ความต้านทานการขัดสีและการซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่ทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

ฐิติพงศ์ ต่วนทอง[1*] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร[2] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล[3]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

และ สมิตร ส่งพิริยะกิจ[4]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ10800

** Corresponding Author: thitipong.kc43@mail.kmutt.ac.th*

[1] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

[3] ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

[4] รองศาสตราจารย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ข้อมูลบทความ **บทคัดย่อ**

ประวัติบทความ :
รับเพื่อพิจารณา : 3 กันยายน 2561
แก้ไข : 11 มกราคม 2562
ตอบรับ : 28 มกราคม 2562

คำสำคัญ :
การทาผิวหน้าคอนกรีต /
ความต้านทานการขัดสี /
ความต้านทานการซึมของคลอไรด์ /
สารละลายโซเดียมซิลิเกต

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงผิวหน้าคอนกรีตด้วยการทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 40:60 และ 60:40 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ ทาบนผิวหน้าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ซึ่งมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่อัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แบ่งการทาผิวหน้าคอนกรีตออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ 1) ทาทันทีด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตหลังจากถอดแบบคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วบ่มในอากาศเป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบความต้านทานการขัดสี และ 2) บ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 60 วัน แล้วจึงทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต จากนั้นบ่มตัวอย่างในอากาศเป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีความต้านทานการขัดสีและการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตปกติที่ไม่มีการทาผิวหน้า โดยเฉพาะในกรณีของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 โดยความต้านทานการขัดสีเพิ่มขึ้นร้อยละ 64.5 และ 69.9 เมื่อใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 40:60 และ 60:40 ตามลำดับ ในขณะที่การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 ทั้งกรณีที่ทาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วน 40:60 และ 60:40

Abrasion Resistance and Rapid Chloride Permeability of Concrete Coated with Sodium Silicate Solution

Thitipong Tuantong[1*], Weerachart Tangchirapat[2], Chai Jaturapitakkul[3]

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, ThungKhru, Bangkok 10140

and Smith Songpiriyakij[4]

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

* *Corresponding Author: Thitipong.kc43@mail.kmutt.ac.th*

[1] *Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

[2] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

[3] *Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

[4] *Associate Professor, College of Industrial Technology.*

Article Info

Article History:
Received: September 3, 2018
Revised: January 11, 2019
Accepted: January 28, 2019

Keywords:
Abrasion Resistance /
Rapid Chloride Penetration /
Sodium Silicate Solution /
Surface Coating

Abstract

This research aimed to improve the surface of concrete by coating with sodium silicate solution; by which the ratios of sodium silicate solution to water of 40:60 and 60:40 by weight were used. Concretes made from cement and fly ash at the water to binder ratios of 0.45, 0.55 and 0.65 were used as a substrate, while Portland cement was partially replaced by fly ash ata ratio of 25% by weight of binder. Coating was applied in two different cases:1) concrete was immediately coated with sodium silicate solution after being removed from the mold at 24 hours, then the specimen was cured at ambient temperature for 7 days before testing the abrasion resistance and 2) concrete was cured in water for 60 days before coating and curing at ambient temperature for 7 days for rapid chloride permeability testing. The results showed that the concrete coated with sodium silicate solution had higher abrasion and rapid chloride penetration resistance than the uncoated concrete, especially in the case of concrete prepared at the water to binder ratio of 0.65. The abrasion resistance improved by 64.5% and 69.9% when the ratios of sodium silicate solution to water of 40:60 and 60:40 were used, while the rapid chloride penetration resistance of the coated concrete improved by 30% at both ratios of the sodium silicate solution.

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างมาอย่างยาวนานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยในบางโครงสร้างที่มีการใช้งานยาวนานมากจึงเกิดปัญหาด้านการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมต่างๆ ซึ่งส่งผลเสียต่อสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตและในบางครั้งราคาในการซ่อมแซมโครงสร้างอาจมีราคาสูงกว่าราคาในการก่อสร้างแรกเริ่ม [1] ดังนั้นการปรับปรุงผิวหน้าคอนกรีตจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากที่จะช่วยลดปัญหาการสึกกร่อนของคอนกรีต เพราะถ้าคอนกรีตมีผิวหน้าที่อ่อนแอหรือมีความพรุนมาก เนื่องจากการเยิ้มน้ำของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง การกัดกร่อนย่อมเกิดได้ง่ายและเร็ว ซึ่งการป้องกันปัญหาเหล่านี้สามารถทำได้โดยการออกแบบคอนกรีตให้มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและการใส่วัสดุที่มีอนุภาคเล็กระดับนาโน เช่น นาโนซิลิกา ซึ่งทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2] พบว่าวิธีการเหล่านี้ไม่สามารถป้องกันคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะที่รุนแรงมากได้

