

ความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ้ง

Chloride Resistance and Compressive Strength of Concrete with Silica Fume

ทวีชัย สำราญวานิช*, อัญชานา กิจจานนท์
Taweechai Sumranwanich*, Aunchana Kijjanon

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย
Burapha Construction and Maintenance Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand

*Corresponding author e-mail: twc@buu.ac.th

(Received: 29 July 2020, Revised: 1 February 2021, Accepted: 10 February 2021)

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ้ง โดยใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 โดยทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28 และ 91 วัน ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน จากนั้นเผชิญคลอไรด์ที่ความเข้มข้นคลอไรด์ 5.0% เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน และทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน และจากผลการทดลองพบว่า การใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานในคอนกรีตทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีขึ้นและกำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น โดยการใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่ร้อยละ 15 ทำให้คอนกรีตความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดที่ดีที่สุด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตพบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ลดลงเมื่อกำลังอัดเพิ่มขึ้น จากสมการความสัมพันธ์สามารถหาค่าปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ได้จากค่ากำลังอัดคอนกรีต

คำสำคัญ: คอนกรีต, ซิลิกาฟุ้ง, ความต้านทานคลอไรด์, สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์, กำลังอัด

Abstract

This paper 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 tested at 7, 28 and 91 days of water curing. Chloride penetration by bulk diffusion were tested at 28 days of water curing and immersed in 5.0% chloride concentration for 28, 56 and 91 days. 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 the increase of the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete. Concrete with 15% silica fume replacement had the highest chloride penetration resistance and compressive strength. Considering the relationship between compressive strength and charge passed content and chloride diffusion coefficient of

Naresuan University Engineering Journal, Vol.16, No.1, Jan - June 2021, pp.107-118

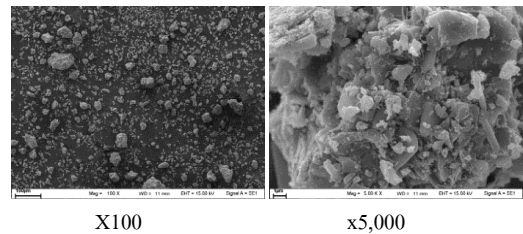
concrete, it was noted that the charge passed content and the chloride diffusion coefficient decreased with increasing compressive strength. Based on the relationship equations, the charged pass content and the chloride diffusion coefficient can be determined from the compressive strength of concrete.

Keywords: Concrete, Silica Fume, Chloride Resistance, Chloride Diffusion Coefficient, Compressive Strength

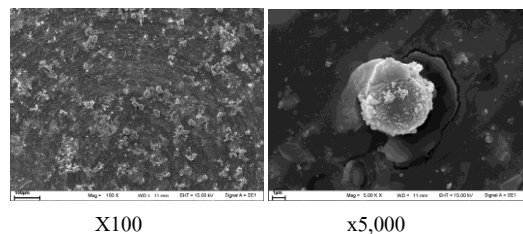
1. บทนำ

ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็นปัญหาที่พบมากในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลหรือพื้นที่น้ำกร่อย เพราะมีโอกาสสัมผัสกับความชื้น ไอเกลือ และน้ำทะเลโดยตรง ซึ่งสภาวะดังกล่าวมีผลต่อการทำลาย และลดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตได้อย่างรุนแรง (Sumranwanich & Tangtermsirikul, 2018; Tangtermsirikul, 2003) ด้วยเหตุนี้ปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตจึงได้รับการปรับปรุงโดยการใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) เข้ามาแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ ดังนั้นอนุภาคของซิลิกาฟุ้งจึงสามารถเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มมากขึ้น ความทึบแน่นของคอนกรีตสามารถช่วยป้องกันการการแทรกซึมสารเคมีภายในเนื้อคอนกรีตได้อย่างมาก นอกจากนี้ ซิลิกาฟุ้งมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 90 จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้อย่างมาก เพิ่มปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Siddique, 2011; Barbhuiya & Qureshi, 2016) มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่บางส่วน of วัสดุประสานเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดย Khan and Siddique (2011) รายงานว่า ซิลิกาฟุ้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ลดการซึมผ่านของน้ำ ลดโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต เพิ่มความต้านทานการเกิดสนิม เพิ่มความต้านทานซัลเฟต รวมถึงเพิ่มความต้านทานการเกิดปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวมของคอนกรีตด้วย และงานวิจัยของ Song et al. (2007) พบว่า การใช้ซิลิกาฟุ้งสามารถลดการซึมผ่านน้ำได้ดี เนื่องจากซิลิกาฟุ้งสามารถลดโพรงช่องว่างในคอนกรีตได้ และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตจากงานวิจัยของ Bagheri et al. (2012) พบว่า

กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ซิลิกาฟุ้งในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ก็มากขึ้นด้วย แต่จากการศึกษาในอดีตยังไม่มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ้ง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีความสำคัญยิ่งในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความคงทนระยะยาว



รูปที่ 1 ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 2 ลักษณะอนุภาคของซิลิกาฟุ้ง จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ้ง พร้อมทั้งมุ่งหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตด้วย เพื่อพัฒนาสมการอย่างง่ายสำหรับใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงจากกำลังอัดของคอนกรีต

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุและส่วนผสม

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซึ่งมีลักษณะอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้ซิลิกาฟูม (SF) แทนที่วัสดุประสานบางส่วน โดยมีลักษณะอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 2 องค์กรประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานแสดงไว้ในตารางที่ 1 สำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 ซึ่งใช้มากในส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการความคงทน ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานบางส่วนที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้หินที่อิมตัวผิวแห้ง (R) ที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มม และมีขนาดโตสุด 19 มม ใช้ทรายบดที่อิมตัวผิวแห้ง (S)

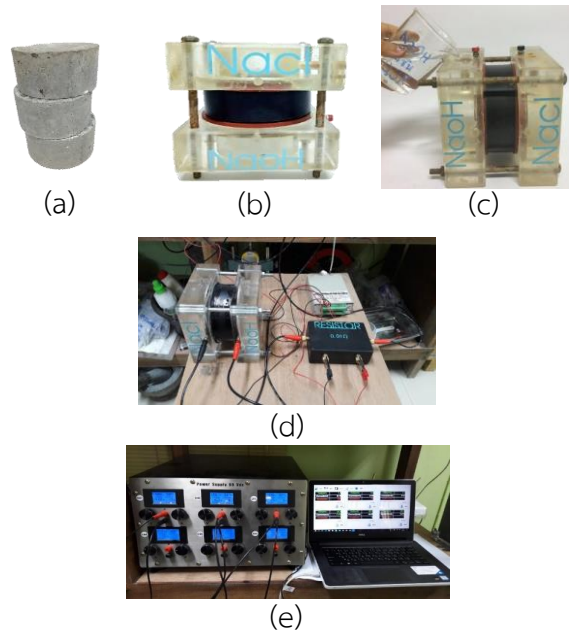
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C)	ซิลิกาฟูม (SF)
SiO ₂	21.30	92.00
Al ₂ O ₃	4.96	0.70
Fe ₂ O ₃	3.10	1.20
CaO	66.61	0.20
MgO	1.81	0.20
SO ₃	2.72	-
Na ₂ O	0.20	-
K ₂ O	0.5	-
LOI	0.74	-
สมบัติทางกายภาพ		
ความถ่วงจำเพาะ	3.13	2.20
ความละเอียดโดยวิธีของเบลน (ชม ² /กรัม)	3,028	150,000

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

Mix id	Mix proportions (kg/m ³)					
	C	SF	SP	W	S	R
C40	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	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

หมายเหตุ: "C40" หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ w/b 0.40, "C40-SF(X)" หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 w/b 0.40 และใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ X, "C" หมายถึง ปูนซีเมนต์, "SF" หมายถึง ซิลิกาฟูม, "SP" หมายถึง Superplasticizer, "S" หมายถึง ทราย, "R" หมายถึง หิน, "W" หมายถึง น้ำ



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

ตารางที่ 3 ความสามารถการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนของคอนกรีต

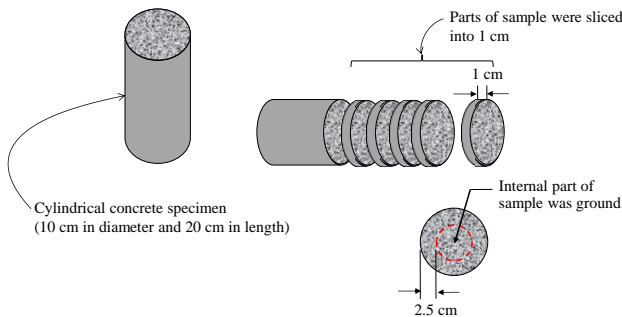
Charge passed (Coulombs)	Chloride ion penetrability
> 4,000	High
2,000 – 4,000	Moderate
1,000 – 2,000	Low
100 – 2,000	Very low
< 100	Negligible

