



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซีโอไลต์
(Chloride penetration resistance of concrete containing zeolite)

ผศ.ดร. ทวีชัย คำราญวานิช

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

รหัสโครงการ 387477

สัญญาเลขที่ 20/2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซีโอไลท์
(Chloride penetration resistance of concrete containing zeolite)

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มีนาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 20/2560

Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 20/2560)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตผสมซีโอโลไลท์สังเคราะห์ วัสดุประสานที่ใช้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอโลไลท์สังเคราะห์ โดยใช้ซีโอโลไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่อายุ 7 28 56 และ 91 วัน และทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5.0 เป็นเวลา 28 วัน หลังจากผ่านการบ่มน้ำ 28 วัน

จากผลการทดลองพบว่า การใช้ซีโอโลไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในคอนกรีตส่งผลกระทบต่อกำลังอัด และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต โดยเมื่อใช้ซีโอโลไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในคอนกรีตมากขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง แต่การใช้ซีโอโลไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าสูงสุด และ การใช้ซีโอโลไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงช่วยปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตได้ดีกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ

Abstract

This research aims to study the resistance of chloride penetration resistance and compressive strength of concrete containing synthetic zeolite. The cementitious materials used in this study are Portland cement type I and synthetic zeolite. The synthetic zeolite to binder ratio was kept at 0.01 0.03 0.05 and 0.10 and water to binder ratio were 0.40 0.50 and 0.60. The compressive strength and rapid chloride penetration resistance of concrete are performed at 7 28 56 and 91 days. The chloride penetrations of concretes submerged in sodium chloride solution were tested at 28 days after 28-day curing.

From the experimental results, it was seen that synthetic zeolite affects to strength and chloride resistance of concrete. The higher content of synthetic zeolite to binder ratio results in the decrease compressive strength of concrete. The use of synthetic zeolite to binder ratio of 0.03 results in the highest chloride resistance of concrete. The use of synthetic zeolite in concrete at higher water to binder ratio improves chloride resistance better than concrete at lower water to binder ratio.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract	ค
สารบัญเรื่อง.....	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการศึกษา	2
ประโยชน์ที่ได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ซีไอไลท์	4
ประวัติของซีไอไลท์	4
องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของซีไอไลท์.....	5
คุณสมบัติของซีไอไลท์.....	7
ประเภทของซีไอไลท์.....	9
การใช้ประโยชน์จากซีไอไลท์ในด้านต่างๆ	12
การใช้ประโยชน์จากซีไอไลท์ในด้านงานวิศวกรรมโยธา.....	15
ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต.....	30
แหล่งที่มาของคลอไรด์	30
ประเภทของคลอไรด์	32
การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต.....	33
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต	38
กระบวนการเกิดความเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่มีสาเหตุมาจาก เกลือคลอไรด์	40

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

บทที่	หน้า
	ผลของการกัดกร่อนหรือทำลายด้วยคลอไรด์..... 41
3	วิธีการดำเนินการวิจัย..... 42
	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย..... 43
	วัสดุที่ใช้ใน 43
	สารเคมีที่ใช้..... 47
	อุปกรณ์ที่ใช้ 49
	วิธีการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 61
	การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบกำลังอัด 61
	การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต..... 61
	วิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง..... 62
	การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ แบบเร่ง 62
	การเตรียมสารละลายสำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง..... 63
	การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง..... 63
	การใช้งานโปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1 65
	วิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ 68
	การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์..... 68
	การเตรียมสารละลายเกลือคลอไรด์สำหรับแช่ก้อนตัวอย่างคอนกรีต..... 69
	การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์..... 69
4	ผลการทดลองและอภิปรายผล..... 73
	กำลังอัดของคอนกรีต 73
	ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน..... 73
	ผลกระทบของระยะเวลาบ่ม 75
	ผลกระทบของอัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 77
	การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต 81
	ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน..... 81

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

บทที่	หน้า
ผลกระทบของระยะเวลาบ่ม	83
ผลกระทบของอัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน	85
การแทรกซึมคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์ของคอนกรีต.....	93
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน.....	93
ผลกระทบของอัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน	94
ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและการใช้ซีโอไลท์ สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ.....	99
คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40.....	99
คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50.....	101
คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60.....	103
5 สรุปผล	105
สรุปผล.....	105
ข้อเสนอแนะ	106
ผลผลิต (Output)	
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลท์..... 5
2.2	ลักษณะโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลท์แบบต่างๆ..... 6
2.3	ตัวอย่างโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลท์..... 6
2.4	กลไกการแลกเปลี่ยนประจุของซีโอไลท์ 7
2.5	กลไกการดูดซับของซีโอไลท์ 8
2.6	กลไก Reversible dehydration ของซีโอไลท์..... 8
2.7	ผงซีโอไลท์ธรรมชาติ..... 9
2.8	ผงซีโอไลท์สังเคราะห์..... 10
2.9	การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติ เถ้าลอย และซิลิกาฟุ่ม แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ 15
2.10	การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติ แทนวัสดุประสาน ปริมาณต่างๆ 16
2.11	ลักษณะอนุภาคของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก และ ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ 17
2.12	กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ซีโอไลท์ธรรมชาติ เถ้าถ่านหิน และเถ้าลอยแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ..... 19
2.13	กำลังอัดของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ซีโอไลท์สังเคราะห์ และซีโอไลท์สังเคราะห์ร่วมกับเถ้าลอย แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ 20
2.14	การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ซีโอไลท์ธรรมชาติ เถ้าลอย และซิลิกาฟุ่มแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ ระยะ 5 15 25 และ 35 มิลลิเมตร ที่วัดจากผิวหน้า..... 22
2.15	การแทรกซึมน้ำ การดูดซึมน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ ... 23
2.16	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุ ประสานหลัก ซิลิกาฟุ่ม เมทาแคลิน และซีโอไลท์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณ ต่างๆ..... 24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ซิลิกาฟูม เมทาแคลิน และซีโอไลต์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ	25
2.18 การขยายตัวของมอร์ต้าเนื่องจากปฏิกิริยาซิลิกาอัลคาไลน์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุประสานหลัก และซีโอไลต์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ.....	26
2.19 การขยายตัวของมอร์ต้าเนื่องจากปฏิกิริยาซิลิกาอัลคาไลน์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุประสานหลัก และซีโอไลต์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ.....	27
2.20 การไหลผ่านของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก และซีโอไลต์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ	29
2.21 การแพร่ของเกลือคลอไรด์สู่คอนกรีต	33
2.22 การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	34
2.23 การดึงดูดอออนคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต	35
2.24 การดึงดูดคลอไรด์แบบคาพิลลารีเข้าสู่คอนกรีต.....	36
2.25 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตโดยความของดันน้ำ	37
3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	43
3.2 ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์สังเคราะห์.....	43
3.3 ลักษณะทางกายภาพของมวลรวมหยาบ (Course aggregate)	44
3.4 ลักษณะทางกายภาพของมวลรวมละเอียด (Fine aggregate)	44
3.5 ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	46
3.6 ลักษณะอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์.....	46
3.7 ลักษณะทางกายภาพของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	47
3.8 ลักษณะทางกายภาพของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	47
3.9 กรดไนตริก.....	48
3.10 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้นร้อยละ 30.....	48
3.11 โม้ผสมคอนกรีต.....	49
3.12 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 cm ³	49
3.13 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	50
3.14 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 เครื่องชั่งดิจิตอล ละเอียด 0.005 kg.....	51
3.16 เครื่องชั่งดิจิตอล ละเอียด 0.001 g.....	51
3.17 เครื่องตัดคอนกรีต	52
3.18 ส่วนประกอบของเซลล์ทดสอบ	52
3.19 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า.....	53
3.20 เครื่อง Potentiometric titration	53
3.21 เครื่องต้ม (Hot plate).....	54
3.22 เครื่องดูด (Suction apparatus)	54
3.23 บีกเกอร์ขนาด 1,000 ml.....	55
3.24 บีกเกอร์ขนาด 250 ml.....	55
3.25 ขวดแก้วกัน โปร่ง (Filtration flask) ขนาด 250 ml.....	56
3.26 กระจกตวงขนาด 100 ml.....	56
3.27 กรวย (Büchner funnel) ขนาด 250 ml.....	57
3.28 ซ้อนตักสารเคมี	57
3.29 กระดาษกรองเนื้อหยาบ ขนาด 11 mm.....	58
3.30 ซิลิโคน	58
3.31 อีพ็อกซี่ (Epoxy)	59
3.32 ลักษณะคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 cm ³ ที่แข็งตัวแล้ว.....	61
3.33 ลักษณะคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm ที่แข็งตัวแล้ว....	62
3.34 ตัวอย่างคอนกรีตที่ประกอบเข้ากับชุดเซลล์ทดสอบแล้ว	63
3.35 การต่ออุปกรณ์ทั้งหมดสำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง	64
3.36 ไอคอน โปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1	65
3.37 หน้าต่างและวิธีการเริ่ม โปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1	65
3.38 วิธีการเลือกช่องสัญญาณที่ต้องการทำการทดสอบของ โปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1	66
3.39 วิธีการตั้งค่าและกำหนดชื่อต่างๆของตัวอย่างทดสอบ โปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.40 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบที่ได้จากโปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1.....	67
3.41 ลักษณะคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm ที่ทำการเคลือบอีพ็อกซีโดยยกเว้นบริเวณผิวหน้าตัดด้านบน	68
3.42 ลักษณะผงของตัวอย่างที่ถูกบดแล้ว	69
3.43 การประกอบเครื่องคูเข้ากับกรวยด้วยสายยางและนำปลายกรวยเสียบเข้ากับขวดแก้วก้นโปร่ง	70
3.44 การไตเตรทโดยเครื่อง Potentiometric titration.....	71
4.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	73-74
4.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน	76
4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน ...	79
4.4 ปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	81-82
4.5 ปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน	84
4.6 ปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน	89
4.7 ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60	91-92
4.8 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60.....	93
4.9 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ	97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซีโพลีท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน แล้วแซในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5.0 อีก 28 วัน	97
4.11 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ใช้ซีโพลีท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน	100
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง และความต้านทานคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์ ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน	100
4.13 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ใช้ซีโพลีท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน	102
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง และความต้านทานคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์ ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน	102
4.15 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ใช้ซีโพลีท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน	104
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง และความต้านทานคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์ ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน	104

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของซีโอไลท์ธรรมชาติ 10
2.2	องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของซีโอไลท์สังเคราะห์ 11
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลท์สังเคราะห์.. 45
3.2	ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา..... 60
3.3	เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์อออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202... 64
4.1	การเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณ ต่างๆ และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก 80
4.2	การปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทน วัสดุประสานปริมาณต่างๆ เทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก..... 90
4.3	การปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบช้าในสารละลายเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ เทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก 98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ซีโอไลต์ (Zeolite) คือสารประกอบออลูมิโนซิลิเกต ซึ่งหน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วย อะตอมของซิลิกอน หรือออลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) โดยที่อะตอมของซิลิกอน หรือออลูมิเนียมอยู่ตรงกลาง แล้วล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุมโดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน ก่อให้เกิดเป็น โครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในระบบสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม จึงทำให้ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุน อีกทั้งในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะที่เกาะอยู่หลวมๆ ได้แก่ โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม เป็นต้น และยังมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึกด้วย

ซีโอไลต์แบ่งเป็น 2 ประเภท คือซีโอไลต์ธรรมชาติและซีโอไลต์สังเคราะห์ ซึ่งซีโอไลต์สังเคราะห์มีความแตกต่างกับซีโอไลต์ธรรมชาติ คือ ซีโอไลต์สังเคราะห์มีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ มีโครงสร้างที่แน่นอน และค่อนข้างบริสุทธิ์ มีสารปนเปื้อนน้อยกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติประกอบกับ ปัจจุบันการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลต์สังเคราะห์ยังมีน้อย ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดความสนใจที่จะศึกษาคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลต์สังเคราะห์ ได้แก่ กำลังอัดและความสามารถด้านทานคลอไรด์

ดังนั้น ถ้าผลจากการทดสอบบ่งชี้ว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์นั้นมีความสามารถในการด้านทานคลอไรด์ อีกทั้งยังไม่สูญเสียคุณสมบัติด้านกำลังอัดแล้ว สุดท้ายงานวิจัยนี้ จะบ่งบอกปริมาณของ ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เหมาะสมในการนำไปใช้เพื่อป้องกัน และแก้ไขปัญหาความคงทนของคอนกรีตที่มีสาเหตุมาจากคลอไรด์ โดยที่ไม่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตนั่นเอง และยังสามารถนำผลที่ได้จากการวิจัยนี้ไปใช้พัฒนา ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับ โครงสร้างที่ต้องเผชิญปัญหาทางด้านความคงทนที่มีสาเหตุมาจากคลอไรด์ที่ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากำลังอัดและการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซีโพลีท์สังเคราะห์
2. เพื่อศึกษาความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมซีโพลีท์สังเคราะห์ โดยวิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง และวิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์
3. เพื่อประเมินหาปริมาณของซีโพลีท์สังเคราะห์ที่เหมาะสมในการแทนที่วัสดุประสานของคอนกรีต โดยให้มีกำลังอัดและความคงทนต่อคลอไรด์ที่ดี

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ทำการทดสอบกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมซีโพลีท์สังเคราะห์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 และใช้ซีโพลีท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 0 1 3 5 และ 10 ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้อัตราส่วนการแทนที่โดยน้ำหนัก

สำหรับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซีโพลีท์สังเคราะห์ ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ทดสอบคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน

ส่วนการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมซีโพลีท์สังเคราะห์ ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm โดยในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งนั้น ทดสอบคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน และในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ ทดสอบคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันแล้วแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 อีก 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงกำลังอัดและการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์
2. ทำให้ทราบถึงความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ ด้วยวิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง และวิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์
3. ทำให้ทราบถึงปริมาณของซีโอไลท์สังเคราะห์ที่เหมาะสมในการแทนที่วัสดุประสานของคอนกรีต โดยให้มีกำลังอัดและความคงทนต่อคลอไรด์ที่ดี

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

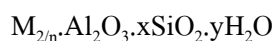
2.1 ซีโอไลต์

2.1.1 ประวัติของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ เป็นแร่ชนิดหนึ่งที่ค้นพบในปี ค.ศ. 1756 โดย Boron Cronstedt ซึ่งพบว่าเมื่อให้ความร้อนกับสารชนิดหนึ่ง แล้วนำไปใส่น้ำทำให้เกิดฟองคล้ายน้ำเดือดจึงให้ชื่อที่เป็นภาษากรีกว่า Zeolite ซึ่ง Zeo แปลว่า เดือด และ lite แปลว่า แร่ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1956 ได้มีการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ โดย Reed และ Breck จนกระทั่งยุคปัจจุบันได้มีการวิจัย และการใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์ด้านต่างๆ ทั้งด้านการเกษตร เช่น การใช้เป็นสารปรับปรุงดิน ใช้ผสมในอาหารสัตว์ เป็นต้น ด้านอุตสาหกรรม เช่น การใช้ดูดซับสารพิษที่ปนเปื้อนจากกระบวนการอุตสาหกรรม ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก ใช้เป็นส่วนผสมในสารดูดความชื้น เป็นต้น และด้านวิศวกรรม เช่น การใช้เป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มความคงทนของคอนกรีต เป็นต้น

2.1.2 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต หน่วยย่อยของประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน หรืออลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า โดยที่อะตอมของซิลิกอน หรืออลูมิเนียมอยู่ตรงกลาง แล้วล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุมโดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน จนกระทั่งเกิดเป็นโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้าที่มีขนาดใหญ่ โดยมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบมีขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม อีกทั้งในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะที่เกาะอยู่หลวมๆ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เป็นต้น อีกทั้งยังมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึกด้วย ซึ่งน้ำดังกล่าวสามารถระเหยออกไปจากโครงสร้างได้ โดยสูตรทางเคมีอย่างง่ายของซีโอไลต์ ดังนี้



โดย n คือ วาเลนซ์ของแคทไอออน M โดยมากเท่ากับ 1 และ 2 สำหรับโลหะอัลคาไลน์ และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท ตามลำดับ

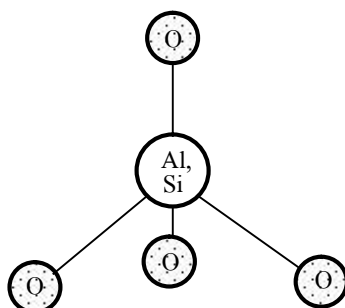
x คือ จำนวนโมเลกุลของ SiO_2 ปกติมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

ซึ่งโครงสร้างของซีโอไลต์แบ่งออกเป็น

2.1.2.1 โครงสร้างปฐมภูมิ

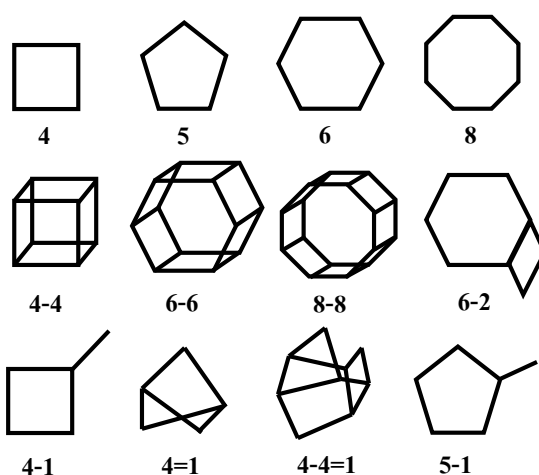
อะตอมของซิลิกอน หรืออลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอมแต่ละหน่วยจัดเรียงตัวในลักษณะรูปทรงสี่หน้า เชื่อมต่อกันโดยอะตอมของซิลิกอนและอะลูมิเนียมอยู่ตรงกลาง และอะตอมของออกซิเจนอยู่ที่จุดยอดมุมสามเหลี่ยมทรงสี่หน้า



รูปที่ 2.1 โครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์

2.1.2.2 โครงสร้างทุติยภูมิ

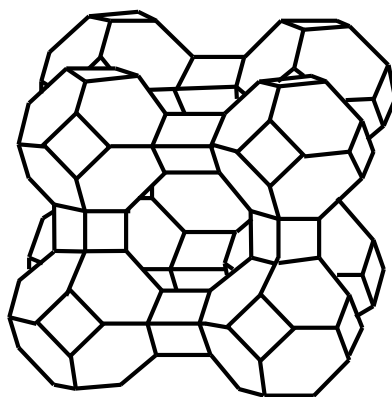
เกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิแต่ละหน่วยมาเชื่อมต่อกัน โดยอาศัยจุดยอดมุมทั้งสิ้นเป็นจุดเชื่อมต่อ เพื่อให้ได้เป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น โครงสร้างที่เกิดจากโครงสร้างขั้นปฐมภูมิมาเชื่อมต่อกันเป็นวงขนาดเล็กในรูป แบบต่างๆ กัน เช่น สี่เหลี่ยม ห้าเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม โดยเป็นวงเดี่ยว หรือวงซ้อนก็ได้



รูปที่ 2.2 ลักษณะ โครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์แบบต่างๆ

2.1.2.3 โครงสร้างรูปทรงหลายหน้า

เกิดจากโครงสร้างทุติยภูมิที่เชื่อมต่อกันจะเกิดเป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่ ซีโอไลต์ที่ต่างชนิดกันก็จะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติของซีโอไลต์มีคุณสมบัติแตกต่างกันไปด้วย



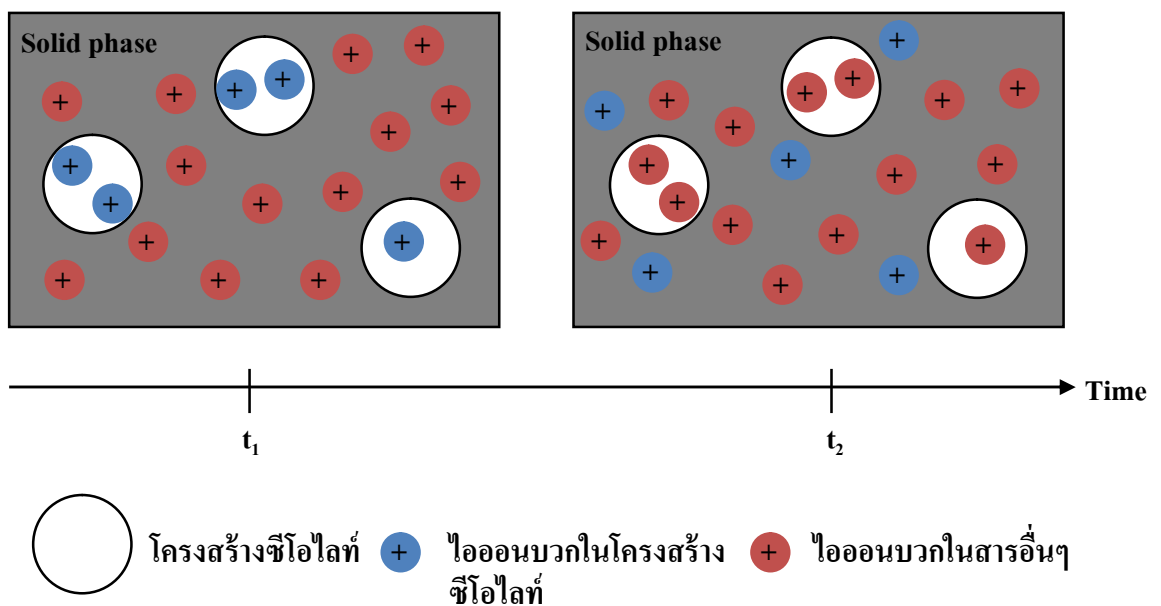
รูปที่ 2.3 ตัวอย่าง โครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์

2.1.3 คุณสมบัติของซีโอไลต์

ซีโอไลต์มีโครงสร้างแบบเปิด ภายในโครงสร้างประกอบด้วยรูโพรงที่เชื่อมต่อกันโดยมีรูปแบบของรูโพรงสม่ำเสมอ

2.1.3.1 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange)

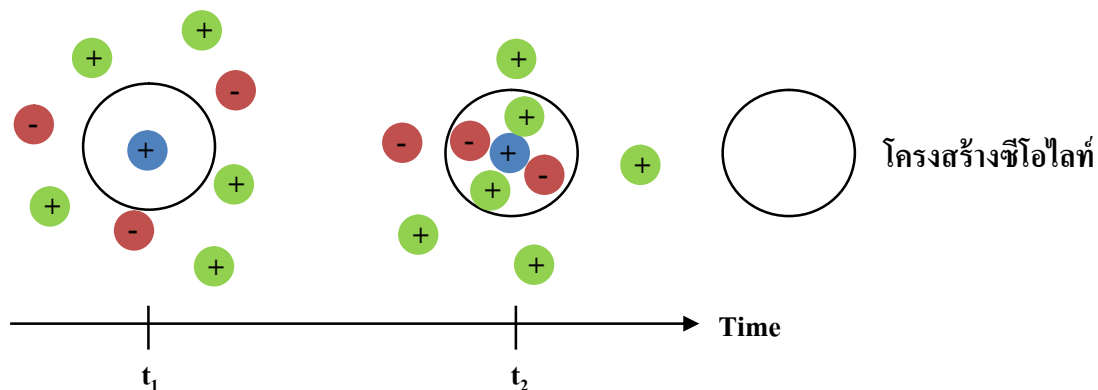
ซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกในโครงสร้างกับไอออนบวกอื่นได้ คือสามารถให้ไอออนบวกของโมเลกุลบางชนิด แทรกเข้าไปในโครงสร้างได้ เมื่อไอออนบวกหรือโมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปภายในโครงสร้าง ไอออนบวกของในโครงสร้างจะสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกของสารนั้นได้ โดยไอออนบวกของโมเลกุลสารจะเข้าไปอยู่แทนไอออนบวกในโครงสร้าง และไอออนบวกในโครงสร้างเข้าไปอยู่แทนไอออนบวกของสาร



รูปที่ 2.4 กลไกการแลกเปลี่ยนประจุของซีโอไลต์

2.1.3.2 การดูดซับ (Adsorption)

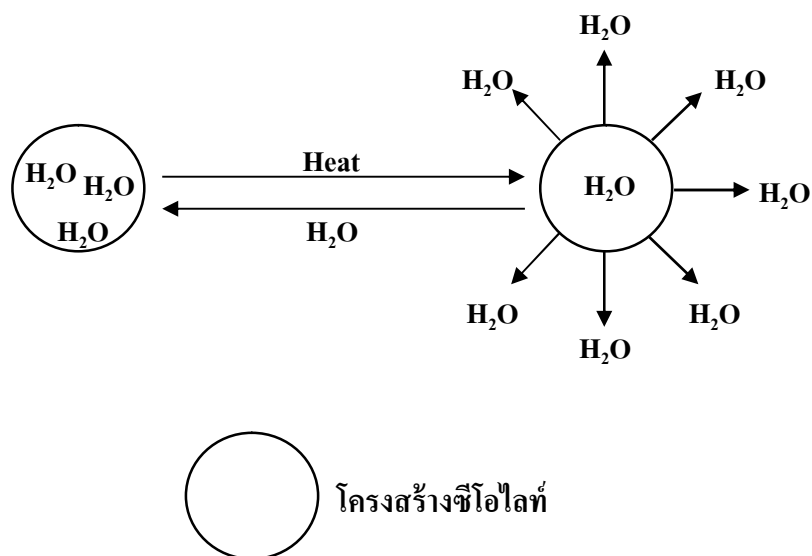
เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นรูพรุนจึงทำให้อนุภาคที่มีประจุบวก และประจุลบเกิดการแทรกตัวเข้าไปอยู่ในโครงสร้างได้ด้วยแรงระหว่างโมเลกุลทั้งสอง



รูปที่ 2.5 กลไกการดูดซับของซีโอไลต์

2.1.3.3 Reversible dehydration

เมื่อซีโอไลต์ได้รับความร้อน โมเลกุลของน้ำในโครงสร้างจะหลุดออกมา และระเหยออกมา โดยที่โครงสร้างโมเลกุลนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง และหลังจากนั้นช่องว่างในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังสามารถกักเก็บน้ำได้เช่นเดิม



รูปที่ 2.6 กลไก Reversible dehydration ของซีโอไลต์

2.1.4 ประเภทของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ ซีโอไลต์ที่พบตามธรรมชาติ (Natural or Mineral zeolite) และที่สังเคราะห์ขึ้น (Synthetic zeolite) ซีโอไลต์แต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกันที่พบตามธรรมชาติมีมากกว่า 35 ชนิด ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีถึงประมาณ 100 ชนิด ซีโอไลต์มี 2 ชนิด ดังนี้

2.1.4.1 ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural or Mineral zeolite)