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาวัสดุชนิดต่างๆ มาใช้เพื่อทาเคลือบผิวหน้าคอนกรีต โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ อีพ็อกซี่ (Epoxy) ซึ่งเป็นวัสดุอินทรีย์ โดยทำหน้าที่เปรียบเสมือนฟิล์มป้องกันผิวหน้าคอนกรีตจากสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้อีพ็อกซี่ทาเคลือบผิวหน้าคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานที่ดีขึ้น เช่น ความต้านทานการขัดสี การดูดซึมน้ำ [3] อย่างไรก็ตามการใช้อีพ็อกซี่ในการทาเคลือบผิวคอนกรีตมีข้อเสียในด้านของราคาที่สูง รวมถึงมีอายุการใช้งานที่สั้นเนื่องจากสมบัติในการยึดเกาะระหว่างผิวฟิล์มที่ทำหน้าที่ป้องกันคอนกรีตกับผิวคอนกรีตค่อนข้างต่ำจึงทำให้เกิดรอยแตกบนผิวฟิล์มได้ง่ายเมื่อคอนกรีตมีการหดหรือขยายตัว [4] ดังนั้นการศึกษาการนำวัสดุจำพวกอนินทรีย์ ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต หรือน้ำแก้ว (Water glass) ซึ่งมีสมบัติเป็นด่าง มาเป็นวัสดุทาผิวหน้าคอนกรีตเพื่อลดปัญหาในด้านราคาและในด้านการแตกร้าวฟิล์มบนผิวหน้าคอนกรีต เนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่โดยการทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จึงส่งผลทำให้ผิวหน้าคอนกรีตมีความแข็งแรงและมีความทึบน้ำมากขึ้น แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของการนำสารละลายโซเดียมซิลิเกตมาใช้เป็นวัสดุทาผิวหน้าคอนกรีตยังมีน้อยและยังไม่ชัดเจน [5] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำสารละลายโซเดียมซิลิเกตมาทาเพื่อปรับปรุงผิวหน้าคอนกรีต โดยศึกษาความต้านทานการขัดสีและการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ รวมถึงศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการนำสารละลายโซเดียมซิลิเกตมาเป็นวัสดุทาผิวหน้าคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความต้านทานการขัดสี และความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีการทาผิวหน้า รวมถึงศึกษาโครงสร้างจุลภาค และผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ต่างกันที่ส่งผลต่อคอนกรีตที่ทาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1(OPC) และ เถ้าถ่านหิน (Flyash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นวัสดุประสานและวัสดุปอซโซลาน ตามลำดับโดยปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ขณะที่เถ้าถ่านหินมีค่าเท่ากับ 2.26 โดยสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินมีปริมาณร้อยละของสารประกอบแคลเซียมออกไซด์มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 63.3 และ 27.9 รวมถึงเถ้าถ่านหินมีปริมาณผลรวมของสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับร้อยละ 57.9 ซึ่งสามารถจัดอยู่ในเถ้าถ่านหินชนิดแคลเซียมสูง (Class C) ตามมาตรฐาน ASTM C618 [6] มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Finenessmodulus) เท่ากับ 2.89 และมวลรวมหยาบใช้หินปูนที่มีขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 12.7 มม. ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) มีค่าเท่ากับ 2.62 และ 2.67 และค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.87 และ 0.31 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical composition (%)	OPC	Fly ash
Silicon dioxide (SiO_2)	20.9	27.9
Aluminium oxide (Al_2O_3)	4.8	14.4
Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.4	15.6
Calcium oxide (CaO)	63.3	27.9
Sulfur trioxide (SO_3)	2.7	7.1
Magnesium oxide (MgO)	1.3	2.2
Sodium oxide (Na_2O)	0.3	1.9
Potassium oxide (K_2O)	0.4	2.8
Loss on ignition (LOI)	2.9	0.2
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3	-	57.9

สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต เบอร์ 59 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม [7] สมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกต แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีค่าอัตราส่วนของ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 1:2.22 และค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 1.642 สารลดน้ำพิเศษประเภท F ตามมาตรฐาน ASTMC494 [8] นำมาใช้เพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 100-150 มม.

ตารางที่ 2 สมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกต

Test item	Unit	Result
Sodium oxide (Na_2O)	% (w/w)	16.22
Silicon dioxide (SiO_2)	% (w/w)	34.88
Mole ratio (Na_2O: SiO_2)	-	1:2.22
Specific gravity (at 20 ^{o}C)	-	1.642
Density (at 20 ^{o}C)	Baume’	56.7

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมค่าการยุบตัวของของคอนกรีตสดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 100-150 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ ส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3

สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ทาลงบนผิวหน้าคอนกรีตเพียงด้านเดียว เตรียมได้โดยการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตกับน้ำ (Na_2SiO_3:Water) ที่อัตราส่วน 40:60 และ 60:40 โดย

