ผลกระทบของซิลิก้าฟูมต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต
Effect of Silica fume on Chloride Penetration Resistance of Concrete

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

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิก้าฟูม โดยแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28 และ 91 วัน และทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน จากผลการทดลองพบว่า การใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่ประสานในคอนกรีตทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีขึ้นและกำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น โดยการใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่ร้อยละ 15 ทำให้คอนกรีตความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดดีที่สุด นอกจากนี้ คอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดดีกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง

คำสำคัญ: ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์, กำลังอัด, ซิลิก้าฟูม, คอนกรีต

Abstract

This research aims to study the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete containing silica fume. The binder content in concrete was replaced by silica fume at 5%, 7.5%, 10% and 15% by weight of binder. The water to binder ratios were used at 0.40 and 0.50. The rapid chloride penetrations of concrete were determined at 7, 28 and 91 days of water curing. The compressive strengths of concrete were tested at 7, 14, 28, 56 and 91 days of water curing. From the experimental results, it was found that the use of silica fume to replace binder content in concrete resulted in increasing the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete. Concrete with 15% silica fume replacement had the highest chloride penetration resistance and compressive strength. Moreover, concretes containing silica fume at lower water to binder ratio had higher chloride penetration resistance and compressive strength than that at higher water to binder ratio.

Keywords: chloride penetration resistance, compressive strength, silica fume, concrete

1. คำนำ

ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็นปัญหาที่พบมากในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลหรือพื้นที่ที่เป็นน้ำกร่อย เพราะมีโอกาสสัมผัสกับความชื้น ไอเกลือ และน้ำทะเลโดยตรง ซึ่งสภาวะดังกล่าวมีผลต่อการทำลาย และลดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตได้อย่างชัดเจน [1, 2] ด้วยเหตุนี้ปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตจึงได้รับการปรับปรุงโดยการใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น ซิลิก้าฟูม (Silica fume) เข้ามาแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ เนื่องจากซิลิก้าฟูมมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ ดังนั้นอนุภาคของซิลิก้าฟูมจึงสามารถเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความทึบน้ำของคอนกรีตสามารถช่วยป้องกันการการแทรกซึมสารเคมีภายในเนื้อคอนกรีตได้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ ซิลิก้าฟูมมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 90 ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้อย่างรวดเร็ว เพิ่มปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3, 4]

มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตให้ดีขึ้น งานวิจัยของ Khan and Siddique [5] รายงานว่า ซิลิก้าฟูมมีประสิทธิภาพมากในการพัฒนาคอนกรีตต่อสภาวะต่าง ๆ เช่น ลดซึมผ่านน้ำ โครงสร้างโพรงช่องว่างลดลง เพิ่มความต้านทานการเกิดสนิม ต้านทานซัลเฟต รวมถึงความต้านทานการเกิดปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวมของคอนกรีต งานวิจัยของ Song et al. [6] พบว่า การใช้ซิลิก้าฟูมสามารถลดการซึมผ่านน้ำได้ดี เนื่องจากซิลิก้าฟูมสามารถปรับปรุงโพรงช่องว่างในคอนกรีตให้ลดลงได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตจากงานวิจัยของ Bagheri et al. [7] พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ซิลิก้าฟูมในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ก็มากขึ้นด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะมุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูม โดยศึกษาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

ประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 และการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 ตามลำดับ

2. การทดลอง

2.1 วัสดุและส่วนผสมที่ใช้

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ที่มีรูปร่างอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้ซิลิก้าฟูม (SF) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน โดยมีรูปร่างอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และซิลิก้าฟูมถูกแสดงดังตารางที่ 1

สำหรับส่วนผสมคอนกรีตถูกออกแบบให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 2

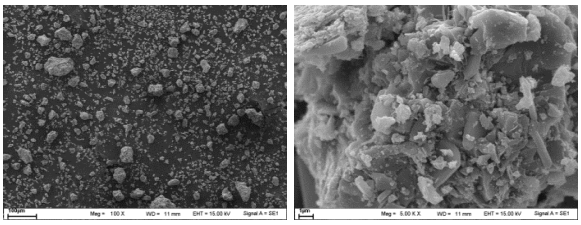
2.2 การเตรียมตัวอย่างและเงื่อนไขการทดสอบ