ส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ เป็นกลุ่มของผลึกอลูมิโนซิลิเกตของโมโนหรือไดวาเลนต์เบส (Mono and divalent bases) อาจมีการสูญเสียน้ำผลึกบางส่วนหรือทั้งหมด โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น Faujasite Erionite Offretite Chabazite Clinoptilolite เป็นต้น



รูปที่ 2.7 ผงซีโอไลต์ธรรมชาติ (ที่มา : ชัยณรงค์ จันทร์มณ และ ดนุพล ตันนโยภาส, 2556)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์ธรรมชาติ
(ที่มา : ชัยณรงค์ จันทร์มณ และ ดนุพล ตันนโยภาส, 2556)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
	ซีโอไลต์ธรรมชาติ
Silicon dioxide, SiO ₂	70.12
Aluminium oxide, Al ₂ O ₃	21.89
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	1.77
Titanium Dioxide, TiO ₂	1.24
Potassium oxide, K ₂ O	0.94
Sulfur Trioxide, SO ₃	0.46
Calcium oxide, CaO	0.16
Loss on ignition, LOI	3.42
Specific gravity	1.8

2.1.4.2 ซีโอไลต์สังเคราะห์ (Synthetic Zeolite)

เกิดจากการทำปฏิกิริยาเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น Al₂O₃ SiO₂ Na₂O และ K₂O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึก โดยการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดได้ตั้งแต่เป็นเจลจนถึงรูปที่เป็นรูพรุน และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย ได้แก่ Zeolite A Zeolite Y Zeolite F Zeolite M เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ผงซีโอไลต์สังเคราะห์

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของซีโอไลท์สังเคราะห์

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
	ซีโอไลท์สังเคราะห์
Silicon dioxide, SiO ₂	32.98
Aluminium oxide, Al ₂ O ₃	27.73
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	0.04
Calcium oxide, CaO	0.04
Sulfur Trioxide, SO ₃	0.04
Sodium oxide, Na ₂ O	19.86
Potassium oxide, K ₂ O	0.04
Loss on ignition, LOI	19.19
Specific gravity	2.16

2.1.5 การใช้ประโยชน์จากซีโอไลท์ในด้านต่างๆ

ปิยะ ปุทธิเวทินทร์ (2545) ได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลท์จากถ้ำลอย ลิกไนต์โดยตรวจสอบคุณสมบัติของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลท์ที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นนำซีโอไลท์ที่สังเคราะห์ได้นี้ไปศึกษาความสามารถในการดูดติดแคดเมียมในน้ำ การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลท์ทำโดยใช้วิธีทางสถิติ โดยศึกษาผลของตัวแปร 5 ชนิด คือ ขนาดของอนุภาคของถ้ำลอย อุณหภูมิกระตุ้น ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา เพื่อหาว่าผลของตัวแปรชนิดใดมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลท์สังเคราะห์สูงที่สุด ซึ่งจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิกระตุ้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการสังเคราะห์ซีโอไลท์ โดยที่การศึกษาครั้งนี้พบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 110 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 96 ชั่วโมง โดยซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ได้มีคุณสมบัติของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกประมาณ 635 เซนติโมลต่อกิโกรัม นอกจากนี้ในการศึกษาครั้งนี้นำซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ได้ไปทดสอบหาความสามารถในการกำจัดแคดเมียมแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการดูดติดแคดเมียมของซีโอไลท์สังเคราะห์สามารถอธิบายโดยไอโซเทอมการดูดติดแบบฟรันทซ์ได้ดีกว่าไอโซเทอมการดูดติดแบบแลงมัวร์ และมีค่าความสามารถในการดูดติดสูงสุดเท่ากับ 234 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมของซีโอไลท์ ในการทดสอบแบบต่อเนื่องกระทำโดยใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แบบเม็ดเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมและภาวะบรรทุกทางชลศาสตร์ ต่อการกำจัดแคดเมียม โดยใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แบบเม็ด พบว่าที่ความเข้มข้นแคดเมียม 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความสามารถการดูดซึมแคดเมียมมีค่า เท่ากับ 0.2 และ 0.15 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมซีโอไลท์สังเคราะห์แบบเม็ด ที่อัตราภาวะบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.22 และ 0.44 ล./ตร.ซม./ซม. ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความสามารถ ในการดูดติดแคดเมียมมีค่าเท่ากับ 0.79 และ 0.44 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมซีโอไลท์สังเคราะห์แบบเม็ด ที่อัตราภาวะบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.22 และ 0.44 ล./ตร.ซม./ซม. ตามลำดับ

ถิรานันท์ ถือชาติ และคณะ (2552) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ซีโอไลท์ที่ได้จากธรรมชาติ เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยางธรรมชาติโดยศึกษาเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตและ จีเถ้าแกลบที่ปริมาณต่างๆกันคือที่ 100 159 200 และ 250 phr จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลท์และแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้ยางสุกเร็วขึ้น แต่จีเถ้าแกลบจะให้ผลในทางตรงกันข้าม สำหรับคุณสมบัติเชิงกลยางขึ้นรูปที่เติมซีโอไลท์มีค่าความแข็งและค่าคืนตัวของยางใน

ระดับกลาง โดยที่เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งก็จะเพิ่มขึ้นแต่ค่าคืนตัวของยางจะลดลงในทุกสารตัวเติม ความต้านทานต่อการขาดของยางที่เติมซีโอไลต์และซีเถ้าแกลบจะให้ค่าที่ดีขึ้นเมื่อปริมาณที่เติมเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อการขาดกลับมีค่าลดลง ยางขึ้นรูปที่เติมซีโอไลต์มีความทนต่อการฉีกขาดสูงที่สุด รองลงมาคือยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตและซีเถ้าแกลบตามลำดับ โดยยิ่งเติมสารตัวเติม ค่าความทนต่อแรงฉีกขาดยิ่งลดลง

ยะโก๊ะ ขาเริ่มดาเบะ (2551) ได้ศึกษาการดูดซับของสารประกอบฟอสเฟตบนซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 โดยระเบียบวิธี ONIOM2 (HZ/6-31G(d,p):UFF) สำหรับแบบจำลอง 5T-quantum 12T 34T และ 128T ONIOM2 มีค่าพลังงานการดูดซับ (adsorption energy) เป็น -22.5 -23.7 -32.2 และ -35.5 kal/mol ตามลำดับ และเมื่อใช้ระเบียบวิธี ONIOM2 (B3LYP/6-31G(d,p):UFF) พบว่าพลังงานในการดูดซับเป็น -26.2 -28.7 -37.7 และ -39.5 kal/mol สำหรับแบบจำลอง 500T-quantum cluster 12T 34T 128T ONIOM2 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการสมบัติการดูดซับของสารประกอบฟอสเฟตบนซีโอไลต์ ชนิด Z-ZAM-5 ขึ้นอยู่กับการขยายขนาดของโครงสร้าง (extended structure) ของซีโอไลต์ และการศึกษาการดูดซับอโรฟอสเฟต ด้วยซีโอไลต์ วิเคราะห์ด้วยวิธี Vanadomolybdophosphoric acid ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ KH_2PO_4 พบว่าปัจจัยการดูดซับที่เหมาะสม คือ เวลาการดูดซับ 30 นาที ค่า pH 12 และพฤติกรรมการดูดซับอโรฟอสเฟตด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ มีความสอดคล้องกับสมการ Freundlich isotherm ($R^2=0.99$) มากกว่า Langmuir isotherm ($R^2=0.99$) แสดงให้เห็นว่าลักษณะการดูดซับดังกล่าวเป็นแบบหลายชั้น หรือเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่าทางเคมี และเมื่อประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียจากการซักผ้าด้วยเครื่องซักผ้าอัตโนมัติ โดยผ่านชุดกรองแบบแบบน้ำไหลอย่างต่อเนื่อง พบว่าประสิทธิภาพ การดูดซับฟอสเฟตสูงถึง 94.08% ผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการจริงเป็นอย่างดี

ธีระรัตน์ ชินแสน (2554) ได้ศึกษาคุณภาพและอายุการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศ หลังการลดความชื้นด้วยเม็ดซีโอไลต์ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2552 ถึง เมษายน พ.ศ.2553 โดยใช้เมล็ดพันธุ์มะเขือเทศที่มีความชื้นเริ่มต้น 12 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับเม็ดซีโอไลต์ที่สัดส่วน 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวม พบว่า ความชื้นของเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศมีความชื้น 5 – 6 เปอร์เซ็นต์ ภายในชั่วโมงที่ 2 หลังการลดความชื้น ยกเว้นเมล็ดที่มีความชื้นเริ่มต้น 15 เปอร์เซ็นต์ แล้วลดความชื้นด้วยเม็ดซีโอไลต์ 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวม ที่ยังคงมีความชื้นสูง (9 และ 7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) เมื่อนำเมล็ดพันธุ์ที่มีความชื้น 5 – 6 เปอร์เซ็นต์ หลังผ่านการลดความชื้นด้วยเม็ด

ซีโอล์ที่ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมงและ 2 ชั่วโมง มาทดสอบคุณภาพของเมล็ดเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 0 เดือน 2 เดือน 6 เดือนและ 12 เดือนเปรียบเทียบกับการลดความชื้นด้วยการพรางแสง (shade drying) พบว่าเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศมีความงอกไม่แตกต่างกันทางสถิติ (95 – 100 เปอร์เซ็นต์) มีเวลาเฉลี่ยในการงอกประมาณ 5 – 6 วันหลังเพาะเมล็ด และมีค่าดัชนีความงอกประมาณ 8 – 9 ในทุกวิธีดเมนต์ ตลอดอายุการเก็บรักษา

2.1.6 การใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์ในด้านงานวิศวกรรมโยธา

2.1.6.1 การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีต

Poon et al. (1999) ได้ศึกษาผลของกำลังอัด ระดับของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้จะใช้เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่ผสมรวมกันกับซิลิกาฟูม และเถ้าลอย จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาฟูมและเถ้าลอย สังเกตได้จากรูปที่ 2.9 โดยทั่วไปซีเมนต์เพสต์ผสมที่มีอัตราส่วนของซีเมนต์กับน้ำต่ำ ซีโอไลต์ธรรมชาติมีส่วนทำให้เพสต์มีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ในเพสต์ที่มีน้ำสูงกว่าอัตราส่วนของซีเมนต์และซีเมนต์ระดับที่ต่ำกว่าแทนมันผ่านระดับที่สูงขึ้นของการเกิดปฏิกิริยา

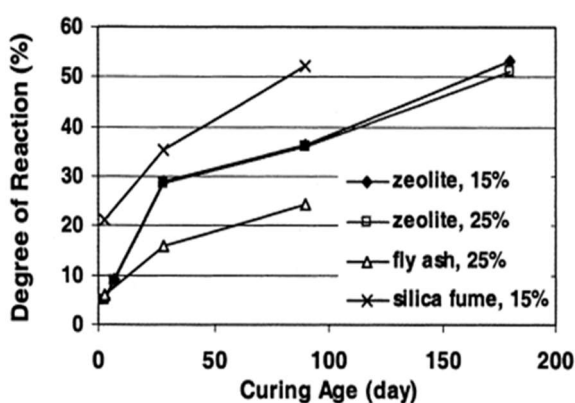


Fig. 2. Comparison of degree of reaction of natural zeolite with fly ash and silica fume.

รูปที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ เถ้าลอย และซิลิกาฟูม แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ (ที่มา : Poon et al., 1999)

Perraki et al. (2003) ได้ศึกษาผลกระทบของซีโอไลต์ธรรมชาติที่นำมาจากพื้นที่ของเขตเมทซาเดส เมืองเทรซ ประเทศกรีซ บนปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ที่นำมาทดสอบ ในส่วนของการทดลองประกอบด้วยสามขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกได้อธิบายลักษณะหน้าที่ของแร่ซีโอไลต์ นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของซีโอไลต์ถูกประเมินผลบนพื้นฐานของ Chapelle test ในขั้นตอนที่สอง เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมรวมกับ 0% 10% 20% และ 30% ต่อน้ำหนักของซีโอไลต์ละเอียดที่จัดเตรียมไว้ เพสต์ถูกบ่มน้ำไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สำหรับ 1 2 7 และ 28 วัน ขั้นตอนสุดท้าย อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลิตภัณฑ์ถูกศึกษาวิจัยโดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และสเปกโทรสโกปีอินฟราเรด (FT-IR) ในการรวมกันด้วย

วิธีการ Thermoanalytical (TG/DTG และการวิเคราะห์ความร้อนที่แตกต่างกัน) เป็นที่สรุปว่าการตรวจสอบซีโอไลต์ส่วนใหญ่ประกอบด้วย “Heulandite type II” และแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดี (0.555 กรัมของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ต่อซีโอไลต์ 1 กรัม ตามผลของ Chapelle test) สังเกตได้จากรูปที่ 2.10 การรวมตัวกันของซีโอไลต์ในซีเมนต์ทำให้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หกคไปในระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์และการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ไฮเดรท

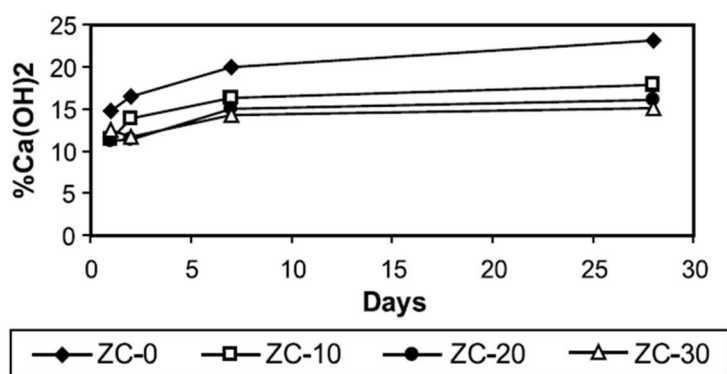


Fig. 4. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content in relation to the zeolite addition and the age of hydration.

รูปที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ แทนวัสดุประสาน ปริมาณต่างๆ (ที่มา : Perraki et al., 2003)

Kocak et al. (2013) ได้ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของซีเมนต์ที่ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ในขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ทางแรธาตุ และคุณสมบัติเชิงโมเลกุลของซีโอไลต์และซีเมนต์ ในขั้นตอนที่สองเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกล และเชิงกายภาพของซีเมนต์ผสมในสัดส่วนปริมาณซีโอไลต์ต่อน้ำหนักที่ 0% 5% 10% 15% และ 20% ต่อมาจะศึกษาอัตราการคายน้ำและการผลิตน้ำของปูนซีเมนต์โดยใช้การเลี้ยวเบนเฉื่อยของรังสี X-ray (XRD) สเปกโทรสโกปีอินฟราเรด (FT-IR) และ Scanning electron microscope (SEM) เป็นเวลา 28 วัน สังเกตได้จากรูปที่ 2.11 ซึ่งโดยสรุปแล้ว การตรวจสอบซีโอไลต์ หลักๆแล้วประกอบไปด้วย Clinoptilolite ซึ่งทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide: $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดขึ้นระหว่างการคายน้ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยซีโอไลต์นั้นมีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกายภาพ และเชิงกลของซีเมนต์ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของซีโอไลต์

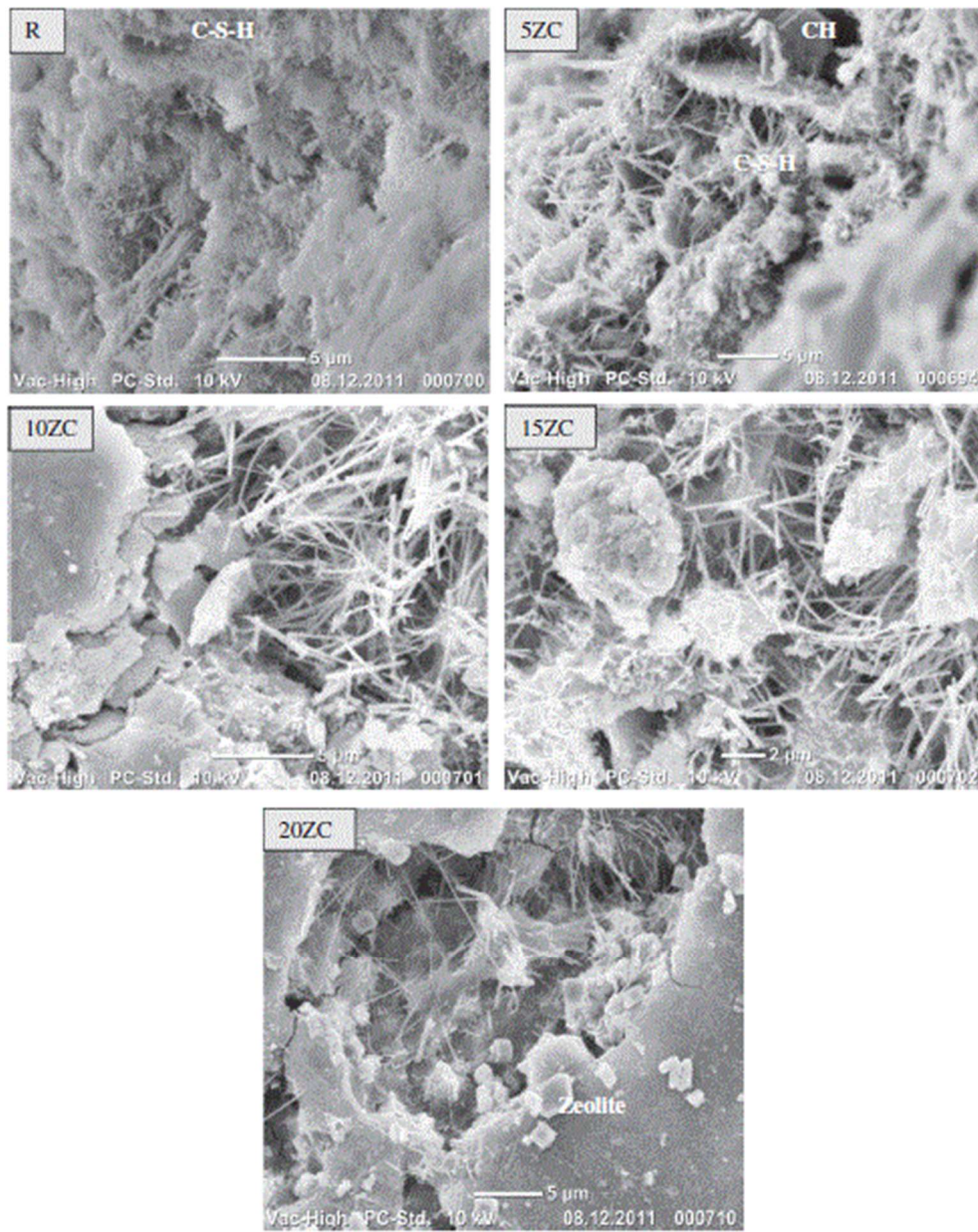


Fig. 8. SEM picture of cement pastes after 28 days of hydration.

รูปที่ 2.11 ลักษณะอนุภาคของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก และ ซีโอไลต์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ (ที่มา : Kocak et al., 2013)

2.1.6.2 กำลังอัดของคอนกรีต

Canpolat et al. (2004) ได้ศึกษาผลของซีโอไลท์ธรรมชาติ เถ้าถ่านหิน และเถ้าลอย เป็นวัสดุที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีคุณสมบัติด้านการเชื่อมประสาน โดยทำการทดสอบที่ส่วนผสมต่างๆ และทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพจากค่าต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว การขยายตัวของปริมาตร กำลังอัด และความชื้นเหลวของมอร์ต้า ดังนั้น คุณสมบัติทางกายภาพดังกล่าวที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลของตัวอย่าง ไม่ได้ใส่วัสดุผสมเพิ่มแล้ว ปรากฏว่าการแทนที่ของวัสดุนั้นมีอิทธิพลบางอย่างต่อคุณสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์ กล่าวคือ กำลังอัดนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาแรก เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของซีโอไลท์ถึงระดับที่ 15 เปอร์เซ็นต์ แต่ปรากฏว่าเกิดการลดลงของค่ากำลังอัดเมื่อใช้ในการผสมกับเถ้าลอย สังเกตได้จากรูปที่ 2.12 เช่นเดียวกัน สำหรับระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลง เมื่อมีการใช้ซีโอไลท์ในการแทนที่ ทั้งนี้ผลการทดลองได้รับการเปรียบเทียบกับ Turkish Standard (TS) และยังทราบว่าค่าต่างๆดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่าความต้องการขั้นต่ำ

Table 4
Compressive strength of cement mixtures

Symbol	Cement mixtures	Compressive strength (N/mm ²)			
		2 days	7 days	28 days	90 days
R	Reference mix	21.2	34.4	45.1	57.6
	PC 42.5	(47)	(76)	(100)	(128)
A ₁	5% Z+	25.2	38.6	52.5	55.7
	95% PC	(56)	(86)	(116)	(124)
A ₂	10% Z+	23.5	36.8	51.3	53.6
	90% PC	(52)	(82)	(114)	(119)
A ₃	15% Z+	22.1	33.5	52.8	56.8
	85% PC	(49)	(74)	(117)	(126)
A ₄	20% Z+	17.8	30.7	54.2	58.5
	80% PC	(39)	(68)	(120)	(130)
A ₅	25% Z+	14.2	25.6	49.8	57.2
	75% PC	(31)	(57)	(110)	(127)
A ₆	30% Z+	13.4	26.8	47.8	58.5
	70% PC	(30)	(59)	(106)	(130)
A ₇	35% Z+	11.7	22.2	46.2	53.5
	65% PC	(26)	(49)	(102)	(119)
B ₁	5% Z+5%	20.8	29.6	49.5	56.2
	FA+90% PC	(46)	(66)	(110)	(125)
B ₂	10% Z+5%	19.4	33.8	51.4	58.7
	FA+85% PC	(43)	(75)	(114)	(130)
B ₃	15% Z+5%	17.8	28.4	51	59.4
	FA+80% PC	(39)	(63)	(113)	(132)
B ₄	20% Z+5%	15.4	26.2	50.8	60.8
	FA+75% PC	(34)	(58)	(113)	(135)
B ₅	25% Z+5%	14.4	27.3	50.8	58.3
	FA+70% PC	(32)	(61)	(113)	(129)
B ₆	30% Z+5%	11.8	24.2	47.6	54.3
	FA+65% PC	(26)	(54)	(106)	(120)
B ₇	35% Z+5%	9.6	23.1	43.3	50.4
	FA+60% PC	(21)	(51)	(96)	(112)
C ₁	5% Z+5%	20.5	33.8	53.6	61.3
	BA+90% PC	(45)	(75)	(119)	(136)
C ₂	10% Z+5%	18.5	33.4	54.1	58.4
	BA+85% PC	(41)	(74)	(120)	(129)
C ₃	15% Z+5%	15.5	29.6	52.7	57.9
	BA+80% PC	(34)	(66)	(117)	(128)
C ₄	20% Z+5%	13.9	26.8	48.9	56.7
	BA+75% PC	(31)	(59)	(108)	(126)
C ₅	25% Z+5%	13.7	26.6	50.2	54.1
	BA+70% PC	(30)	(59)	(111)	(120)
C ₆	30% Z+5%	11.6	24.1	46.8	51.3
	BA+65% PC	(26)	(53)	(104)	(114)
C ₇	35% Z+5%	11.9	21.9	45.6	48.9
	BA+60% PC	(26)	(49)	(101)	(108)
	TS 12142-	≥ 10	-	42.5-	-
	TS 12144			62.5	
	TS 26-	≥ 10	>21.0	>32.5	-
	TS 10156				

Values inside parentheses show the percentages with respect to the 28-day compressive strength of PC 42.5.

รูปที่ 2.12 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ซีโพลีท์
ธรรมชาติ เถ้าถ่านหิน และเถ้าลอยแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ (ที่มา : Canpolat
et al., 2004)

Ikotun และ Ekolu (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพและพฤติกรรมด้านความแข็งแรง และความคงทนของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ (PWC) และสารผสมเพิ่มที่ผสมระหว่างสารที่มีคุณสมบัติเป็นค่าที่ได้รับการคัดเลือกกับซีโอไลท์สังเคราะห์ ในการวิจัยนี้ตัวอย่างคอนกรีตได้ถูกเตรียมโดยการผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ และ/หรือ เถ้าลอย 30% ในส่วนผสมซึ่งซีโอไลท์สังเคราะห์ถูกใช้ที่สัดส่วน 0.6% 0.8% และ 1.0% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.50 นั้นได้ถูกทดสอบความสามารถเท่าใด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าแยก กำลังอัด การซึมผ่านของออกซิเจน การดูดซึมน้ำ และความพรุน พฤติกรรมของรูปแบบการยึดประสานกัน ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน และประสิทธิภาพของสารผสมเพิ่มซีโอไลท์สังเคราะห์ ที่ถูกศึกษาโดยการใช้ Differential thermal analysis และ Thermogravimetric analysis ในปฏิกิริยาปอซโซลาน จากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าซีโอไลท์สังเคราะห์มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังเมื่อใช้สัดส่วนผสมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ที่ 0.6%-1.0% สังเกตได้จากรูปที่ 2.13 ส่วนคุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่ถูกปรับปรุงนั้นไม่ได้คำนึงถึงการใช้ PWC ในสัดส่วนของการผสม ในขณะที่การซึมผ่านของออกซิเจนของคอนกรีตจะถูกปรับปรุงที่การใช้เถ้าลอย 30% เท่านั้น และจะพบว่า ซีโอไลท์สังเคราะห์นั้นมีประสิทธิภาพมากเมื่อใช้ร่วมกับเถ้าลอย

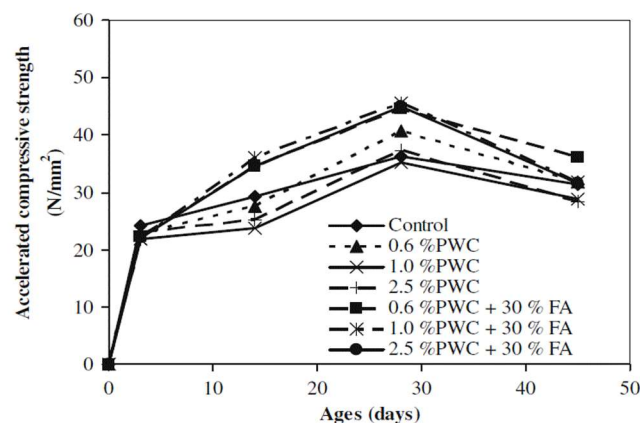


Fig. 9. Accelerated compressive strength against test age of mortar samples cured at 50 °C.