น้ำหนัก แบ่งการทาออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ 1) ทาสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงบนผิวหน้าคอนกรีตทันทีหลังถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง เพื่อทดสอบความต้านทานการขัดสี และ 2) บ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 60 วัน แล้วจึงทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต เพื่อทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ เพื่อเป็นการจำลองโครงสร้างคอนกรีตที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว โดยทั้ง 2 วิธี ทาผิวหน้าจำนวน 3 รอบ โดยแต่ละรอบจะทิ้งตัวอย่างไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงทำการทารอบถัดไป แสดงดังรูปที่ 1 หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในอากาศเป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำตัวอย่างไปทดสอบ

ตารางที่ 3 สมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกต

Sample	Mix proportions (kg/m^3)								Slump (mm)
	Symbol	Cement	Fly ash	Fine Agg.	Coarse Agg.	Water	W/B	SP	
1	360CON25(0.45)	270	90	850	1030	162	0.45	2.5	130
2	360CON25(0.55)	270	90	810	985	198	0.55	-	135
3	330CON25(0.65)	247.5	82.5	800	975	214.5	0.65	-	150

รูปที่ 1 การทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

3.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTMC 39 [9] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. และ สูง 200 มม. ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีการทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต ที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน ตามลำดับ

3.4 การทดสอบความต้านทานการขัดสีของคอนกรีต

ความต้านทานการขัดสีของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTMC944 [10] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 150x150x75 มม^3 ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่มีการทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตและตัวอย่าง

ที่ไม่มีการทาที่อายุ 7 วัน ทดสอบโดยการขัดผิวหน้าตัวอย่างคอนกรีตเป็นจำนวน 10 รอบ โดยแต่ละรอบใช้เวลาขัด 2 นาที ด้วยน้ำหนักกดเท่ากับ 197 นิวตัน และความเร็วรอบเท่ากับ 200 รอบต่อนาที แล้วจึงทำการชั่งน้ำหนักคอนกรีตเพื่อหาค่าการสูญเสียน้ำหนักในแต่ละรอบ

3.5 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

การทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ทดสอบสอบตามมาตรฐาน ASTMC1202 [11] โดยใช้ตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม.และ สูง 50 มม. ทดสอบโดยการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชม. ที่ได้จากค่าความต่างศักย์ 60 โวลต์ ของเครื่อง Rapid Chloride Permeability Tester แล้วจึงคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างทดสอบ ดังสมการที่ 1

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \ldots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

เมื่อ Q = ประจุสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างทดสอบ (คูลอมบ์)

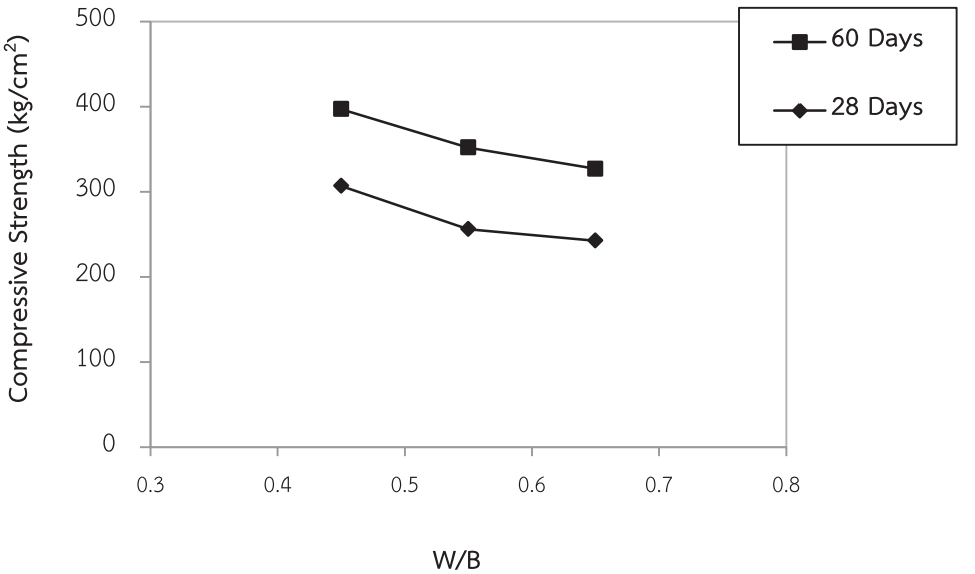
I_0 = ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มแรก (แอมแปร์)

I_t = ค่ากระแสไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ (แอมแปร์)

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 กำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 2 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าต่ำ เนื่องจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตมาก [12] โดยค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ที่ส่วนผสม 360CON25 (0.45) มีค่าเท่ากับ 307 และ 397กก/ซม^2 ที่อายุ 28 และ 60 วัน ตามลำดับ คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่ส่วนผสม 360CON25 (0.55) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 256 และ 352กก/ซม^2 ที่อายุ 28และ 60วัน และค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 มีค่าเท่ากับ 242 และ 327กก/ซม^2 ที่อายุ 28 และ 60 วัน ตามลำดับ



