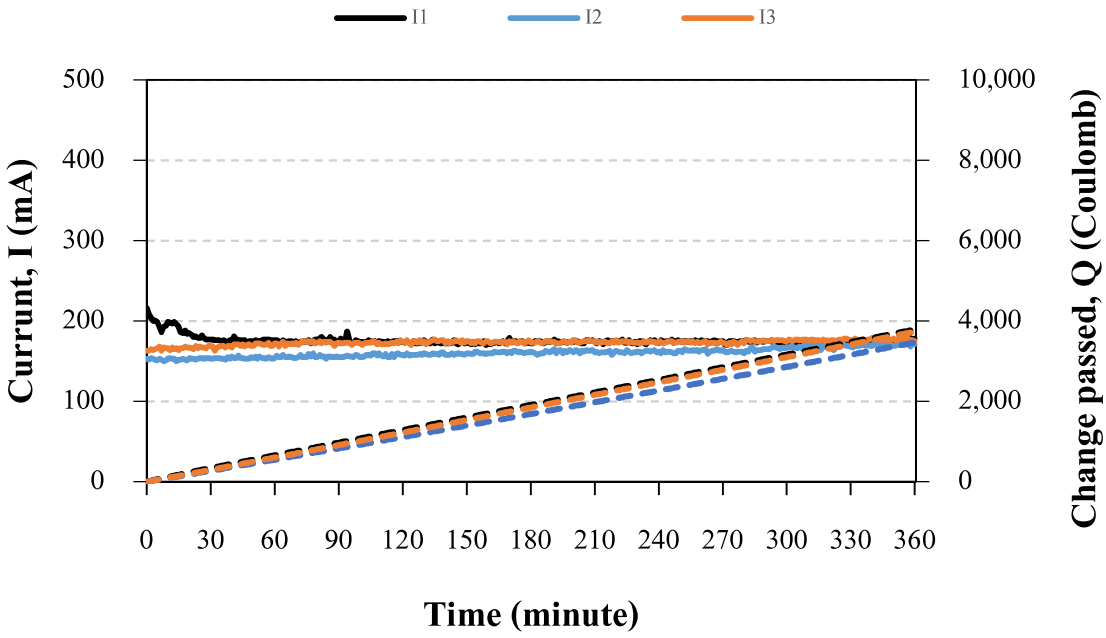
รูปที่ ก-26 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60DFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



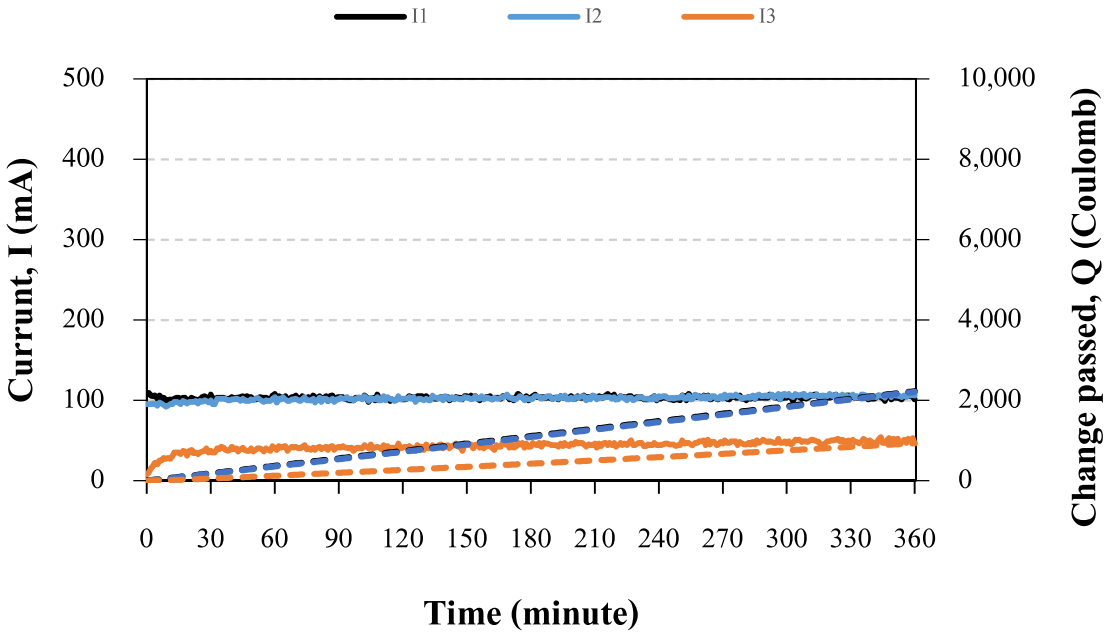
รูปที่ ก-27 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60DFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