รูปที่ 2.13 กำลังอัดของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์สังเคราะห์ร่วมกับเถ้าลอย แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ (ที่มา : Ikotun และ Ekolu, 2010)

2.1.6.3 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต

Chan and Ji (1999) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลท์ธรรมชาติในการเสริมสร้างประสิทธิภาพให้แก่คอนกรีตโดยการเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูม และเถ้าลอย ชุดแรกของการทดลอง ซีโอไลท์ ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย ทั้งหมดถูกนำมาแทนที่ 5% 10% 15% และ 30% ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก คอนกรีตที่มีน้ำรวมอัตราส่วนวัสดุซีเมนต์ ($W/(C+P)$) ถูกควบคุมที่ 0.28 ผลการศึกษาพบว่า ซีโอไลท์ลดการเยิ้ม น้ำ และเพิ่มความหนืดของคอนกรีตโดยไม่สูญเสียค่า Slump และที่ระดับ 15% ของการแทนที่ มีผลคือเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน 14% โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ใส่วัสดุผสมเพิ่ม ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าซีโอไลท์ช่วยลดการดูดซึมน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ผลการทดสอบจากชุดที่สองของการทดลองที่ใช้ซีโอไลท์ ซิลิกาฟูม และ เถ้าลอย 10% แทนซีเมนต์ในคอนกรีตด้วย $W/(C+P)$ ที่ 0.27-0.45 พบว่าซีโอไลท์ให้ผลดีกว่าเถ้าลอย แต่ด้อยกว่าซิลิกาฟูมในด้านการเพิ่มความกำลังอัด ลดการดูดและการแทรกซึมคลอไรด์ และยังพบว่าเมื่อ $W/(C+P)$ มากกว่า 0.45 ความต้านทานของคอนกรีต ซึ่งรวมเข้ากับซีโอไลท์ หรือเถ้าลอย (ทดแทนโดยตรง) มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ใส่วัสดุผสมเพิ่ม การศึกษาในระดับจุลภาคโครงสร้างบนคอนกรีตกับซีโอไลท์ ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 2.14 พบว่า สารละลายซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สามารถตอบสนองกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เพื่อสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ซีโอไลท์ส่งผลกระทบให้โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์แข็งขึ้นและลดขนาดของรูในคอนกรีต ซึ่งไม่ส่งผลดีให้อยู่ในระดับที่น่าพอใจ ด้วยเหตุนี้ทำให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น

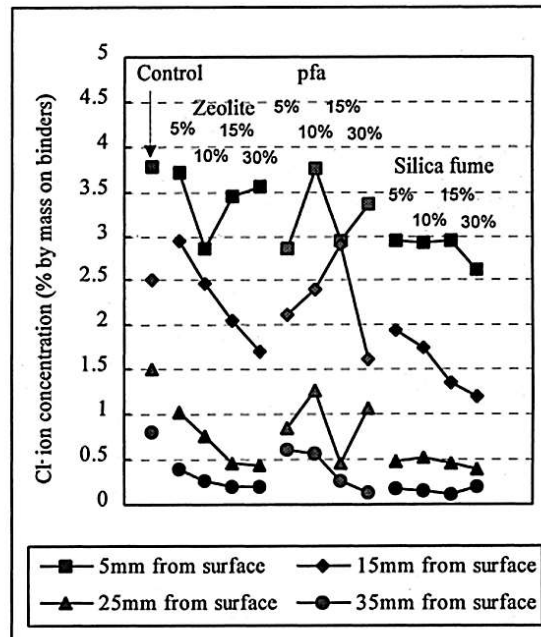


Fig. 2. Chloride contents profile of control zeolite, PFA and silica fume concrete (60-day exposure).

รูปที่ 2.14 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ซีโอไลต์ธรรมชาติ เถ้าลอย และซิลิกาฟุ่มแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ ระยะ 5 15 25 และ 35 มิลลิเมตร ที่วัดจากผิวหน้า (ที่มา : Chan and Ji, 1999)

Najimi et al. (2012) ได้ศึกษาการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural zeolite) เป็นวัสดุประสานเพิ่มเติมในคอนกรีต โดยได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติที่ 15% และ 30% โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมของน้ำ (Water penetration) การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride ion penetration) สังเกตได้จากรูปที่ 2.15 อัตราการเกิดสนิม (Corrosion rate) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) ของคอนกรีต แต่ไม่พบผลที่น่าพอใจต่อการทำลายด้วยกรด กล่าวโดยสรุปสำหรับในทางปฏิบัติแล้วการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ 15% ในคอนกรีต พบว่าเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัด และความคงทนของคอนกรีต

Table 10
Transport properties.

Mixture identification	Water penetration depth (mm)		24 h-Water absorption (%)		Chloride ion penetration (C)	
	28 days	90 days	28 days	90 days	28 days	90 days
NZ0 (control)	15	15	6.88	6.50	6970	6340
NZ15	13	11	7.97	7.95	1914	958
NZ30	9	10	7.75	7.60	572	408

รูปที่ 2.15 การแทรกซึม น้ำ การดูดซับน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ซีโอไลต์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ (ที่มา : Najimi et al., 2012)

Valipour et al. (2013) ได้ศึกษาความแข็งแรงคงทนของโครงสร้างคอนกรีตและอายุการใช้งานนั้นถูกแก้ไขปรับปรุงโดยการนำสารปอซโซลานมาใช้ในวงการอุตสาหกรรม ดังนั้นการใช้สารปอซโซลานชนิดใหม่นี้กลายเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสภาพแวดล้อมที่มีความรุนแรงเป็นพิเศษ ในการศึกษาจะใช้ปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วย 10% 20% และ 30% ของซีโอไลต์ธรรมชาติ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยด้วย 5% 10% และ 15% ของเมทาแคลินและปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วย 5% 7.5% และ 10% ของซิลิกาฟูม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 0.40 0.45 และ 0.50 ซึ่งเปรียบเทียบในเรื่องกำลังอัด ความสามารถในการดูดซึม น้ำ ค่าสภาพดูดซึม ปริมาณช่องว่าง ความต้านทานไฟฟ้า การแทรกซึมของแก๊ส และการแทรกซึมคลอไรด์ จากการทดสอบแสดงว่า โดยทั่วไปซีโอไลต์นั้นจะดีกว่าซิลิกาฟูม และเมทาแคลิน แม้ว่าซีโอไลต์สามารถใช้แทนที่สารปอซโซลานได้เพราะว่ามันมีคุณสมบัติความทนทานที่ดีกว่าและถูกกว่า และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าก็ตาม ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 2.16

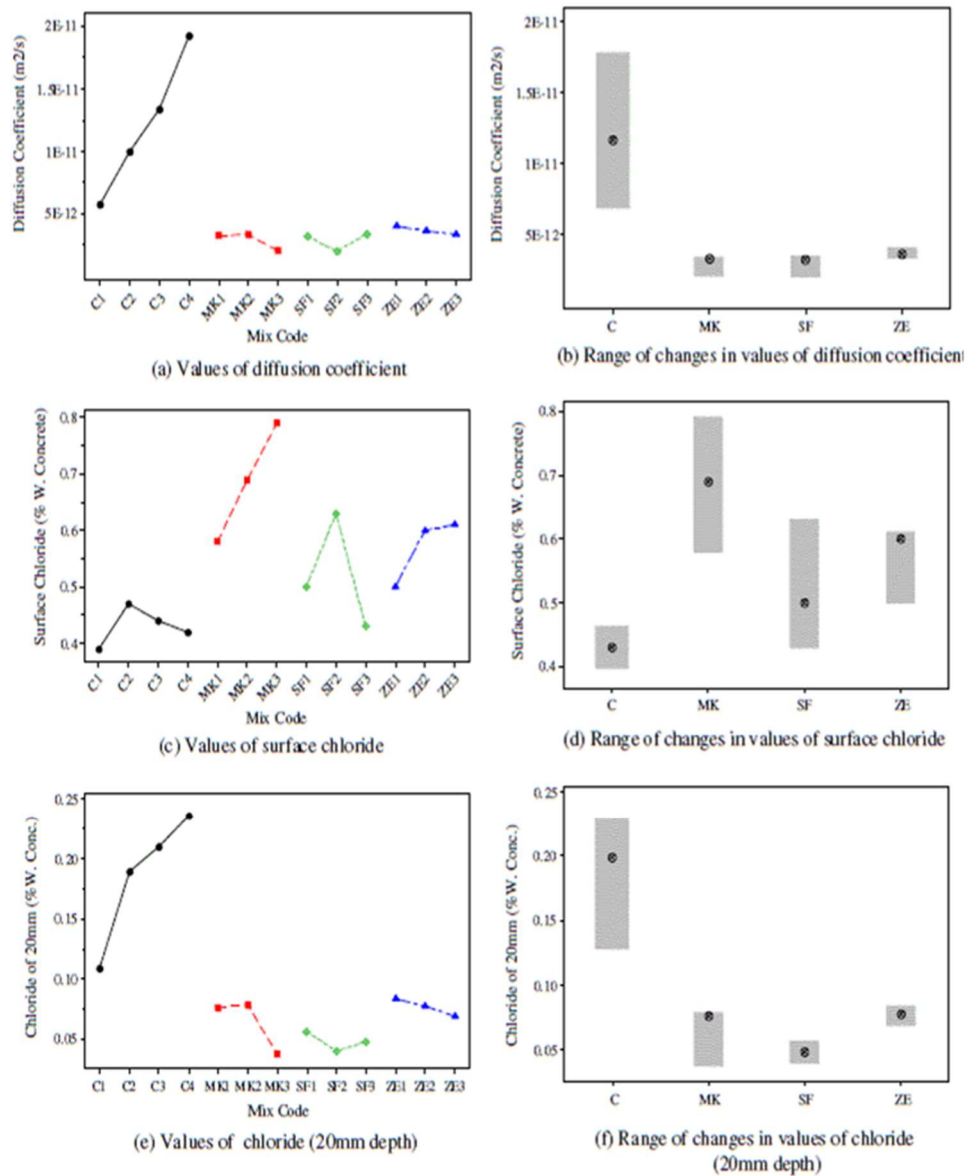


Fig. 7. Results of the diffusion coefficient, surface chloride and chloride at depth of 20 mm.

รูปที่ 2.16 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ซิลิกาฟุ่ม เมทาแคลิน และซีโอไลท์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ (ที่มา : Valipour et al., 2013)

Valipour et al. (2013) ได้ศึกษากระบวนการเสื่อมสภาพ ได้แก่ การแทรกซึมคลอไรด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นที่จะนำไปสู่การเสริมสร้างการกัดกร่อนที่รุนแรงกว่าในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เพื่อปรับปรุงความคงทนและการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตในสภาพแวดล้อม การค้นคว้าวิจัย ในหลายๆแห่งมีใช้สิ่งอื่นนอกจากซิลิกาฟูม และเมทาเคลลิน ในขณะที่ได้รับความสนใจน้อยกว่าที่ได้รับการแนะนำให้รู้จักกับปอซโซลานชนิดใหม่ที่เรียกว่า “ซีโอไลท์ธรรมชาติ” ในงานวิจัยนี้ การทดสอบของคอนกรีตที่มีซีโอไลท์ธรรมชาติ เมทาเคลลิน และซิลิกาฟูม โดยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุที่แตกต่างกันภายใต้ลักษณะการสัมผัสสารต่างๆ ในแง่ของการแทรกซึมคลอไรด์ที่ถูกทดสอบโดยการออกแบบตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (w/b) 0.35 0.40 0.45 และ 0.50 นอกจากนี้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของปอซโซลาน 3 ชนิดที่แตกต่างกัน ได้เตรียมตัวอย่างอื่น ๆ ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุคงที่ 0.40 ที่มี ซีโอไลท์ธรรมชาติ 10% เมทาเคลลิน 5% และ ซิลิกาฟูม 5% ตัวอย่างทั้งหมดถูกควบคุมให้อยู่ในสิ่งแวดล้อมสัมผัส (น้ำขึ้นน้ำลง, คลื่นซัด, อากาศ, ดิน) ผลที่ได้รับจากสถานที่ทดสอบแสดงให้เห็นว่าซีโอไลท์ธรรมชาติแสดงผลที่ดีในแง่ของการปรับปรุงความทนทานของคอนกรีต ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าโซนที่ถูกคลื่นซัดส่งผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตอย่างรุนแรงกว่าโซนน้ำขึ้นน้ำลง ดังเกิดได้จากรูปที่ 2.17

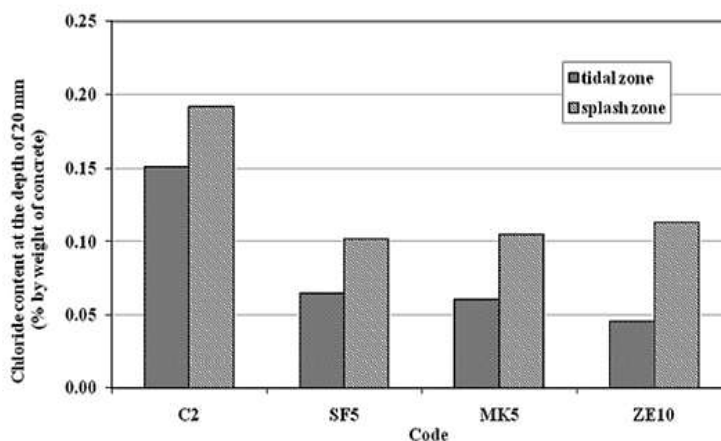


Fig. 6. Chloride content at a depth of 20 mm for control and pozzolan-containing concretes in tidal and splash zones.

รูปที่ 2.17 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ซิลิกาฟูม เมทาเคลลิน และซีโอไลท์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ (ที่มา : Valipour et al., 2013)

2.1.6.4 การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาของซิลิกา

Quanlin และ Naiqian (2005) ได้ศึกษาผลกระทบของซีโอไลต์สังเคราะห์ (Modified zeolite, MZ) บนการขยายตัวของปฏิกิริยาซิลิกาอัลคาไลน์ (Alkaline silica reaction, ASR) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างซีโอไลต์สังเคราะห์และแร่ผสมอื่นๆ ได้แก่ เถ้าลอย และ เถ้าก้นเตาโดยสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM C441 แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์สังเคราะห์มาจากการแช่ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural zeolite, NZ) ในสารละลาย 2 N NH_4Cl อาจลดความเข้มข้นของอัลคาไลน์ที่ละลายน้ำได้ในโพรงอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นอัลคาไลน์ที่อาจมีการแลกเปลี่ยนโดยมี NH_4^+ ในซีโอไลต์สังเคราะห์ด้วยการสร้าง $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ผลที่ได้คือ การควบคุมการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาซิลิกาอัลคาไลน์ ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C441 วันที่ 14 ของการทดสอบการขยายตัว ตัวอย่างที่ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ 5% เกิดการขยายตัวน้อยกว่า 0.1% สังเกตได้จากรูปที่ 2.18 ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตามีประสิทธิภาพเดียวกันอยู่ที่ประมาณ 25% และ 40% ตามลำดับ คุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์ที่ผสมซีโอไลต์สังเคราะห์ 5% ได้แก่ ความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาแข็งตัว ความต้านทานแรงคัด และกำลังอัดนั้นผ่านมาตรฐานของประเทศจีน

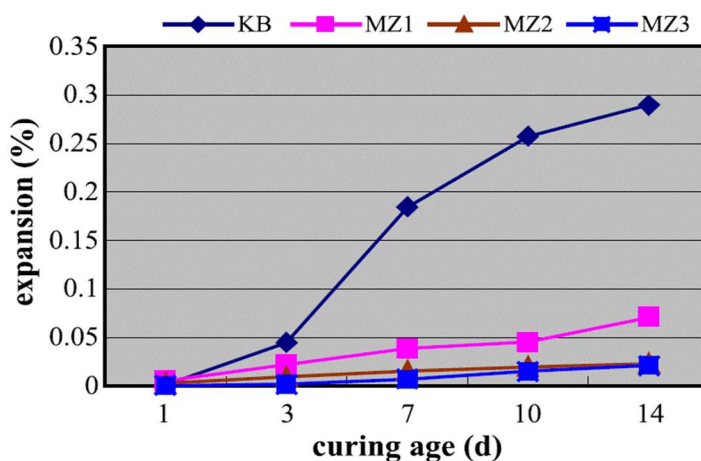


Fig. 4. Effect of modified zeolite on ASR expansion.

รูปที่ 2.18 การขยายตัวของมอร์ต้าเนื่องจากปฏิกิริยาซิลิกาอัลคาไลน์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก และซีโอไลต์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ (ที่มา : Quanlin และ Naiqian, 2005)

Ahmadi และ Shekarchi (2010) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของคอนกรีต โดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบซีโอล์ไลท์ธรรมชาติ กับสารปอซโซลานอื่นๆ ซึ่งการศึกษาประกอบด้วย 3 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานของซีโอล์ไลท์ธรรมชาติ และซิลิกาฟูมด้วยวิธี Themogravimetric ในกรณีนี้ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าซีโอล์ไลท์ธรรมชาติ ไม่ได้มีปฏิกิริยาเช่นเดียวกับซิลิกาฟูม แต่ซีโอล์ไลท์ธรรมชาตินั้นก็ได้แสดงให้เห็นว่ามันเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดีเช่นกัน ในส่วนที่สองซีโอล์ไลท์ธรรมชาติ และซิลิกาฟูมถูกนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ส่วนผสมต่างกัน แล้วจึงทำการทดสอบทางกายภาพหลายๆอย่าง รวมถึงความคงทนของคอนกรีต ซึ่งการศึกษาทดลองประกอบด้วย การหาค่าการไหลแผ่ กำลังอัด การดูดซึมน้ำ การซึมผ่านของออกซิเจน การแทรกซึมคลอไรด์ และความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต จากผลการทดลองดังกล่าว ทำให้ทราบว่า คอนกรีตผสมซีโอล์ไลท์ธรรมชาติที่ได้รับการปรับปรุงส่วนผสมแล้วนั้น ในบางกรณี จะมีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือดีกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม และสุดท้าย การศึกษาเปรียบเทียบผลของการขยายตัวสูงสุดของปฏิกิริยา Alkali-Silica Reaction (ASR) ในมอร์ต้าที่ผสมซีโอล์ไลท์ธรรมชาติ และเถ้าลอย ซึ่งการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1260 และ ASTM C 1567 การทดสอบการขยายตัวของมอร์ต้าทรงปริซึมแสดงให้เห็นว่า ซีโอล์ไลท์ธรรมชาติมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเถ้าลอยในการป้องกันอันตรายจากการขยายตัวอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของ Alkali-Silica Reaction สังเกตได้จากรูปที่ 2.19

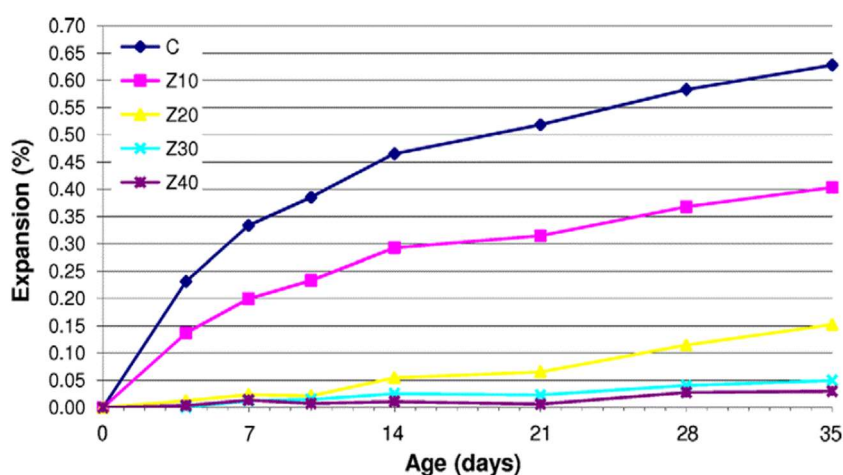


Fig. 6. Expansion of mortar bars made with zeolite versus time.

รูปที่ 2.19 การขยายตัวของมอร์ต้าเนื่องมาจากปฏิกิริยาซิลิกาอัลคาไลน์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก และซีโอล์ไลท์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ (ที่มา : Ahmadi และ Shekarchi, 2010)

2.1.6.5 การใช้เป็นวัสดุบ่มภายในของคอนกรีต

Ghourchian et al. (2013) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของ LECA (Lightweight expanded clay aggregate) และซีโอไลท์ธรรมชาติจากประเทศอิหร่าน โดยใช้แทนมวลรวมสำหรับการบ่มภายในของคอนกรีต ส่วนแรกได้ทำการพิจารณาโครงสร้าง ทดสอบการดูดซึมน้ำและการคายน้ำ ในส่วนที่สองได้ทดสอบประสิทธิภาพของการบ่มภายในของมอร์ตาร์ที่รวมเข้ากับมวลรวมที่มีรูพรุน ผลที่ได้ตรงกันข้ามกับ LECA มวลรวมซีโอไลท์ที่ใช้ทดสอบในการวิจัยนี้ไม่มีประสิทธิภาพในการบ่มภายใน ขณะที่ LECA แสดงถึงค่าการดูดซึมน้ำที่สูงและสามารถปล่อยน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงได้ มวลรวมซีโอไลท์ส่วนใหญ่ดูดซึมน้ำภายในรูที่มีขนาดนาโนเมตรและเก็บรักษาน้ำไว้ให้ลดลงสู่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ สมรรถภาพของมวลรวมที่มีรูพรุนที่ใช้ในการบ่มภายในจะเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับ โครงสร้างจุลภาคภายใน และคุณสมบัติการคายออก โดยมวลรวมซีโอไลท์ทำงานได้ไม่ดีในช่วงต้นของการบรรเทาการหดตัว

2.1.6.6 การใช้ในคอนกรีตคุณสมบัติพิเศษ

Ranjbar et al. (2013) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตไหลเข้าแบบได้เอง (Self-compacting concrete, SCC) ที่ผสมซีโอไลท์ธรรมชาติทั้งที่อยู่ในสถานะคอนกรีตสด และแข็งตัว ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตนั้นได้ผสมซีโอไลท์ธรรมชาติ (0-20%โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด พิจารณาค่าการไหลแผ่ (Visual stability index , VSI) T_{50} V-funnel และ L-box ทั้งนี้ยังได้ทำการพิจารณาค่าการไหลแผ่ และค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาต่างๆด้วย และในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วพิจารณาจากกำลังอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าแยก (Ultrasonic pulse velocity, UPV) ความสามารถในการดูดซึมน้ำขึ้นต้นและขั้นสุดท้าย จากการทดลอง การผสมกันระหว่างคอนกรีตไหลเข้าแบบได้เอง และซีโอไลท์ธรรมชาตินั้นได้ผลการทดลองที่น่าพอใจในด้านของความสามารถในการไหล ความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางและความหนืด สังกัดได้จากรูปที่ 2.20 และสำหรับส่วนผสมทั้งหมด การไหลแผ่นั้นสูญเสียตามเวลาที่ผ่านไป อย่างไรก็ตาม อัตราการลดลงของค่าการไหลแผ่จะมีค่าสูงในส่วนผสมที่มีปริมาณซีโอไลท์ธรรมชาติมากขึ้น ในส่วนคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วนั้น ผลของคอนกรีตไหลเข้าแบบได้เองที่ผสมซีโอไลท์ธรรมชาติที่มีต่อกำลังอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าแยก โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน ยิ่งไปกว่านั้นกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจะพบได้ในส่วนผสมที่มีค่าการไหลแผ่สูงกว่า 55 ซม. โดยที่ยืดเวลาการผสมออกไป ในส่วนของค่า Ultrasonic pulse velocity นั้นแสดงให้เห็นว่า ซีโอไลท์ธรรมชาติมีผลต่อค่า Ultrasonic pulse velocity โดยค่าของกำลังอัดจะสูงขึ้น

เล็กน้อย และการเปรียบเทียบคอนกรีตไหลเข้าแบบได้เองที่ส่วนผสมต่างๆ พบว่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตไหลเข้าแบบได้เองที่ผสมซีโอไลท์ธรรมชาติลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น

Table 2
Mix details of NZ concrete.

Mix group	Mix. ID	Cement (kg/m ³)	NZ		Water (kg/m ³)	W/B	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	HRWR (kg/m ³)	VMA (kg/m ³)
			(%)	(kg/m ³)						
G1	SCCH	445.0	0	0	198	0.45	915	810	1.28	0.8
	SCCH5	422.8	5	22.2	198	0.45	905	810	2.15	-
	SCCH10	400.5	10	44.5	198	0.45	900	810	3.12	-
	SCCH15	378.3	15	66.7	198	0.45	890	810	4.78	-
	SCCH20	356	20	89	198	0.45	890	800	4.78	-
G2	SCCL	470.0	0	0	179	0.38	937	810	2.85	1.24
	SCCL5	446.5	5	23.5	179	0.38	944	800	3.55	-
	SCCL10	423.0	10	47.0	179	0.38	951	780	4.07	-
	SCCL15	399.5	15	70.5	179	0.38	957	771	5.71	-
	SCCL20	376.0	20	94.0	179	0.38	957	760	8.57	-

ก) ส่วนผสมคอนกรีต

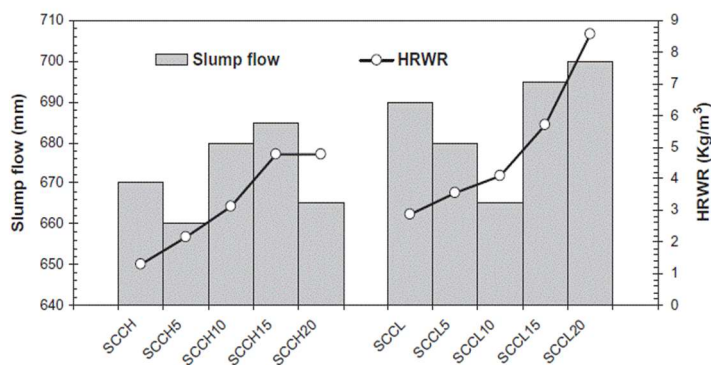


Fig. 1. The effect of NZ on the slump flow and HRWR content.