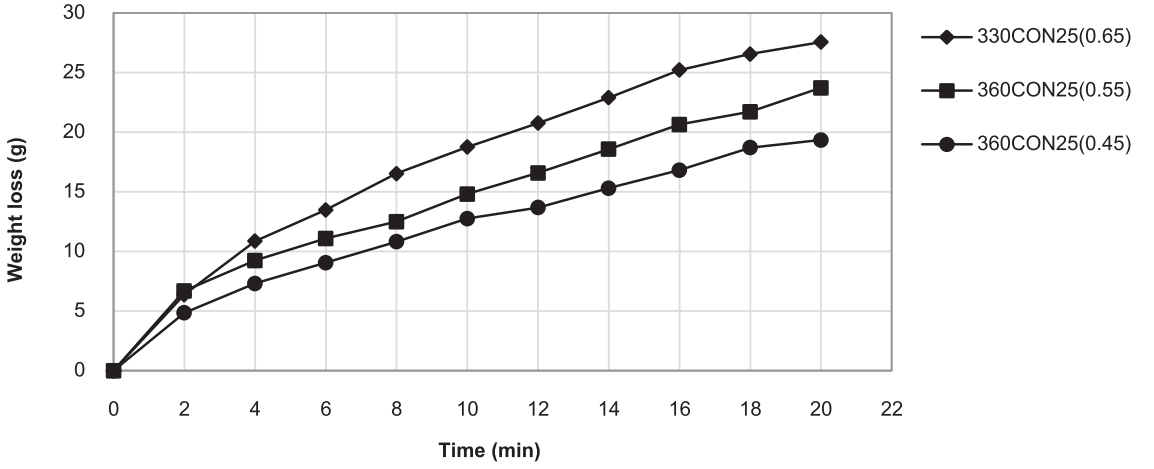
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต

การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อคอนกรีตมีอายุ 60 วัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินในส่วนผสม โดยสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในเถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น [13] เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จึงส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่อายุ 60 วัน ที่มาก

4.2 ความต้านทานการขัดสีของคอนกรีต

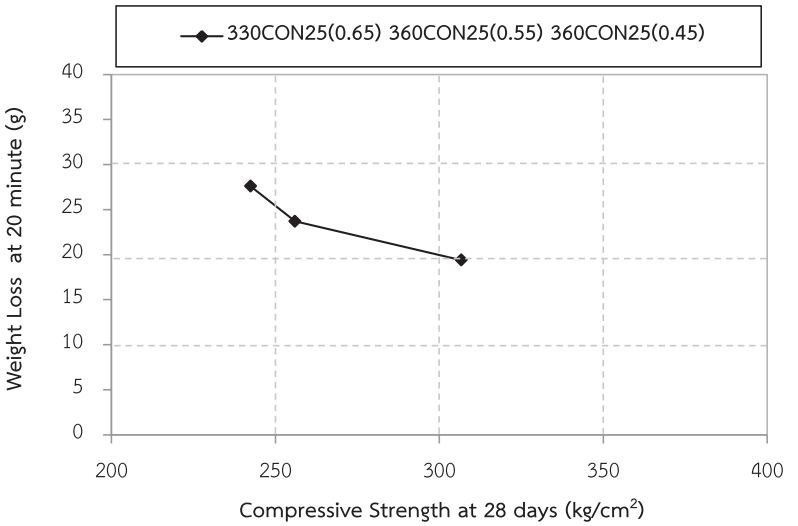
4.2.1 คอนกรีตที่ไม่มีการทาผิวหน้า

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดสอบและค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากขัดสีของคอนกรีตที่ไม่มีการทาผิวหน้า พบว่าคอนกรีตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากขัดสีมากขึ้นตามเวลาการทดสอบที่มากขึ้น โดยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีหลังจากทดสอบเป็นเวลา 20 นาที เท่ากับ 19.4 กรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.65 ซึ่งมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 23.7 และ 27.6 กรัม ตามลำดับผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีตมีค่ามากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น กล่าวคือค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีตแปรผกผันกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาทดสอบและค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่ไม่มีการทาผิวหน้า

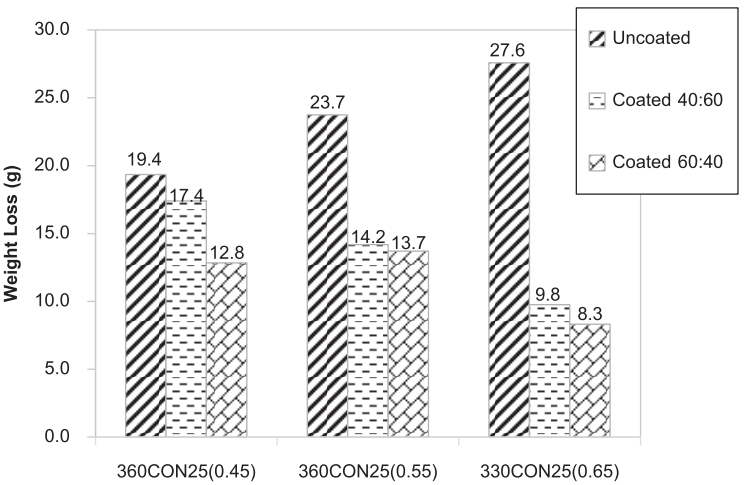
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตและค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสี เห็นได้ว่าคอนกรีต 360CON25 (0.45) มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 307 กก/ซม^2 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีเท่ากับ 19.4 กรัม ในขณะที่คอนกรีต 360CON25(0.55) และ 330CON25 (0.65) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 256 และ 242 กก/ซม^2 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีเท่ากับ 23.7 และ 27.6 กรัม ตามลำดับ ซึ่งให้ผลคล้ายกับงานวิจัยของ Norarat และคณะ [14] ที่ศึกษาค่าความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและตะกรันเตาถลุงเหล็กมาทดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก ทดสอบโดยการขัดสีที่ผิวหน้าตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 6 นาที ด้วยน้ำหนักกระทำเท่ากับ 98 นิวตัน พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต

4.2.2 คอนกรีตที่ทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

ผลการทดสอบความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน โดยการหาค่าการสูญเสียน้ำหนักด้วยวิธี Rotating-Cutter Method แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีเท่ากับ 19.4 กรัม โดยเมื่อทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 40:60 และ 60:40 ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีมีค่าเท่ากับ 17.4 และ 12.8 กรัม ซึ่งค่าการสูญเสียน้ำหนักลดลงเท่ากับร้อยละ 10.3 และ 34.0 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.65 พบว่าคอนกรีตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีเท่ากับ 23.7 และ 27.6 กรัม โดยเมื่อทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 40 และ 70 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีตที่ทาและไม่ทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่ทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลทำให้คอนกรีตเกิดการเยิ้มน้ำเมื่อคอนกรีตแข็งตัวจึงเกิดเป็นฝ้าน้ำปูน (laitance) เป็นผลทำให้ผิวหน้าคอนกรีตมีความอ่อนแอและมีความพรุนมาก [15] สารละลายโซเดียมซิลิเกตจึงสามารถซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้มาก โดยออกไซด์ของซิลิกา (SiO2) ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีหน้าที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แสดงดังสมการที่ 2 [16, 17] ทำให้ผิวหน้าคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 เห็นได้ว่าการทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต ส่งผลให้คอนกรีตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักลดลงในปริมาณร้อยละที่น้อยกว่าการทาผิวหน้าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 นั้นมีความทึบน้ำมากกว่า จึงส่งผลให้สารละลายโซเดียมซิลิเกตซึมลงสู่คอนกรีตได้น้อย

$$Na_2SiO_3 + yH_2O + xCa(OH)_2 \rightarrow xCaO \cdot SiO_2 \cdot yH_2O + 2NaOH \quad (2)$$

แม้ว่าสารละลายโซเดียมซิลิเกตส่งผลให้เกิดผลิตผลของสารประกอบอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตได้ เช่นโซเดียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (NASH) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่น เนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งมีอยู่ในปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน [18] อย่างไรก็ตามการเกิดผลผลิตอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตนั้นมักเกิดเมื่อใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ และต้องมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อน [19] เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนจึงทำให้สารประกอบอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตนั้นอาจเกิดได้น้อย เมื่อเทียบกับสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)

ตารางที่ 4 ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ไม่มีการทาผิวหน้าที่อายุการบ่ม 60 วัน

Mix proportions	Charged Passed (Coulombs)	Chloride Ion Penetrability
360CON25(0.45)	460	Very Low
360CON25(0.55)	2195	Moderate
330CON25(0.65)	3325	Moderate

4.3 ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์

4.3.1 คอนกรีตที่ไม่มีการทาผิวหน้า

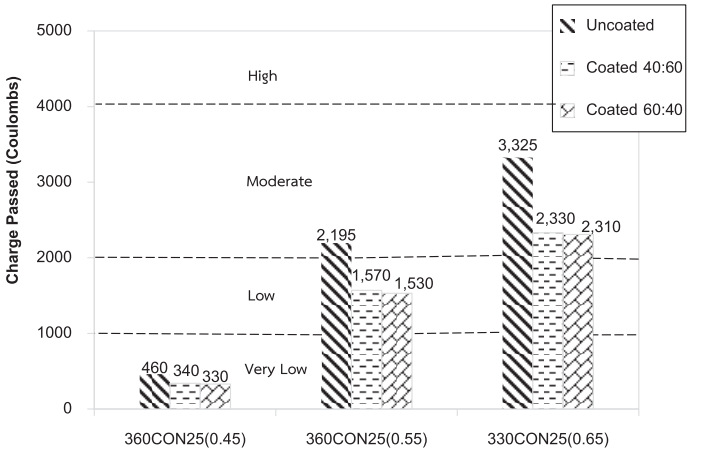
ตารางที่ 4 แสดงค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ไม่มีการทาผิวหน้า ที่อายุการบ่ม 60 วัน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างเท่ากับ 460 คูลอมบ์ ถือว่าอยู่ในระดับน้อยมาก ขณะที่คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.65 มีค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างเท่ากับ 2,195 และ 3,325 คูลอมบ์ตามลำดับ ถือว่าอยู่ในระดับปานกลาง ตามมาตรฐาน ASTM C1202 [11] เห็นได้ว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำทำให้คอนกรีตมีความทึบสูง

4.3.2 คอนกรีตที่ทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ทาผิวหน้า และไม่ทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต ผลการทดสอบพบว่าการทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถช่วยลดค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตได้ โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีค่าประจุไฟฟ้าที่

เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตเท่ากับ 460 คูลอมบ์ เมื่อทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 40:60 และ 60:40 ค่าประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 340 และ 330 คูลอมบ์ ตามลำดับ คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 มีค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตเท่ากับ 2,194 คูลอมบ์ ในคอนกรีตที่ไม่มีการทาผิวหน้า และมีค่าเท่ากับ 1,570 และ 1,530 คูลอมบ์ เมื่อทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วน 40:60 และ 60:40 ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 มีค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตเท่ากับ 3,325 คูลอมบ์ ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในทุกส่วนผสม และเมื่อทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วน 40:60 และ 60:40 ค่าประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 2,330 และ 2,310 คูลอมบ์ตามลำดับ เห็นได้ว่าการทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตช่วยเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต-ไฮเดรต (CSH) ซึ่งส่งผลทำให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น [20, 21] จึงช่วยลดปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้

จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าการทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตส่งผลดีในการช่วยลดค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ทั้งในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 โดยร้อยละการลดลงของค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลงประมาณร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีการทาผิวหน้า โดยคอนกรีตที่ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 มีค่าการลดลงของประจุไฟฟ้ามากกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 เล็กน้อย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 เป็นคอนกรีตที่มีความทึบน้ำค่อนข้างสูงอยู่แล้ว เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีความเหลวมากและมีความพรุนที่ผิวหน้าเนื่องจากการเยิ้มน้ำ เมื่อทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตจึงส่งผลทำให้สารละลายสามารถซึมลงสู่ผิวได้มากกว่า โดยจากงานวิจัยของ Baltazar และคณะ [22] พบว่าคอนกรีตที่มีความพรุนที่ผิวหน้ามากจะให้ผลที่ดีกว่าคอนกรีตที่มีความทึบเมื่อทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยวัสดุทาผิวหน้าชนิดต่างๆ เนื่องจากวัสดุทาผิวเหล่านี้สามารถซึมลงสู่คอนกรีตได้มากกว่า เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีความทึบสูง จึงทำให้สารละลายซึมลงสู่ผิวได้น้อยแต่จากผลการทดสอบพบว่า ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตมีค่าลดลงในปริมาณใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 เนื่องจากการใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ส่งผลให้สารละลายโซเดียมซิลิเกตซึมลงสู่คอนกรีตได้น้อย เมื่อสารละลายแข็งตัวจึงเกิดเป็นฟิล์มขึ้นที่ผิวคอนกรีตซึ่งฟิล์มเหล่านี้ทำหน้าที่ช่วยป้องกันผิวหน้าคอนกรีตได้ดี [23] แต่เมื่อเวลาผ่านไปอาจเกิดรอยแตกร้าวบนผิวฟิล์มได้ง่ายหากคอนกรีตเกิดการหดตัว จึงส่งผลทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหายได้ [5]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ทาและไม่ทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

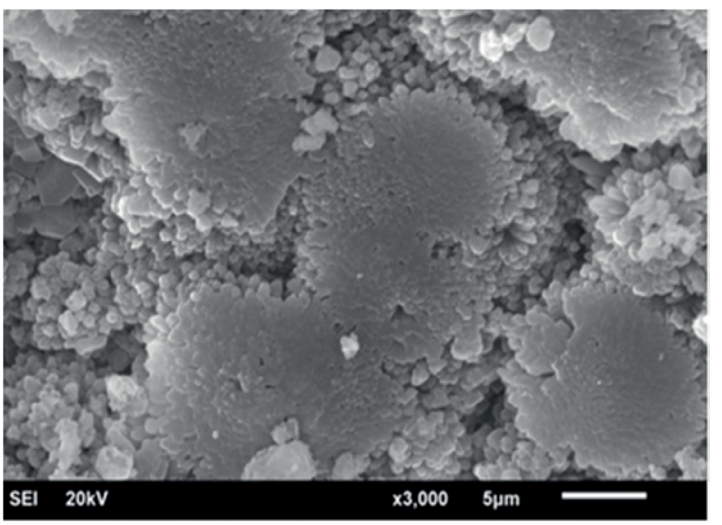
4.4 ผลของการใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำ

จากรูปที่ 5 และ 6 เห็นได้ว่าคอนกรีตที่ทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 60:40 ให้ผลที่ดีกว่าอัตราส่วน 40:60 เล็กน้อยในด้านความต้านทานการขัดสี และการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ เนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตทั้ง 2 อัตราส่วนสามารถซึมลงสู่ผิวคอนกรีตได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่การใช้อัตราส่วน 60:40 ส่งผลให้สารละลายมีความเข้มข้นของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มากกว่าจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้มากกว่า นอกจากนี้การซึมของสารละลายที่ค่าใกล้เคียงกันส่งผลทำให้สารละลายมีเวลาการแข็งตัวเป็นเจล (Gelationtime) ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [17] พบว่าการทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะให้ผลที่ดีเมื่อสารละลายมีระยะแข็งตัวเป็นเจลที่เพียงพอและมีปริมาณความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสม

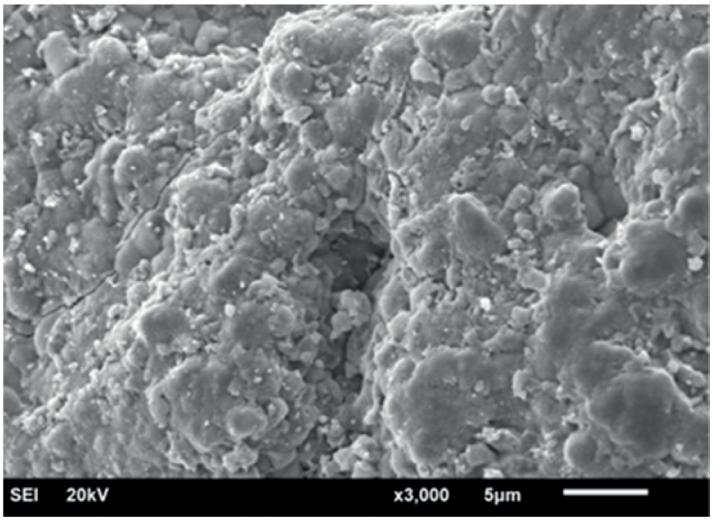
ผลการทดสอบเห็นได้ว่า การเลือกใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างมากในการเลือกใช้งาน เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างจริงมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะโครงสร้างที่ใช้งาน เช่น บางโครงสร้างอาจใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงเพื่อเพิ่มความสามารถในการเทได้ ซึ่งการใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อปรับปรุงผิวหน้าคอนกรีตอาจเลือกใช้อัตราส่วนที่มีความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกตสูง เช่น 60:40 หรือ สูงกว่าได้ แต่บางโครงสร้างที่ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ การใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำอาจจำเป็นต้องลดความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกตลง เช่น 40:60 หรือต่ำกว่าเพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมของสารละลายเข้าสู่ผิวคอนกรีต

4.5 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงลักษณะพื้นผิวของคอนกรีตที่ทาและไม่ทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ทดสอบโดยการใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า พบว่าคอนกรีตปกติมีความพรุนที่ผิวหน้าค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาพื้นผิวของคอนกรีตหลังจากทาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่ามีพื้นผิวที่แน่นและทึบมากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการขัดสีและคลอไรด์ได้ดีมากขึ้น โดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในปริมาณที่สูงจึงสามารถเข้าไปอุดตามช่องว่างบนผิวหน้าคอนกรีตได้ดี [24, 25] รวมถึงการทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ส่งผลทำให้ผิวหน้าคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น



(ก) คอนกรีตที่ไม่มีการทาผิวหน้า



(ข) คอนกรีตที่ทาผิวหน้าด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

รูปที่ 7 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของคอนกรีต

5. สรุปผลการวิจัย

1. การทาผิวหน้าคอนกรีตด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตช่วยเพิ่มความต้านทานการขัดสี และการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้อย่างมาก เนื่องจากซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกต-ไฮเดรต (CSH) ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบและแข็งแรงมากขึ้น

2. การทาสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงบนผิวหน้าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ให้ผลที่ดีกว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ในด้านการเพิ่มความแข็งแรง และลดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้ดี เพราะผิวหน้าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 มีความอ่อนแอและความพรุนมาก สารละลายโซเดียมซิลิเกตจึงสามารถซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้มาก

3. การใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 60:40 ให้ผลที่ดีกว่าอัตราส่วน 40:60 เล็กน้อย เนื่องจากที่อัตราส่วน 60:40 มีความเข้มข้นของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มากกว่า จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าการใช้อัตราส่วน 40:60 อย่างไรก็ตามการใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำที่เหมาะสม ควรพิจารณาสมบัติของคอนกรีตด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เลขที่สัญญา CE-KMUTT-FTERO 6104

7. เอกสารอ้างอิง

1. Ibraham, M., Al-Gahtani, A.S., Maslehuddin, M. and Almusallam, A.A., 1997, “Effectiveness of Concrete Surface Treatment Materials in Reducing Chloride-induced Reinforcement Corrosion,” *Construction and Building Materials*, 11 (7-8), pp. 443-451.

2. Pacheco-Torga, F. and Jalali, S., 2009, “Sulfuric Acid Resistance of Plain, Polymer Modified and Fly Ash Cement Concretes,” *Construction and Building Materials*, 12, pp. 3485-3491.

3. Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T.C. and Ning Li., 2016, “A Review on Concrete Surface Treatment Part II: Performance,” *Construction and Building Materials*, 133, pp. 81-90.

4. Delucci, M., Barbucci A. and Cerisola G., 1997,

"Studyofthephysic-chemical properties of organic coatings for concrete degradationcontrol", *Construction and Building Materials*, 11 (7), pp. 365-371.

5. Dai, j., Akira, Y., Wittmann, F.H., Yokota, H. and Zhang, P., 2010, "Water Repellent Surface Impregnation for Extension of Service Life of Reinforced Concrete Structures in Marine Environments: The Role of Cracks," *Cement and Concrete Composites*, 32, pp. 101-109.

6. American Society for Testing and Materials, 2017, "ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

7. Thai Industrial Standards Institute, 2009, Liquid Sodium Silicates for Industry, TISI, pp. 433-1996.

8. American Society for Testing and Materials, 2017, "ASTM C494 / C494M: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete," *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

9. American Society for Testing andMaterials, 2018, "ASTM C39 / C39M:Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA.

10. American Society for Testing and Materials, 2012, "ASTM C944 / C944M:Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method," *ASTM International,* West Conshohocken, PA.

11. American Society for Testing and Materials, 2017, "ASTMC 1202:Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

12. Chalee, W., Teekavanit, M., Jaturapitakkul, C. and Ausapanit, P., 2007, "Effect of Seawater on Compressive Strength, Chloride Penetration and Corrosion of Steel in Fly Ash Concrete for 4-Year Exposure in Marine Environment," *KMUTT Research and Development Journal*, 30 (1), pp. 153-166. (In Thai)

13. Khongpermgoson, P., Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2016, "Development of Compressive Strength of Concrete from a Binder of Bottom Ash and Calcium Carbide Residue," *Journal of Thailand Concrete Association,* 4 (1), pp. 11-19. (In Thai)

14. Norarat, P., Songpiriyakij, S. and Sukontasukkul, P., 2553, "Abrasion Resistance of High Volume Replacement of Fly Ash and Ground Granulated Blast-furnace Slag Concrete," *Proceeding of the 15th National Convention on Civil Engineering*, pp. MAT053. (In Thai)

15. Jindaprasert, P. and Jaturapitakkul, C., 2012, Cement, Pozzolan and Concrete, pp. 246-248. (In Thai)

16. Pan, X., Shi, C., Jia, L. Zhang, J. and Wu, L., 2015. "Effect of Inorganic Surface Treatment on Air Permeability of Cement-based Materials," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, pp. 1-8.

17. Jiang, L., Xue, X., Zhang, W., Yang, J., Zhang, Li, H.Y., Zhang, R., Zhang, Z., Xu, L., Qu, J,. Song, J. and Song Qin, J., 2015, "The Investigation of Factors Affecting the Water Impermeability of Inorganic Sodium Silicate-based Concrete Sealer," *Construction and Building Materials*, 93, pp. 729-736.

18. Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C., 2002, "The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly-ash and Metakaolinite-based Geopolymers," *Chemical Engineering Journal*, 89, pp. 63-73.

19. Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U., 2017, "Characterization of the High- calcium Fly Ash GeopolymerMortar with Hot-weather Curing Systems of Sustainable Application," *Advanced Powder Technology*, 28, pp. 2317-2324.

20. Sirivivatnanon, V., 2006 "Pozzolan in Modern Concrete," *Concrete and Geopolymer, International Conference on Pozzolan*, 24-25 May 2006, Khon Kaen, Thailand.

21. Sanawung, W., Cheewaket, T. and Jaturapitakkul, C., 2011, "Effect of Palm Oil Fuel Ash on Compressive Strength, Water Permeability and Chloride Penetration of Concrete," *Proceedings of 7th Annual Concrete Conference*, 19-21 October 2011, Rayong, Thailand, pp. MAT 144-150. (In Thai)

22. Baltazar, L., Santana, J., Lopes, B., Rodrigues, M.P. and Correia, J.R., 2014, "Surface Skin Protection of Concrete with Silicate-based Impregnation: Influenced of the Substrate Roughness and Moisture," *Construction and Building Materials*, 70, pp. 191-200.

23. Franzoni, E., Pigino, B. and Pistolesi, C., 2013, "Ethyl Silicate for Surface Protection of Concrete: Performance in Comparison with other Inorganic Surface Treatments," *Cement and Concrete Composites*, 44, pp. 69-76.

24. Bertolini, L., Elsener, B., Pedeferri, P., Redaelli, E. and Polder, R.B., 2013, Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, John Wiley and Sons.

25. Moon, H.Y., Shin, D.S. and Choi, D.S., 2007, "Evaluation of the Durability of Mortar and Concrete Applied with Inorganic Coating Material and Surface Treatment System," *Construction and Building Materials*, 21, pp. 362-369.