ที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม แต่ใหญ่กว่า 0.075 มม

2.2 การทดสอบ

2.2.1 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงทำตามมาตรฐาน ASTM C1202 แสดงดังรูปที่ 3 โดยการหาค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านโพรงช่องว่างที่อัดตัวด้วยน้ำภายในคอนกรีต โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม สูง 20 ซม จำนวน 1 ก้อนต่อ 1 อายุทดสอบ โดย 1 ก้อนจะแบ่งทดสอบบริเวณส่วนบน ส่วนกลางและส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28 และ 91 วัน โดยภายหลังครบกำหนดระยะเวลาบ่มน้ำ นำตัวอย่างมาตัดให้มีมีความหนา 5 ซม



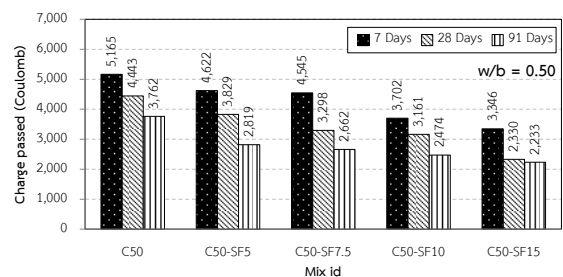
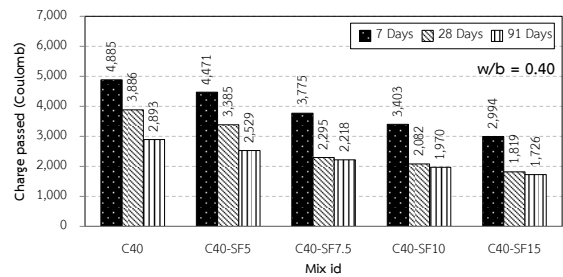
รูปที่ 4 การเตรียมผงดตัวอย่างจากการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด

3 ชั้นดังรูปที่ 3(a) และทำการทดสอบ โดยเริ่มจากประกอบตัวอย่างเข้าเซลล์ทดสอบดังรูปที่ 3(b) แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M ที่ขั้วบวก (Anode) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3% ที่ขั้วลบ (Cathode) ดังรูปที่ 3(c) จ่ายค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 60 ± 0.01 Volts ดังรูปที่ 3(d) ทดสอบต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำการเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างแล้วคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านในหน่วยคูลอมป์

ดังรูปที่ 3(e) และนำค่าที่ได้จากทั้ง 3 ก้อนมาหาค่าเฉลี่ย จากค่าที่ได้สามารถพิจารณาเกณฑ์คุณภาพตามตารางที่ 3

2.2.2 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1556 โดยหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในแต่ละความลึกในรูปแบบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ของคอนกรีต โดยเริ่มจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม สูง 20 ซม จำนวน 1 ก้อนต่อ 1 อายุทดสอบ จากนั้นบ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบระยะเวลาบ่มน้ำ นำตัวอย่างเคลือบผิวด้านข้างและด้านล่างด้วยอีพ็อกซี ยกเว้นด้านบนหนึ่งด้านเพื่อควบคุมให้คลอไรด์แพร่เข้าสู่คอนกรีตในทิศทางเดียว จากนั้นนำตัวอย่างไปเผชิญสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้นคลอไรด์ 5% เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน เมื่อครบระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ นำตัวอย่างตัดหนาชั้นละ 1 ซม ดังรูปที่ 4 จากนั้นนำตัวอย่างที่ตัดแล้วมาบดเป็นผงเพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 ต่อไป



รูปที่ 5 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง

2.2.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

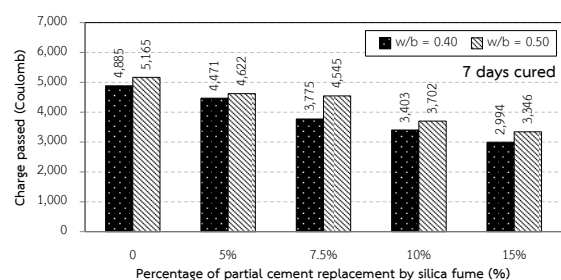
ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS EN 1881-116 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ ซม.³ และทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