ข) การไหลแผ่ของคอนกรีต

รูปที่ 2.20 การไหลแผ่ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก และซีโอไลท์ธรรมชาติแทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ (ที่มา : Ranjbar et al., 2013)

Sabet et al. (2013) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลท์ธรรมชาติ ซิลิกาฟูม ถ้ำลอยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตคอนกรีตสมรรถนะสูง (High performance concrete, HPC) และคอนกรีตไหลเข้าแบบได้เอง (Self-consolidating concrete, SCC) ในสภาวะคอนกรีตสด และแข็งตัว ซึ่งทุกส่วนผสมได้ทำการวัดค่าต่างๆ ได้แก่ ค่าการไหลแผ่ ปริมาณที่เหมาะสม กำลังอัด ความต้านทานไฟฟ้า การดูดซึมน้ำ และการแทรกซึมของคลอไรด์ ซึ่งผลลัพธ์ของการทดลองบ่งชี้ว่าโดยรวมแล้วส่วนผสมเพิ่มโดยทั่วไปได้ปรับปรุงคุณลักษณะเชิงกล และความคงทนของส่วนผสมคอนกรีต อย่างไรก็ตามซิลิกาฟูมก็มีประสิทธิภาพมากกว่าซีโอไลท์ธรรมชาติ และถ้ำลอยในด้านการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความคงทนอยู่เล็กน้อย ในขณะที่ซีโอไลท์ธรรมชาติมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกันทางด้านราคา

2.2 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต

2.2.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์ เป็นสารที่สามารถพบอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป ด้วยความเข้มข้นต่างๆกัน คลอไรด์นั้นแปรผันตามปริมาณเกลือแร่ที่เพิ่มขึ้น น้ำธรรมชาติตามภูเขา หรือในพื้นที่สูงจะมีคลอไรด์น้อย ขณะที่น้ำในแม่น้ำและน้ำใต้ดินมีคลอไรด์สูง และน้ำในทะเลจะมีปริมาณคลอไรด์อยู่ในปริมาณสูงมาก เพราะเป็นแหล่งรวมของน้ำจากที่ต่างๆ และมีการระเหยของน้ำตลอดเวลาจึงเกิดตะกอนเกลือปริมาณมาก

น้ำในธรรมชาติได้รับคลอไรด์เพิ่มขึ้นได้หลายทาง เนื่องจากความสามารถในการละลายของน้ำทำให้สามารถละลายคลอไรด์จากชั้นดินต่างๆ ละอองน้ำจากมหาสมุทรถูกพัดเข้ามาสู่แผ่นดินในสภาพของหยดน้ำเล็กๆ ซึ่งมีเกลืออยู่ ปัจจุบันเหล่านี้เป็นตัวทำให้ปริมาณคลอไรด์บนพื้นดินสูงขึ้น

น้ำจากทะเลและมหาสมุทรไหลขึ้นตามลำน้ำที่ไหลทอดตัวลงสู่มหาสมุทรได้โดยเฉพาะในแม่น้ำที่มีความลึกมากๆ น้ำทะเลมีความหนาแน่นมากกว่าจะไหลทวนน้ำในแม่น้ำขึ้นมาภายใต้ น้ำจืดที่ไหลลงทะเลจึงเกิดการผสมกันระหว่างน้ำทะเลกับน้ำจืด

น้ำใต้ดินที่อยู่บริเวณใกล้ๆ กับทะเลและมหาสมุทร จะมีแรงดันของน้ำเท่ากับน้ำทะเลแต่ถ้ามีการดูดเอาน้ำใต้ดินมาใช้ในปริมาณที่มากเกินไปแล้ว จะเกิดความแตกต่างของ Hydrostatic head ทำให้น้ำทะเลมีความดันมากกว่าก็จะไหลขึ้นสู่น้ำจืด

สิ่งขับถ่ายของมนุษย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ ปัสสาวะจะมีคลอไรด์อยู่ในปริมาณเท่ากับคลอไรด์ที่บริโภคเข้าไปกับอาหารและน้ำซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 6 กรัมของคลอไรด์ต่อคนต่อวัน ซึ่งจะทำให้น้ำในแม่น้ำลำธารมีปริมาณคลอไรด์สูงขึ้นด้วย น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมก็เป็นอีกแหล่งหนึ่งที่มีคลอไรด์ในปริมาณสูง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมการปนเปื้อนของน้ำผิวดินจากคลอไรด์ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ

คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) กล่าวว่า คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่นในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือที่ปนเปื้อนมากับหิน ทราช (โดยเฉพาะทราชที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล) รวมถึงมีแหล่งที่มาจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากมาจากสภาพแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงของการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็ง (De-icing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบที่รุนแรงต่อโครงสร้างนั้นมาจากน้ำทะเล ซึ่งสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้ว่าคลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้า

ไปในคอนกรีตได้ แต่เนื่องจากไม่มีปริมาณของออกซิเจนที่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็จะไม่เกิดขึ้น

CPAC (2543) กล่าวว่า โดยทั่วไปแล้วเราทราบว่าปริมาณของคลอไรด์มีมากในน้ำทะเล คือมีประมาณ 90% ซึ่งสารประกอบต่างๆของคลอไรด์ในน้ำทะเลประกอบด้วย เกลือของคลอไรด์ ในรูปของสารประกอบ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประมาณ 27,000 ppm. แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ประมาณ 3,200 ppm. และแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ประมาณ 500 ppm.

2.2.2 ประเภทของคลอไรด์

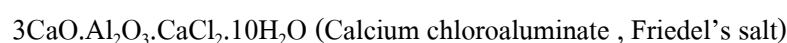
คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) กล่าวว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อของคอนกรีต (Total chloride) นั้น เป็นผลรวมของคลอไรด์ในสองประเภทคือ

2.2.2.1 คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chlorides)

หมายถึง คลอไรด์ (ในบางส่วน) ส่วนที่ถูกจับยึดอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปในรูปของ Calcium chloro-aluminate hydrate (Friedel's salt) หรือถูกดูดซับด้วยผิวของ Gel pores ซึ่งคลอไรด์ในส่วนนี้จะไม่ผลต่อกระบวนการเกิดสนิมและมีความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ (Chloride binding capacity) การยึดจับคลอไรด์แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.2.2.1.1 การยึดจับโดยวัสดุประสาน (Cementitious materials)

- คลอไรด์ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางเคมีกลายเป็นส่วนหนึ่งของผลผลิตจากปฏิกิริยาซึ่งอยู่ในรูปของ



และ $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Calcium chloroferrite)

- คลอไรด์ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพไว้ที่ผิวของผลผลิตไฮเดรชันและปอซโซลานิกซึ่งจะยึดจับที่บริเวณผนังในรูโพรงของคอนกรีต ได้แก่



และ C-S-H และ CAH จากปฏิกิริยาปอซโซลาน

- คลอไรด์ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพไว้ที่ผิวของผลผลิตไฮเดรชันอื่นๆ เช่น โมโนซัลเฟต (Monosulfate) และ เอททริงไท์ (Ettringite) เป็นต้น

2.2.2.1.2 การยึดจับโดยวัสดุเฉื่อย (Non-reactive materials)

เช่น มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ ฝุ่นหินปูน ซึ่งจะยึดจับคลอไรด์ที่บริเวณผิวของคอนกรีต เป็นต้น

2.2.2.2 คลอไรด์อิสระ (Free chloride)

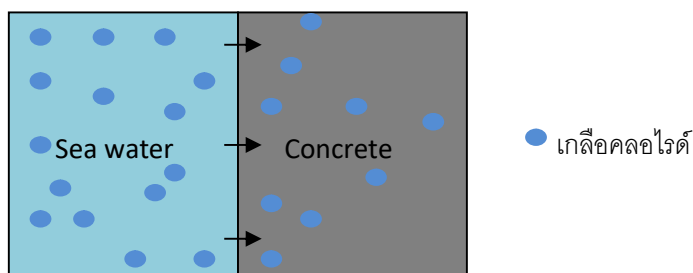
หมายถึง คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์ในส่วนนี้สามารถที่จะแพร่เข้าไปยังคอนกรีต ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง ดังนั้นหากเราสามารถจับยึดคลอไรด์ในส่วนนี้ไว้ได้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถช่วยยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ คลอไรด์อิสระนี้จะทำอันตรายต่อเหล็กเสริม

2.2.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

เนื่องจากคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำทะเล จึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีตโดยมีผลกระทบทั้งทางตรง และทางอ้อม ซึ่งทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสื่อมสภาพลง โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของการซึมผ่านของคลอไรด์ นั้นสามารถแบ่งออกได้ใน 4 กลไกดังนี้

2.2.3.1 การแพร่กระจาย (Diffusion)

กลไกนี้มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์เข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อิ่มตัว แรงขับเคลื่อนของเกลือคลอไรด์ในกลไกนี้เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ กล่าวคือ ความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตน้อย คลอไรด์จะแพร่กระจายจากบริเวณที่มีคลอไรด์มาก ไปสู่บริเวณที่มีคลอไรด์น้อยเสมอ แสดงดังรูป 2.21 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎข้อที่หนึ่งและสองของฟิค แสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.3 ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือคลอไรด์ทั้งหมด



รูปที่ 2.21 การแพร่ของเกลือคลอไรด์สู่คอนกรีต

คลอไรด์อิสระ (Free chloride) เคลื่อนที่ด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นคลอไรด์ (Concentration gradient) ตามกฎข้อที่หนึ่งของฟิค (Fick's 1st law of diffusion)

$$F_c(x) = -D_a \frac{\partial C_{\text{free}}(x)}{\partial x} \quad (2.1)$$

ใช้หลักการ mass conservation จะได้

$$\frac{\partial C_{\text{total}}}{\partial t} = \frac{\partial F_c}{\partial x} \quad (2.2)$$

แทนสมการที่ 2.1 ลงในสมการที่ 2.2 จะได้ Fick's 2nd law of diffusion ดังสมการที่ 2.3

$$\frac{\partial C_{\text{total}}(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_{\text{free}}(x,t)}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

โดย $\partial C_{\text{total}}(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

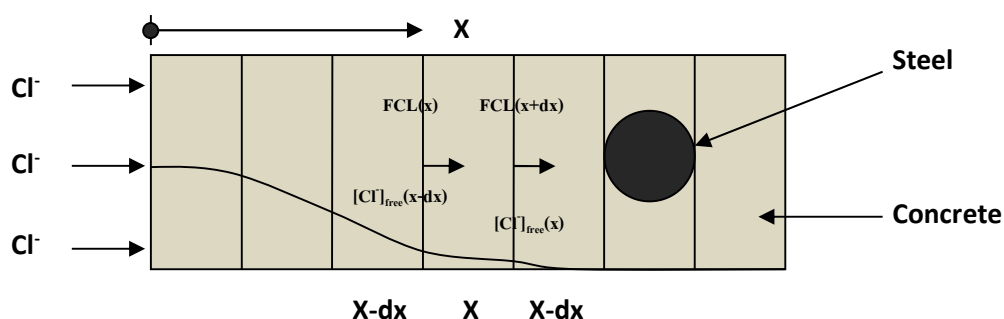
$\partial C_{\text{free}}(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะ x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.²/ปี)

X คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)

t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

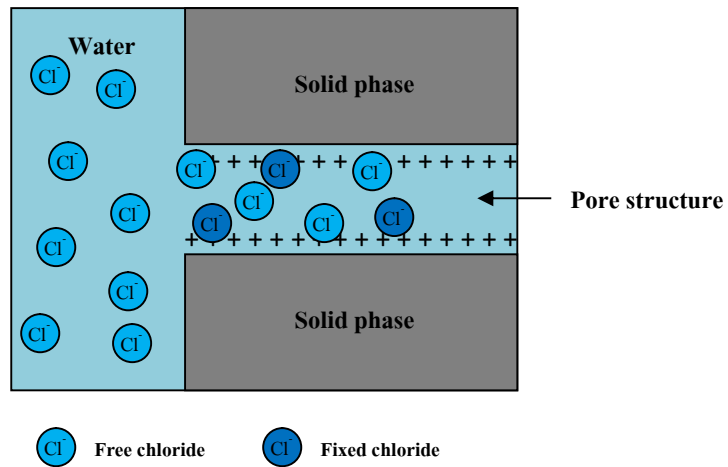
และปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทาง ณ เวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก

2.2.3.2 การดึงดูดไอออน (Ion adsorption)

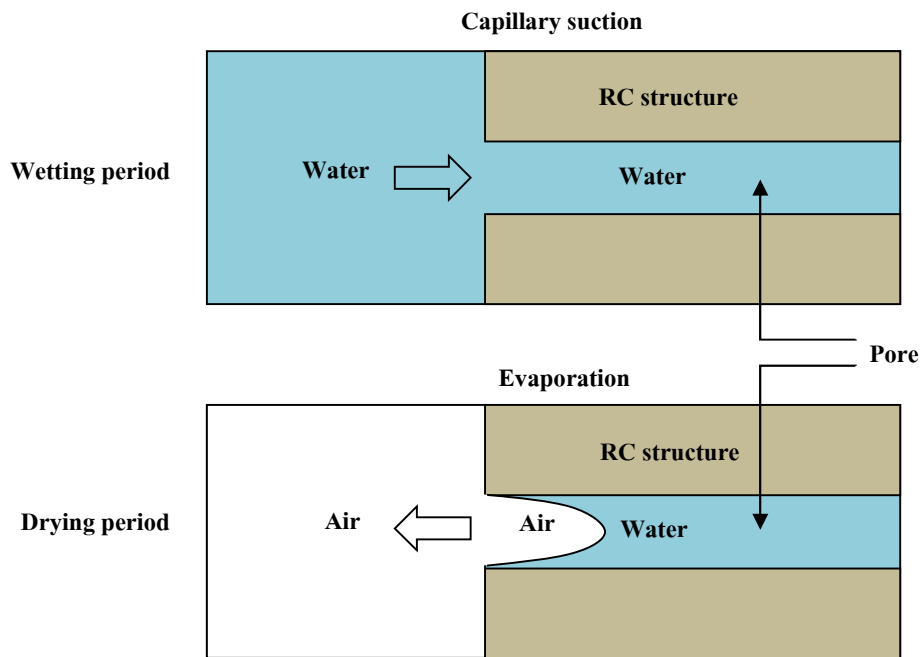
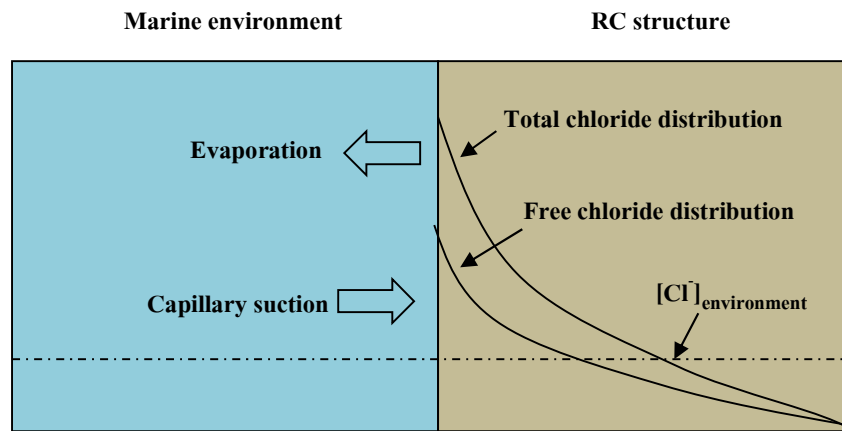
เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า (หรือปริมาณของไอออน) ในคอนกรีตกับคลอไรด์ไอออนหรือเรียกว่า การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลาพบว่า ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงกว่า ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการแพร่ได้ เพราะการแพร่ยุติลงเมื่อความเข้มข้นคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนสูงขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีตดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีต และสะสมอยู่ในบริเวณนั้น แสดงดังรูป 2.23



รูปที่ 2.23 การดึงคลอไดออนคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

2.2.3.3 การดึงดูดคาพิลลารี (Capillary suction)

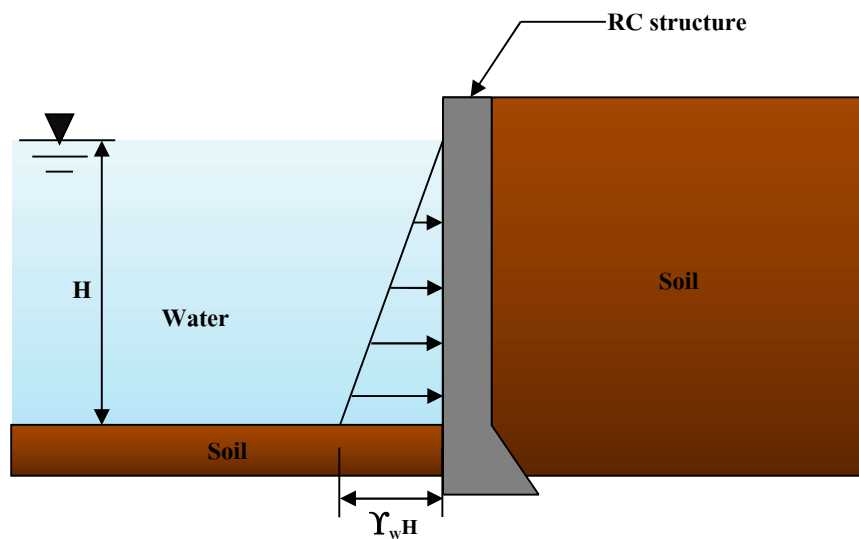
เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งในคอนกรีตซึ่งนำไปสู่กระบวนการดึงดูดคาพิลลารี (Capillary Suction) นั่นเอง โดยการดึงดูดแบบคาพิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงเล็กๆที่แห้งในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเล สภาวะเปียกสลับแห้ง (Wet-dry cycle) เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แล้วถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล จากนั้นน้ำทะเลถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่เล็กๆที่แห้งที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การดึงดูดคลอไรด์แบบคาพิลลารีเข้าสู่คอนกรีต

2.2.3.4 การซึมผ่าน (Permeability)

โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำเช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่าง Hydraulic head ซึ่ง Hydraulic head มีระดับความลึกมาก ทำให้มี Hydraulic pressure สูงทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ อีออนสามารถซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำ



รูปที่ 2.25 การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตโดยความดันของน้ำ

2.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตมีผลต่อปริมาณคลอไรด์ที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีต โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ ได้แก่

2.2.4.1 ชนิดของปูนซีเมนต์และคุณภาพของคอนกรีต

Soroka (1993) กล่าวว่า คลอไรด์บางส่วนถูกกักกัน หรือดูดกลืน โดยผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นการดูดกลืนที่ผิวหรือไม่ แต่คลอไรด์จะเข้ามารวมกับ สารผลิตภัณฑ์ ของ C_3A เกือบทั้งหมดกลายเป็นเกลือฟรีเดิล (Friedel's Salt) ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) หรือสารละลายมีความเข้มข้นสูง จะเกิดแคลเซียมออกไซด์คลอไรด์ ($CaO \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ด้วย ความสามารถในการกักเก็บปริมาณคลอไรด์ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จะขึ้นอยู่กับปริมาณ C_3A ยิ่งมีปริมาณ C_3A มาก ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ก็มากตามไปด้วย ดังนั้นถ้าปูนซีเมนต์มีความสามารถกักเก็บมากเท่าไรก็ย่อมจะทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตได้ช้าลงไปเท่านั้น และจะทำให้ช่วงเริ่มต้น (Initial period) ของการกัดกร่อนช้าออกไปอีก Soroka (1993) อ้างจาก Rasheeduzzafar et al., (1990) แสดงผลเนื่องจากปริมาณของ C_3A ต่อช่วงเริ่มต้นได้และในที่นี่สามารถสรุปต่อไปได้อีกว่า ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาที่มี C_3A สูงกว่าย่อมดีกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต

Kayyali et al. (1988) กล่าวว่า คอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมที่มีเกลือคลอไรด์ต้องการระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตที่มากเพียงพอ เนื่องจากการบ่มคอนกรีตที่นานเพียงพอทำให้โครงสร้างของโพรงช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีตมีขนาดเล็ก และส่งผลทำให้การแพร่ของคลอไรด์ในเนื้อของคอนกรีตเกิดขึ้นได้ยาก

Bakker (1988) ส่วนประกอบของคอนกรีตและอุณหภูมิที่ใช้บ่มมีความสำคัญกับโครงสร้างโพรงของคอนกรีต เมื่อเพิ่มระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง ซึ่งเป็นจริงเมื่อคอนกรีตไม่มีการสูญเสียไอน้ำเท่านั้น หากสูญเสียไอน้ำ ระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชันเปลี่ยนไปตามระยะจากผิว เนื่องจากการลดลงของความชื้น ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านเพิ่มขึ้น หากบ่มคอนกรีตไว้นาน การแทรกซึมของคลอไรด์จะลดลง นอกจากนี้หากการทำให้คอนกรีตแน่นไม่เพียงพอ การแทรกซึมของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้น

2.2.4.2 อัตราส่วนของ น้ำต่อซีเมนต์ (w/c)

Bakker (1988) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และประเภทของปูนซีเมนต์ จะเป็นตัวบอกคุณภาพด้านความซึมผ่านได้ต่ำของคอนกรีต คุณภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับทำให้คอนกรีตแน่นและเนื่องไขการบ่มความซึมผ่านได้สำหรับคลอไรด์ของคอนกรีตผสมสารปอซโซลานิกที่บ่มอย่างดีจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมสารปอซโซลานิกที่มีส่วนผสมเหมือนกัน และพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต ซึ่งมี C_3A ต่ำ ให้ค่าต่อการต้านทานการแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

2.2.4.3 ความเป็นกรด-ด่าง

น้ำทะเลปกติมีค่า PH ประมาณ 7.8 – 8.1 แต่ถ้าในอ่าวหรือท่าเทียบเรือ น้ำทะเลจะมีค่า PH เหลือประมาณ 7 เนื่องจากบริเวณนี้มักมีสิ่งมีชีวิตที่สามารถสร้างไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ ซึ่งส่งผลให้การกัดกร่อนสูงขึ้น (ศิริพร คาววิเศษ เรียบเรียงจาก Gary N. Kirby ,1995)

2.2.4.4 ปริมาณออกซิเจน

การกัดกร่อนบริเวณที่ทะเลราบเรียบ จะกัดกร่อนเสียหายน้อยกว่าบริเวณทะเลที่มีคลื่น เนื่องจากทะเลที่มีคลื่นเป็นการเติมออกซิเจนตลอดเวลา ทำให้มีออกซิเจนในน้ำมาก อัตราการกัดกร่อนจึงสูงขึ้น น้ำในทะเลที่มีเกลือละลายอยู่อย่างอิมตัวจะกัดกร่อนน้อย เนื่องจากออกซิเจนจะละลายในน้ำนั้นได้น้อยลง

2.2.4.5 อุณหภูมิ

น้ำที่มีปริมาณคลอไรด์ต่ำเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นออกซิเจนจะละลายน้ำได้น้อยลงทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง แต่น้ำที่มีปริมาณคลอไรด์สูงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการกัดกร่อนไม่ลดลงแม้ออกซิเจนในน้ำนั้นจะลดลงก็ตาม

2.2.4.6 ความทึบน้ำ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ และใช้วัสดุปอซโซลานิกเป็นวัสดุผสมเพิ่ม จะช่วยให้ช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน (Interconnected void) ลดลง คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น การซึมผ่านของคลอไรด์ ซัลเฟต ความชื้น และออกซิเจนลดน้อยลง

2.2.5 กระบวนการเกิดความเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่มีสาเหตุมาจากเกลือคลอไรด์

โดยหลักการแล้ว การเสื่อมสภาพที่มีสาเหตุมาจากเกลือคลอไรด์นั้นเกิดจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสำคัญ กล่าวคือ เมื่อมีการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์เข้าไปในเนื้อของคอนกรีต จนกระทั่งบริเวณผิวเหล็กเสริมมีปริมาณเกลือคลอไรด์ถึงปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ส่งผลให้ Passive film ที่เคลือบผิวเหล็กเสริมถูกทำลาย ร่วมกับเหล็กเสริมได้สัมผัสกับความชื้นและออกซิเจน จึงเกิดสนิมของเหล็กเสริมขึ้น เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมแล้วจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กนั้นมีปริมาตรมากกว่าเนื้อเหล็กเดิมถึง 6 เท่า และเมื่อแรงดันที่เกิดจากสนิมเหล็กนั้นมีค่ามากกว่าแรงดันที่คอนกรีตสามารถรับได้ ก็ทำให้คอนกรีตเกิดการกะเทาะ แตกร้าว และหลุดร่อนในที่สุด

ดังนั้น การใช้วิธีใดๆก็ตามเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพแก่คอนกรีต ที่ส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ได้ จะส่งผลดีต่อการป้องกันการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่มีสาเหตุมาจากเกลือคลอไรด์

2.2.6 ผลของการกัดกร่อนหรือทำลายด้วยคลอไรด์

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2543) กล่าวว่า ผลกระทบโดยรวมจากการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์ซึ่งได้กล่าวมาแล้วคือ กำลังรับแรงต่างๆของคอนกรีตโดยรวมลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางด้านความต้านทานความล้า (Fatigue strength) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย รวมถึงความยืดหยุ่น (Stiffness) ก็ลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่ผลข้างเคียงจากการทำลายโดยกระบวนการดังกล่าวคือการแตกร้าวของคอนกรีต เป็นส่วนหนึ่งซึ่งช่วยเร่งให้น้ำและออกซิเจนสามารถเข้าถึงบริเวณผิวของเหล็กเสริมได้เร็วและมากขึ้น ซึ่งยังส่งผลให้มีการเร่งการเกิดของสนิมเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ทำการทดสอบกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 และใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 0 1 3 5 และ 10 โดยปริมาณซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ใส่แทนที่ปริมาณวัสดุประสาน ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้อัตราส่วนการแทนที่โดยน้ำหนัก

สำหรับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ทดสอบคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน

ส่วนการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm โดยในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งนั้น ทดสอบคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน และในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ ทดสอบคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันแล้วแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 อีก 28 วัน

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้

3.1.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

ในการทดลองได้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย มอก. 15-2532 แสดงดังรูปที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 3.1 และลักษณะอนุภาคแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.1.2 ซีโอไลท์สังเคราะห์ (Synthetic zeolite)

ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลท์สังเคราะห์มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว แสดงดังรูปที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 3.1 และลักษณะอนุภาคแสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเห็นได้ว่าซีโอไลท์สังเคราะห์มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อเทียบที่กำลังขยายเท่ากัน



รูปที่ 3.2 ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลท์สังเคราะห์

3.1.1.3 มวลรวมหยาบ (Course aggregate)

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดลอง เป็นหินปูนขนาดโตสุด 19 mm แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะทางกายภาพของมวลรวมหยาบ (Course aggregate)

3.1.1.4 มวลรวมละเอียด (Fine aggregate)

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดลอง เป็นทรายน้ำจืดสะอาดขนาดเล็กกว่า 4.75 mm หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 mm แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะทางกายภาพของมวลรวมละเอียด (Fine aggregate)

3.1.1.5 น้ำ (Water)

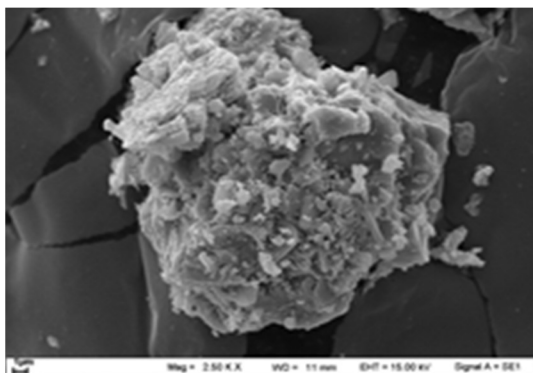
น้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต เป็นน้ำประปาสะอาดที่ได้จากห้องปฏิบัติการคอนกรีต และวัสดุภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

