ความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์

Chloride Resistance and Compressive Strength of Concrete Containing Synthetic Zeolite

อัญชนา กิจจานนท์[1] ทวีชัย สำราญวานิช[2,*] และ ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี
**Corresponding author; E-mail address: twc@buu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ โดยวัสดุประสานที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลท์สังเคราะห์ ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.10 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและกำลังอัดของคอนกรีตทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28, 56 และ 91 วัน จากผลการทดลองพบว่า คอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์มีความต้านทานคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตล้วนทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.03 มีความต้านทานคลอไรด์ดีที่สุด แต่คอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตล้วน

คำสำคัญ: ความต้านทานคลอไรด์, คอนกรีต, ซีโอไลท์สังเคราะห์, กำลังอัด

Abstract

This paper aims to study the chloride resistance and compressive strength of concrete containing synthetic zeolite. In this paper, Portland cement type I and synthetic zeolite were used as cementitious materials. The synthetic zeolite to binder ratios were kept at 0.01, 0.03, 0.05, and 0.10. Water to binder ratios were kept at 0.50 and 0.60. The rapid chloride penetration and compressive strength of concrete were performed at 7, 28, 56 and 91 days of curing time. From the experimental results, it was seen that concretes with synthetic zeolite had better chloride resistance than cement-only concrete at all water to binder ratios. Concrete with synthetic zeolite to binder ratio of 0.03 had the best chloride resistance. But, concretes with synthetic zeolite had lower compressive strength than cement-only concrete.

Keywords: chloride resistance, concrete, synthetic zeolite, compressive strength

1. คำนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเลมักเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล โดยคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้จากหลายกระบวนการ เช่น การแพร่ (Diffusion), การดึงดูดคาปิลลารี (Capillary suction), การดึงดูดอิออนคลอไรด์ (Ion adsorption) และความดันน้ำ (Hydraulic pressure) เมื่อคลอไรด์แทรกซึมภายในเนื้อคอนกรีตและมีการสะสมของคลอไรด์ที่บริเวณผิวของเหล็กเสริมจนมีค่ามากกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Threshold chloride content) ชั้นฟิล์มที่เคลือบป้องกันเหล็กเสริมอยู่จะถูกทำลายลง และหากมีปริมาณออกซิเจนและความชื้นที่เพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมได้ เมื่อปริมาตรของสนิมเกิดเพิ่มมากขึ้นจะดันให้เนื้อคอนกรีตเกิดการหลุดล่อนและแตกร้าวในที่สุด [1, 2]

ซีโอไลท์ (Zeolite) คือ สารประกอบอลูมิโนซิลิเกต ซึ่งหน่วยย่อยของซีโอไลท์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) โดยที่อะตอมของซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุมโดยใช้ออกซิเจนร่วมกันก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในระบบสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม จึงทำให้ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลท์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุน อีกทั้งในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลท์ยังมีประจุบวกของโลหะที่เกาะอยู่หลวม ๆ ได้แก่ โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม เป็นต้น และยังมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึกด้วย [3] โดยทั่วไปซีโอไลท์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ซีโอไลท์ธรรมชาติ และซีโอไลท์สังเคราะห์ โดยซีโอไลท์สังเคราะห์มีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ มีโครงสร้างที่แน่นอน มีความบริสุทธิ์ และมีสารปนเปื้อนน้อยกว่าซีโอไลท์ธรรมชาติ จากผลการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่วัสดุประสานพบว่า คอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์มีคุณสมบัติทางกลและความคงทนดีขึ้น [4]

สำหรับบทความนี้มุ่งศึกษาคุณสมบัติความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในคอนกรีต

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC)	ซีโอไลท์สังเคราะห์ (Z)
SiO_2	20.8	32.98
Al_2O_3	5.5	27.73
Fe_2O_3	3.16	0.04
CaO	64.97	0.04
MgO	1.06	-
SO_3	2.96	0.04
Na_2O	0.08	19.86
K_2O	0.55	0.04
TiO_2	0.01	-
P_2O_5	0.01	-
LOI	2.89	19.19
คุณสมบัติทางกายภาพ		
Specific gravity	3.11	2.16
ความละเอียดทดสอบโดยวิธี Blaine fineness (ซม2 /กรัม)	3,480	4,227

2. การทดลอง

2.1 วัสดุและส่วนผสมที่ใช้

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ (Z) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาออกไซด์และอลูมิน่าออกไซด์เป็นหลักแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพแสดงไว้ในตารางที่ 1 ส่วนรูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลท์สังเคราะห์ถูกแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ มวลรวมหยาบใช้หินปูนที่มีขนาดโตสุดเท่ากับ 19 มม และมีสภาพผิวอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายบกที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

สำหรับส่วนผสมคอนกรีตถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.50 และ 0.60 อัตราส่วนซีโอไลท์ต่อวัสดุประสาน (z/b) เท่ากับ 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.10

2.2 วิธีการทดสอบ

2.2.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [5] โดยการหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรงช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำภายในคอนกรีต โดยการทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง10 ซม สูง 20 ซม ทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28, 56 และ 91 วัน หลังจากครบระยะเวลาบ่มน้ำตัวอย่างถูกทดสอบตาม ASTM C1202 โดยค่าประจุไฟฟ้าที่ได้อยู่ในหน่วยคูลอมป์ ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกพิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์อิออนในคอนกรีตดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

รหัส	w/b	z/b	Mix proportions (kg/m^3)				
			OPC	Zeolite	Water	Sand	Rock
I50-Z00	0.50	-	369	0	185	776	1,025
I50-Z01		0.01	365	4	184	776	1,025
I50-Z03		0.03	356	11	184	776	1,025
I50-Z05		0.05	348	18	183	776	1,025
I50-Z10		0.10	327	36	181	776	1,025
I60-Z00	0.60	-	329	0	198	776	1,025
I60-Z01		0.01	325	3	197	776	1,025
I60-Z03		0.03	318	10	197	776	1,025
I60-Z05		0.05	310	16	196	776	1,025
I60-Z10		0.10	292	32	194	776	1,025

หมายเหตุ: ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

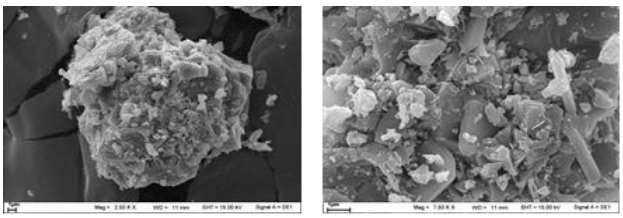
"I xx" หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ "0.xx"

"Z xx" หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุเท่ากับ "0.xx"

"w/b" หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

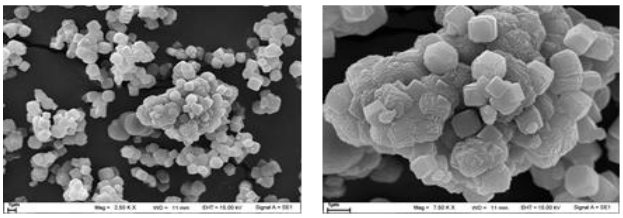
"z/b" หมายถึง อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน

"OPC" หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



x2500 x7500

รูปที่ 1 ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



x2500 x7500

รูปที่ 2 ลักษณะอนุภาคของซีโอไลท์สังเคราะห์

ตารางที่ 3 การแทรกซึมคลอไรด์อิออนในคอนกรีตภายใต้ค่าประจุไฟฟ้า [5]

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

2.2.2 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตถูกทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 1881-116 [6] โดยทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ซึ่งมีขนาด 10x10x10 ซม^3 และทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

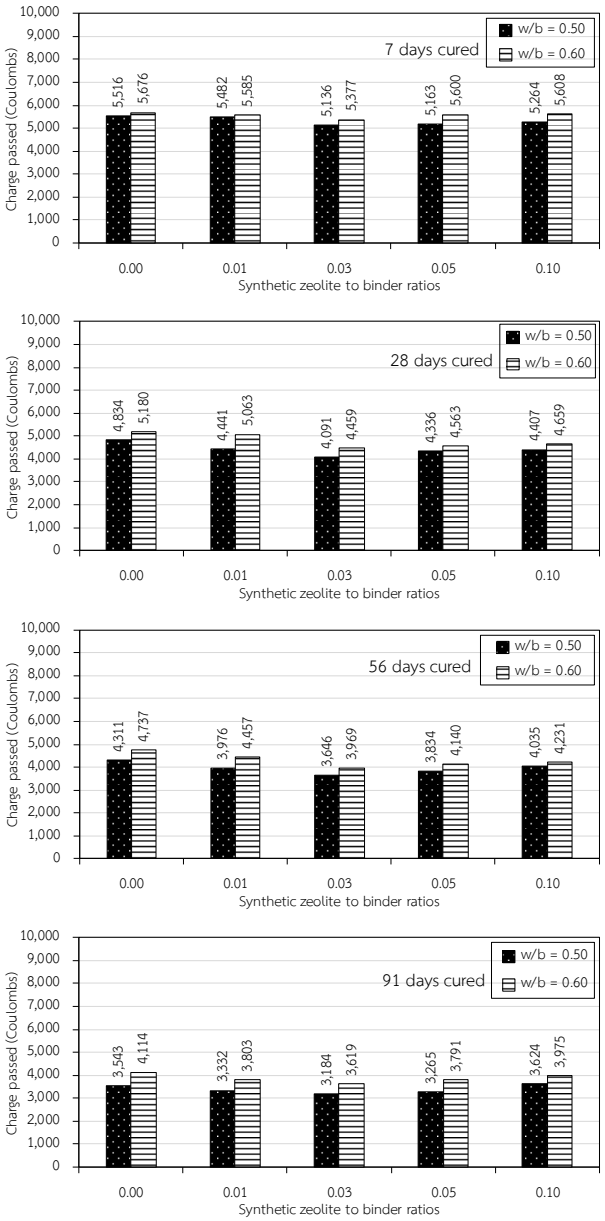
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

รูปที่ 3 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน จากรูปพบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าต่ำที่สุด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีการใช้น้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยกว่า จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำส่งผลให้การไหลผ่านของประจุเป็นไปได้ยาก เมื่อปริมาณประจุที่ไหลผ่านมีค่าต่ำลง นั่นหมายถึงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่สูงขึ้น [7, 8]

เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำดังรูปที่ 4 พบว่า คอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมากที่สุด และเมื่อคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมีแนวโน้มที่ต่ำลง โดยมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันในทุก ๆ ส่วนผสม คอนกรีตเนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้นทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปอซโซลานิกของคอนกรีตเกิดขึ้นเพิ่มมากขึ้นทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่อคอนกรีตมีความทึบน้ำส่งผลให้ปริมาณไฟฟ้าไหลผ่านโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ยากขึ้น ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตจึงสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ดังรูปที่ 4 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 คอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์มีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ต่ำกว่าคอนกรีตล้วน และแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อระยะเวลาบ่มสูงขึ้น จากรูปจะเห็นว่าที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 และ 28 วัน ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่า 4,000 คูลอมป์ หากพิจารณาตามเกณฑ์ ASTM C1202 พบว่า คอนกรีตนั้นมีการแทรกซึมคลอไรด์สูง สำหรับระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.10 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมากกว่า 4,000 คูลอมป์ เช่นเดียวกัน ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.1, 0.03 และ 0.05 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วง 2,000 - 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง



รูปที่ 3 ผลกระทบของ w/b ต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

และที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน คอนกรีตทุกส่วนผสมมีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วง 2,000 - 4,000 คูลอมป์ เช่นเดียวกัน โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำที่สุด

สำหรับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 พบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ต่ำกว่าคอนกรีตล้วน ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28 และ 56 วัน ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่า 4,000 คูลอมป์ หากพิจารณาตามเกณฑ์ ASTM C1202 พบว่าค่าที่ได้มีเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่สูง สำหรับที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ยังคงมีปริมาณประจุไฟฟ้ามากกว่า 4,000 คูลอมป์ ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุ

ประสานที่อัตราส่วน 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.10 มีปริมาณประจุไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2,000 - 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.03 มีปริมาณประจุไฟฟ้าต่ำที่สุด เช่นเดียวกันกับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนบางส่วนของปูนซีเมนต์จากสมการที่ (1)

$$E_{cp,z=x} = \frac{CP_{z=0} - CP_{z=x}}{CP_{z=0}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ $E_{cp,z=x}$ คือ ประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ x (%)