2.2.1 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [8] โดยการหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรงช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำภายในคอนกรีต โดยการทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง10 ซม สูง 20 ซม ทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28 และ 91 วัน หลังจากครบระยะเวลาบ่มน้ำตัวอย่างถูกตัดที่ความหนา 5 ซม และทดสอบตาม ASTM C1202 โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M ที่ขั้วบวก (Anode) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3% ที่ขั้วลบ (Cathode) ควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 60±0.01 Volts และทำการทดสอบตัวอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยค่าประจุไฟฟ้าที่ได้อยู่ในหน่วยคูลอมบ์ ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกพิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์อิออนในคอนกรีตดังตารางที่ 3

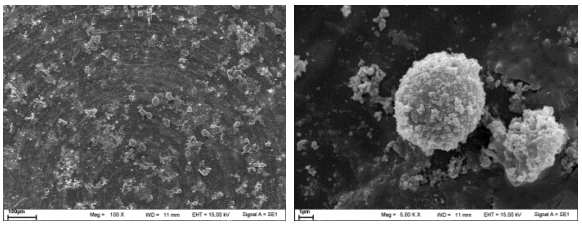
2.2.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตถูกทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 1881-116 [9] โดยทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ซึ่งมีขนาด 10x10x10 ซม^3 และทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ



X100 x5,000

รูปที่ 1 ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



X100 x5,000

รูปที่ 2 ลักษณะอนุภาคของซิลิก้าฟูม

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC)	ซิลิก้าฟูม (SF)
SiO_2	21.3	92
Al_2O_3	4.96	0.7
Fe_2O_3	3.1	1.2
CaO	66.61	0.2
MgO	1.81	0.2
SO_3	2.72	-
Na_2O	0.21	-
K_2O	0.5	-
LOI	0.74	-
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ความละเอียดแบบเบลน (ซม^2/กรัม)	3,028	150,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.13	2.20
สี	เทา	เทาดำ, เทาอมขาว

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

รหัส	w/b	Mix proportions (kg/m^3)					
		OPC	SF	SP	Water	Sand	Rock
C40	0.40	421	-	-	144	799	1,025
C40-SF5		396	21	1.3	142	799	1,025
C40-SF7.5		384	31	1.2	141	799	1,025
C40-SF10		372	41	1.2	140	799	1,025
C40-SF15		348	61	2.0	138	799	1,025
C50	0.50	369	-	-	161	799	1,025
C50-SF5		348	18	-	159	799	1,025
C50-SF7.5		338	27	-	169	799	1,025
C50-SF10		327	36	-	158	799	1,025
C50-SF15		307	54	-	156	799	1,025

ตารางที่ 3 การแทรกซึมคลอไรด์อิออนในคอนกรีตภายใต้ค่าประจุไฟฟ้า [9]

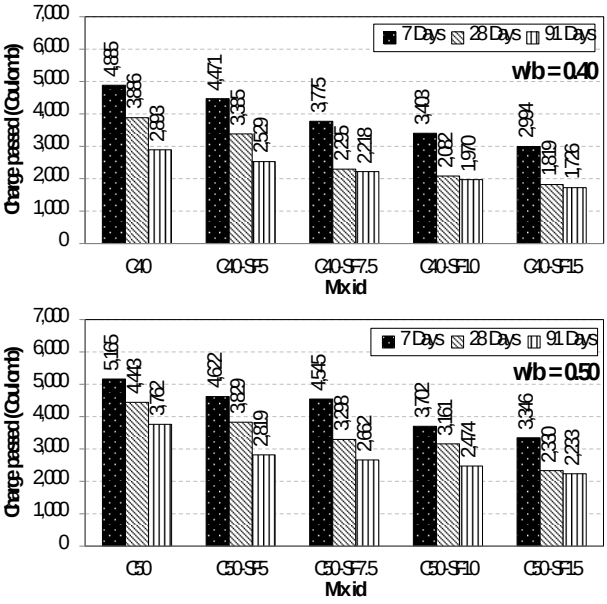
Charge passed (Coulombs)	Chloride ion penetrability
> 4,000	High
2,000 – 4,000	Moderate
1,000 – 2,000	Low
100 – 2,000	Very low
< 100	Negligible