3.1.1.6 น้ำกลั่น (Distilled water)

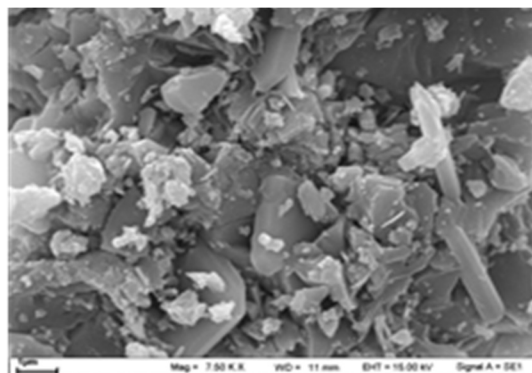
น้ำกลั่นใช้สำหรับผสมกับสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง และการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ ซึ่งได้จากห้องปฏิบัติการคอนกรีตและวัสดุภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์สังเคราะห์

Chemical Compositions (%)	Portland cement Type 1	Synthetic zeolite
Silicon dioxide, SiO ₂	20.8	32.98
Aluminium oxide, Al ₂ O ₃	5.5	27.73
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	3.16	0.04
Calcium oxide, CaO	64.97	0.04
Magnesium oxide, MgO	1.06	-
Sulfur Trioxide, SO ₃	2.96	0.04
Sodium oxide, Na ₂ O	0.08	19.86
Potassium oxide, K ₂ O	0.55	0.04
Titanium Dioxide, TiO ₂	-	-
Phosphorus Pentoxide, P ₂ O ₅	-	-
Loss on ignition, LOI	2.89	19.19
Specific gravity	3.11	2.16
Blaine fineness (cm ² /g)	3,480	4,227

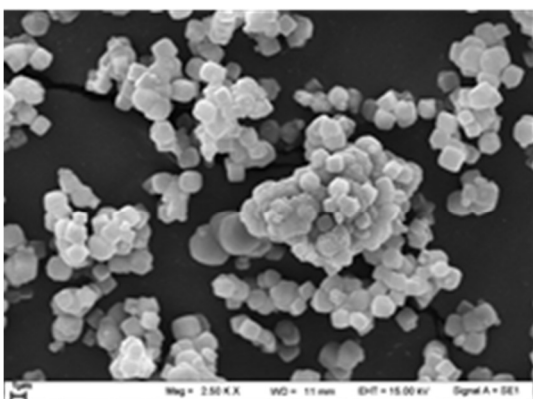


x2500

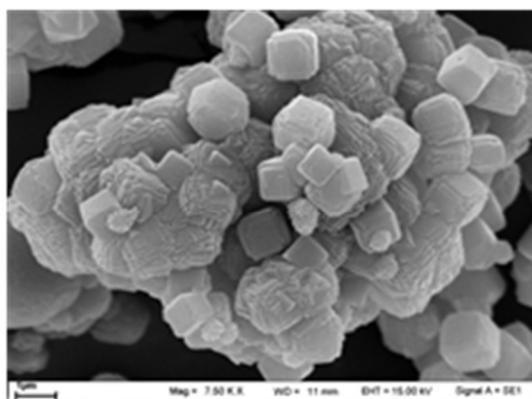


x7500

รูปที่ 3.5 ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



x2500



x7500

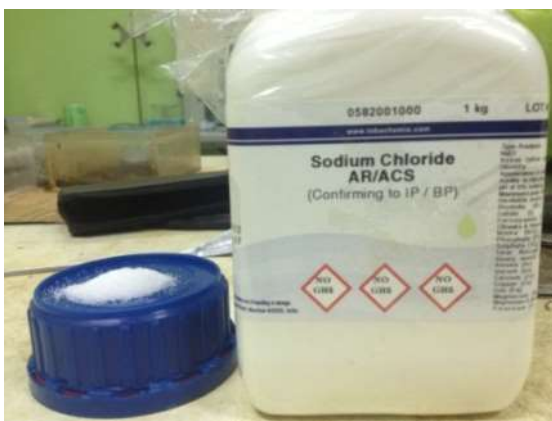
รูปที่ 3.6 ลักษณะอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์

3.1.2 สารเคมีที่ใช้

3.1.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

3.1.2.1.1 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

โซเดียมคลอไรด์ ใช้ผสมกับน้ำกลั่นเพื่อให้เป็นสารละลาย สำหรับใช้ในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง โดยใส่ทางฝั่งซ้ายลบ (ซ้ายสีดำ) ความเข้มข้นร้อยละ 3 และการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์ แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะทางกายภาพของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

3.1.2.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ผสมกับน้ำกลั่นเพื่อให้เป็นสารละลาย สำหรับใช้ในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง โดยใส่ทางฝั่งซ้ายบวก (ซ้ายสีแดง) ความเข้มข้น 0.3 M แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะทางกายภาพของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.1.2.2 สารเคมีที่ใช้ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์

3.1.2.2.1 สารละลายคลอไรด์ไอออน ความเข้มข้นคลอไรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อ

ปริมาตร

3.1.2.2.2 กรดไนตริก (Nitric Acid) เข้มข้นร้อยละ 100 แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กรดไนตริก

3.1.2.2.3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้นร้อยละ 30 แสดงดัง

รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เข้มข้นร้อยละ 30

3.1.2.2.4 สารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3)

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้

3.1.3.1 โม่ผสมคอนกรีต

ใช้สำหรับผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โม่ผสมคอนกรีต

3.1.3.2 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$

ใช้สำหรับหล่อตัวอย่างคอนกรีต สำหรับการทดสอบกำลังอัด แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$

3.1.3.3 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm ใช้สำหรับหล่อตัวอย่างคอนกรีต สำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง และการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm

3.1.3.4 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

ใช้สำหรับทดสอบกำลังอัดตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

3.1.3.5 เครื่องชั่งดิจิตอล ละเอียด 0.005 kg

ใช้สำหรับชั่งส่วนผสมคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่องชั่งดิจิตอล ละเอียด 0.005 kg

3.1.3.6 เครื่องชั่งดิจิตอล ละเอียด 0.001 g

ใช้สำหรับชั่งสารเคมี แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เครื่องชั่งดิจิตอล ละเอียด 0.001 g

3.1.3.7 เครื่องตัดคอนกรีต

ใช้ตัดตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก สำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง และการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เครื่องตัดคอนกรีต

3.1.3.8 เซลล์ทดสอบ

ประกอบด้วยแท่นอะคริลิกมีช่องสำหรับใส่สารละลาย แผ่นประกบและยางกันซึม ขั้วจ่ายไฟ ตะแกรงเหล็ก และชุดน็อตยึดอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ส่วนประกอบของเซลล์ทดสอบ

3.1.3.9 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.19

ใช้สำหรับปรับศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง



รูปที่ 3.19 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า

3.1.3.10 เครื่อง Potentiometric titration แสดงดังรูปที่ 3.20

ใช้สำหรับอ่านค่าปริมาณเกลือคลอไรด์ในการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซนในสารละลายคลอไรด์



รูปที่ 3.20 เครื่อง Potentiometric titration

3.1.3.11 เครื่องต้ม (Hot plate) แสดงดังรูปที่ 3.21



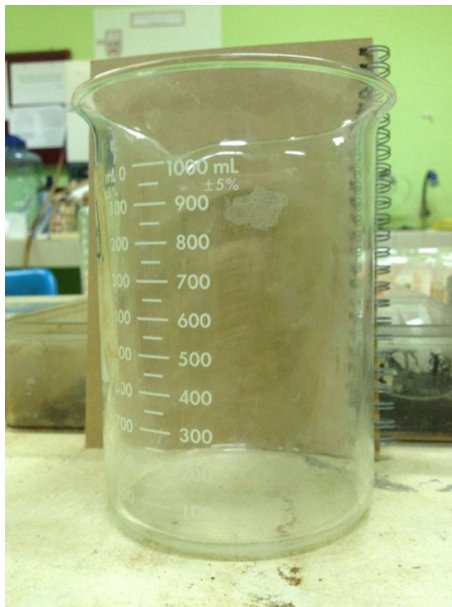
รูปที่ 3.21 เครื่องต้ม (Hot plate)

3.1.3.12 เครื่องดูด (Suction apparatus) แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 เครื่องดูด (Suction apparatus)

3.1.3.13 ปีกเกอร์ขนาด 1,000 ml แสดงดังรูปที่ 3.23



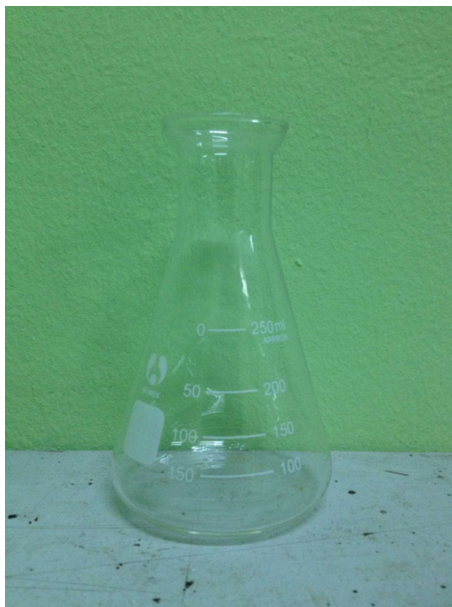
รูปที่ 3.23 ปีกเกอร์ขนาด 1,000 ml

3.1.3.14 ปีกเกอร์ขนาด 250 ml แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ปีกเกอร์ขนาด 250 ml

3.1.3.15 ขวดแก้วก้น โปรง (Filtration flask) ขนาด 250 ml แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ขวดแก้วก้น โปรง (Filtration flask) ขนาด 250 ml

3.1.3.16 กระบอกลวดขนาด 100 ml แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 กระบอกลวดขนาด 100 ml

3.1.3.17 กรวย (Büchner funnel) ขนาด 250 ml แสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 กรวย (Büchner funnel) ขนาด 250 ml

3.1.3.18 ช้อนตักสารเคมี แสดงดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ช้อนตักสารเคมี

3.1.3.19 กระดาษกรองเนื้อหยาบ ขนาด 11 mm แสดงดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 กระดาษกรองเนื้อหยาบ ขนาด 11 mm

3.1.3.20 ซิลิโคน แสดงดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 ซิลิโคน

3.1.3.21 อีพ็อกซี่ (Epoxy) sikadur-32TH แสดงดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 อีพ็อกซี่ (Epoxy)

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

No	Mix id.	Slump (cm)	Mix proportion of concrete (kg/m ³)				
			Binder		Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
			Portland cement type 1	Zeolite			
1	I40-Z00	0.4	421	0	168	776	1,025
2	I40-Z01	0.4	416	4	168	776	1,025
3	I40-Z03	0.8	406	13	167	776	1,025
4	I40-Z05	1.0	396	21	167	776	1,025
5	I40-Z10	1.2	371	41	165	776	1,025
6	I50-Z00	1.5	369	0	185	776	1,025
7	I50-Z01	1.6	365	4	184	776	1,025
8	I50-Z03	1.8	356	11	184	776	1,025
9	I50-Z05	1.8	348	18	183	776	1,025
10	I50-Z10	2.4	327	36	181	776	1,025
11	I60-Z00	2.6	329	0	198	776	1,025
12	I60-Z01	2.5	325	3	197	776	1,025
13	I60-Z03	2.6	318	10	197	776	1,025
14	I60-Z05	2.7	310	16	196	776	1,025
15	I60-Z10	3.3	292	32	194	776	1,025

หมายเหตุ: ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

I xx หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนักที่มีค่าเท่ากับ xx

Z xx หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ ต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนักที่มีค่าเท่ากับ xx

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

I40-Z05 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนักเท่ากับ 40 และใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสานน้ำหนักเท่ากับ 5

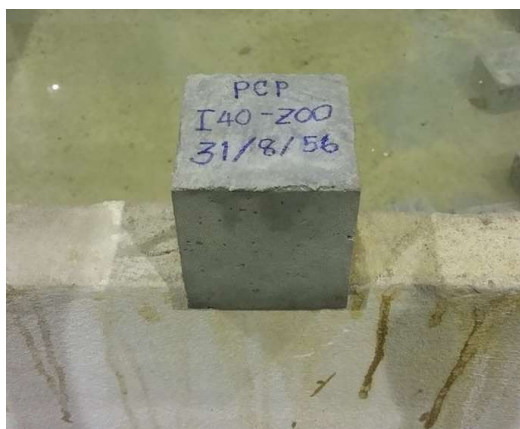
3.2 วิธีการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบกำลังอัด

3.2.1.1 เตรียมแบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ จำนวน 12 โมลต่อ 1 ส่วนผสม โดยแบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ดังกล่าว ต้องสะอาด ปราศจากฝุ่นละออง ไม่มีน้ำ สารเคมีหรือสิ่งเจือปนใดๆ (ที่ส่งผลให้คุณสมบัติด้านกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป) ชั่งหรือเกาะอยู่บริเวณผิวภายในแบบหล่อ

3.2.1.2 หล่อตัวอย่างคอนกรีตในแบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ซึ่งส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการทดสอบกำลังอัดได้แสดงตามตารางที่ 3.2

3.2.1.3 เมื่อตัวอย่างคอนกรีตแข็งตัวแล้ว (ประมาณ 24 ชั่วโมง) แสดงดังรูปที่ 3.32 จึงทำการแกะแบบ แล้วบ่มตัวอย่างคอนกรีตด้วยน้ำประปา โดยน้ำประปาที่ใช้บ่มตัวอย่างคอนกรีตนั้นต้องเป็นน้ำสะอาด ไม่มีสารเคมี หรือสิ่งเจือปนใดๆ (ที่ส่งผลให้คุณสมบัติด้านกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป)



รูปที่ 3.32 ลักษณะคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ที่แข็งตัวแล้ว

3.2.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.2.2.1 เมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีระยะเวลาบ่มครบ 7 28 56 และ 91 วัน ตามลำดับ แล้วจึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบกำลังอัด โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ซึ่งทำการทดสอบกำลังอัดจำนวน 3 ก้อนต่อ 1 ระยะเวลาบ่มของตัวอย่างคอนกรีต

3.2.2.2 บันทึกผลกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบ

3.3 วิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

3.3.1.1 เตรียมแบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm จำนวน 6 โมล ต่อ 1 ส่วนผสม โดยแบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ดังกล่าว ต้องสะอาด ปราศจากฝุ่นละออง ไม่มีน้ำ สารเคมีหรือสิ่งเจือปนใดๆ (ที่ส่งผลให้คุณสมบัติด้านความต้านทานคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป) ชั่งหรือเกาะอยู่บริเวณผิวภายในแบบหล่อ

3.3.1.2 หล่อตัวอย่างคอนกรีตในแบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอก ซึ่งส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการทดสอบการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งได้แสดงตามตารางที่ 3.2

3.3.1.3 เมื่อตัวอย่างคอนกรีตแข็งตัวแล้ว (ประมาณ 24 ชั่วโมง) แสดงดังรูปที่ 3.33 จึงทำการแกะแบบ แล้วบ่มตัวอย่างคอนกรีตด้วยน้ำประปา โดยน้ำประปาที่ใช้บ่มตัวอย่างคอนกรีตนั้นต้องเป็นน้ำสะอาด ไม่มีสารเคมี หรือสิ่งเจือปนใดๆ (ที่ส่งผลให้คุณสมบัติด้านความต้านทานคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป)



รูปที่ 3.33 ลักษณะคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm ที่แข็งตัวแล้ว

3.3.2 การเตรียมสารละลายสำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

3.3.2.1 เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยการชั่งสารโซเดียมคลอไรด์ 30 g โดยละเอียดถึงตำแหน่งทศนิยม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 1,000 ml แล้วใช้เท่งคนสารคนสารโซเดียมคลอไรด์จนละลายจนหมด

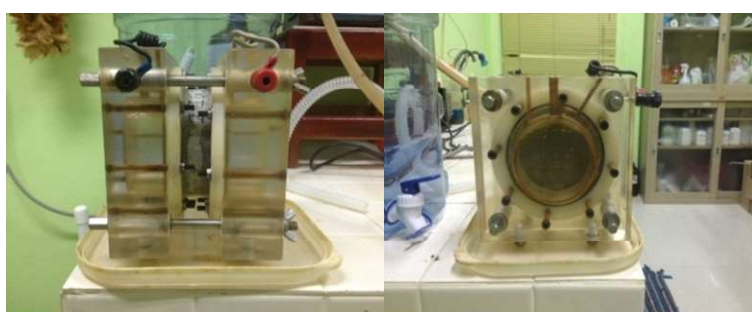
3.3.2.2 เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.3 M โดยการชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 g โดยละเอียดถึงตำแหน่งทศนิยม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 1,000 ml แล้วใช้เท่งคนสารคนสารโซเดียมคลอไรด์จนละลายจนหมด

3.3.3 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

3.3.4.1 เมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีระยะเวลาบ่มครบ 7 28 56 และ 91 วัน จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 1 ก้อนต่อ 1 ระยะเวลาบ่มของตัวอย่างคอนกรีต มาตัดด้วยเครื่องตัดคอนกรีตให้มีความหนา 5 cm โดยตัวอย่างคอนกรีต 1 ก้อนนั้นต้องตัดให้ได้ตัวอย่างคอนกรีตที่มีความหนา 5 cm จำนวน 3 ก้อน

3.3.4.2 นำตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดเสร็จแล้วมาทาซิลิโคนที่บริเวณผิวนอก แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ โดยต้องระวังไม่ให้ซิลิโคนและบริเวณผิวหน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต

3.3.4.3 เมื่อซิลิโคนแห้งแล้ว จึงประกอบตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับชุดเซลล์ทดสอบ ทั้งนี้เมื่อประกอบเสร็จแล้วต้องตรวจสอบรอยรั่ว อาจทำโดยการใช้น้ำกลั่นเทลงในช่องสำหรับใส่สารละลายจนเต็ม ซึ่งสามารถสังเกตรอยรั่วได้จากการซึมของน้ำกลั่นที่บริเวณรอยต่อต่างๆ และเมื่อพบรอยรั่วแล้ว จึงทำการทาซิลิโคนเพื่ออุดปิดรอยรั่วดังกล่าว แสดงดังรูป 3.34



ก.) รูปด้านหน้า

ข.) รูปด้านข้าง

รูปที่ 3.34 ตัวอย่างคอนกรีตที่ประกอบเข้ากับชุดเซลล์ทดสอบแล้ว

3.3.4.4 เติมน้ำกลั่นลงในช่องสำหรับใส่สารละลายจนเต็ม โดยใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 M ฟุ้งข้าววก (ข้าวสีแดง) และใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ฟุ้งข้าวลบ (ข้าวสีดำ)

3.3.4.5 เลือกช่องสัญญาณที่จะทำการทดสอบ แล้วต่อสายไฟจากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับตัวอย่างคอนกรีตที่ประกอบเซลล์ทดสอบและเติมสารละลายแล้ว โดยต่อขั้วบวกของเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับขั้วบวกของเซลล์ทดสอบ และต่อขั้วลบของเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับขั้วลบของเซลล์ทดสอบเช่นกัน จากนั้นเปิดเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า กดปุ่ม reset ปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 60 V และตั้งเวลาการทดสอบให้อยู่ที่ 360 นาที

3.3.4.6 ต่อสายสัญญาณ RS - 232 จากเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าเข้ากับ Serial port ของเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วเรียกใช้งาน โปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1 ที่ได้ติดตั้งไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ถ่ายโอนข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ แสดงดังรูป 3.35



รูปที่ 3.35 การต่ออุปกรณ์ทั้งหมดสำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

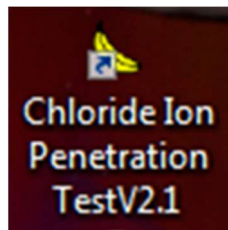
3.3.4.7 เมื่อครบ 360 นาทีแล้ว นำผลการทดสอบที่แสดงอยู่ในรูปปริมาณอออนคลอไรด์ (หน่วย Coulombs) ซึ่งเป็นค่าปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีต มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์อออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 แสดงดังตารางที่ 3.3 ซึ่งจะบ่งบอกถึงระดับการแทรกซึมของอออนคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตได้

ตารางที่ 3.3 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์อออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202

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

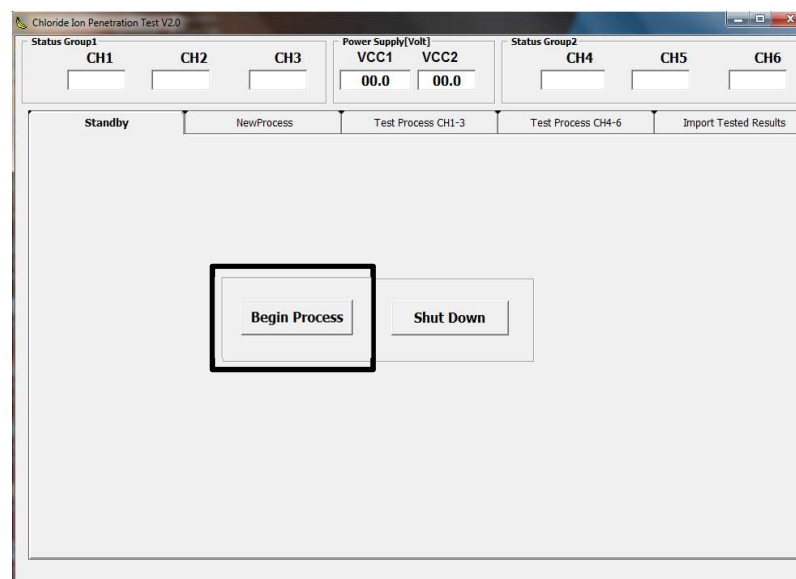
3.3.4 การใช้งานโปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1

3.3.4.1 เรียกใช้งาน โปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้สำหรับบันทึกผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง แสดงดังรูปที่ 3.36



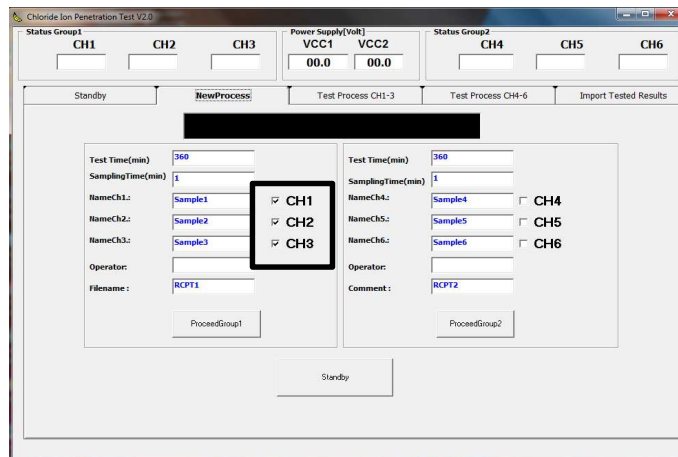
รูปที่ 3.36 ไอคอน โปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1

3.3.4.2 เมื่อนำหน้าต่างของโปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1 เปิดขึ้นมา ขั้นตอนแรกเลือก Begin Process แสดงดังรูปที่ 3.37



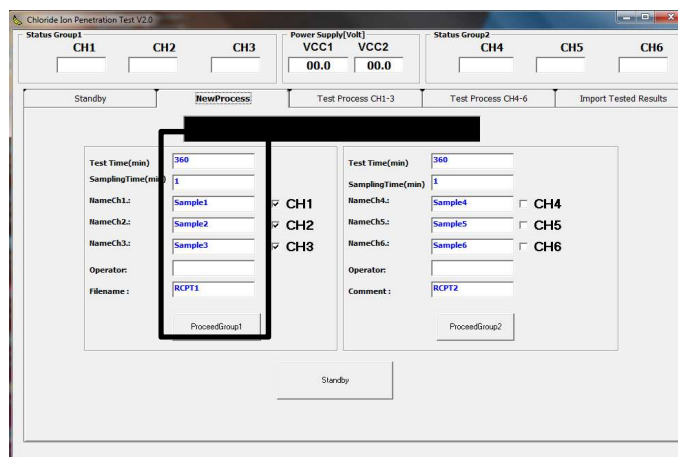
รูปที่ 3.37 หน้าต่างและวิธีการเริ่มโปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1

3.3.4.3 จากนั้นเลือกช่องสัญญาณที่ต้องการทำการทดสอบ โดยที่ช่องสัญญาณที่เลือกในโปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1 ต้องตรงกันกับช่องสัญญาณที่เลือกต่อตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า ที่จะใช้สำหรับการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 วิธีการเลือกช่องสัญญาณที่ต้องการทำการทดสอบของโปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1

3.3.4.4 ทำการตั้งค่า และกำหนดชื่อต่างๆ โดยตั้งเวลาการทดสอบเป็นเวลา 360 ในช่อง Test Time (min) ตั้งชื่อตัวอย่างคอนกรีตที่จะทำการทดสอบ (ถ้ามี) ในช่อง Name Ch x ตั้งชื่อ ไฟล์ที่จะบันทึกผลการทดสอบในช่อง Filename และเมื่อตั้งค่า และกำหนดชื่อต่างๆเสร็จแล้วเลือก ProceedGroup x เพื่อเริ่มทำการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 วิธีการตั้งค่าและกำหนดชื่อต่างๆของตัวอย่างทดสอบโปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1

3.3.4.5 เมื่อครบกำหนดเวลาทำการทดสอบ 360 นาทีแล้ว เลือก Back Process เพื่อย้อนไปหน้าต่างก่อนหน้า และเมื่อย้อนไปหน้าต่างก่อนหน้าแล้วเลือก Standy ซึ่งโปรแกรมจะย้อนไปหน้าต่างเริ่มต้น จากนั้นเลือก Shut Down เพื่อปิดโปรแกรม

3.3.4.6 ผลการทดลองจะอยู่ในไฟล์เคอร์ Result โดยผลการทดลองจะอยู่ในไฟล์สกุล Text Document (.txt) ซึ่งภายในบ่งบอกถึงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ปริมาณไอออนคลอไรด์ที่แทรกซึมในแต่ละตัวอย่างคอนกรีต ณ เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.40