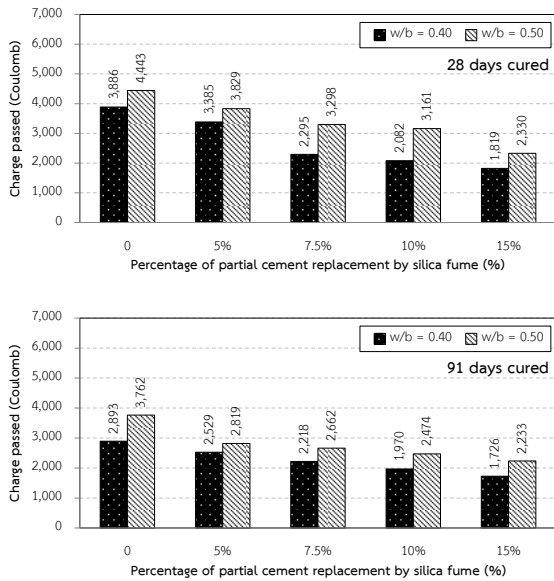
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำดังรูปที่ 5 พบว่า คอนกรีตมีค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตต่ำลงเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้นเมื่อมีระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น โดยมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันในทุก ๆ ส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งก็พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi (2016) เช่นกัน เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้น การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาพอซโซลานิกก็เกิดเพิ่มมากขึ้นทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่อคอนกรีตมีความทึบน้ำส่งผลให้ปริมาณไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ยากขึ้น ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตจึงสูงขึ้นตามไปด้วย หากพิจารณาการลดลงของปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน กับ 28 วัน พบว่าการลดลงของทุกส่วนผสมคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากผลของการเติมเต็มโพรงช่องว่างในคอนกรีต แต่เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน กับ 91 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 กลับพบว่า คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 มีการลดลงของปริมาณประจุไฟฟ้ามากกว่าคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5, 10 และ 15 อาจเป็นผลมาจากการใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณที่มากทำให้เกิดปฏิกิริยาพอซโซลานิกในระยะยาวได้น้อยกว่ารวมทั้งการใช้ซิลิกาฟูมมากทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลงด้วย ผลลักษณะดังกล่าวก็สามารถเห็นได้ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เช่นกัน เมื่อพิจารณาเกณฑ์ความสามารถแทรกซึมคลอไรด์จากปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตตามตารางที่ 3 พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน มีค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตเท่ากับ 4,885 และ 4,471

คูลอมป์ ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีการแทรกซึมคลอไรด์สูง ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5, 10 และ 15 มีค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตเท่ากับ 3,775, 3,403 และ 2,994 คูลอมป์ ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มีการแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง หากพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5, 7.5 และ 10 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ และที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 7.5 ยังคงมีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ หากพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่า ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 7.5 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์สูง โดยมีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ 5,165, 4,622 และ 4,545 คูลอมป์ ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง โดยมีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ 3,702 และ 3,346 คูลอมป์ ตามลำดับ ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า มีเพียงคอนกรีตล้วนที่มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์สูง ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมทุกร้อยละการแทนที่มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง และที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน ทุกส่วนผสมมีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง

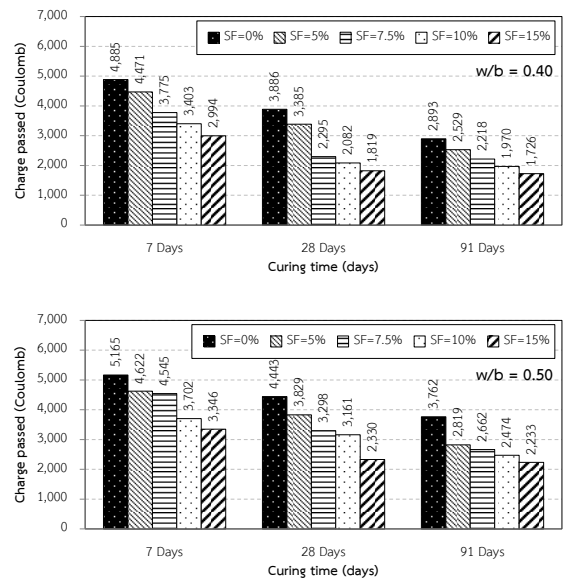




รูปที่ 6 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานดังรูปที่ 6 พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งก็พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi (2016) ที่ได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อความแข็งแรงและความคงทนของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีการใช้น้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยกว่า จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นส่งผลให้การเคลื่อนที่ผ่านของประจุไฟฟ้าเป็นไปได้ยาก หากพิจารณาการลดลงของปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่างกันพบว่า ผลต่างของคอนกรีตล้วนและ คอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 และ 15 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28 และ 91 วัน มีผลต่างที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 7.5 และ 10 มีผลต่างที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ระยะเวลาบ่มนี้ 28 วัน ทั้งนี้อาจเป็นผลมากจากการใช้ w/b ที่ 0.40 ส่งผลให้คอนกรีตมีการปรับปรุงโครงสร้างโพรง