3. ผลการทดลองและอภิปราย

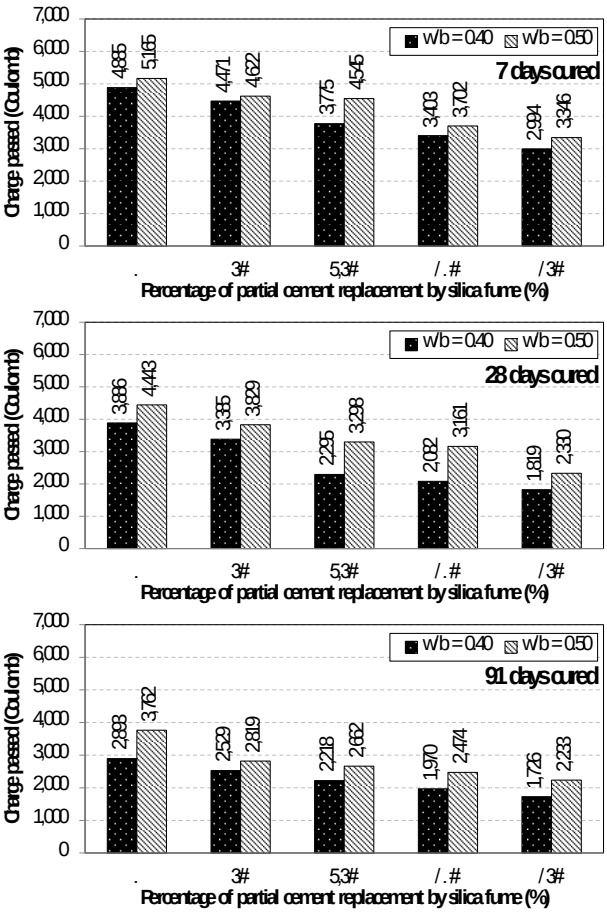
3.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำดังรูปที่ 3 พบว่า คอนกรีตมีค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำลงเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้นเมื่อมีระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น โดยมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันในทุก ๆ ส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi [4] เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้นทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปอซโซลานิกของคอนกรีตเกิดเพิ่มมากขึ้นทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่อคอนกรีตมีความทึบน้ำส่งผลให้ปริมาณไฟฟ้าไหลผ่านโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ยากขึ้น ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตจึงสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตตามตารางที่ 3 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน มีค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตเท่ากับ 4,885 และ 4,471 คูลอมป์ ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีการแทรกซึมคลอไรด์สูง ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมร้อยละ 7.5, 10 และ 15 มีค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตเท่ากับ 3,775, 3,403 และ 2,994 คูลอมป์ ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มีการแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง หากพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า คอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมร้อยละ 5, 7.5 และ 10 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ขณะที่คอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมร้อยละ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ และที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน คอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมร้อยละ 5 และ 7.5 ยังคงมีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมร้อยละ 10 และ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ หากพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่า ที่ระยะเวลา 7 วัน คอนกรีตล้วน คอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมร้อยละ 5 และ 7.5 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์สูง โดยมีค่าประจุไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตที่ 5,165, 4,622 และ 4,545 คูลอมป์ ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมร้อยละ 10 และ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง โดยมีค่าประจุไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตที่ 3,702 และ 3,346 คูลอมป์ ตามลำดับ ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า มีเพียงคอนกรีตล้วนที่มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์สูง ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมทุกร้อยละการแทนที่มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง และที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน ทุกส่วนผสมมีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานดังรูปที่ 4 พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีค่าประจุไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi [4] ที่ศึกษาผลกระทบของซิลิก้าฟูมต่อความแข็งแรงและความคงทนของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้

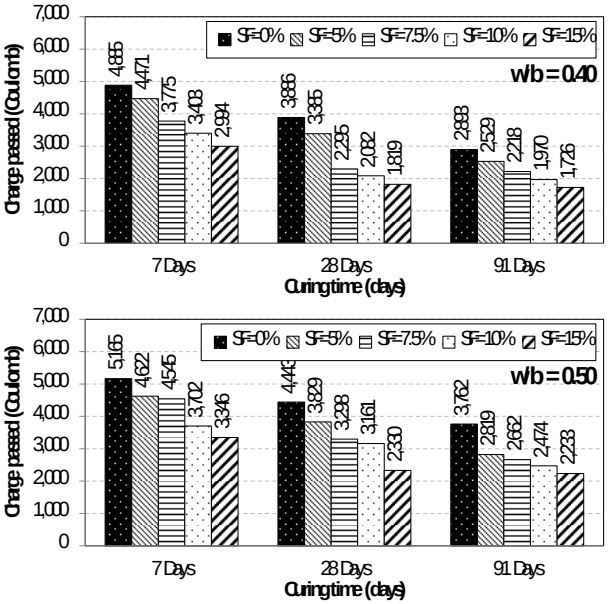


รูปที่ 3 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง



รูปที่ 4 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีการใช้น้ำเป็นส่วนผสม คอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซ



รูปที่ 5 ผลกระทบของร้อยละการแทนที่ของซิลิก้าฟูมต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

ตารางที่ 4 การปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูม

Mix id	การปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูม (ร้อยละ)		
	ระยะเวลาบ่มน้ำ (วัน)		
	7	28	91
C40	-	-	-
C40-SF5	8.5	12.9	12.6
C40-SF7.5	22.7	40.9	23.3
C40-SF10	30.3	46.4	31.9
C40-SF15	38.7	53.2	40.3
C50	-	-	-
C50-SF5	10.5	13.8	25.1
C50-SF7.5	12.0	25.8	29.2
C50-SF10	28.3	28.9	34.2
C50-SF15	35.2	47.6	40.6

โซลานิกน้อยกว่า จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ ส่งผลให้การไหลผ่านของประจุไฟฟ้าเป็นไปได้ยาก

รูปที่ 5 แสดงผลกระทบของร้อยละการแทนที่ของซิลิก้าฟูมต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต จากรูปพบว่า ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 คอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมมีค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตล้วนทุกระยะเวลาบ่มน้ำ ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi [4] โดยคอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูมมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตล้วน เมื่อพิจารณาร้อยละการแทนที่ของปูนซีเมนต์ด้วยซิลิก้าฟูม พบว่า คอนกรีตมีค่าประจุไฟฟ้าต่ำลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของซิลิก้าฟูม ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า คอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมร้อยละ 15 มีค่าประจุไฟฟ้าต่ำที่สุด หรือมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงที่สุด เนื่องจากซิลิก้าฟูมสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $Ca(OH)_2$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์และก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ CSH สามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นและทึบมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของซิลิก้าฟูมมีขนาดเล็กสามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้ประจุไฟฟ้าจึงไหลผ่านเนื้อคอนกรีตได้ยาก [10-13]

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์จากสมการที่ (1)

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

เมื่อ $E_{cp,sf=x}$ คือ ประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของการใช้ซิลิก้าฟูมแทนวัสดุประสานร้อยละ x (%)

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

$CP_{sf=x}$ คือ ประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมแทนวัสดุประสานร้อยละ x (Coulomb)

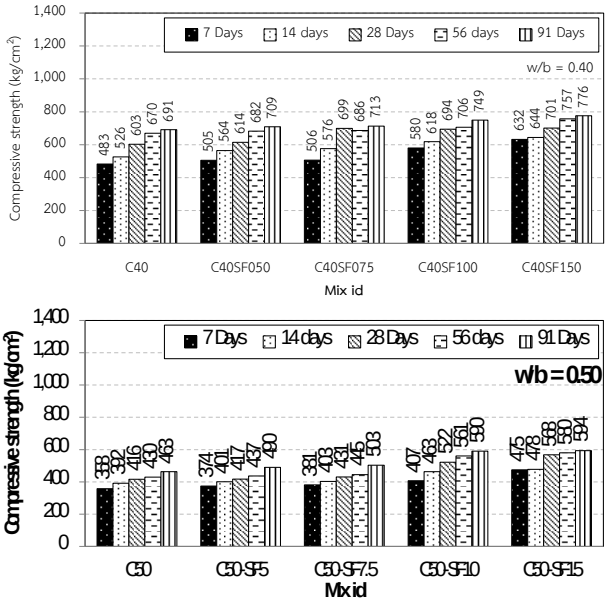
เมื่อพิจารณาการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมแทนปูนซีเมนต์บางส่วนดังตารางที่ 4 พบว่า เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และใช้ซิลิก้าฟูมแทนวัสดุประสานที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 8.5, 22.7, 30.3 และ 38.7 ตามลำดับ ในขณะที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน คอนกรีตใช้ซิลิก้าฟูมแทนวัสดุประสานที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 12.9, 40.9, 46.4 และ 53.2 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน คอนกรีตใช้ซิลิก้าฟูมแทนวัสดุประสานที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 12.6, 23.3, 31.9 และ 40.3 ตามลำดับ หากพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่า คอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมแทนวัสดุประสานที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 10.5, 12.0, 28.3 และ 35.2 ตามลำดับ ในขณะที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน คอนกรีตใช้ซิลิก้าฟูมแทนวัสดุประสานที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 13.8, 25.8, 28.9 และ 47.6 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน คอนกรีตใช้ซิลิก้าฟูมแทนวัสดุประสานที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 25.1, 29.2, 34.2 และ 40.6 ตามลำดับ จากตารางพบว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ยกเว้นคอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมแทนวัสดุประสานที่ร้อยละ 5 ซึ่งจากตารางพบว่า คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ทุกระยะเวลาบ่มน้ำ โดยจาก

งานวิจัยของ Dhandapani et al. [14] พบว่า ในกรณีคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงมีการปรับปรุงประสิทธิภาพดีกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ หรืออาจกล่าวได้ว่า คุณสมบัติด้านความคงทนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจำเป็นต้องอาศัยน้ำในการทำปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและอาจจะเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวนำไปสู่การปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาบ่มน้ำ แต่ในขณะเดียวกันการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงก็ส่งผลให้โครงสร้างโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตสูงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้แม้การปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 แต่ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตก็มีค่าสูงกว่าทุกระยะเวลาบ่มน้ำด้วยเช่นกัน สำหรับในกรณีของคอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่ร้อยละ 7.5, 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 อาจจะเนื่องจากมีการใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลง การลดลงของปูนซีเมนต์ส่งผลให้ $Ca(OH)_2$ ลดลงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นจึงต่ำลงส่งผลให้การปรับปรุงประสิทธิภาพการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมร้อยละ 7.5, 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

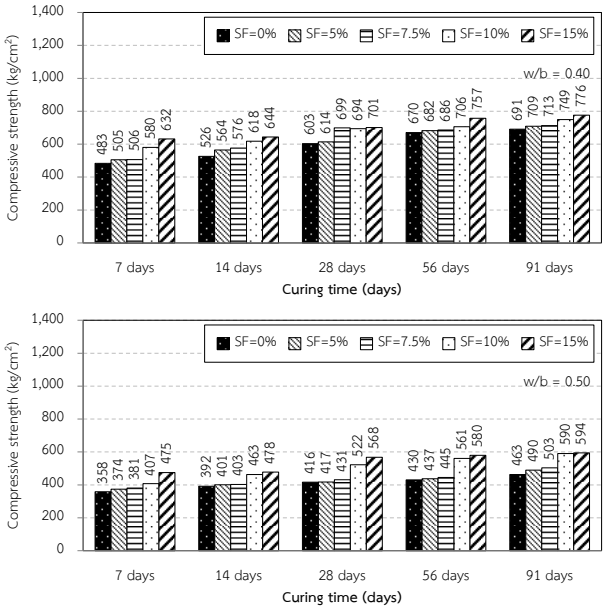
3.2 กำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำของคอนกรีตที่ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ดังรูปที่ 6 พบว่า คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำ นานขึ้น โดยมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันในทุก ๆ ส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi [4] เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้นทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปอซโซลานิกของคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ส่งให้ให้เกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น CSH และ CAH เป็นต้นเพิ่มมากขึ้น โดยผลผลิตที่เกิดขึ้นดังกล่าวส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ดังรูปที่ 7 พบว่า คอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตล้วน และกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ซิลิก้าฟูมในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi [4] โดยการใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ 15 มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่ในร้อยละอื่น ๆ เนื่องจากซิลิก้าฟูมเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $Ca(OH)_2$ เกิดผลผลิต เช่น CSH เป็นต้น ซึ่งผลผลิตดังกล่าว



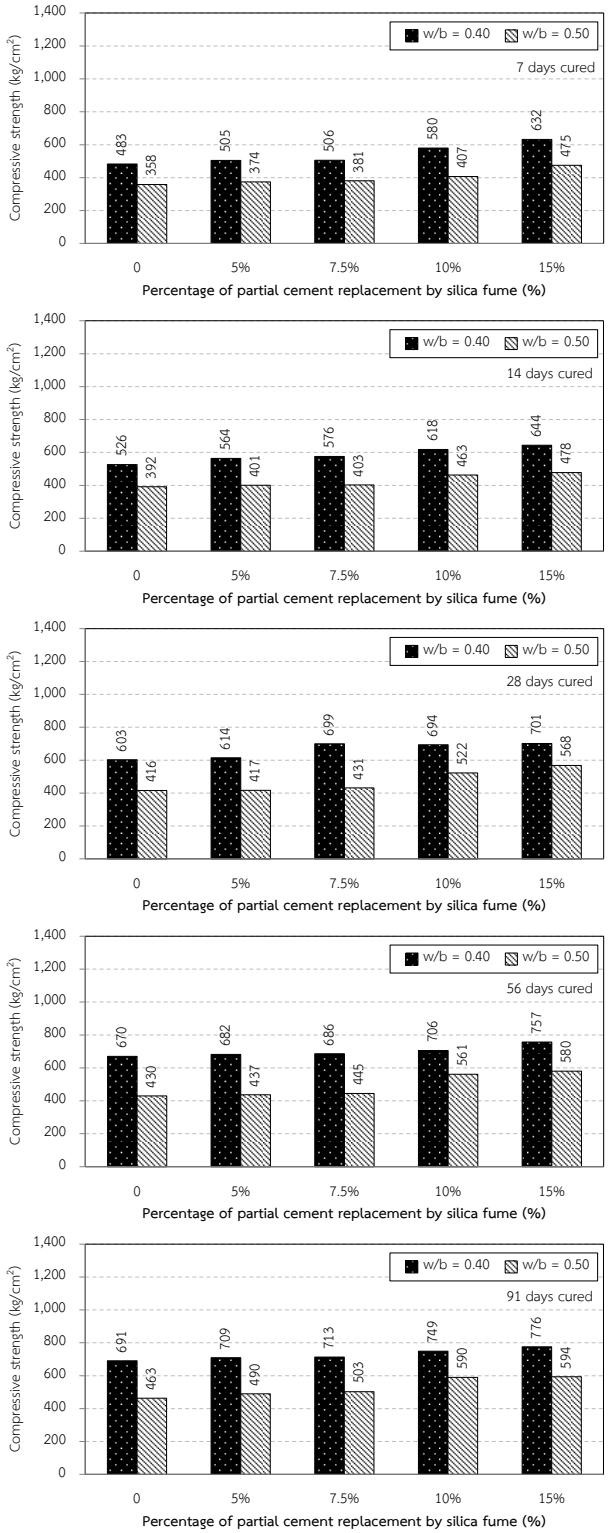
รูปที่ 6 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อกำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 7 ผลกระทบของร้อยละการแทนที่ของซิลิก้าฟูมต่อกำลังอัดของคอนกรีต

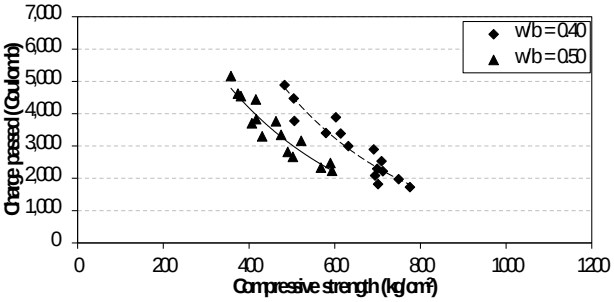
ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อนุภาคขนาดเล็กของซิลิก้าฟูมสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้รับการพิจารณาดังรูปที่ 8 พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi [4] เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีปริมาณน้ำอิสระที่น้อยกว่า ทำให้เกิดความพรุนภายในเนื้อคอนกรีตน้อยลง ส่งผลให้คอนกรีตมีทึบน้ำสูงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า



รูปที่ 8 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีตส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความคงทนของคอนกรีต การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต [15] จากผลการทดลองในการศึกษานี้สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตได้ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

จากรูปที่ 9 สามารถหาความสัมพันธ์ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) โดยความสัมพันธ์ที่ได้เป็นไปในรูปแบบของ Exponential หรือ hyperbolic function โดยสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ถูกแสดงไว้ในสมการที่ (2) และ (3) โดยมีค่า R^2 = 0.87 และ 0.89 ตามลำดับ

สำหรับ w/b = 0.40;

$$RCPT = 24,237e^{-0.003\times CS} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.87 \qquad (2)$$

สำหรับ w/b = 0.50;

$$RCPT = 15,120e^{-0.003\times CS} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.89 \qquad (3)$$

โดยที่ RCPT คือ ปริมาณประจุไฟฟ้าจากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Coulombs)
CS คือ กำลังอัดของคอนกรีต (kg/cm^2)

4. สรุปผล

จากการศึกษาผลกระทบของซิลิก้าฟูมต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตล้วน และความต้านทานเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของซิลิก้าฟูม

2. คอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่ร้อยละ 15 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงที่สุด และมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น

3. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

4. คอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตล้วน และกำลังอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ที่มากขึ้น โดยคอนกรีตที่ใช้ซิลิก้าฟูมร้อยละ 15 มีกำลังอัดสูงที่สุด

5. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และกำลังอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 141/2559 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 oncrete (1st edition)*. Pathum Thani: Thammasat University, Rangsit Campus.

[3] Siddiuqe, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resource, Conservation and Recycling*; 55, pp. 923-932.

[4] Barbhuiya, S. and Qureshi, M. (2016). Effect of silica fume on the strength and durability properties of concrete. *CESDOC*, 2016, pp. 117-120.

[5] Khan, M.I. and Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, pp. 30-35.

[6] Song, H.W., Jang, J.W., Saraswathy, V. and Byun, K.J. (2007). An estimation of the diffusivity of silica fume concrete. *Building and Environment*, 42, pp. 1358–1367.

[7] Bagheri, A.R., Zanganeh, H. and Moalemi, M.M. (2012). Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 34, pp. 663–670.

[8] 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*.

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

[10] Soutsos, M. (2010). *1st Edition. Concrete durability*. Thomas Telford Limited.

[11] Gonen, T. and Yazicioglu, S. (2007). The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete. *Build. Environ*, 42, pp. 3080-3085.

[12] Gjrov, 0.E. (1993). Durability of concrete containing condensed silica fume. *ACI Special Publications SP,* 79, pp. 695-708.

[13] Bagheri, AR., Zanganeh, H. and Moalemi, MM. (2012). Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 34, pp. 663-670.

[14] Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R. and Pillai, RG. (2018). Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC^3). *Cement and Concrete* Research, 107, pp. 136-151.

[15] Ramezanianpour, AA. and Jovein, HB. (2012). Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. *Construction and Building Materials*, 30, pp. 470-479.