CH1	ON	CH2	ON	CH3	ON	1	CH1_NAME	Sample1	CH2_NAME	Sample2	CH3_NAME	Sample3
Test	Time[min]	360	Sampling	time[min]	time	12	C2	I3	VC11			
0	15/9/2556		8:45:41	32	0.00	2	0.00	6	0.00	0.73		
1	15/9/2556		8:46:43	121	4.59	89	2.73	95	3.03	60.14		
2	15/9/2556		8:47:44	118	11.76	77	7.71	93	8.67	60.13		
3	15/9/2556		8:48:46	116	18.78	77	12.33	92	14.22	60.14		
4	15/9/2556		8:49:48	115	25.71	85	17.19	92	19.74	60.17		
5	15/9/2556		8:50:50	115	32.61	-2	19.68	94	25.32	60.22		
6	15/9/2556		8:51:52	115	39.51	86	22.20	93	30.93	59.97		
7	15/9/2556		8:52:54	114	46.38	88	27.42	95	36.57	60.19		
8	15/9/2556		8:53:56	114	53.22	85	32.61	94	42.24	60.17		
9	15/9/2556		8:54:58	114	60.06	83	37.65	93	47.85	60.23		
10	15/9/2556		8:56:00	113	66.87	86	42.72	92	53.40	60.03		
11	15/9/2556		8:57:02	113	73.65	88	47.94	95	59.01	60.22		
12	15/9/2556		8:58:04	114	80.46	89	53.25	95	64.71	60.19		
13	15/9/2556		8:59:06	115	87.33	90	58.62	97	70.47	60.20		
14	15/9/2556		9:00:08	115	94.23	89	63.99	98	76.32	60.21		
15	15/9/2556		9:01:10	113	101.07	92	69.42	99	82.23	60.23		
16	15/9/2556		9:02:12	111	107.79	91	74.91	98	88.14	60.21		
17	15/9/2556		9:03:13	115	114.57	91	80.37	97	93.99	60.23		
18	15/9/2556		9:04:15	114	121.44	91	85.83	96	99.78	60.24		
19	15/9/2556		9:05:17	114	128.28	90	91.26	95	105.51	60.11		
20	15/9/2556		9:06:19	113	135.09	92	96.72	97	111.27	60.16		
21	15/9/2556		9:07:21	115	141.93	90	102.18	98	117.12	60.14		
22	15/9/2556		9:08:23	115	148.83	97	107.79	97	122.97	60.18		
23	15/9/2556		9:09:25	115	155.73	98	113.64	102	128.84	60.06		
24	15/9/2556		9:10:27	115	162.63	94	119.40	103	135.09	60.05		
25	15/9/2556		9:11:29	116	169.56	97	125.13	99	141.15	60.01		
26	15/9/2556		9:12:31	116	176.52	97	130.95	99	147.09	60.06		
27	15/9/2556		9:13:33	115	183.45	96	136.74	103	153.15	60.02		
28	15/9/2556		9:14:35	115	190.35	98	142.56	101	159.27	60.01		
29	15/9/2556		9:15:37	117	197.31	94	148.32	100	165.30	59.93		
30	15/9/2556		9:16:39	116	204.30	96	154.02	101	171.33	60.00		
31	15/9/2556		9:17:41	118	211.32	99	159.87	107	177.57	60.05		
32	15/9/2556		9:18:42	118	218.40	100	165.84	107	183.89	60.25		
33	15/9/2556		9:19:44	119	225.51	99	171.81	104	190.32	60.24		
34	15/9/2556		9:20:46	118	232.62	100	177.78	103	196.53	60.23		
35	15/9/2556		9:21:48	118	239.70	99	183.75	105	202.77	60.24		
36	15/9/2556		9:22:50	117	246.75	98	189.66	105	209.07	60.27		
37	15/9/2556		9:23:52	117	253.77	99	195.57	101	215.25	60.18		
38	15/9/2556		9:24:54	118	260.82	99	201.51	103	221.37	60.13		
39	15/9/2556		9:25:56	116	267.84	101	207.51	100	227.46	60.12		
40	15/9/2556		9:26:58	117	274.83	101	213.57	106	233.64	60.21		
41	15/9/2556		9:28:00	118	281.88	102	219.66	113	240.21	60.25		
42	15/9/2556		9:29:02	119	288.99	101	225.75	108	246.84	60.17		
43	15/9/2556		9:30:04	121	296.19	102	231.84	105	253.23	60.15		
44	15/9/2556		9:31:06	118	303.36	101	237.93	106	259.56	60.19		
45	15/9/2556		9:32:08	120	310.50	101	243.99	105	265.89	60.12		
46	15/9/2556		9:33:09	121	317.73	101	250.05	109	272.31	60.26		
47	15/9/2556		9:34:11	121	324.99	101	256.11	109	278.85	60.27		

รูปที่ 3.40 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบที่ได้จากโปรแกรม Chloride Ion Penetration Test Version 2.1

3.4 วิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์

3.4.1.1 เตรียมแบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm จำนวน 1 โมล ต่อ 1 ส่วนผสม โดยแบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ดังกล่าว ต้องสะอาด ปราศจากฝุ่นละออง ไม่มีน้ำ สารเคมีหรือสิ่งเจือปนใดๆ (ที่ส่งผลให้คุณสมบัติด้านความต้านทานคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป) ชั่งหรือเจาะอยู่บริเวณผิวภายในแบบหล่อ

3.4.1.2 หล่อตัวอย่างคอนกรีตในแบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอก ซึ่งส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการทดสอบการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์ ได้แสดงตามตารางที่ 3.2

3.4.1.3 เมื่อตัวอย่างคอนกรีตแข็งตัวแล้ว (ประมาณ 24 ชั่วโมง) แสดงดังรูปที่ 3.33 จึงทำการแกะแบบ แล้วบ่มตัวอย่างคอนกรีตด้วยน้ำประปา โดยน้ำประปาที่ใช้บ่มตัวอย่างคอนกรีตนั้นต้องเป็นน้ำสะอาด ไม่มีสารเคมี หรือสิ่งเจือปนใดๆ (ที่ส่งผลให้คุณสมบัติด้านความต้านทานคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป)

3.4.1.4 เมื่อบ่มตัวอย่างคอนกรีตด้วยน้ำประปาครบ 28 วันแล้ว จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวมาเคลือบด้วยอีพ็อกซีที่บริเวณผิวทั้งหมด ยกเว้นบริเวณผิวหน้าตัดด้านบนเพื่อบังคับให้การซึมผ่านของคลอไรด์เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าตัดด้านบนของตัวอย่างคอนกรีตในทิศทางเดียวเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 ลักษณะคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm ที่ทำการเคลือบอีพ็อกซี โดยยกเว้นบริเวณผิวหน้าตัดด้านบน

3.4.1.5 จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตที่เคลือบอีพ็อกซีเรียบร้อยแล้วไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จำนวน 28 วัน ต่อ 1 ก้อน ต่อ 1 ส่วนผสม

3.4.2 การเตรียมสารละลายเกลือคลอไรด์ไว้สำหรับแช่ก้อนตัวอย่างคอนกรีต

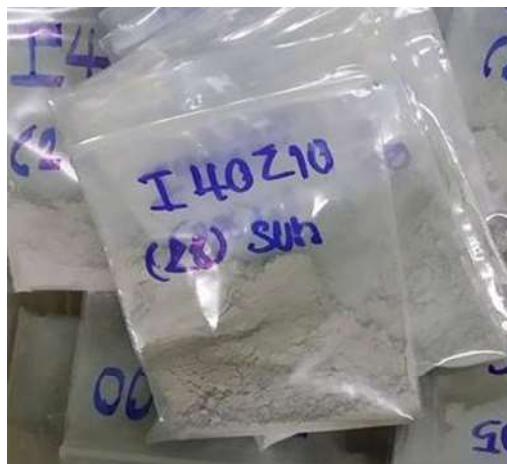
เตรียมสารละลายคลอไรด์อ่อน ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยคิดจาก

	คลอไรด์	35.5 g	ได้จาก	โซเดียมคลอไรด์	58.5 g
	คลอไรด์	5 g	ได้จาก	โซเดียมคลอไรด์	$\frac{58.5 \times 5}{5.5} = 8.24 \text{ g}$
ดังนั้น	น้ำ	100 g	ต้องใช้	โซเดียมคลอไรด์	8.24 g
	น้ำ	100 g (หรือ 0.1 litre)	ต้องใช้	โซเดียมคลอไรด์	8.24 g
	น้ำ	1,000 g (หรือ 1 litre)	ต้องใช้	โซเดียมคลอไรด์	$\frac{1,000 \times 8.24}{100} = 82.4 \text{ g}$
ดังนั้น	น้ำ	1,000 g (หรือ 1 litre)	ต้องใช้	โซเดียมคลอไรด์	82.4 g.

3.4.3 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์

3.4.3.1 นำตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายคลอไรด์อ่อน ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่ครบระยะเวลาที่กำหนด (28 วัน) มาตัดเป็นชิ้นความหนาประมาณ 1 cm จำนวน 5 ชิ้น ที่ระดับความลึก 1 2 3 4 และ 5 cm ที่วัดจากผิวหน้าตัดด้านบน (วัดจากด้านที่ไม่ได้เคลือบซิลิโคน) แล้วนำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดแล้วมาบดเป็นผง โดยแยกตามระดับความลึกจากผิวหน้าตัดด้านบน

3.4.3.2 นำผงที่ได้จากการบดตัวอย่างคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3.42 มาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 (Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete) ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) โดยการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) มีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.42 ลักษณะผงของตัวอย่างที่ถูกบดแล้ว

3.4.3.2.1 ชั่งตัวอย่างคอนกรีตที่บดแล้วมาจำนวน 5 g โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 g ใส่ไว้ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml

3.4.3.2.2 เติมน้ำกลั่นลงไป 100 ml แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 100 ที่เจือจางกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 ml

3.4.3.2.3 ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาด้วยแผ่นกระจกด้วยการต้มให้เดือด อย่าให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

3.4.3.2.4 ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) เข้ากับกรวย (Büchner funnel) ด้วยสายยาง และนำปลายกรวยเสียบเข้ากับขวดแก้วกันโปรง (Filtration flask) แสดงดังรูปที่ 3.43 จากนั้นทำการเปิดเครื่องดูด วางกระดาษกรองไว้บนกรวย 2 แผ่น ฉีดน้ำกลั่นลงไปเล็กน้อยเพื่อให้กระดาษกรองแนบติดกับกรวย นำบีกเกอร์ที่เย็นแล้วมาผ่านบนกรวยเพื่อทำการกรองโดยพยายามฉีดน้ำกลั่นบนบีกเกอร์เพื่อชะล้างผงคอนกรีตที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ให้ออกให้หมดถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกันโปรงไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วกันโปรงทันทีด้วยน้ำกลั่นทิ้งสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml



รูปที่ 3.43 การประกอบเครื่องดูดเข้ากับกรวยด้วยสายยางและนำปลายกรวยเสียบเข้ากับขวดแก้วกันโปรง

3.4.3.2.5 นำบีกเกอร์ที่เย็นแล้ววางบนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แชน electrode และบิวเรตสำหรับปล่อยสารละลาย 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode เริ่มการกวนช้า ๆ

3.4.3.2.6 โดยเครื่อง Potentiometric titration จะทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Potentiometric titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดยุติปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.44 การไตเตรทโดยเครื่อง Potentiometric titration

3.4.3.2.7 จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็นร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% Chloride by weight of concrete)

3.4.3.3 นำผงที่ได้จากการบดตัวอย่างคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3.42 มาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1218 (Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete) ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble chloride) โดยการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) มีขั้นตอนดังนี้

3.4.3.3.1 ชั่งตัวอย่างคอนกรีตที่บดแล้วมาจำนวน 5 g โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 g ใส่ไว้ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml

3.4.3.3.2 เติมน้ำกลั่นลงไปในบีกเกอร์ที่มีผงคอนกรีต 50 ml ปิดด้วยกระดาษให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาด้วยแผ่นกระดาษด้วยการต้มให้เดือด 5 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

3.4.3.3.3 ประกอบเครื่องดูด (Suction apparatus) เข้ากับกรวย (Büchner funnel) ด้วยสายยาง และนำปลายกรวยเสียบเข้ากับขวดแก้วกันโปรง (Filtration flask) แสดงดังรูปที่ 3.43 จากนั้นทำการเปิดเครื่องดูด วางกระดาษกรองไว้บนกรวย 2 แผ่น ฉีดน้ำกลั่นลงไปเล็กน้อยเพื่อให้กระดาษกรองแนบติดกับกรวย นำบีกเกอร์ที่เย็นแล้วมาเทลงบนกรวยเพื่อทำการกรอง โดยพยายามฉีดน้ำกลั่นบนบีกเกอร์เพื่อชะล้างผงคอนกรีตที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ให้ออกให้หมด ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วกันโปรงไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วกันโปรงทันทีด้วยน้ำกลั่น ทั้งสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml

3.4.3.3.4 เติมสารละลายกรดไนตริกที่เจือจางกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 ml และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ความเข้มข้นร้อยละ 30 ลงไป 3 ml ลงในสารละลายที่ผ่านการกรอง ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระจกแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือด อย่าให้เดือดนานเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม

3.4.3.3.5 นำบีกเกอร์ที่เย็นแล้ววางบนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แชนด์ electrode และบิวเรตสำหรับปล่อยสารละลาย 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode เริ่มการกวนช้า ๆ

3.4.3.3.6 โดยเครื่อง Potentiometric titration จะทำการไตเตรตให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Potentiometric titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ไตเตรตตัวอย่างและค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ณ จุดยุติปฏิกิริยา

3.4.3.3.7 จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบจะแสดงค่าเป็นร้อยละของคลอไรด์ต่อน้ำหนักของคอนกรีต (% Chloride by weight of concrete)

บทที่ 4

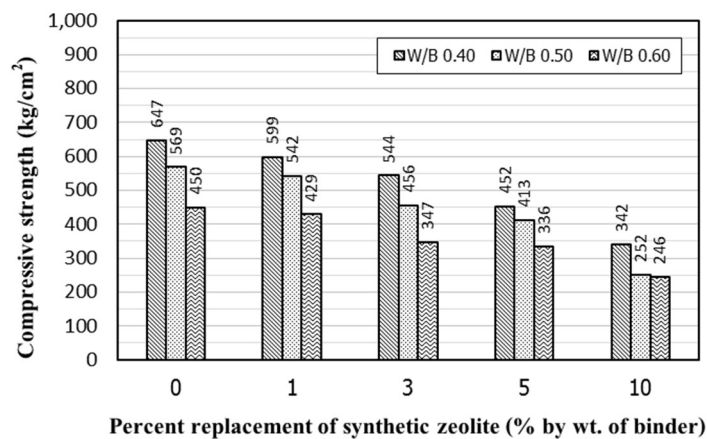
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 กำลังอัดของคอนกรีต

4.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

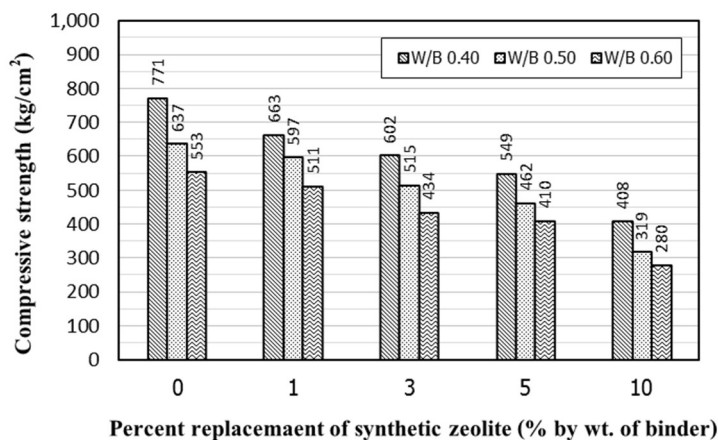
จากรูปที่ 4.1 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน สังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีกำลังอัดสูงสุดสำหรับทุกๆระยะเวลาบ่ม และมีแนวโน้มที่ต่ำลงในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ

เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีน้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่า คอนกรีตจึงมีความทึบแน่น และมีเนื้อแน่นกว่า ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตจึงมีค่าสูงกว่า

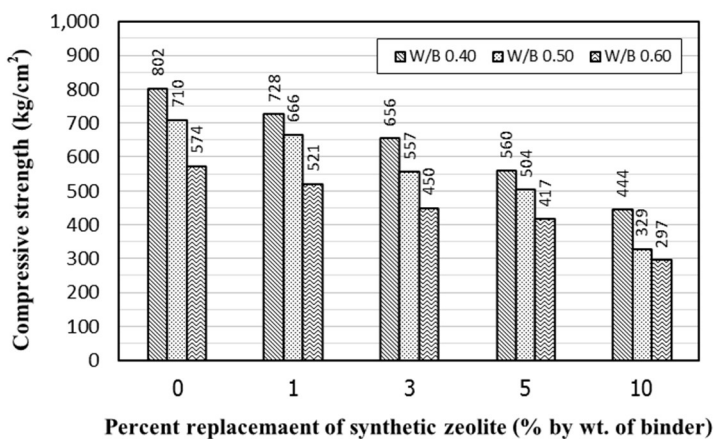


ก) ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

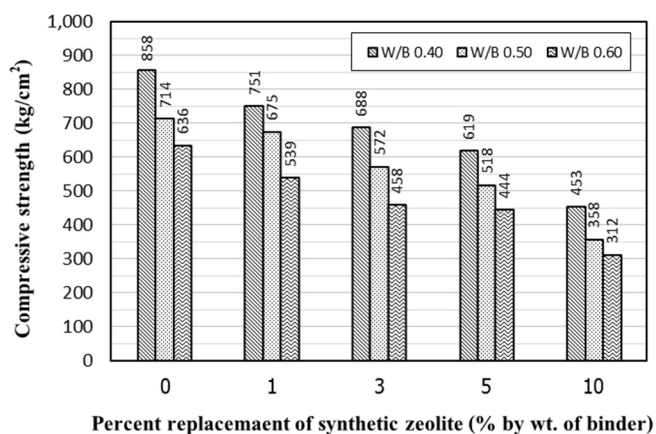
รูปที่ 4.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60



ข) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



ค) ระยะเวลาบ่ม 56 วัน



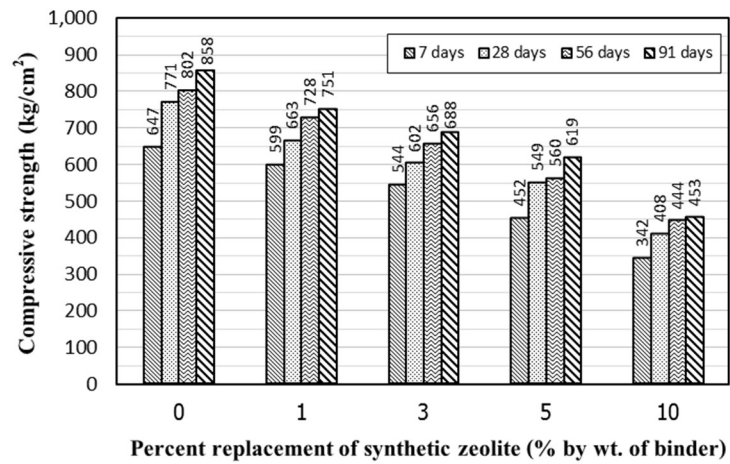
ง) ระยะเวลาบ่ม 91 วัน

รูปที่ 4.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 (ต่อ)

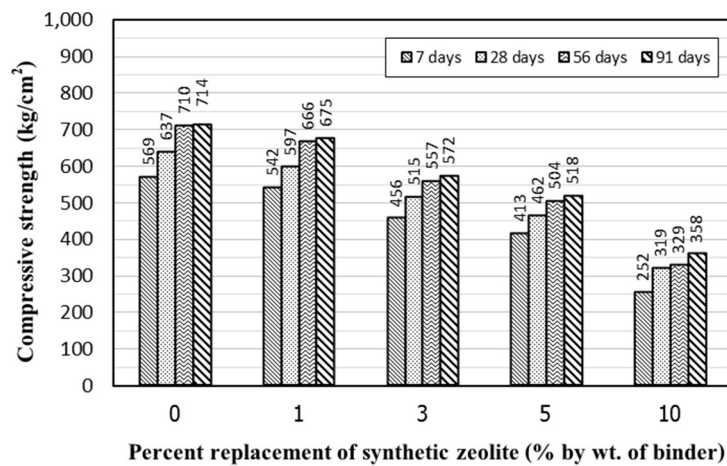
4.1.2 ผลกระทบของระยะเวลาบ่ม

จากรูปที่ 4.2 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 สังเกตได้ว่าคอนกรีตทุกๆอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีกำลังอัดต่ำที่สุดที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และมีแนวโน้มสูงขึ้นที่ระยะเวลาบ่ม 28 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

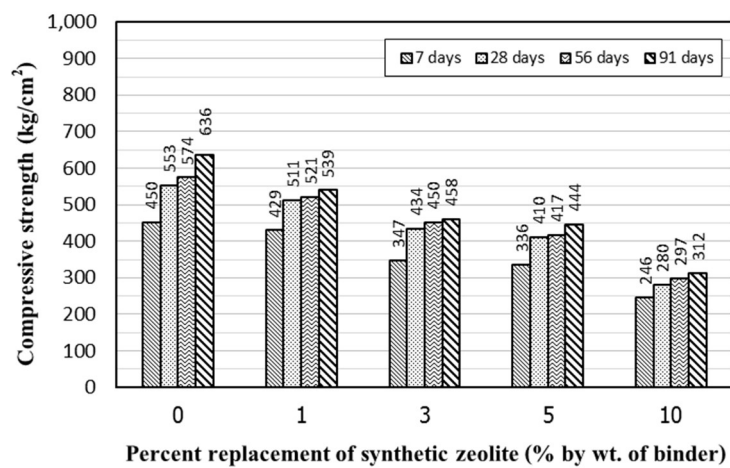
เนื่องจากการที่คอนกรีตมีระยะเวลาบ่มที่สูง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ในอนุภาคของคอนกรีตจึงเพิ่มมากขึ้น คอนกรีตจึงมีความทึบน้ำ เนื้อแน่น และกำลังอัดสูงขึ้น



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 4.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน

4.1.3 ผลกระทบของอัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.3 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 สังเกตได้ว่าในทุกๆอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และทุกๆระยะเวลาบ่ม คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักมีกำลังอัดสูงสุด และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 มีกำลังอัดต่ำลงตามลำดับ

เมื่อพิจารณากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก จากสมการที่ 4.1

$$C_x = \frac{C_{z=x}}{C_{z=0}} \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ C_x คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ x เทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (%)

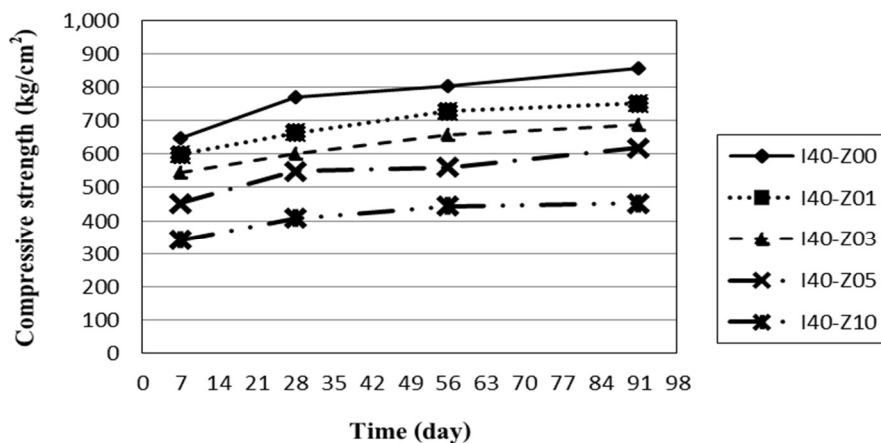
$C_{z=x}$ คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ x (kg/cm^2)

$C_{z=0}$ คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (kg/cm^2)

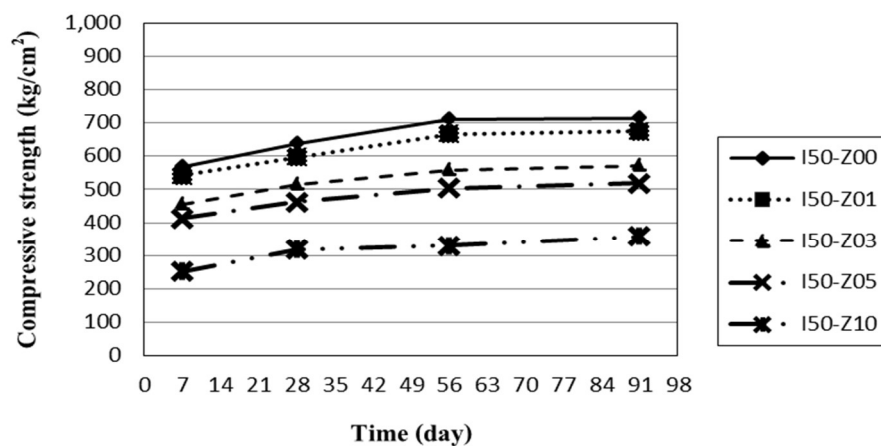
จากตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก สังเกตได้ว่าทุกๆอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กำลังอัดของคอนกรีตที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักมีกำลังอัดสูงสุด และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 เทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักอยู่ที่ประมาณร้อยละ 90 80 70 และ 50 ตามลำดับ

ดังนั้นกล่าวได้ว่าซีโอไลท์สังเคราะห์ไม่มีความเป็นวัสดุปอซโซลาน สังเกตได้จากการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดต่ำลงในระยะเวลาบ่มช่วงต้น เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮดรเจนซันจึงลดลง เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮดรเจนซันแล้วทำให้ได้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮดรต (C-A-H) ที่ต่ำ กำลังอัดของคอนกรีตจึงมีค่าต่ำ และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานไม่มีการพัฒนากำลังอัดเมื่อระยะเวลา

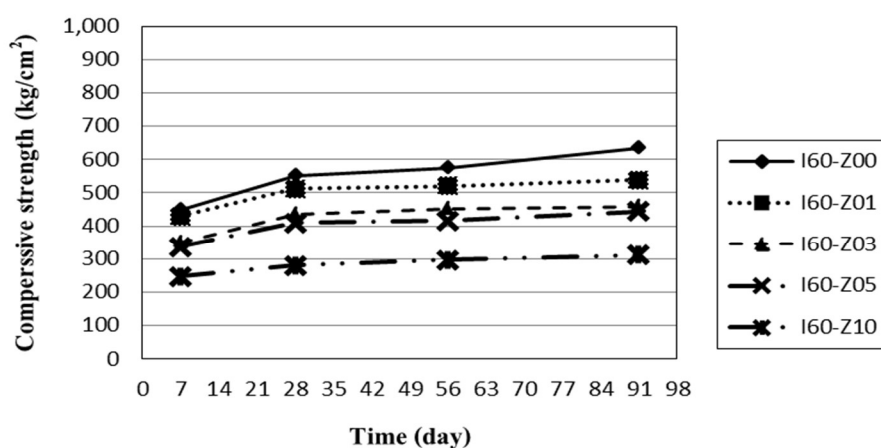
บ่มสูงขึ้น อาจเนื่องจากซีโอไลต์สังเคราะห์ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ปริมาณต่ำ สารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่จึงต่ำ เมื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานแล้วทำให้ได้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮดรต (C-A-H) ที่ต่ำ กำลังอัดของคอนกรีตจึงต่ำ เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้เกิดจากปฏิกิริยาไฮดรชันจากปูนซีเมนต์เป็นหลัก ซึ่งปูนซีเมนต์ดังกล่าวถูกลดลงจากการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์แทนแทนวัสดุประสาน อีกทั้งซีโอไลต์สังเคราะห์ยังมีองค์ประกอบของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ในปริมาณสูง ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิกา (Alkali-silica reaction) กับซิลิกอน (Si) ที่มีในมวลรวมละเอียด ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตจึงต่ำ



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก

Mix id.	Comparative compressive strength of concrete based on cement concrete (%)			
	Curing time (day)			
	7	28	56	91
I40-Z00	100	100	100	100
I40-Z01	93	86	91	88
I40-Z03	84	78	82	80
I40-Z05	70	71	70	72
I40-Z10	53	53	55	53
I50-Z00	100	100	100	100
I50-Z01	95	94	94	95
I50-Z03	80	81	79	80
I50-Z05	73	73	71	73
I50-Z10	44	50	46	50
I60-Z00	100	100	100	100
I60-Z01	95	93	91	85
I60-Z03	77	79	78	72
I60-Z05	75	74	73	70
I60-Z10	55	51	52	49

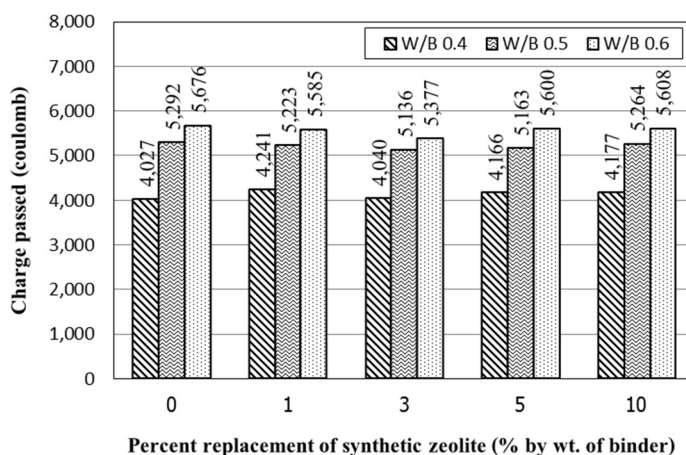
4.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตถูกแสดงในรูปแบบของปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีต ซึ่งแสดงในหน่วยของคูลอมป์ โดยพิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202

4.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

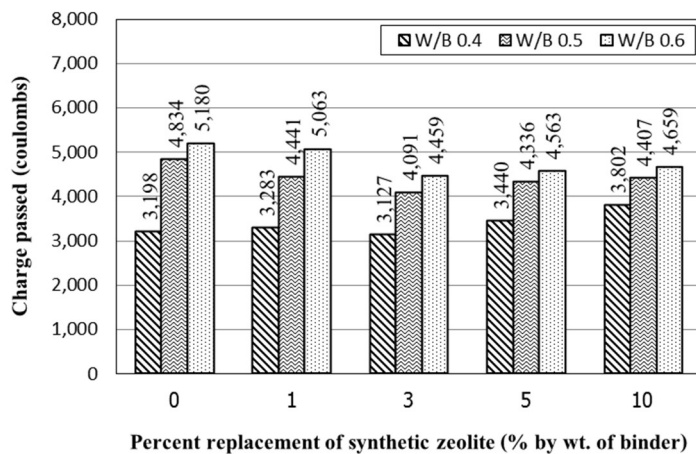
จากรูปที่ 4.4 แสดงปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน สังเกตได้ว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีค่าต่ำที่สุด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ

เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำใช้น้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่า คอนกรีตจึงมีความทึบน้ำ และมีเนื้อที่แน่นกว่าเมื่อมีเนื้อแน่นกว่าจึงทำให้การเคลื่อนผ่านของประจุเป็นไปได้ยากกว่า เมื่อปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านมีค่าต่ำลง นั้นหมายถึงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่สูงขึ้น

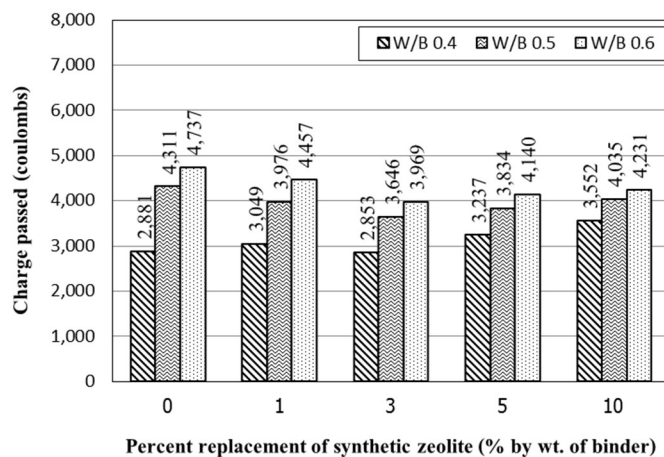


ก) ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

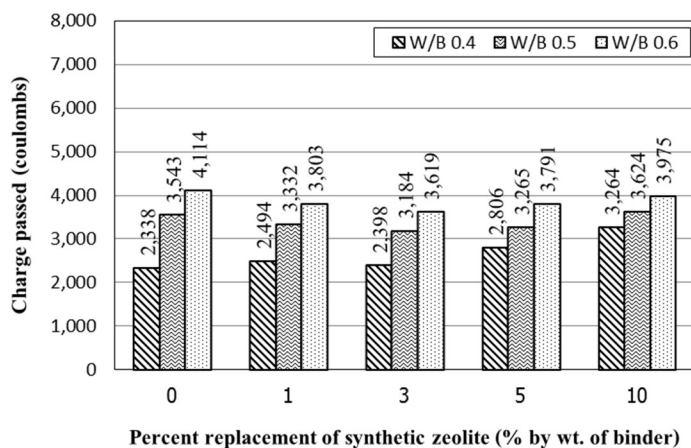
รูปที่ 4.4 ปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60



ข) ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



ค) ที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน



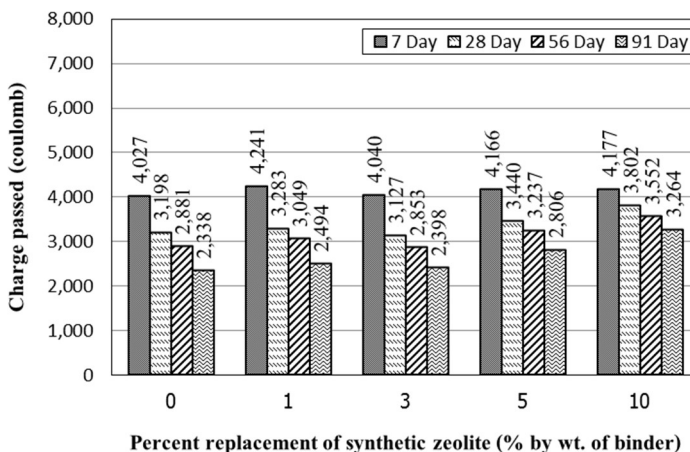
ง) ที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน

รูปที่ 4.4 ปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 (ต่อ)

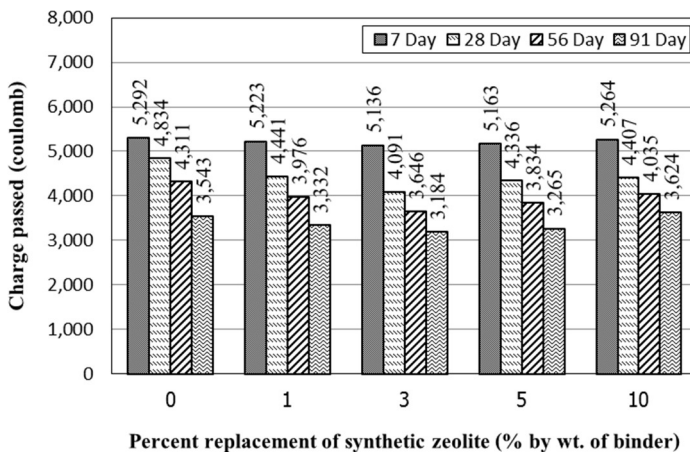
4.2.2 ผลกระทบของระยะเวลาบ่ม

จากรูปที่ 4.5 แสดงปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 สังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านมากที่สุด และเมื่อคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่ม 28 56 และ 91 วัน ประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตมีแนวโน้มที่ต่ำลงตามลำดับ โดยจะมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันในทุกๆ ส่วนผสม และทุกๆ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

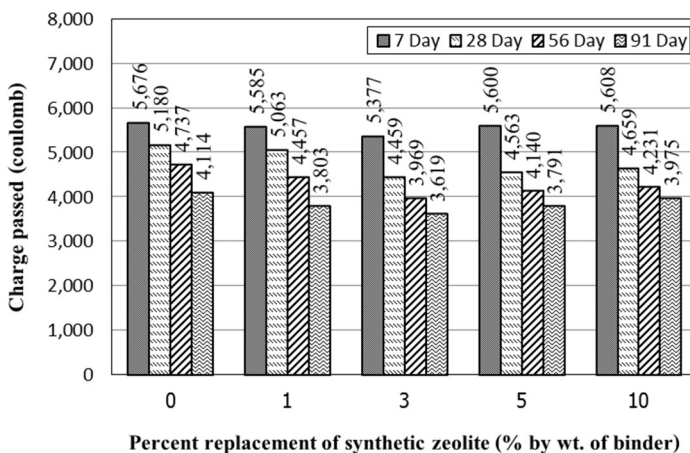
เนื่องจากเมื่อคอนกรีตมีการบ่มน้ำที่สูงขึ้นนั้นมีความที่บ่มน้ำมาก ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น มีความพรุนน้อย ปริมาณประจุจึงเคลื่อนที่ผ่านได้ยากขึ้น ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตจึงสูงขึ้น



ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



ค) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 4.5 ปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน

4.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.6 (ก) แสดงปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 สังเกตได้ว่าคอนกรีตระยะเวลาบ่ม 7 วัน ปริมาณประจุเคลื่อนผ่านคอนกรีตทุกส่วนผสมมีปริมาณใกล้เคียงกัน ซึ่งมากกว่า 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่สูง และปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตมีปริมาณลดลง และแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อระยะเวลาบ่มสูงขึ้น ได้แก่ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 56 และ 91 วัน ตามลำดับ ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 2,000-4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง โดยคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 1.5 และ 10 มีปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก โดยปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ 2,400 คูลอมป์ สำหรับคอนกรีตระยะเวลาบ่ม 91 วัน ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มความคงทนให้แก่คอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อมทางทะเล เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ในสภาพแวดล้อมทางทะเลควรมีความต้านทานคลอไรด์ที่สูง หรือเทียบเป็นปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่อยู่ในเกณฑ์ต่ำ คือ ต่ำกว่า 2,000 คูลอมป์

จากรูปที่ 4.6 (ข) แสดงปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 สังเกตได้ว่าคอนกรีตระยะเวลาบ่ม 7 วัน ปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตทุกส่วนผสมใกล้เคียงกัน และมีปริมาณลดลง และแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อระยะเวลาบ่มสูงขึ้น ได้แก่ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 56 และ 91 วัน ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีตระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน มีปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตทุกส่วนผสมมากกว่า 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่สูง ส่วนที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 10 ยังคงมีปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตมากกว่า 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่สูง และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1.3 และ 5 มีปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตอยู่ที่ประมาณ 2,000-4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง และที่คอนกรีตระยะเวลาบ่ม 91 วัน คอนกรีตทุกส่วนผสมมีปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตอยู่ที่ประมาณ 2,000-4,000 คูลอมป์ ถือ

ว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง โดยคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 ปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ซึ่งคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตต่ำที่สุด โดยปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ 3,200 คูลอมป์ สำหรับคอนกรีตระยะเวลาบ่ม 91 วัน

จากรูปที่ 4.6 (ค) แสดงปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 สังเกตได้ว่าคอนกรีตระยะเวลาบ่ม 7 วัน ปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตทุกส่วนผสมใกล้เคียงกัน และมีปริมาณลดลง และแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อระยะเวลาบ่มสูงขึ้น ได้แก่ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 56 และ 91 วัน ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีตระยะเวลาบ่ม 7 28 และ 56 วัน ปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตทุกส่วนผสมมากกว่า 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่สูง ส่วนที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ยังคงมีปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตมากกว่า 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่สูง และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 ปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตอยู่ที่ประมาณ 2,000 - 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง โดยคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 ปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ซึ่งคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตต่ำที่สุด โดยปริมาณประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ 3,600 คูลอมป์ สำหรับคอนกรีตระยะเวลาบ่ม 91 วัน

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสาน จากสมการที่ 4.2

$$E_{R,x} = \frac{C_{R,z=0} - C_{R,z=x}}{C_{R,z=0}} \times 100 \quad (4.2)$$

เมื่อ $E_{R,x}$ คือ ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ x (%)

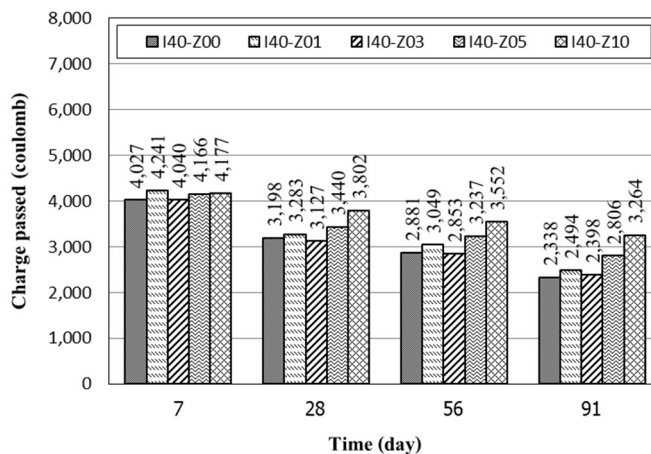
$C_{R,z=0}$ คือ ประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (coulomb)

$C_{R,z=x}$ คือ ประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสาน ร้อยละ x (coulomb)

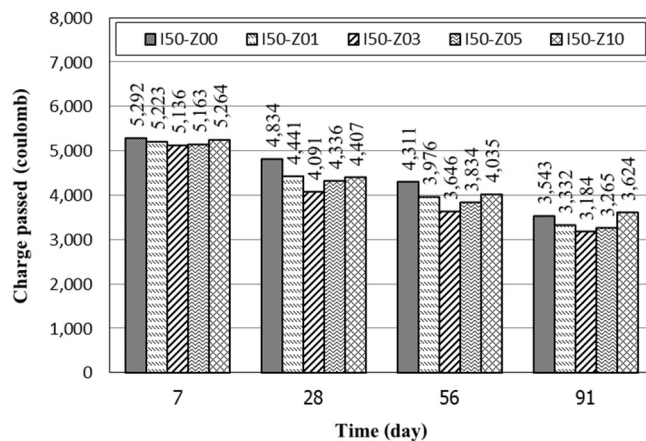
จากตารางที่ 4.2 แสดงการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ เทียบกับคอนกรีตที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มคอนกรีต 91 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาบ่มสูงสุด สังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 มีความต้านทานคลอไรด์ต่ำลงร้อยละ 6.7 2.5 20.0 และ 39.6 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก แต่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 5 และ 10 มีความต้านทานคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก อย่างชัดเจน ส่วนคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 และ 5 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 6.0 10.1 และ 7.9 ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 10 มีความต้านทานคลอไรด์ลดลงร้อยละ 2.3 ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 และ 5 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีความต้านทานคลอไรด์สูงสุด แต่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 10 มีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 7.5 12.0 7.8 และ 3.4 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก โดยคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีความต้านทานคลอไรด์สูงสุด

จากรูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต ที่ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์ของการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีแนวโน้มที่ต่ำ และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ

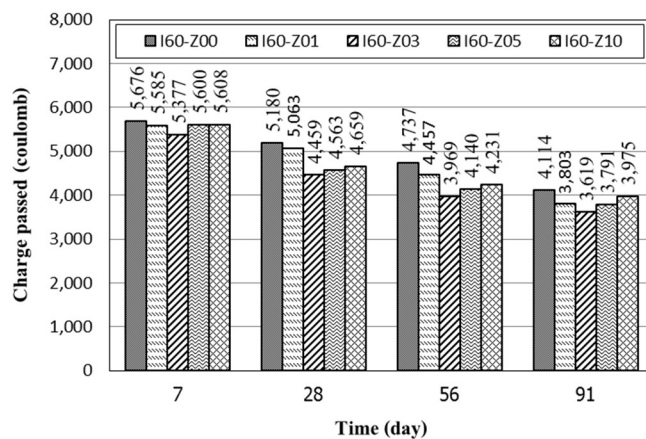
ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นสอดคล้องไปในทางเดียวกับงานวิจัยของ ชีรวัดน์ สีนศิริ และคณะ (2550) ได้นำเสนอผลกระทบของซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม พบว่าเพสต์ที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์โครงสร้างของเพสต์มีความหนาแน่นขึ้น การแทนที่ซีโอไลท์สังเคราะห์ในเพสต์มีผลกระทบที่สำคัญต่อปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาปิลลารีของเพสต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ในอัตราการแทนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์เพิ่มขึ้นแต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง และโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่มีแนวโน้มลดลงในขณะที่โพรงคาปิลลารีขนาดกลางเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ กล่าวคือคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีน้ำเป็นส่วนผสมที่ต่ำ ส่งผลให้มีน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อย คอนกรีตจึงมีโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่มีน้อย ซีโอไลท์สังเคราะห์จึงช่วยปรับปรุงขนาดของโพรงในคอนกรีตน้อย ดังนั้นการใช้ ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานจึงมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์ต่ำ ส่วนคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีน้ำเป็นส่วนผสมที่สูงขึ้น ส่งผลให้มีน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากขึ้น คอนกรีตจึงมีโพรงคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ซีโอไลท์สังเคราะห์จึงช่วยปรับปรุงขนาดของโพรงมากขึ้น ดังนั้นการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานจึงมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้น และในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 มีน้ำเป็นส่วนผสมสูงที่สุด ส่งผลให้มีน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมากที่สุด คอนกรีตจึงมีโพรงคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่มากที่สุด ซีโอไลท์สังเคราะห์จึงช่วยปรับปรุงขนาดของโพรงมากที่สุด ดังนั้นการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานจึงมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์ สูงที่สุด



ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



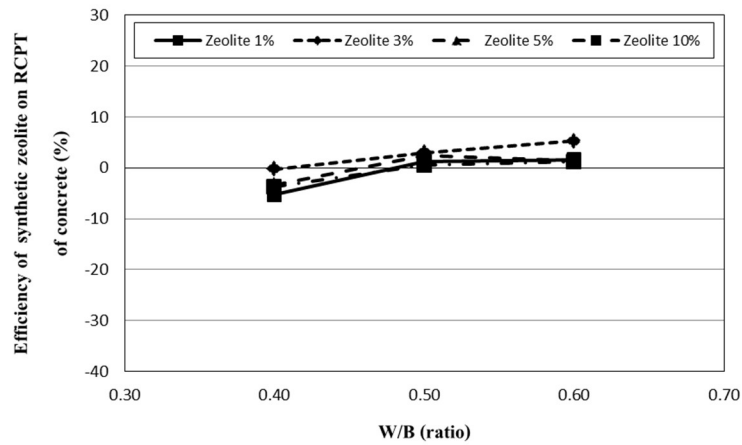
ค) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 4.6 ปริมาณประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน

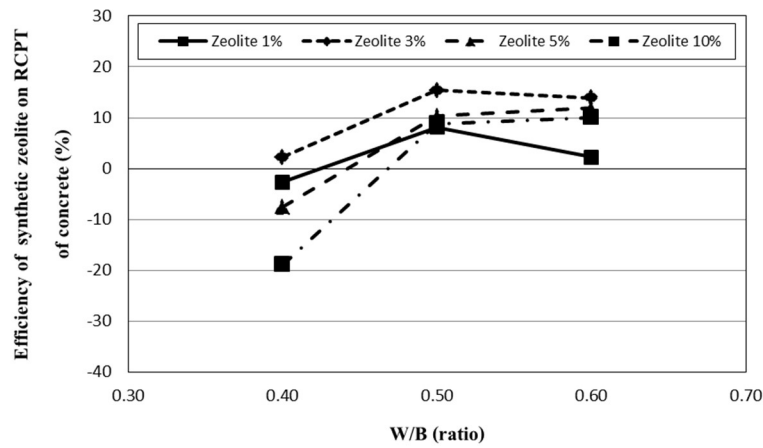
ตารางที่ 4.2 การปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ เทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก

Mix id.	Comparative charge passed of concrete based on cement concrete (%)			
	Curing time (day)			
	7	28	56	91
I40-Z01	-5.3	-2.6	-5.8	-6.7
I40-Z03	-0.3	2.2	1.0	-2.5
I40-Z05	-3.5	-7.6	-12.4	-20.0
I40-Z10	-3.7	-18.9	-23.3	-39.6
I50-Z01	1.3	8.1	7.8	6.0
I50-Z03	3.0	15.4	15.4	10.1
I50-Z05	2.5	10.3	11.1	7.9
I50-Z10	0.5	8.8	6.4	-2.3
I60-Z01	1.6	2.3	5.9	7.5
I60-Z03	5.3	13.9	16.2	12.0
I60-Z05	1.3	11.9	12.6	7.8
I60-Z10	1.2	10.1	10.7	3.4

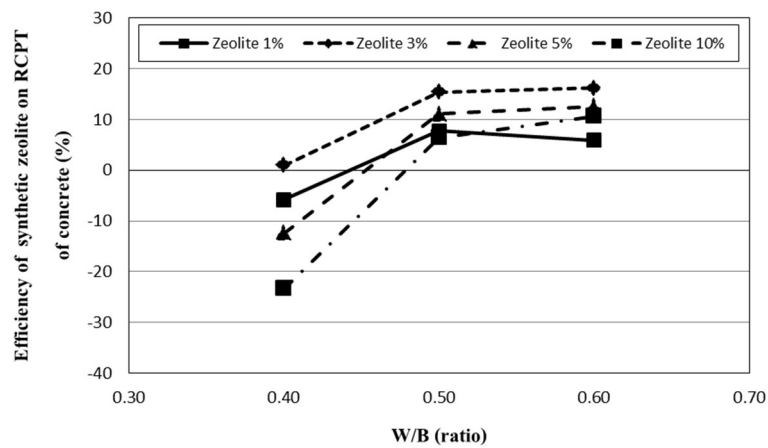
หมายเหตุ : เครื่องหมายลบ (-) แสดงถึงคอนกรีตที่มีการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักร้อยละ x



ก) ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

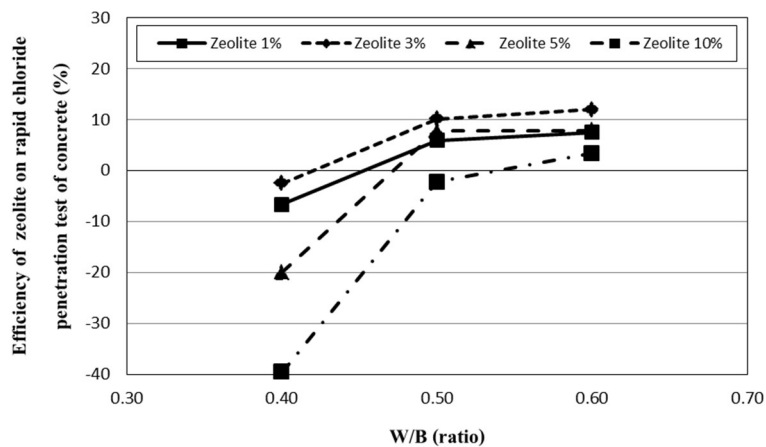


ข) ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



ค) ที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน

รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ที่แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60



ง) ที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน

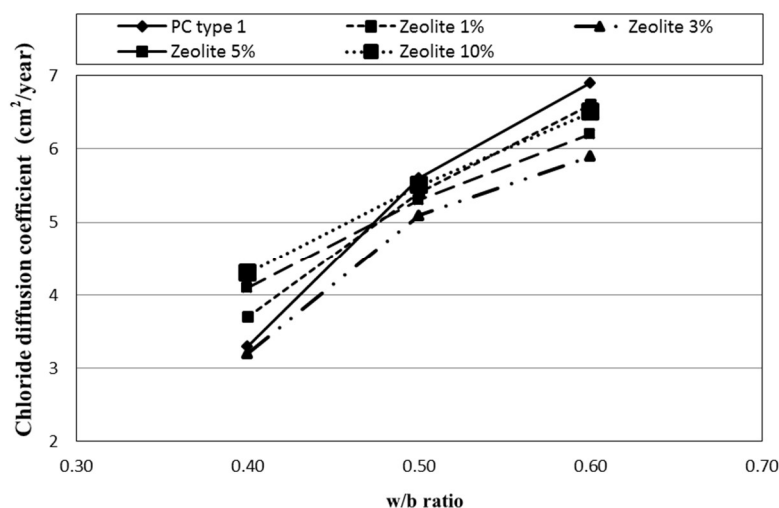
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 (ต่อ)

4.3 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์ของคอนกรีต

4.3.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.8 แสดงสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 สังเกตได้ว่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าต่ำที่สุดในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นที่ในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ นั่นหมายความว่าคอนกรีตคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีความต้านทานคลอไรด์สูงที่สุด และคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 นั้นมีความต้านทานคลอไรด์ที่ต่ำลง ตามลำดับ

เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง เนื้อคอนกรีตแน่น และมีช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ดังนั้นปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์จึงเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ยากในกรณีคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ



รูปที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60

4.3.2 ผลกระทบของอัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักที่ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 สังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 5 และ 10 มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก แต่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ตรงกันข้ามเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 สังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 10 มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักวัสดุประสาน แต่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสาน ร้อยละ 1 3 และ 5 มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก โดยที่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ต่ำที่สุด

และเมื่อพิจารณาในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 สังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสาน ร้อยละ 1 3 5 และ 10 มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสาน โดยที่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสาน จากสมการที่ 4.3

$$E_{M,x} = \frac{C_{M,z=0} - C_{M,z=x}}{C_{M,z=0}} \times 100 \quad (4.3)$$

เมื่อ $E_{M,x}$ คือ ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ x (%)

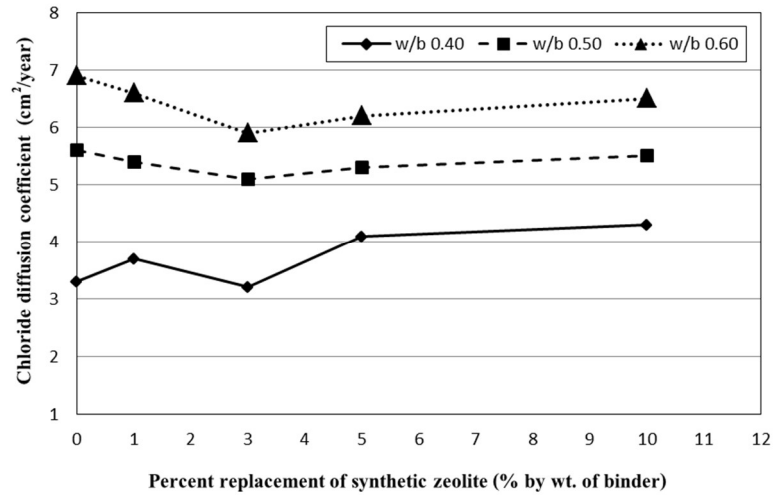
$C_{M,z=0}$ คือ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (cm^2/year)

$C_{M,z=x}$ คือ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ x (cm^2/year)

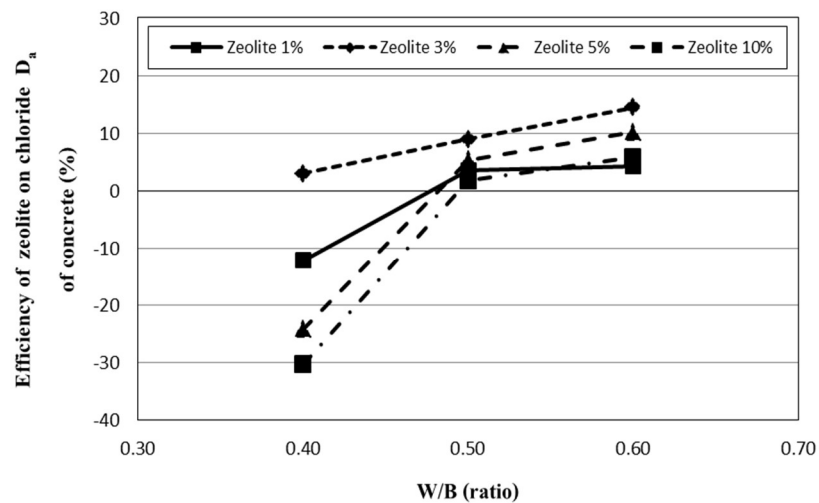
จากตารางที่ 4.3 แสดงการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ สัมพัทธ์กับคอนกรีตที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน แล้วแซในสารละลายเกลือคลอไรด์อีก 28 วัน สังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 คอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานร้อยละ 3.0 และคอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 5 และ 10 มีความต้านทานคลอไรด์ต่ำลง ร้อยละ 12.1 24.2 และ 30.3 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานร้อยละ 3.0 แต่คอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 5 และ 10 มีความต้านทานคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานร้อยละ 1 เป็นวัสดุประสานหลักอย่างชัดเจน ส่วนคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 การใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 และ 5 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 3.6 8.9 และ 5.4 ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 10 มีความต้านทานคลอไรด์ลดลงร้อยละ 1.8 ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 และ 5 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานร้อยละ 1 เป็นวัสดุประสานหลักอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีความต้านทานคลอไรด์สูงสุด แต่คอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 10 มีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานร้อยละ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 การใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 4.3 14.5 10.1 และ 5.8 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานร้อยละ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก โดยคอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ที่สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีความต้านทานคลอไรด์สูงสุด

จากรูปที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซใน สารละลายเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซีโพลีไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ระยะเวลาบ่ม 28 วัน แล้วแซในสารละลายเกลือ คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5.0 อีก 28 วัน สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทาน คลอไรด์ของการใช้ซีโพลีไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.40 มีแนวโน้มที่ต่ำ และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ

ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นสอดคล้องไปในทางเดียวกับงานวิจัยของ ชีรวัฒน์ สีนศิริ และ คณะ (2550) ซึ่งได้นำเสนอผลกระทบของซีโพลีไลท์สังเคราะห์ต่อ โครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์ เพสต์ผสม โดยพบว่าเพสต์ที่ผสมซีโพลีไลท์สังเคราะห์โครงสร้างของเพสต์มีความหนาแน่นขึ้น การ แทนที่ซีโพลีไลท์สังเคราะห์ในเพสต์มีผลกระทบที่สำคัญต่อปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรง คาปิลลารีของเพสต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโพลีไลท์สังเคราะห์ใน อัตราการแทนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์เพิ่มขึ้นแต่ขนาดเฉลี่ยของโพรง ลดลง และโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่มีแนวโน้มลดลงในขณะที่โพรงคาปิลลารีขนาดกลางเพิ่มขึ้นเมื่อ มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโพลีไลท์สังเคราะห์ กล่าวคือคอนกรีตที่ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีน้ำเป็นส่วนผสมที่ต่ำ ส่งผลให้มีน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮดรเอชันน้อย คอนกรีตจึงมีโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่มีน้อย ซีโพลีไลท์สังเคราะห์จึงช่วยปรับปรุงขนาด ของโพรงในคอนกรีตน้อย ดังนั้นการใช้ซีโพลีไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานจึงมีประสิทธิภาพใน การปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์ต่ำส่วนคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีน้ำ เป็นส่วนผสมที่สูงขึ้น ส่งผลให้มีน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮดรเอชันที่มากขึ้น คอนกรีตจึงมีโพรงคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ซีโพลีไลท์สังเคราะห์จึงช่วยปรับปรุงขนาดของโพรงมากขึ้น ดังนั้นการใช้ ซีโพลีไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานจึงมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์ สูงขึ้น และในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 มีน้ำเป็นส่วนผสมสูงสุด ส่งผลให้ มีน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮดรเอชันมากที่สุด คอนกรีตจึงมีโพรงคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่มากที่สุด ซี โพลีไลท์สังเคราะห์จึงช่วยปรับปรุงขนาดของโพรงมากที่สุด ดังนั้นการใช้ซีโพลีไลท์สังเคราะห์แทน วัสดุประสานจึงมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์สูงที่สุด



รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบแห้งในสารละลายเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน แล้วแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5.0 อีก 28 วัน

ตารางที่ 4.3 การปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซในสารละลายเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ เทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก

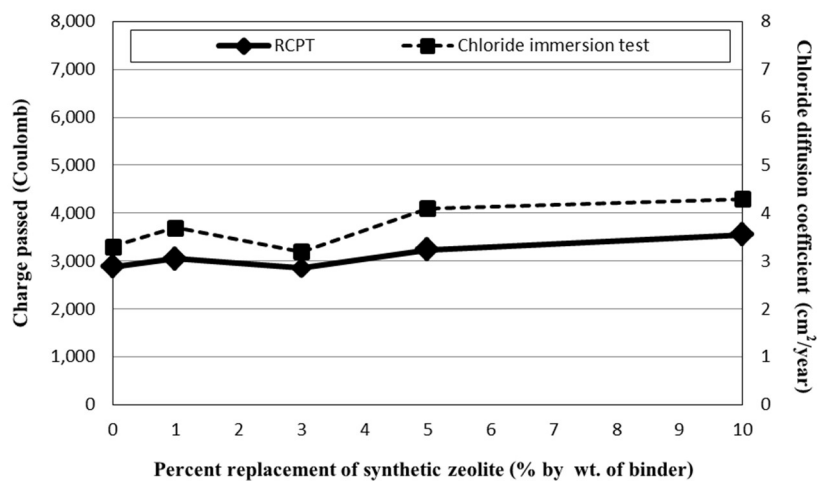
W/B ratio	Comparative D_a of concrete based on cement concrete (%)			
	Percent replacement of synthetic zeolite (% by wt. of binder)			
	1	3	5	10
0.40	-12.1	3.0	-24.2	-30.3
0.50	3.6	8.9	5.4	1.8
0.60	4.3	14.5	10.1	5.8

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานปริมาณต่างๆ

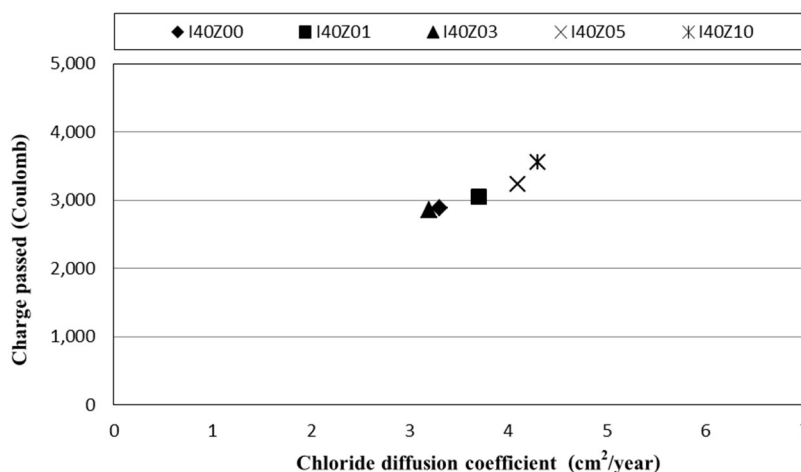
4.4.1 คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

จากรูปที่ 4.11 แสดงความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน สังเกตได้ว่า ประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตจากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดจากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 15 และ 10 มีความต้านทานคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

และจากรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง และความต้านทานคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน สังเกตได้ว่า สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีค่าต่ำ ประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งก็มีค่าต่ำ และเมื่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์มีค่าสูงขึ้น ประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งก็มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.11 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน

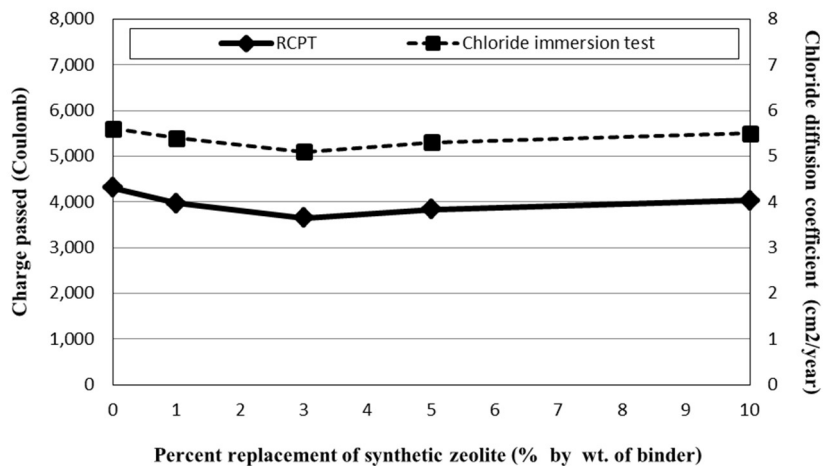


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานคลอไรด์แบบแรง และความต้านทานคลอไรด์แบบแซนสารละลายเกลือคลอไรด์ ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน

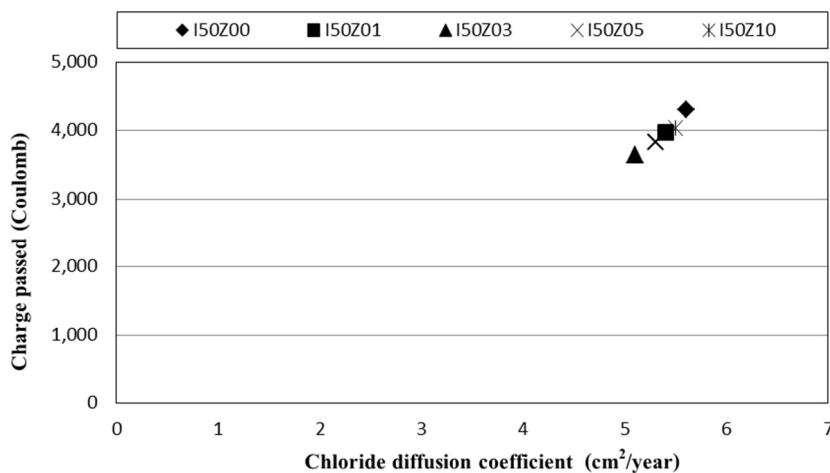
4.4.2 คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

จากรูปที่ 4.13 แสดงความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน สังเกตได้ว่าประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตจากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดจากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 10 มีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 13 และ 5 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก โดยที่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีความต้านทานคลอไรด์สูงสุด

และจากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง และความต้านทานคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน สังเกตได้ว่า สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีค่าต่ำ ประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งก็มีค่าต่ำ และเมื่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์มีค่าสูงขึ้น ประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งก็มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.13 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน

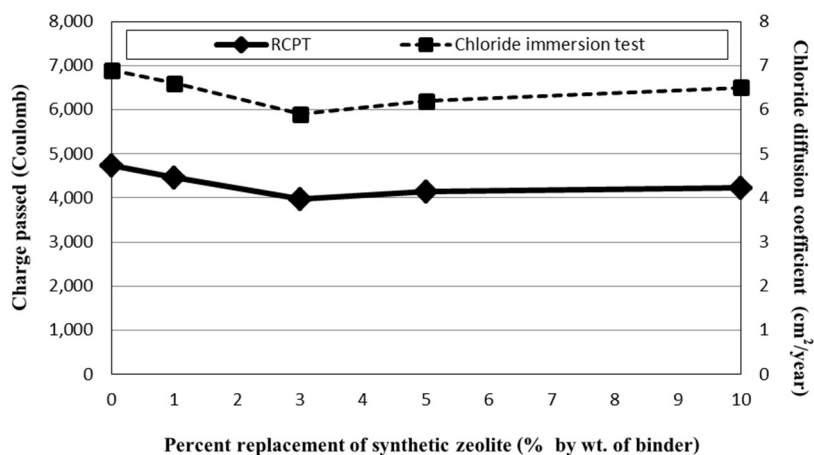


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานคลอไรด์แบบแรง และความต้านทานคลอไรด์แบบแซนสารละลายเกลือคลอไรด์ ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน

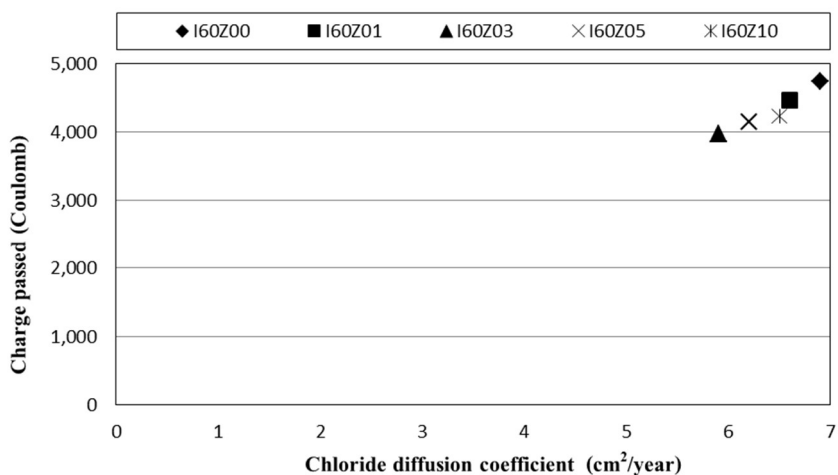
4.4.3 คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

จากรูปที่ 4.15 แสดงความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน สังเกตได้ว่าประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตจากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดจากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1 3 5 และ 10 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก โดยที่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีความต้านทานคลอไรด์สูงสุด

และจากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานคลอไรด์แบบเร่ง และความต้านทานคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน สังเกตได้ว่า สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีค่าต่ำ ประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งก็มีค่าต่ำ และเมื่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์มีค่าสูงขึ้น ประจุที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งก็มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.15 ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่ใช้ซิลิโอสโกลีท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานปริมาณต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานคลอไรด์แบบแรง และความต้านทานคลอไรด์แบบแซนสารละลายเกลือคลอไรด์ ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อายุคอนกรีตทั้งหมด 56 วัน

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผล

1. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในคอนกรีตมีผลกระทบต่อความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต โดยการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 ในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และร้อยละ 1-10 ในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ช่วยปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตให้ดีขึ้น แต่กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

2. คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตดีที่สุด และมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงมากกว่าในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ โดยคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกับคอนกรีตล้วน แต่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 มีความต้านทานคลอไรด์มากที่สุด ทั้งนี้คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 มีกำลังอัดประมาณร้อยละ 80 ของคอนกรีตล้วน ที่อายุ 28 วัน และลดลงเหลือประมาณร้อยละ 70 ที่อายุ 91 วัน

3. ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานให้ผลทดสอบไปในแนวทางเดียวกัน โดยเมื่อปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตก็มีค่าต่ำด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในคอนกรีตช่วยปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์ ซึ่งอาจเป็นเพราะซีโอไลท์สังเคราะห์ช่วยปรับปรุงขนาดของโพรงในคอนกรีตให้มีขนาดเล็กลง จึงทำให้การแทรกซึมคลอไรด์ได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วน ดังนั้นจึงควรตรวจสอบขนาดโพรงช่องว่างและปริมาณของขนาดโพรงช่องว่างต่างๆ ในคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน โดยขนาดโพรงช่องว่างที่เล็กหรือปริมาณโพรงช่องว่างที่น้อยช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ รวมทั้งควรศึกษาความสามารถในการดูดซับคลอไรด์ไอออนของซีโอไลท์สังเคราะห์ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับคลอไรด์ไอออน น่าจะส่งผลต่อการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

2. เนื่องจากการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในคอนกรีตทำให้กำลังอัดลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะซีโอไลท์สังเคราะห์มีองค์ประกอบของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ในปริมาณสูง จึงอาจเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิกา (Alkali-silica reaction) กับสารซิลิกาในมวลรวมละเอียดทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว กำลังอัดของคอนกรีตจึงต่ำ แม้ว่าจะมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ก็ตามซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ ดังนั้นจึงควรศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน

ผลผลิต (Output)

ผลงานตีพิมพ์

มีแผนเผยแพร่ผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ

บรรณานุกรม

- จิราณี วณิชกุล. (2542). ซีโอไลต์. *วารสารจอมบึง*, 2542(2), 1-8.
- ชัยณรงค์ จันทน์มณี และคุณพล ตันนโยภาส. (2556). อิทธิพลของซีโอไลต์ธรรมชาติที่มีต่อการหดรัดตัวของดินเหนียวและกำลังอัดของมอร์ตาร์มวลรวมหินทรายบด. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 16(2), 28-36.
- ทรงพล ปุญหะกิจ และณัฐพล วงศ์นง. (2555). ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี. *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.*
- ธิดารัตน์ พลเยี่ยม และทัศนีย์ ถ้วนญาติ. (2555). ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เถ้าลอยและผงหินปูน. *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.*
- ธีรวัฒน์ ลินศิริ, ชูวิทย์ นาเพ็ญ และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี. (2550). ผลกระทบของซีโอไลต์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม. *การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติครั้งที่ 12.* 2-4 พฤษภาคม, โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก, In CD-ROM.
- ธีระรัตน์ ชินแสน. (2554). ผลของการลดความชื้นด้วยเม็ดซีโอไลต์ต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศ. *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาพืชสวน, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.*
- ปิยะ ปุลิเวคินทร์. (2545). การกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน. *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.*
- วิรัชญา แก้ววัฒน์ และถิรานันท์ ถือชาติ. (2552). สารประกอบคอมโพสิทระหว่างยางธรรมชาติและซีโอไลต์. *สาขาวิทยาศาสตร์เคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.*
- อุษา อันทอง, นินนาท โชติบริบูรณ์ และธัญญา พันฤทธิคำ. (2543). การบำบัดแอมโมเนียในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลาด้วยซีโอไลต์. *สาขาวิทยาศาสตร์เคมีและเภสัช, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยทักษิณสงขลา.*
- อุษา อันทอง และปัจจมา ชูรัตน์. (2542). การบำบัดมลพิษทางอากาศโดยซีโอไลต์. *วารสารปริชาต*, 12(1), 1-2.

อุษา อันทอง และยะ โกะ๊ะ ขาเริ่มคาเบะ. (2551). การดูดซับฟอสเฟตบนซีโอไลท์ โดยระเบียบวิธีการ
คำนวณทางเคมีคอมพิวเตอร์. *วารสาร ม.ทักษิณ*, 11(3), 16-23.

เสริมพันธ์ เอี่ยมจะบก. (2550). ความคงทนของคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์.

วันที่ค้นข้อมูล 27 ตุลาคม 2556, เข้าถึงได้จาก

http://www.tumcivil.com/engfanatic/content/upload///File/Doc/Dura_Con_PART1.pdf

ASTM C1152, Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, 2000.

ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, 2000.

ASTM C1218, Standard Test Method for water-soluble chloride in mortar and concrete.

Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2000.

ASTM C39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.

Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2000.

Ahmadi, B., & Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites*, 32, 134–141.

Canpolat, F., Yilmaz, K., Kose, M.M., Sumer, M. & Yurdusev, M.A. (2004). Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. *Cement and Concrete Research*, 34, 731–735.

Chan, S.Y.N., & Ji, X. (1999). Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes.

Cement & Concrete Composites, 21, 293-300.

Ghourchian, S., Wyrzykowski, M., Lura, P., Shekarchi, M., & Ahmadi, B. (2013).

An investigation on the use of zeolite aggregates for internal curing of concrete.

Construction and Building Materials, 40, 135–144.

Ikotun, B.D., & Ekolu, S. (2010). Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 24, 749–757.

Kocak, Y., Tasci, E., & Kaya, U. (2013). The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements. *Construction and Building Materials*, 47, 720-727.

- Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., & Shekarch, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 35, 1023–1033.
- Perraki, Th., Kakali, G., & Kontoleon, F. (2003). The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement. *Microporous and Mesoporous Materials*, 61, 205–212.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., & Lin, Z.S. (1999). A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 13, 427-432.
- Quanlin, N., & Naiqian, F. (2005). Effect of modified zeolite on the expansion of alkaline silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 35, 1784– 1788.
- Ranjbar, M.M., Madandoust, R., Mousavi, S.Y., & Yosefi, S. (2013). Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 806–813.
- Sabet, F.A., Libre, N.A., & Shekarchi, M. (2013). Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials*, 44, 175–184.
- Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., & Khani, S. (2013). Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 41, 879–888.
- Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S., & Moradian, M. (2013). In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. *Construction and Building Materials*, 46, 63-70.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ ก-1 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อายุบ่ม 7 วัน 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน

Mix id.	Slump (cm)	Ex.	Compression load (kN)				Compressive strength (kg/cm ²)				Average compressive strength (kg/cm ²)			
			7	28	56	91	7	28	56	91	7	28	56	91
I40-Z00	0.4	1	603.9	734.4	789.1	851.8	616	749	804	868	647	771	802	858
		2	666.1	768.5	787.0	831.0	679	783	802	847				
		3	531.5	767.6	785.5	727.0	542	782	801	741				
I40-Z01	0.4	1	592.3	619.2	730.4	689.0	604	619	745	702	599	663	728	751
		2	583.0	668.1	699.7	732.1	594	668	713	746				
		3	490.6	658.8	711.2	788.1	500	659	725	803				
I40-Z03	0.8	1	521.7	602.7	623.7	675.1	532	603	636	688	544	602	656	688
		2	545.5	602.0	667.3	659.0	556	602	680	672				
		3	476.9	568.8	638.6	690.5	486	569	651	704				
I40-Z05	1	1	441.6	547.6	540.9	614.0	450	558	551	626	452	549	560	619
		2	460.7	530.6	545.4	591.9	470	541	556	603				
		3	429.2	537.4	562.3	615.4	438	548	573	627				
I40-Z10	1.2	1	336.1	395.5	472.3	455.8	343	403	481	465	342	408	444	453
		2	346.7	402.8	425.8	440.8	353	411	434	449				
		3	323.5	401.2	446.2	437.3	330	409	455	446				

ตารางที่ ก-2 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อายุบ่ม 7 วัน 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน

Mix id.	Slump (cm)	Ex.	Compression load (kN)				Compressive strength (kg/cm ²)				Average compressive strength (kg/cm ²)			
			7	28	56	91	7	28	56	91	7	28	56	91
I50-Z00	1.5	1	554.1	624.8	713.4	713.1	565	637	727	727	569	637	710	714
		2	529.5	625.6	688.3	689.7	540	638	702	703				
		3	561.9	650.3	687.7	697.2	573	663	701	711				
I50-Z01	1.6	1	535.9	585.3	660.4	675.5	546	597	673	689	542	597	666	675
		2	532.1	621.2	687.0	656.3	542	633	700	669				
		3	526.1	645.9	646.9	653.6	536	658	659	666				
I50-Z03	1.8	1	449.8	495.8	550.0	553.2	459	505	561	564	456	515	557	572
		2	445.1	436.5	550.6	563.0	454	445	561	574				
		3	423.5	514.5	539.7	565.8	432	524	550	577				
I50-Z05	1.8	1	406.2	454.5	496.9	502.7	414	463	507	512	413	462	504	518
		2	404.6	445.5	489.4	514.1	412	454	499	524				
		3	375.2	460.6	496.1	472.3	382	470	506	481				
I50-Z10	2.4	1	224.6	320.7	319.5	353.9	229	327	326	361	252	319	329	358
		2	250.2	306.4	323.4	350.0	255	312	330	357				
		3	267.8	311.7	325.8	350.7	273	318	332	357				

ตารางที่ ก-3 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อายุบ่ม 7 วัน 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน

Mix id.	Slump (cm)	Ex.	Compression load (kN)				Compressive strength (kg/cm ²)				Average compressive strength (kg/cm ²)			
			7	28	56	91	7	28	56	91	7	28	56	91
I60-Z00	2.6	1	397.5	587.6	506.8	650.4	405	599	517	663	450	553	574	636
		2	439.7	556.5	523.4	642.3	448	567	534	655				
		3	443.0	527.7	563.0	577.6	452	538	574	589				
I60-Z01	2.5	1	423.3	462.3	431.3	494.3	431	471	440	504	429	511	521	539
		2	403.5	514.9	511.0	561.8	411	525	521	573				
		3	419.1	527.8	497.9	530.8	427	538	508	541				
I60-Z03	2.6	1	361.0	457.6	477.0	454.3	368	466	486	463	347	434	450	458
		2	337.4	394.4	423.8	438.2	344	402	432	447				
		3	323.8	425.4	423.9	456.8	330	434	432	466				
I60-Z05	2.7	1	338.5	416.2	372.7	441.8	345	424	380	450	336	410	417	444
		2	329.7	405.4	403.6	432.4	336	413	411	441				
		3	320.9	384.0	413.7	433.5	327	391	422	442				
I60-Z10	3.3	1	254.1	274.5	289.8	298.1	259	280	295	304	246	280	297	312
		2	239.8	274.7	292.4	307.8	244	280	298	314				
		3	230.9	274.0	291.8	312.6	235	279	297	319				