ช่องว่างอย่างมากในช่วงอายุต้น (7 วัน และ 28 วัน) ในขณะที่การใช้ w/b ที่ 0.50 มีการปรับปรุงโครงสร้างโพรงช่องว่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในช่วงอายุต้น เนื่องจากการใช้ w/b ในปริมาณที่สูงส่งผลให้โครงสร้างโพรงช่องว่างเกิดขึ้นสูงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้การใช้ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 7.5 และ 10 จึงปรับปรุงโครงสร้างโพรงช่องว่างในช่วงอายุต้นได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากคำอธิบายข้างต้นจึงทำให้ผลต่างของประจุไฟฟ้าของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 7.5 และ 10 ที่ w/b ที่ 0.40 และ 0.50 แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น (28 วัน และ 91 วัน) พบว่า ผลต่างมีค่าน้อยลง นั้นแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 7.5 และ 10 ที่ w/b ที่ 0.50 สามารถปรับปรุงโครงสร้างโพรงช่องว่างได้อย่างมากเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น



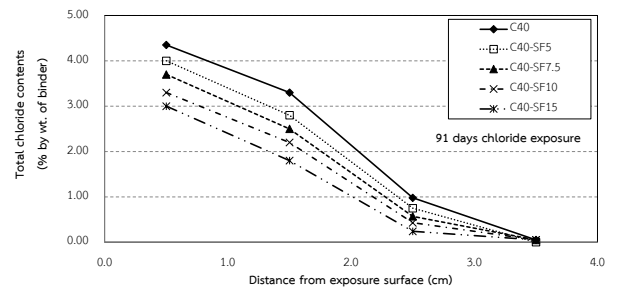
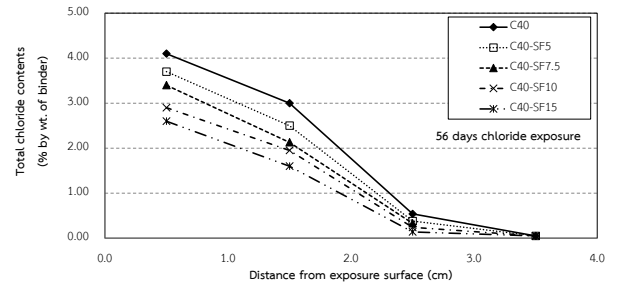
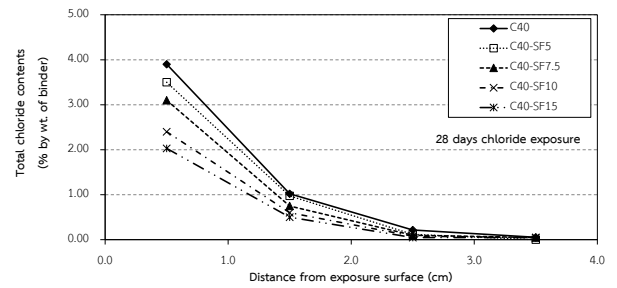
รูปที่ 7 ผลกระทบของร้อยละการแทนที่ของซิลิกาฟุ่มต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง

รูปที่ 7 แสดงผลกระทบของร้อยละการแทนที่ของซิลิกาฟุ่มจากรูปพบว่า ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มมีค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตล้วนทุกระยะเวลาบ่มนี้ ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi (2016), Juan and Lucio (2012) และ Cabrera and Claisse (1990) โดยคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