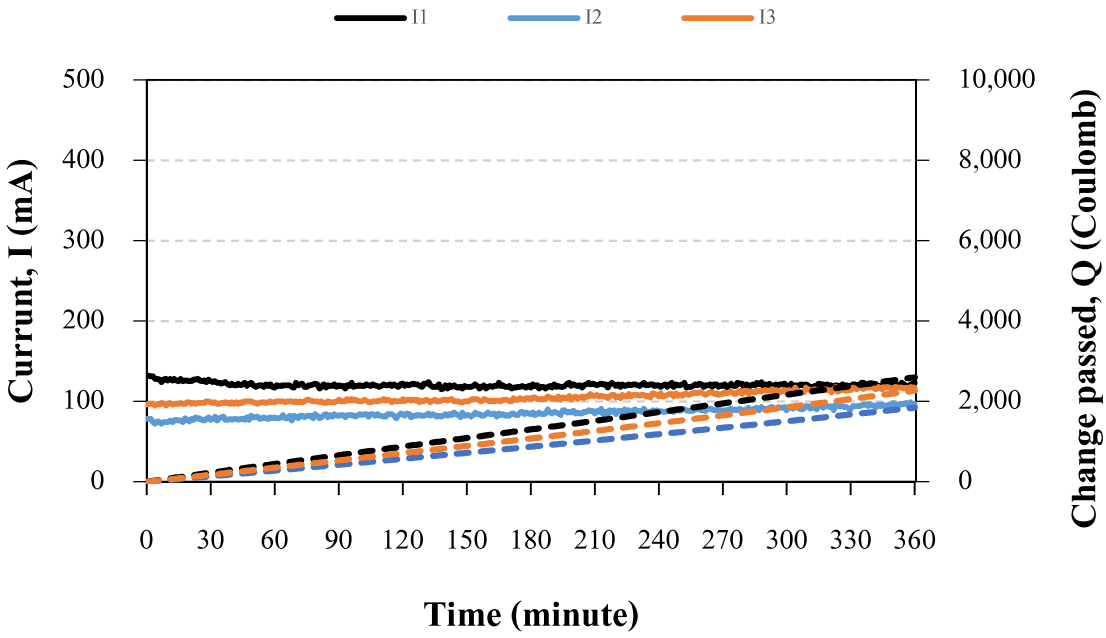
รูปที่ ก-28 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60DFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน



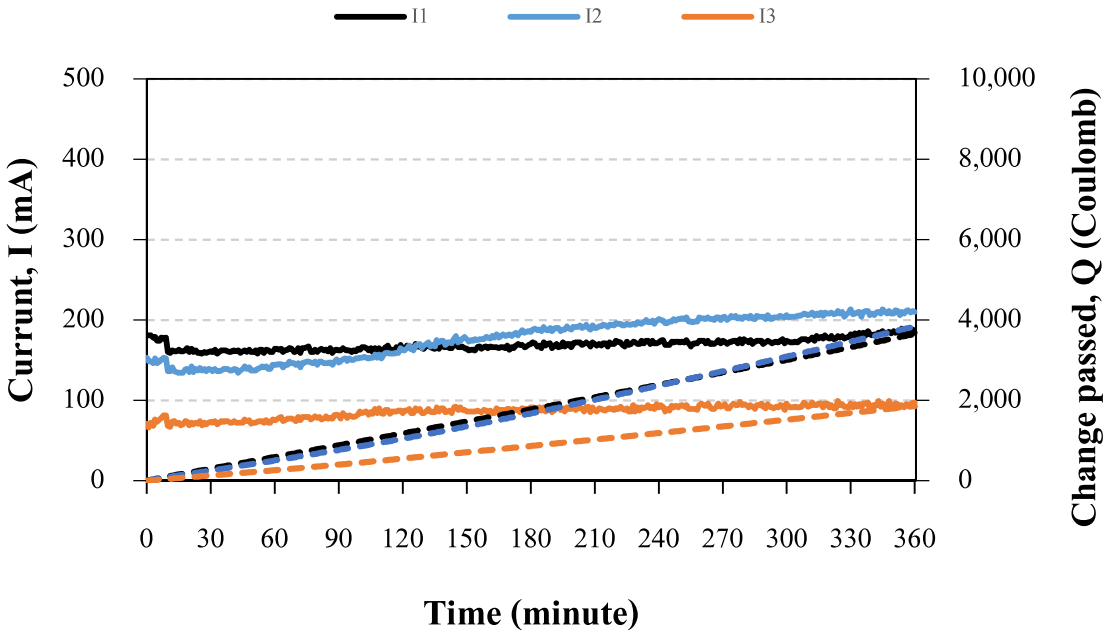
รูปที่ ก-29 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



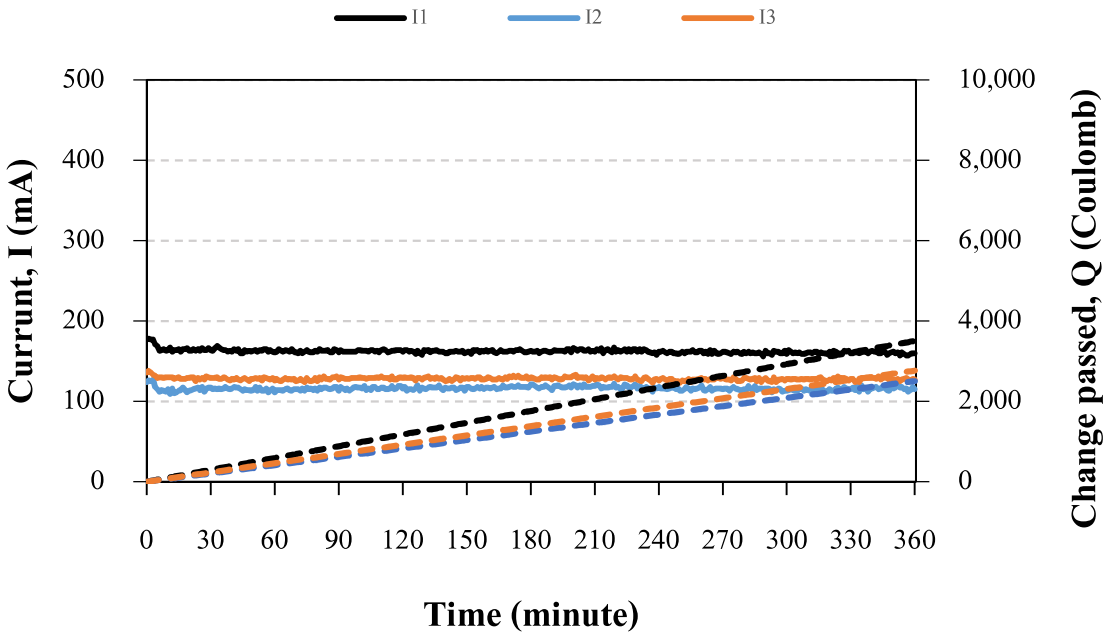
รูปที่ ก-30 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50WFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



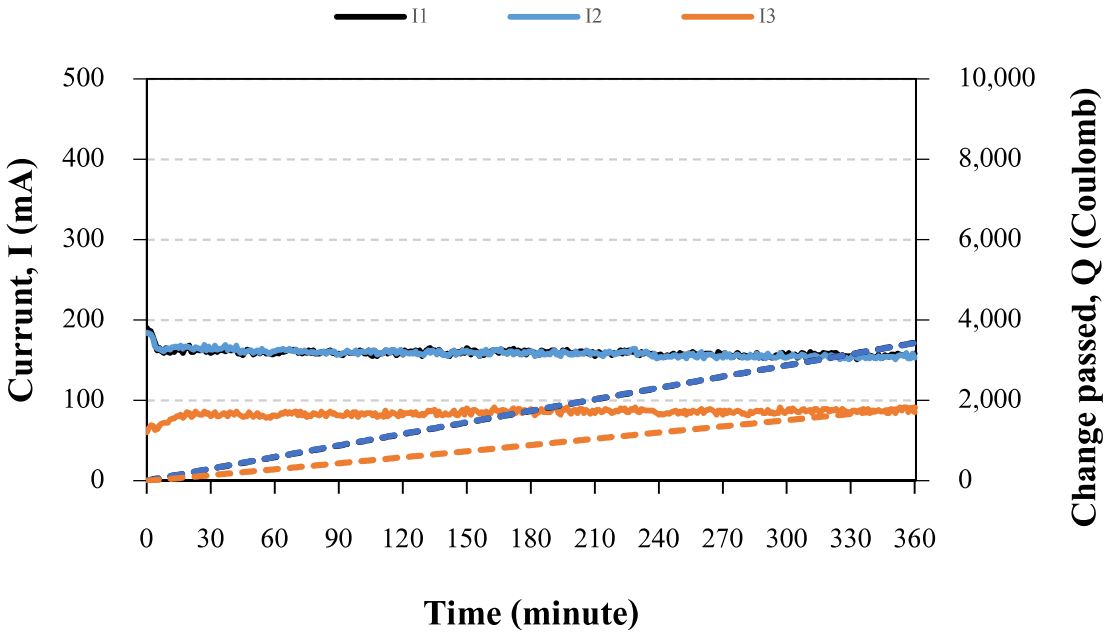
รูปที่ ก-31 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50WFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



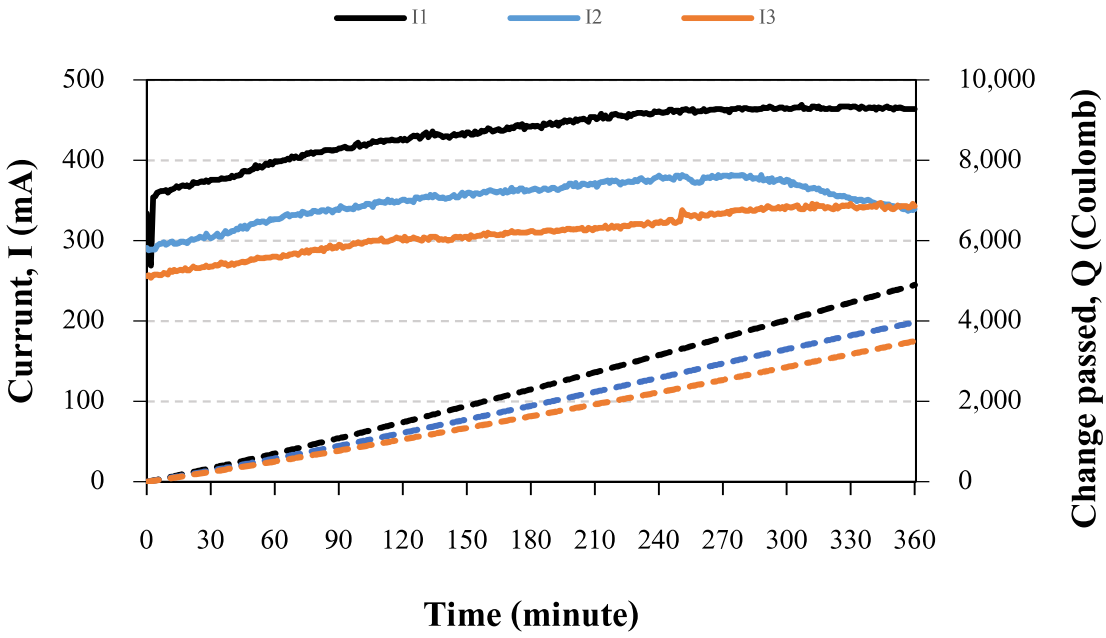
รูปที่ ก-32 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50WFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



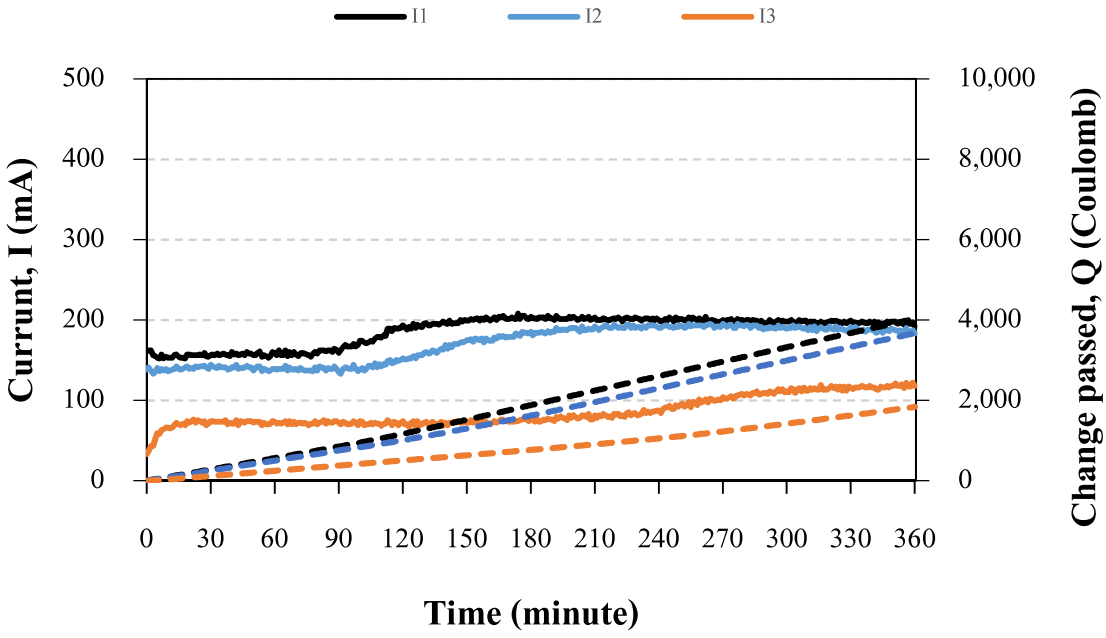
รูปที่ ก-33 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50DFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



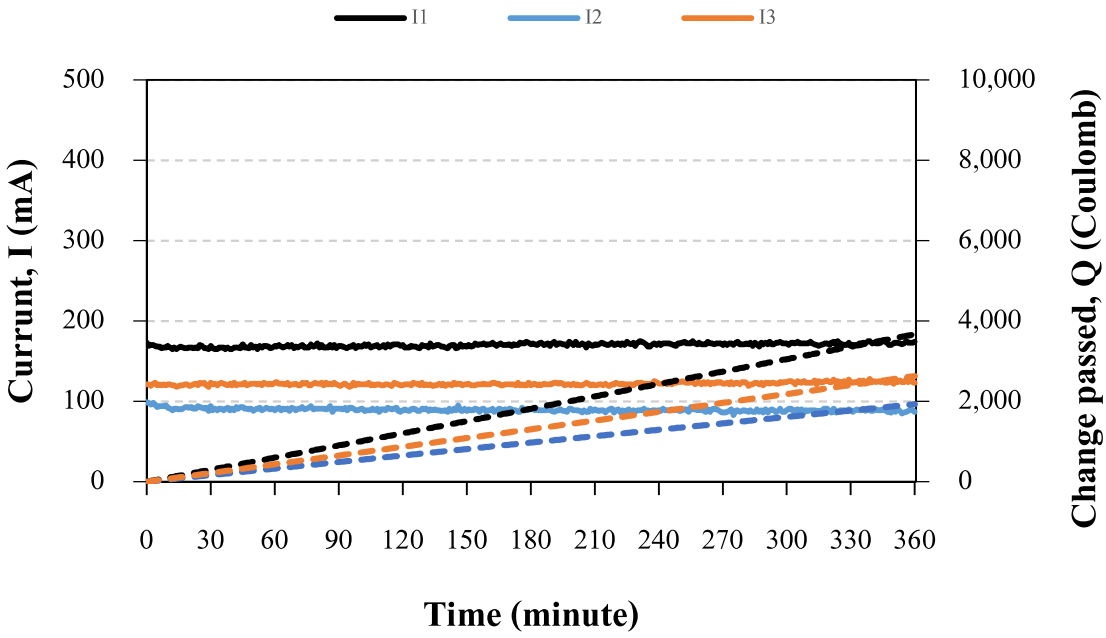
รูปที่ ก-34 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50DFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



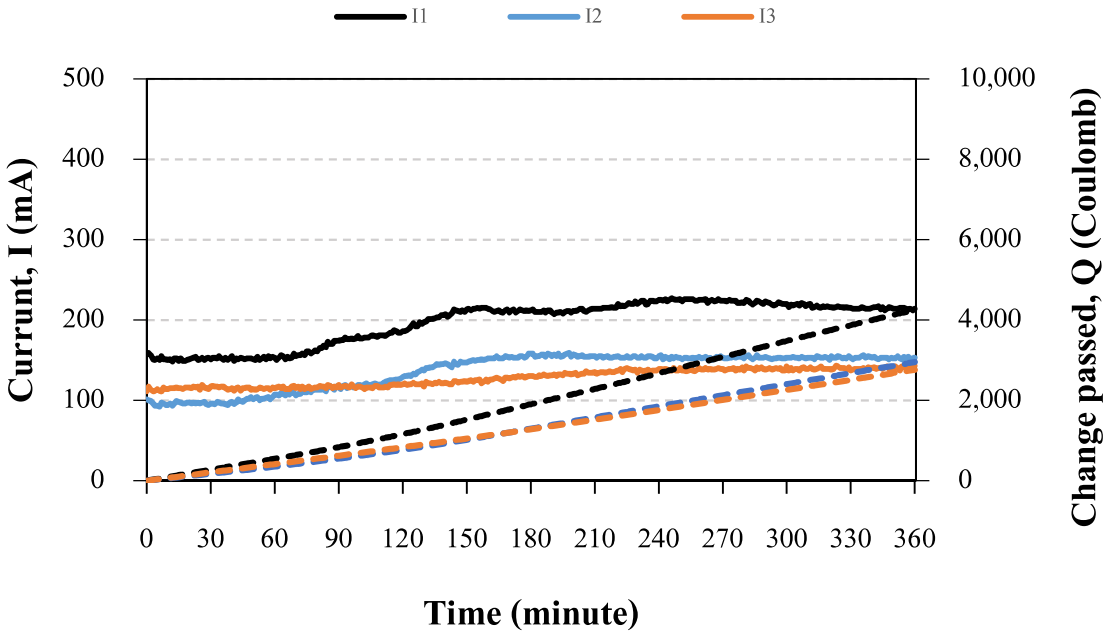
รูปที่ ก-35 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I50DFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



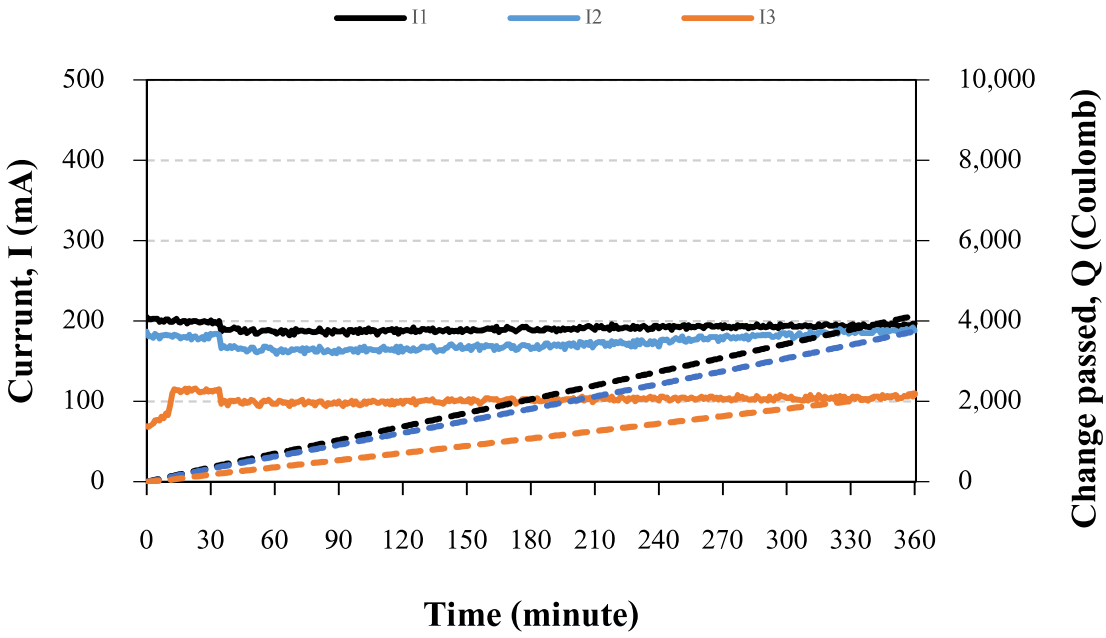
รูปที่ ก-36 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



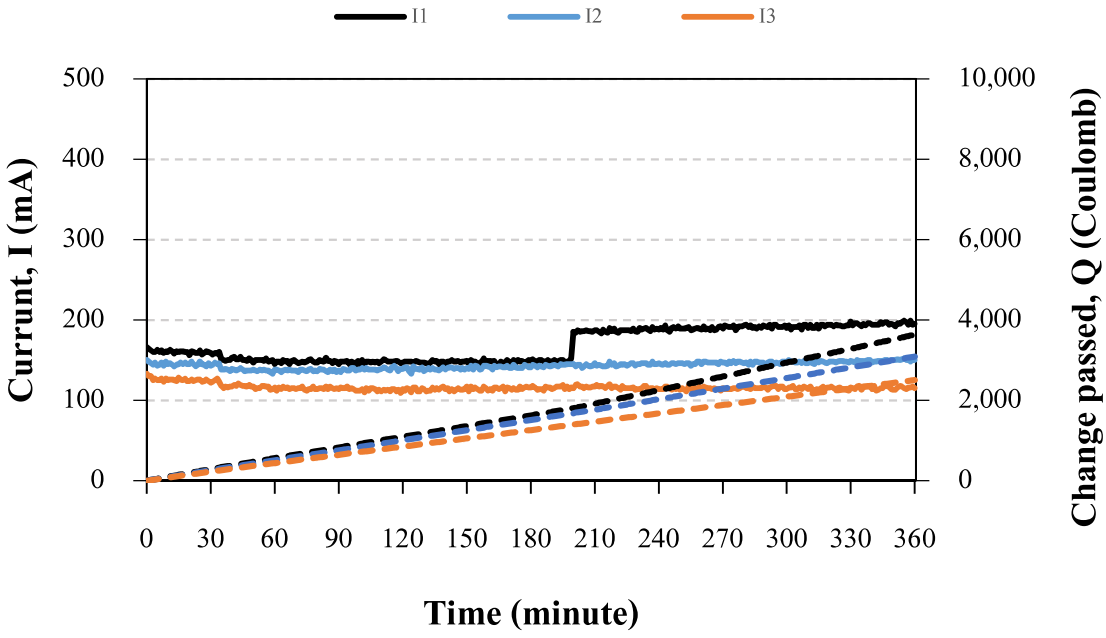
รูปที่ ก-37 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60WFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



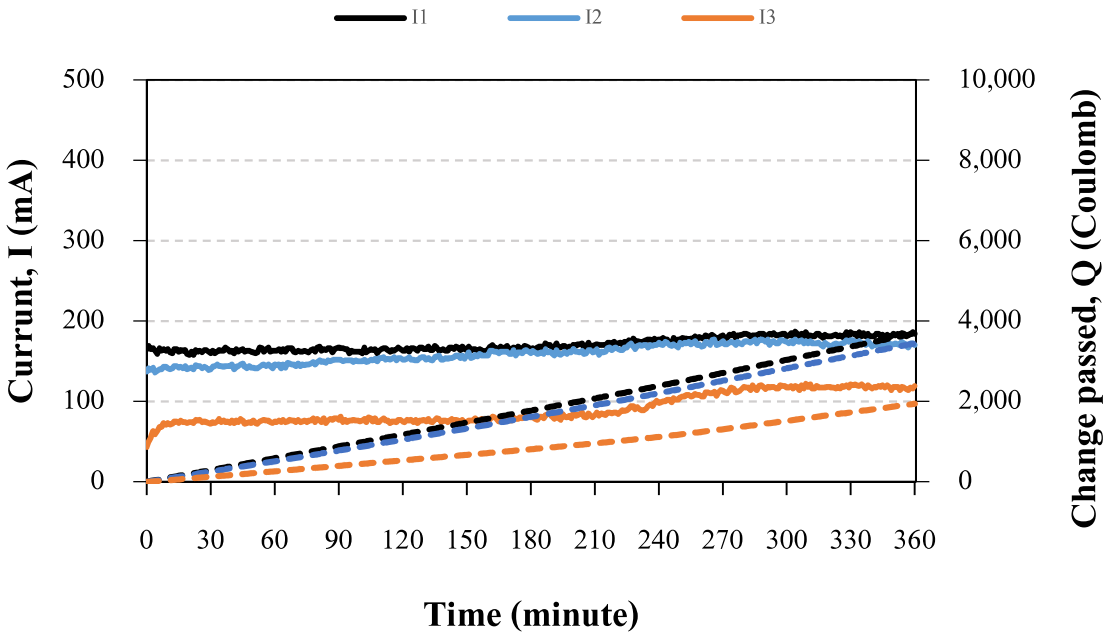
รูปที่ ก-38 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60WFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



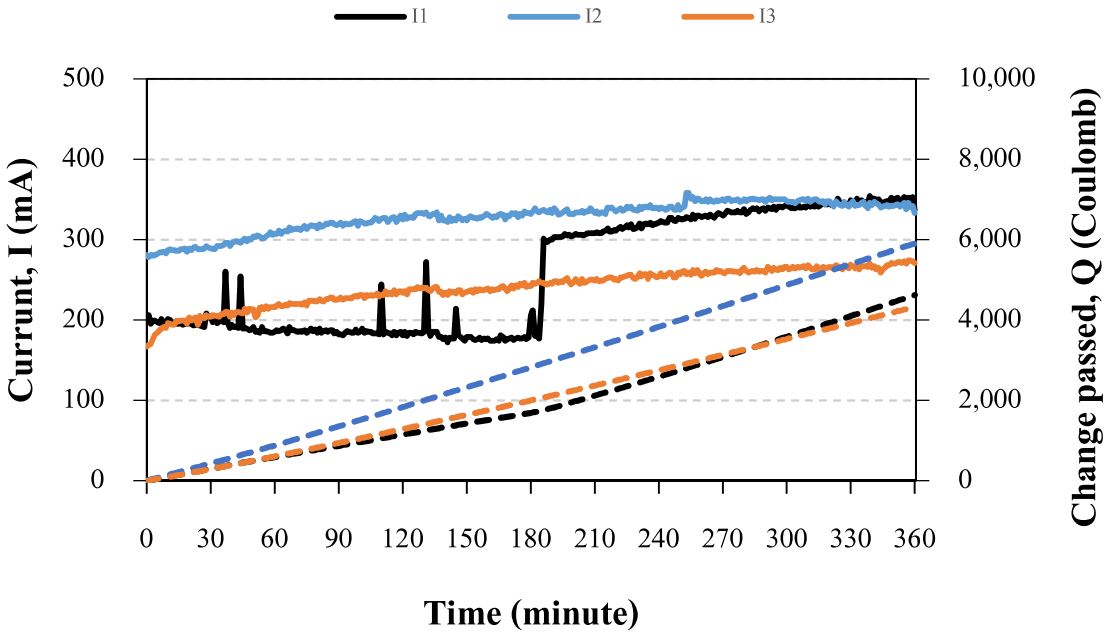
รูปที่ ก-39 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60WFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



รูปที่ ก-40 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60DFA20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



รูปที่ ก-41 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60DFA40 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน



รูปที่ ก-42 กระแสและปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต I60DFA60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน