

# ผลกระทบของการใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์ต่อความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต

อัญญา กิจจานนท์<sup>1</sup> และทวีชัย สำราญวานิช<sup>1\*</sup>  
ann\_aunchana@hotmail.co.th<sup>1</sup>, twc@buu.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Received	: 1-Oct-2020
Revised	: 19-Oct-2020
Accepted	: 25-Dec-2020

## บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์ต่อความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต โดยวัสดุประสานที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีไอไลท์สังเคราะห์ ใช้อัตราส่วนซีไอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงและกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 28 56 และ 91 วัน และทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีตภายหลังบ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 เป็นระยะเวลา 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมซีไอไลท์สังเคราะห์มีความต้านทานคลอไรด์ดีกว่าของคอนกรีตล้วนทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีไอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 มีความต้านทานคลอไรด์ดีที่สุด เนื่องจากซิลิกาและอลูมินาของซีไอไลท์สังเคราะห์สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็น CSH และ CAH และขนาดอนุภาคที่เล็กของซีไอไลท์สามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ แต่พบว่าคอนกรีตที่ผสมซีไอไลท์สังเคราะห์มีกำลังอัดต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน เนื่องจากการใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์ในคอนกรีตทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์ลดลงด้วย นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดสูงกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

**คำสำคัญ:** ซีไอไลท์สังเคราะห์ ความต้านทานคลอไรด์ การแทรกซึมคลอไรด์ กำลังอัด

# Effect of Using Synthetic Zeolite on Chloride Resistance and Compressive Strength of Concrete

Aunchana Kijjanon<sup>1</sup> and Taweechai Sumranwanich<sup>1\*</sup>

Ann\_aunchana@hotmail.co.th<sup>1</sup>, twc@buu.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Burapha Construction and Maintenance Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Burapha University

Received	: 1-Oct-2020
Revised	: 19-Oct-2020
Accepted	: 25-Dec-2020

## Abstract

This paper aims to study the effect of using synthetic zeolite on chloride resistance and compressive strength of concrete. In this paper, Portland cement type I and synthetic zeolite were used as cementitious materials. The binder content in concrete was replaced by synthetic zeolite at 0.01, 0.03, 0.05 and 0.10 of synthetic zeolite to binder ratios. 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. Chloride penetration by bulk diffusion was tested after 28 days of water curing and immersed in 5.0% chloride concentration for 28 days. The study results showed that concretes with synthetic zeolite had better chloride resistance than cement-only concrete at all water to binder ratios. Concrete with 0.03 of synthetic zeolite to binder ratio had the best chloride resistance. This property is because silica and alumina of synthetic zeolite can react with calcium hydroxide to form CSH and CAH, and the small particles of synthetic zeolite can fill the void in concrete. But, concretes with synthetic zeolite had lower compressive strength than cement-only concrete because cement content was reduced by using synthetic zeolite in concrete, resulting in decreased compressive strength. Moreover, concrete with 0.50 of water to binder ratio had higher chloride resistance and compressive strength than concrete with 0.60 of water to binder ratio.

**Keywords:** synthetic zeolite, chloride resistance, chloride penetration, compressive strength

## 1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเลมักเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล โดยคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้จากหลายกระบวนการ เช่น การแพร่ (Diffusion) การดึงดูดคาพิลลารี (Capillary suction) การดึงดูดไอออนคลอไรด์ (Ion adsorption) และความดันน้ำ (Hydraulic pressure) เมื่อคลอไรด์แทรกซึมภายในเนื้อคอนกรีตและมีการสะสมของคลอไรด์ที่บริเวณผิวของเหล็กเสริมจะมีค่ามากกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Critical chloride content) ชั้นฟิล์มที่เคลือบป้องกันเหล็กเสริมอยู่ จะถูกทำลายลง และหากมีปริมาณออกซิเจนและความชื้นที่เพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมได้ เมื่อปริมาณของสนิมเกิดเพิ่มมากขึ้นจะดันให้เนื้อคอนกรีตเกิดการหลุดล่อนและแตกร้าวในที่สุด [1, 2]

ซีโอไลต์ (Zeolite) คือ สารประกอบอลูมิโนซิลิเกต ซึ่งหน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม ( $\text{SiO}_4$  หรือ  $\text{AlO}_4$ ) สร้างพันธะกันเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) โดยที่อะตอมของซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุมโดยใช้ออกซิเจนร่วมกันก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในระบบสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม จึงทำให้ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุน อีกทั้งในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะที่เกาะอยู่หลวม ๆ ได้แก่ โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม เป็นต้น และยังมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึกด้วย [3] โดยทั่วไปซีโอไลต์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และซีโอไลต์สังเคราะห์ โดยซีโอไลต์สังเคราะห์มีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ มีโครงสร้างที่แน่นอน มีความบริสุทธิ์ และมีสารปนเปื้อนน้อยกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ แต่เมื่อพิจารณาด้านราคาของซีโอไลต์สังเคราะห์พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์มีราคาสูงกว่าปูนซีเมนต์ Najimi et al. [4] สรุปว่า คอนกรีตผสมซีโอไลต์ช่วยลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและช่วยปรับปรุงการแตกร้าวเนื่องจากความร้อนและคุณสมบัติด้าน

ความคงทนของคอนกรีต เช่น การแทรกซึมคลอไรด์ อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Corrosion rate) การหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) และการแทรกซึมน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้งานวิจัยของ Sabet et al. [5], Ahmadi and Shekarchi [6], Karakurt and Topcu [7], Valipour et al. [8] และ Valipour et al. [9] รายงานว่าการใช้ซีโอไลต์เป็นแร่ผสมเพิ่มในคอนกรีตช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความคงทนให้กับคอนกรีตได้

ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งศึกษาสมบัติความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในคอนกรีต โดยทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดและกำลังอัดของคอนกรีต

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1. วัสดุและส่วนผสมที่ใช้

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (I) เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ (Z) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์เป็นหลักแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 1 ส่วนรูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์สังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ มวลรวมหยาบ (R) ใช้หินปูนที่มีขนาดโตสุดเท่ากับ 19 มิลลิเมตร และอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง ส่วนมวลรวมละเอียด (S) ใช้ทรายบดที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 สำหรับส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.50 และ 0.60 อัตราส่วนซีโอไลต์ต่อวัสดุประสาน (z/b) เท่ากับ 0.01 0.03 0.05 และ 0.10

**ตารางที่ 1** องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (I)	ซีไอไลท์สังเคราะห์ (Z)
SiO <sub>2</sub>	20.8	32.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.5	27.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16	0.04
CaO	64.97	0.04
MgO	1.06	-
SO <sub>3</sub>	2.96	0.04
Na <sub>2</sub> O	0.08	19.86
K <sub>2</sub> O	0.55	0.04
TiO <sub>2</sub>	0.01	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	-
LOI	2.89	19.19
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ความถ่วงจำเพาะ	3.11	2.16
ความละเอียดทดสอบโดยวิธี Blaine fineness (ซม <sup>2</sup> /กรัม)	3,480	4,227

**2.2. วิธีการทดสอบ**

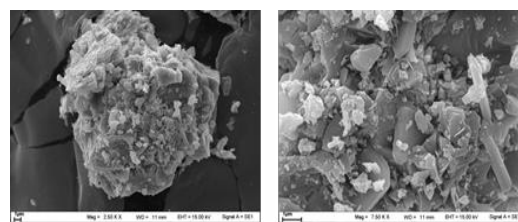
**2.2.1 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต**

ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [10] โดยการหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรงช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำภายในคอนกรีต โดยการทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร จำนวน 1 ก้อนต่อ 1 อายุทดสอบ ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 28 56 และ 91 วัน ภายหลังจากครบกำหนดระยะเวลาบ่มน้ำตัวอย่างถูกตัดให้มีขนาดหน้า 5 เซนติเมตร บริเวณส่วนบน กลาง และ ล่าง และทำการทดสอบโดยเริ่มจากประกอบตัวอย่างเข้าเซลล์ทดสอบแล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M ที่ขั้วบวก (Anode) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 3 ที่ขั้วลบ (Cathode) ผ่านค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 60±0.01 Volts ต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำการเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างแล้วคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านในหน่วยคูลอมป์ นำค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านหาค่าเฉลี่ยและพิจารณาเกณฑ์คุณภาพดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 2** ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้

Mix id	Mix proportions (kg/m <sup>3</sup> )				
	I	Z	Water	S	R
I50-Z00	369	0	185	776	1,025
I50-Z01	365	4	184	776	1,025
I50-Z03	356	11	184	776	1,025
I50-Z05	348	18	183	776	1,025
I50-Z10	327	36	181	776	1,025
I60-Z00	329	0	198	776	1,025
I60-Z01	325	3	197	776	1,025
I60-Z03	318	10	197	776	1,025
I60-Z05	310	16	196	776	1,025
I60-Z10	292	32	194	776	1,025

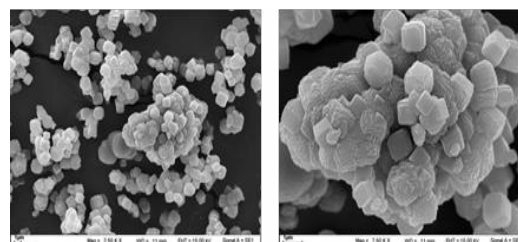
หมายเหตุ: ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้ "Ixx" หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ "0.xx", "Z.xx" หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีไอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุเท่ากับ "0.xx"



x2500

x7500

**รูปที่ 1** ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



x2500

x7500

**รูปที่ 2** ลักษณะอนุภาคของซีไอไลท์

**ตารางที่ 3** ความสามารถการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตภายใต้เกณฑ์ปริมาณประจุไฟฟ้า [10]

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 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

ไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1556 [11] โดยหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ของคอนกรีต โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรสูง 20 เซนติเมตร จำนวน 1 ก้อนต่อ 1 อายุทดสอบ จากนั้นบ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบระยะเวลาบ่มน้ำ นำตัวอย่างเคลือบผิวด้านข้างและด้านล่างด้วยอิพ็อกซี ยกเว้นด้านบนหนึ่งด้านเพื่อควบคุมให้คลอไรด์แพร่เข้าสู่คอนกรีตในทิศทางเดียว จากนั้นนำตัวอย่างไปเผชิญสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้นคลอไรด์ร้อยละ 5 เป็นระยะเวลา 28 วัน เมื่อครบระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ นำตัวอย่างตัดหนาชั้นละ 1 เซนติเมตร นำมาบดเป็นผงเพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 [12] ต่อไป

## 2.2.3 การทดสอบกำลังอัด

กำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 1881-116 [13] โดยทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ซึ่งมีขนาด 10x10x10 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อน ต่อ 1 อายุทดสอบ และทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 28 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

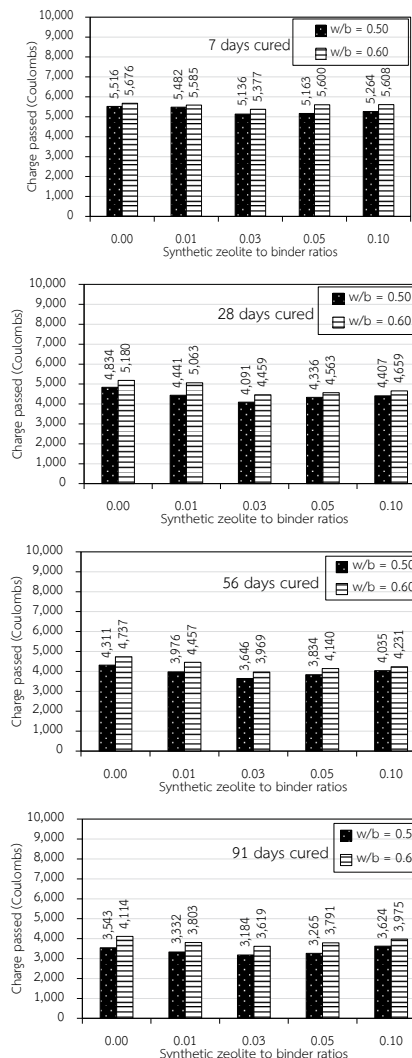
## 3. ผลการทดลองและอภิปราย

### 3.1. การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

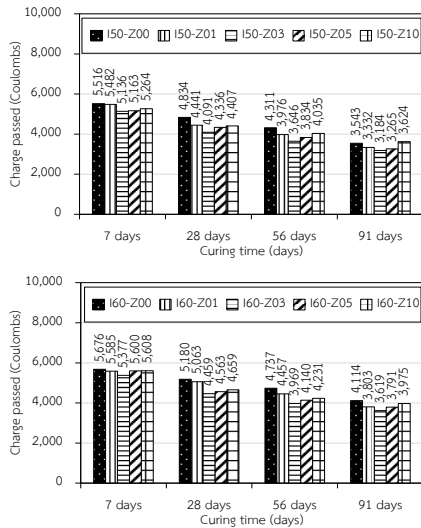
รูปที่ 3 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน จากรูปพบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าต่ำกว่า และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีการใช้น้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยกว่า

จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำส่งผลให้การไหลผ่านของประจุเป็นไปได้อย่างน้อย เมื่อปริมาณประจุที่ไหลผ่านมีค่าต่าลงนั้นหมายถึงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่สูงขึ้น [8]

เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำดังรูปที่ 4 พบว่า คอนกรีตบ่มน้ำ 7 วัน มีปริมาณประจุไฟฟ้ามากที่สุด และเมื่อคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้นค่าประจุไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ต่ำลง โดยมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันในทุก ๆ ส่วนผสมของคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้นทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกของคอนกรีตเกิดเพิ่มมากขึ้นทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 3 ผลกระทบของ w/b ต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต



รูปที่ 4 ผลกระทบของ z/b ต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

เมื่อคอนกรีตมีความชื้นน้ำส่งผลให้ปริมาณไฟฟ้าไหลผ่านโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ยากขึ้น ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตจึงสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ดังรูปที่ 4 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 คอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์มีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน และแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อระยะเวลาบ่มสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลของ Nas et al. [14] และ Eskandari et al. [15] 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 0.01 0.03 และ 0.05 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วง 2,000 - 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง และที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน คอนกรีตทุกส่วนผสมมีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วง 2,000 -

4,000 คูลอมป์ เช่นเดียวกัน โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำที่สุด เนื่องจากที่อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ 0.03 เป็นปริมาณที่เหมาะสม อาจเนื่องจากซิลิกาและอลูมินาของซีโอไลท์สังเคราะห์สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็น CSH CAH ได้เต็มที่ และซีโอไลท์สังเคราะห์มีขนาดอนุภาคเล็กซึ่งสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ด้วย จากเหตุผลข้างต้นคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 จึงมีความต้านทานคลอไรด์ดีกว่าการใช้อัตราส่วนซีโอไลท์ต่อวัสดุประสานอื่นๆ ทั้งนี้การใช้อัตราส่วนซีโอไลท์ต่อวัสดุประสานต่ำไปก็ทำให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกและผลของการเติมเต็มโพรงช่องว่างเกิดขึ้นไม่เต็มที่ ดังเห็นได้จากสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.01 ต่ำกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์ต่อวัสดุประสาน 0.03

สำหรับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 พบว่าที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 และ 56 วัน ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่า 4,000 คูลอมป์ หากพิจารณาตามเกณฑ์ ASTM C1202 พบว่าค่าที่ได้มีเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่สูง สำหรับที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยังคงมีปริมาณประจุไฟฟ้ามากกว่า 4,000 คูลอมป์ ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 มีปริมาณประจุไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2,000 - 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.03 มีปริมาณประจุไฟฟ้าต่ำที่สุด เช่นเดียวกันกับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ดังสมการที่ (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 ประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของการใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ  $x$  (%),  $CP_{z=0}$  คือ ประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (Coulomb),  $CP_{z=x}$  คือ ประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ  $x$  (Coulomb)

ตารางที่ 4 แสดงประสิทธิภาพการปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานบางส่วน เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 การใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 และ 0.05 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 6.0 10.1 และ 7.9 ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.10 มีความต้านทานคลอไรด์ต่ำกว่าของคอนกรีตล้วนร้อยละ 2.3 ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 และ 0.05 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.03 มีความต้านทานคลอไรด์สูงสุด แต่คอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.10 มีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกับของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 การใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นไปกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

3.2. การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

รูปที่ 5 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซีไอไลท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 และใช้อัตราส่วนซีไอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุ

ประสาน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 ตามลำดับ จากรูปพบว่า คอนกรีตผสมซีไอไลท์สังเคราะห์ที่มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน และคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีไอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานพบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีการใช้น้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยกว่า จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำส่งผลให้การไหลผ่านของประจุเป็นไปได้อย่างเมื่อปริมาณประจุที่ไหลผ่านมีค่าต่ำลง นั่นหมายถึงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่สูงขึ้น [8]

จากผลการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบนำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ของคอนกรีตตามสมการคำตอบของ Fick's 2<sup>nd</sup> law ดังสมการที่ (2)

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์

รหัส	ประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง			
	$E_{cp}$ (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

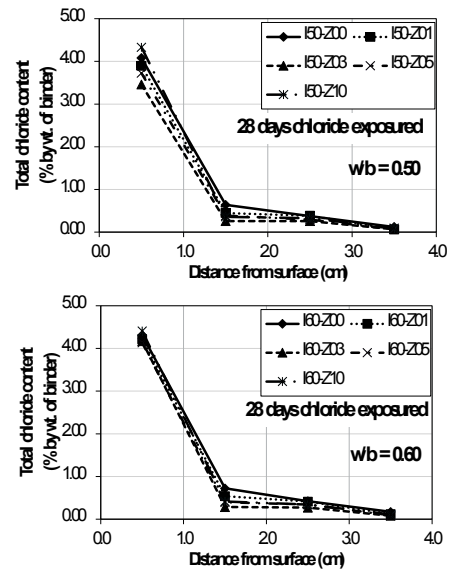
$$C(x, t) = (C_s - C_i) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{D_{Cl} \times t}} \right) \right] + C_i \quad (2)$$

โดยที่  $C(x,t)$  คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ  $x$  เวลา  $t$  ใดๆ (% by wt. of binder),  $x$  คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม),

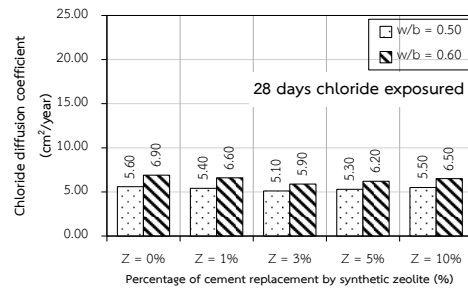
$D_a$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีต ( $\text{cm}^2/\text{ปี}$ ),  $t$  คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ ( $\text{ปี}$ ),  $C_s$  คือ ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (% by wt. of binder),  $C_e$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% by wt. of binder)

รูปที่ 6 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ ที่อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.00 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 จากรูปพบว่า คอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ที่มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่าของคอนกรีตล้วนทุกอัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน หรือคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้น โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ 5.60 5.40 5.10 5.30 และ 5.50 ตารางเซนติเมตรต่อปี สำหรับคอนกรีตล้วนและคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ 6.90 6.60 5.90 6.20 และ 6.50 ตารางเซนติเมตรต่อปี สำหรับคอนกรีตล้วนและคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 ตามลำดับ เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีตขึ้นอยู่กับโครงสร้างโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตทั้งค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่าง (Average pore diameter) และความพรุนทั้งหมด (Total porosity) ซึ่งการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ทำให้โครงสร้างโพรงช่องว่างลดลง เนื่องจากซีโอไลท์สังเคราะห์สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  เกิดผลผลิตเช่น CSH และ CAH เป็นต้น ซึ่งผลผลิตดังกล่าวทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ซีโอไลท์สังเคราะห์มีขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต จากเหตุผลข้างต้นคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์จึงมี สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำลงไปด้วย โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงและการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานพบว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มี

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีน้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ คอนกรีตจึงมีความทึบน้ำ



รูปที่ 5 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์

### 3.3. กำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน จากรูปพบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีกำลังอัดสูงกว่าของคอนกรีตที่ใช้



อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ทุกระยะเวลาบ่มน้ำ เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีน้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ คอนกรีตจึงมีความทึบน้ำ ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตจึงมีค่าสูง นอกจากนี้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มน้ำ เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำสูงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดผลผลิตเช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (CAH) เพิ่มมากขึ้น ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาการแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ดังรูปที่ 8 พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักมีกำลังอัดสูงสุด และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ เนื่องจากเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ถูกแทนที่มากขึ้น ปริมาณของสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงลดลง ส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (CAH) ต่ำ กำลังอัดของคอนกรีตจึงมีค่าต่ำกว่า แม้ซีลิกาและอลูมินาในซีโอไลท์สังเคราะห์จะสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดผลผลิต CSH CAH เป็นต้น หรืออนุภาคขนาดเล็กของซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ทำหน้าที่ในการช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่การเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตไม่ได้ก่อให้เกิดผลผลิตที่กักน้ำซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตล้วน ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ Ikotun et al. [16] ซึ่งศึกษาซีโอไลท์ดัดแปลง แต่ผลกลับตรงข้ามกับงานวิจัยของ Canpolat et al. [17] ซึ่งศึกษาซีโอไลท์ธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์มีการพัฒนากำลังอัดต่ำกว่าเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น

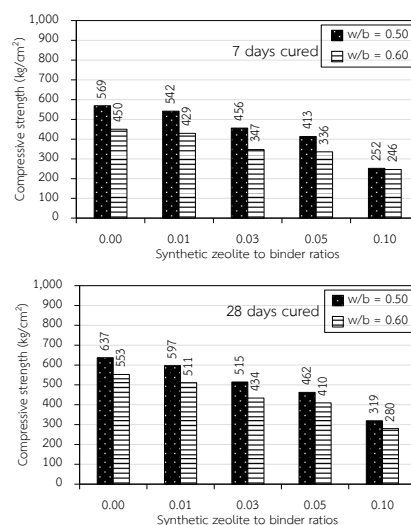
เพื่อให้การพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนมีความชัดเจนขึ้น จึงคำนวณ

เปรียบเทียบเป็นร้อยละของกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ตามสมการที่ (3) โดยค่าที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5

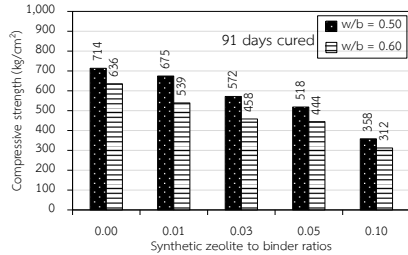
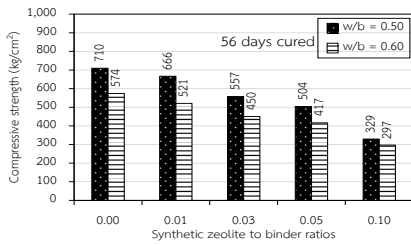
$$SI_{z=x} = \frac{S_{R,z=x}}{S_{z=0}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ  $SI_{z=x}$  คือ ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ  $x$  เทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (ร้อยละ),  $S_{z=0}$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร),  $S_{R,z=x}$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ  $x$  (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

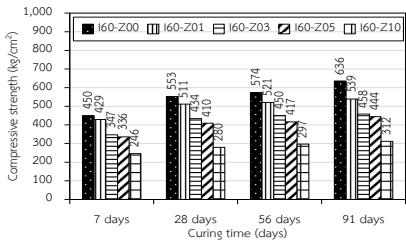
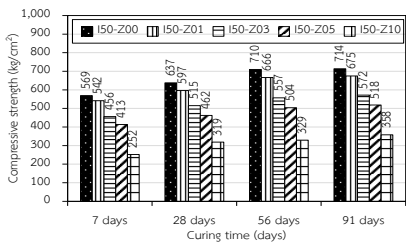
จากตารางที่ 5 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 มีกำลังอัดต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน โดยมีการพัฒนากำลังอัดที่ร้อยละ 95 80 73 และ 50 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วนและที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 มีการพัฒนากำลังอัดที่ร้อยละ 85 72 70 และ 49 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วน



รูปที่ 7 ผลกระทบของ w/b ต่อกำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 7 ผลกระทบของ w/b ต่อกำลังอัดของคอนกรีต (ต่อ)



รูปที่ 8 ผลกระทบของ z/b ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 5 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต

รหัส	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

#### 4. สรุปผล

จากผลการศึกษสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ส่งผลให้ความต้านทานคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตสูงขึ้น โดยการใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานคลอไรด์แบบแรงสูงที่สุด

2. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตได้มากกว่าคอนกรีตล้วน และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์มีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน

3. การใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดสูงที่สุด และมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่ำที่สุด

4. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง และต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตล้วน โดยกำลังอัดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน

5. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้นส่งผลให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง ความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตลดลง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 20/2560 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sumranwanich T, Tangtermsirikul S. Concrete structure deterioration. Bangkok: Charansanitwong Printing (in Thai); 2018.
- [2] Tangtermsirikul S. Durability and mix design of concrete (1<sup>st</sup> edition). Pathum Thani: Thammasat University, Rangsit Campus; 2003.
- [3] Davis M.E. Zeolite and molecular sieve : not just ordinary catalyst. Ind. Eng. Cham. Res. 1991;30:1675-83.
- [4] Najimi M, Sobhani J, Ahmadi B, Shekarch M. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. Construction and Building Materials. 2012;35:1023–33.
- [5] Sabet F, Ali N, Shekarchi M. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. Construction and Building Materials. 2013; 44:175–84.
- [6] Ahmadi B, Shekarchi M. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. Cement and Concrete Composites. 2010; 32:134–41.
- [7] Karakurt C, Topcu I.B. Effect of blended cements with natural zeolite and industrial by-products on rebar corrosion and high temperature resistance of concrete. Construction and Building Materials. 2012; 35:906–11.
- [8] Valipour, Pargar M, Shekarchi F, Khani S. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete. Construction and Building Materials. 2013;41:879–88.
- [9] Valipour, Pargar M, Shekarchi F, Khani S, Moradian M. 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. 2013;46:63–70.
- [10] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C1202, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.
- [11] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C1556, Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion.
- [12] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete.
- [13] British Standards. BS 1881-116, Method for determination of compressive strength of concrete cubes.
- [14] Nas M, Kurbetci S, Nayir S. Investigation on strength and durability properties of concrete containing zeolite. 13<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering; 12-14 September 2018, Izmir, Turkey.
- [15] Eskandri H, Vaghefi M, Kowsari K. Investigation of mechanical and durability properties of concrete influenced by hybrid nano silica and micro zeolite. Procedia Materials Science. 2015;11:594–9.

- [16] Ikotun B.D, Ekolu S. Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties. *Construction and Building Materials*. 2010;24:749–57.
- [17] Canpolat F, Yilmaz K, Kose M.M, Sumer M, Yurdusev M.A. Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. *Cement and Concrete Research*. 2004;34:731–5.