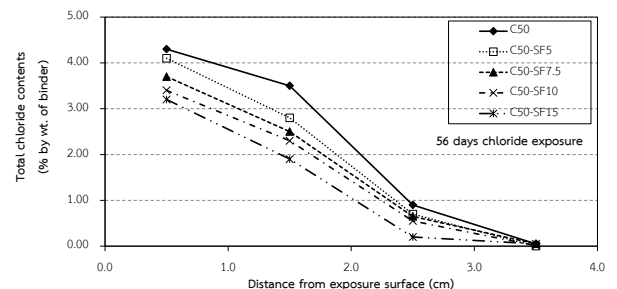
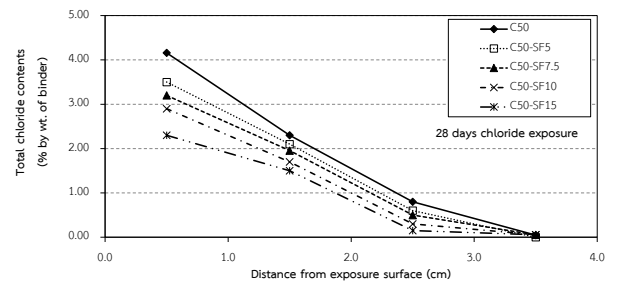
สูงกว่าคอนกรีตล้วน เมื่อพิจารณาร้อยละการแทนที่ของปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม พบว่า คอนกรีตมีค่าประจุไฟฟ้าต่ำลง เมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของซิลิกาฟุ่ม ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 15 มีค่าประจุไฟฟ้าต่ำที่สุด หรือมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงที่สุด เนื่องจากซิลิกาฟุ่มสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ CSH สามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นและทึบมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กสามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้ประจุไฟฟ้าจึงเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตได้ยาก (Bagheri et al., 2012; Soutsos, 2010; Gonen & Yazicioglu, 2007; Gjrov, 1993)

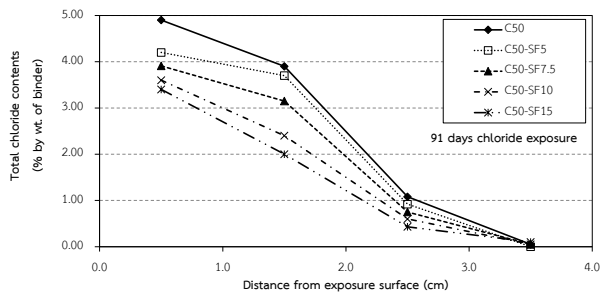
3.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

รูปที่ 8 และ 9 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 และใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 ตามลำดับ จากรูปพบว่า การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น และเมื่อพิจารณาผลกระทบของร้อยละการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดลดลงเมื่อร้อยละการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Cabrera and Claisse (1990) เนื่องจากซิลิกาฟุ่มสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ CSH สามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นและทึบมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กสามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย (Camarini, 2013; Rao, 2003; Cohen & Klitsikas, 1986)



รูปที่ 8 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40





รูปที่ 9 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานพบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งก็พบในงานวิจัยของ Barbhuiya & Qureshi (2016) ที่ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อความแข็งแรงและความคงทนของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีการใช้น้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยกว่า จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง

จากผลการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบนำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ของคอนกรีตตามสมการคำตอบของ Fick's 2nd law ดังสมการที่ (1)

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

โดยที่ $C(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ x เวลา t ใดๆ (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), x คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม), D_{Cl} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีต ($\text{ซม}^2/\text{ปี}$), t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี), C_i คือ ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), C_s คือ

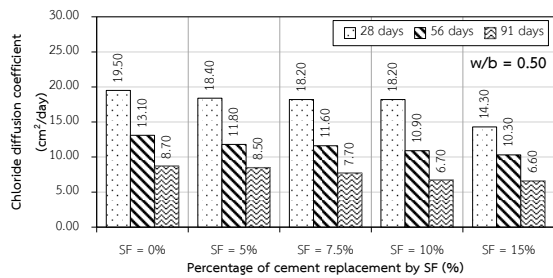
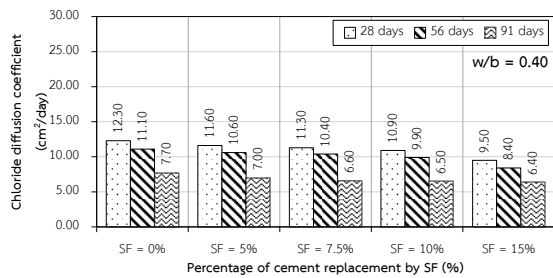
ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

รูปที่ 10 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มที่การแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มร้อยละ 0, 5, 7.5, 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 จากรูปพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่ม กล่าวคือ คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Krishnakumar et al. (2013) และ Juan & Lucio (2012) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาร้อยละการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