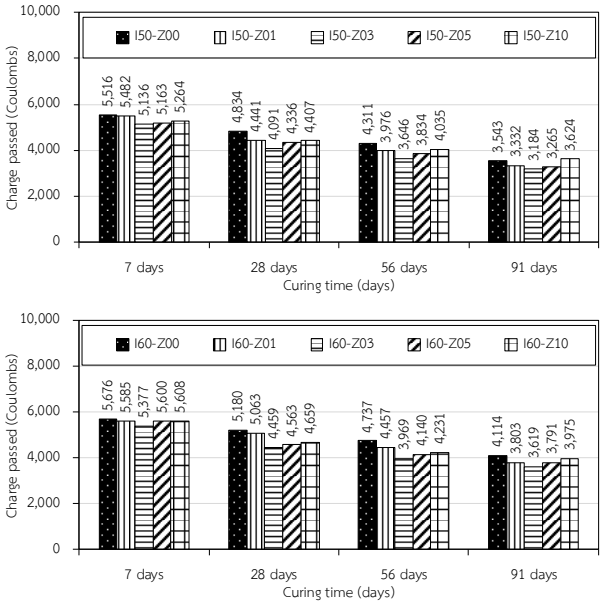
$CP_{z=0}$ คือ ประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (Coulomb)

$CP_{z=x}$ คือ ประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ x (Coulomb)

ตารางที่ 4 แสดงประสิทธิภาพการปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานบางส่วน เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01, 0.03 และ 0.05 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 6.0, 10.1 และ 7.9 ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.10 มีความต้านทานคลอไรด์ต่ำคอนกรีตล้วนร้อยละ 2.3 ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01, 0.03 และ 0.05 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.03 มีความต้านทานคลอไรด์สูงสุด แต่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.10 มีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.10 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 7.5, 12.0, 7.8 และ 3.4 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.10 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก

3.2 กำลังอัดของคอนกรีต

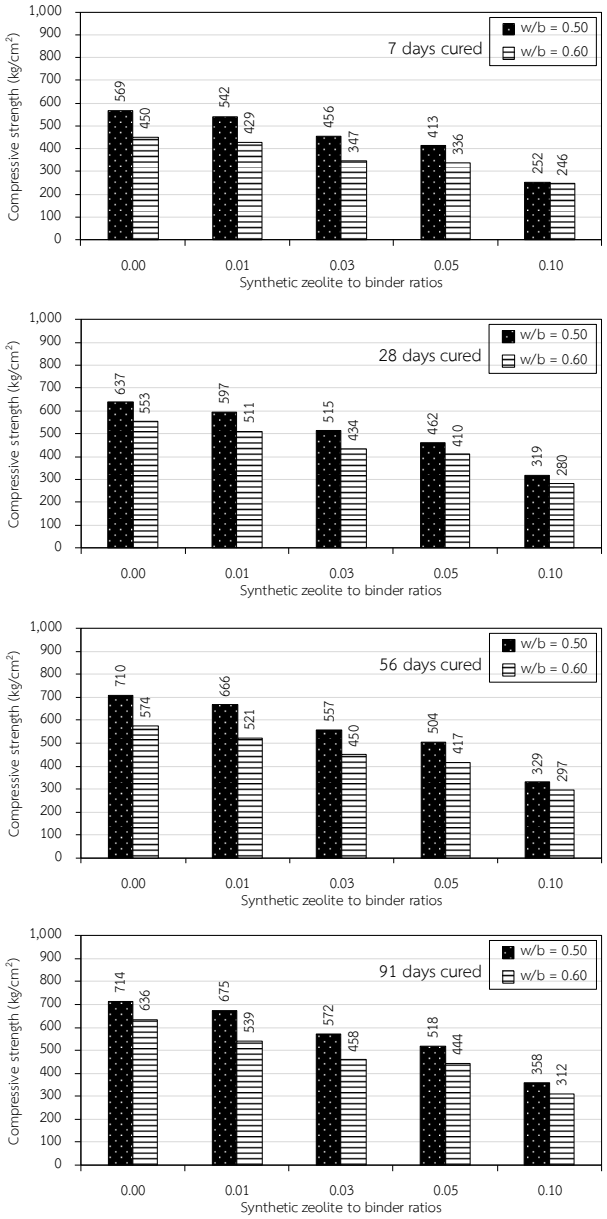
รูปที่ 5 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน จากรูปพบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ทุกระยะเวลาบ่มน้ำ เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีน้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำ คอนกรีตจึงมีความทึบน้ำ ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตจึงมีค่าสูง นอกจากนี้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มน้ำ เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำสูงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดผลผลิตเช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) เพิ่มมากขึ้น ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4 ผลกระทบของ z/b ต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์

Mix id	ประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์, E_{cp} (ร้อยละ)			
	ระยะเวลาบ่มน้ำ (วัน)			
	7	28	56	91
I50-Z00	-	-	-	-
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-Z00	-	-	-	-
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

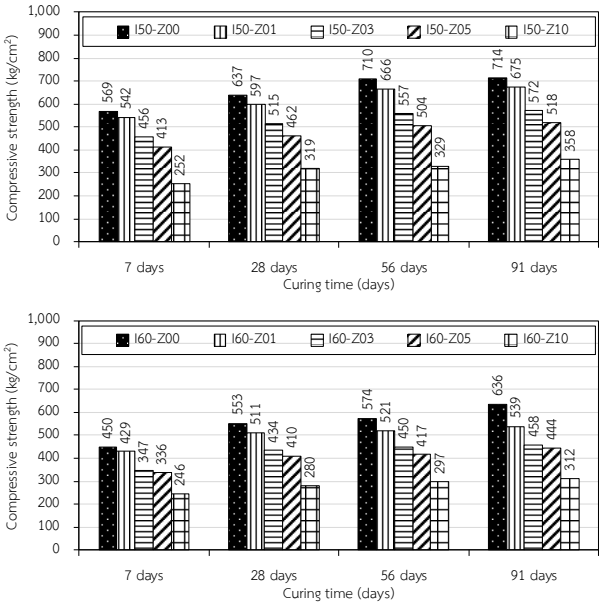


รูปที่ 5 ผลกระทบของ w/b ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ดังรูปที่ 6 พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักมีกำลังอัดสูงสุด และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานมีกำลังอัดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ด้วยซีโอไลท์ เนื่องจากเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ถูกแทนที่มากขึ้น ปริมาณของสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงลดลง ส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ต่ำ กำลังอัดของคอนกรีตจึงมีค่าต่ำกว่า ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ Ikotun et al. [9] ซึ่งศึกษาซีโอไลท์ดัดแปลง แต่ผลกลับตรงข้ามกับงานวิจัยของ Canpolat et al. [10] ซึ่งศึกษาซีโอไลท์ธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์มีการพัฒนากำลังอัดต่ำกว่าเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น

ตารางที่ 5 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์

Mix id	ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์, SI (ร้อยละ) ระยะเวลาบ่มน้ำ (วัน)			
	7	28	56	91
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



รูปที่ 6 ผลกระทบของ z/b ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

เพื่อให้การพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนบางส่วนของปูนซีเมนต์เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนมีความชัดเจนขึ้น จึงคำนวณเปรียบเทียบเป็นร้อยละของกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ตามสมการที่ (2) โดยค่าที่ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5

$$SI_{z=x} = \frac{S_{R,z=x}}{S_{z=0}} \times 100 \qquad (2)$$

เมื่อ $SI_{z=x}$ คือ ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ x เทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (%)

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

$S_{R,z=x}$ คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ x (kg/cm^2)

จากตารางที่ 5 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.10 มีกำลังอัดต่ำว่าคอนกรีตล้วน โดยมีการพัฒนากำลังอัดที่ร้อยละ 95, 80, 73 และ 50 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วน และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.10 มีการพัฒนากำลังอัดที่ร้อยละ 85, 72, 70 และ 49 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วน

4. สรุปผล

จากการศึกษาความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตส่งผลให้ความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตสูงขึ้น โดยการใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งสูงที่สุด

2. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง และต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตล้วน โดยกำลังอัดลดลงตาการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน

3. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้นส่งผลให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและกำลังอัดของคอนกรีตลดลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 143/2559 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

[1] ทวีชัย สำราญวานิช และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2561). *การเสื่อมสภาพโครงสร้างคอนกรีต*. บริษัท จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์ จำกัด.

[2] Tangtermsirikul, S. (2003). *Durability and mix design of concrete (1st edition)*. Pathum Thani: Thammasat University, Rangsit Campus.

[3] Davis, M.E. (1991). Zeolite and molecular sieve : not just ordinary catalyst. *Ind. Eng. Cham. Res*., 30, pp. 1675-1683.

[4] Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B. and Shekarch, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 35, pp. 1023–1033.

[5] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2000). *ASTM C1202, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to. resist chloride ion penetration*.

[6] British Standards (BS). *BS 1881-116, Method for determination of compressive strength of concrete cubes*.

[7] ธีรวัฒน์ สินศิริ, ชูวิทย์ นาเพีย และ ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี. (2550). ผลกระทบของซีโอไลท์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม. *การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12*, พิษณุโลก, 2-4 พฤษภาคม 2550.

[8] Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M. and 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, pp. 879–888.

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

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