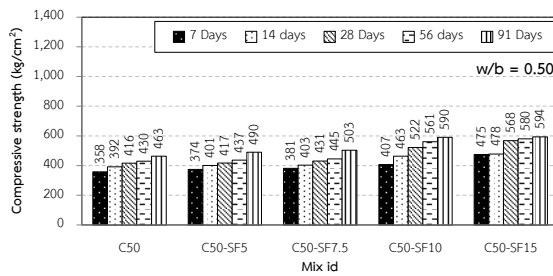
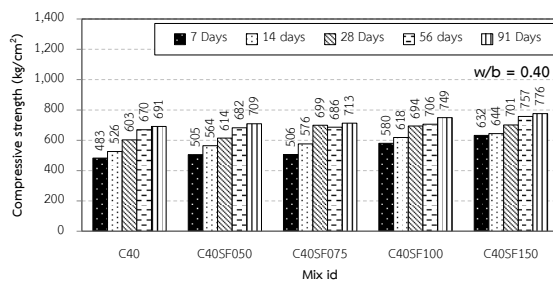
3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำของคอนกรีตที่ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ดังรูปที่ 11 พบว่า คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น โดยมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันในทุก ๆ ส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งก็พบในงานวิจัยของ Barbhuiya & Qureshi (2016) และ Raveendran et al. (2015) เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกของคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ส่งผลให้เกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น CSH และ CAH เป็นต้น เพิ่มมากขึ้น โดยผลผลิตที่เกิดขึ้นดังกล่าวส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตล้วน และกำลังอัดของคอนกรีตมี



รูปที่ 10 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต



รูปที่ 11 กำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม

แนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งก็พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi (2016) และ Raveendran et al. (2015) เช่นกัน โดยการใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ 15 มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ในร้อยละอื่น ๆ เนื่องจากซิลิกาฟูมเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $Ca(OH)_2$ เกิดผลผลิต เช่น CSH เป็นต้น ซึ่งผลผลิตดังกล่าวส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต

เพิ่มขึ้น นอกจากนี้อนุภาคขนาดเล็กของซิลิกาฟูมสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Barbhuiya & Qureshi (2016) เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีปริมาณน้ำอิสระที่น้อยกว่า ทำให้เกิดความพรุนภายในเนื้อคอนกรีตน้อยลง ส่งผลให้คอนกรีตมีทึบแน่นสูงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า

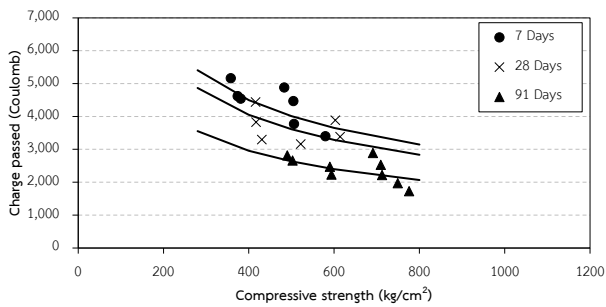
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีตส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความคงทนของคอนกรีต จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ซึ่งในการศึกษานี้ได้นำผลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตได้ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้เป็นไปในรูปแบบของ Exponential โดยสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างกำลังอัดและปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28 และ 91 วัน ได้แสดงไว้ในสมการที่ (2) ถึง (4) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.91, 0.77 และ 0.87 ตามลำดับ เมื่อทำการรวมสมการที่ (2) ถึง (4) จะได้สมการที่ (5) ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.75

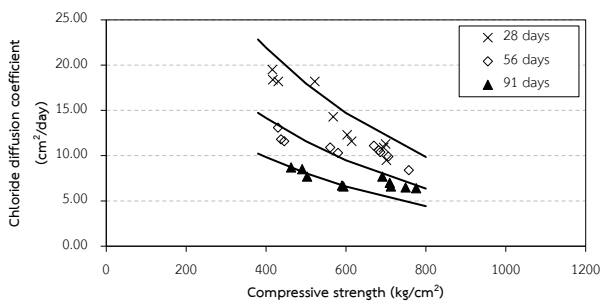
สำหรับ ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน;

$$RCPT = 100,701.9C_s^{-0.516} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.91 \quad (2)$$

สำหรับ ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน;



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่ม



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่ม

$$RCPT = 86,163.0C_s^{(-0.516)} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.77 \quad (3)$$

สำหรับ ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน;

$$RCPT = 63,617.2C_s^{(-0.516)} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.87 \quad (4)$$

สำหรับระยะเวลาบ่มน้ำ ta ใดๆ;

$$RCPT = (102,556e^{(-0.005 \times ta)})C_s^{(-0.516)} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.75 \quad (5)$$

โดยที่ RCPT คือ ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต (Coulombs)

C_s คือ กำลังอัดของคอนกรีต (kg/cm^2)

ta คือ ระยะเวลาบ่มน้ำ (days)

สำหรับสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน ได้แสดงไว้ในสมการที่ (6) ถึง (8) ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.95, 0.79 และ 0.96 ตามลำดับ เมื่อทำการรวมสมการที่ (6) ถึง (8) จะได้สมการที่ (9) ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.78

สำหรับ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน;

$$D_a = 48.834e^{-0.002 \times C_s} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.95 \quad (6)$$

สำหรับ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน;

$$D_a = 31.511e^{-0.002 \times C_s} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.79 \quad (7)$$

สำหรับ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน;

$$D_a = 21.885e^{-0.002 \times C_s} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.96 \quad (8)$$

สำหรับ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ t ใดๆ;

$$D_a = (448.93 \times t^{-0.665})e^{(-0.002 \times C_s)} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.78 \quad (9)$$

โดยที่ D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต (cm^2/day)

C_s คือ กำลังอัดของคอนกรีต (kg/cm^2)

t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (days)

4. สรุปผล

จากการศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตล้วน และความต้านทานเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่ม

ร้อยละการแทนที่ของซิลิกาฟุ้ง โดยคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งร้อยละ 15 มีความต้านทานคลอไรด์สูงสุด

2. คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตล้วนและกำลังอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ที่มากขึ้น โดยคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งร้อยละ 15 มีกำลังอัดสูงสุด

3. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

4. การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดลง และจากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตได้ เพื่อใช้ในการทำนายค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์จากค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 18/2560 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

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

ASTM C1556. (2000). *Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion*. American Society for Testing and Materials.

ASTM C1152. (2000). *Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*. American Society for Testing and Materials.

Bagheri, A. R., Zanganeh, H., & 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, 663–670.

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

Cabrera, J. G., & Claisse, P. A. (1990). Measurement of chloride penetration into silica fume concrete. *Cement and Concrete Composites*, 12, 157-161.

Camarini, G., Bardella, P. S., & Barbosa, D. C. (2013). Chloride penetration depth in silica fume concrete. *LACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 5, 717 – 720.

Cohen, M. D., & Klitsikas, M. (1986). Mechanisms of hydration and strength developments in Portland cement composites containing silica fume particles. *Indian Concrete Journal*, 60, 296-300.

Gjrov, O. E. (1993). Durability of concrete containing condensed silica fume. *ACI Special Publications SP*, 79, 695-708.

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

Juan, L. M., & Lucio, G. L. Y. (2012). Effect of silica fume addition on the chloride-related transport properties of high-performance concrete. *Dyna*, 171, 105-110.

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

Krishnakumar, S., Asif, A. V., Akhil, R. R., & Jayasree, J. T. (2013). Effect of silica fume on the resistance to chloride ion penetration in high performance concrete. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 2, 01-05.

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

Rao, G. A. (2003). Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 33, 1765-1770.

Raveendran, K. G., Rameshkumar, V., Saravanan, M., Kanmani, P., & Sudhakar, S. (2015). Performance of silica fume on strength and durability of concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4, 10162-10166.

- Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resource, Conservation and Recycling*, 55, 923-932.
- Song, H. W., Jang, J. W., Saraswathy, V., & Byun, K. J. (2007). An estimation of the diffusivity of silica fume concrete. *Building and Environment*, 42, 1358-1367.
- Soutsos, M. (2010). *Concrete durability*. Thomas Telford Limited.
- Sumranwanich, T., & Tangtermsirikul, S. (2018). *Concrete structure deterioration*. Charansanitwong Printing.
- Tangtermsirikul, S. (2003). *Durability and mix design of concrete*. Thammasat University, Rangsit Campus.

7. ประวัติผู้เขียนบทความ

ทวีชัย สำราญวานิช



ตำแหน่ง: รองศาสตราจารย์

สังกัด: หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและ
บำรุงรักษาบูรพา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย

อัญชณา กิจจานนท์



ตำแหน่ง: นิสิตปริญญาเอก

สังกัด: หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและ
บำรุงรักษาบูรพา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย