

กำลังอัด การต้านทานการขีดสี และการแทรกซึมของคลอไรด์ ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

วชิรกรณ์ เสนาวัง^{1*} วีรชาติ ตั้งจิรภัทร² และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) ค้ำงบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 9.4 โดยน้ำหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตอยู่ในช่วง 5-10 เซนติเมตร ทดสอบกำลังอัดการต้านทานการขีดสีและการแทรกซึมของคลอไรด์ด้วยวิธีประจุไฟฟ้าสะสมผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) ที่อัตราส่วนร้อยละ 15 มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม การต้านทานการขีดสีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อัตราส่วนร้อยละ 15 และ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุ 180 วัน มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) ผสมในคอนกรีตทำให้ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตดีขึ้น

คำสำคัญ : เถ้าปาล์มน้ำมัน / กำลังอัด / การต้านทานการขีดสี / การแทรกซึมของคลอไรด์

* Corresponding Author : nanoon45@hotmail.com

¹ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Strength, Abrasion Resistance, and Chloride Ion Penetration of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash

Wachilakorn Sanawung^{1*} Weerachart Tangchirapat² and Chai Jaturapitakul³

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

Abstract

This research examined the strength and durability of concrete containing ground palm oil fuel ash (GPOFA). Palm oil fuel ash was ground until the particles retained on No. 325 sieve was 9.4% by weight; the ash was used to partially replace Ordinary Portland Cement (OPC) at 15, 25, 35, and 50% by weight of binder. Water to binder ratio (W/B) of all concretes was kept constant at 0.45. The slump of fresh concrete was maintained at 5-10 cm via the use of a superplasticizer. Compressive strength, abrasion resistance, and rapid chloride ion penetration of concretes were investigated. The results showed that concrete with the replacement of ground POFA at 15% by weight of binder had the compressive strength as high as that of the control concrete. Concretes with the replacement of GPOFA at 15 and 25% by weight of binder had the abrasion resistance better than the control concrete at the age of 180 days. Moreover, GPOFA provided a positive effect of increasing the resistance of chloride ion penetration of the concretes.

Keywords : Palm Oil Fuel Ash / Compressive Strength / Abrasion Resistance / Chloride Ion Penetration

* Corresponding Author : nanoon45@hotmail.com

¹ Ph.D 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.

1. บทนำ

อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง เนื่องจากการกัดกร่อนทำให้เกิดสนิมของเหล็กภายในคอนกรีต การกัดกร่อนดังกล่าวเกิดจากสารที่ก่อความเสียหายที่มาจากสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ สารที่ก่อความเสียหายต่อเหล็กเสริมที่พบบ่อยที่สุดคือ คลอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำทะเลหรือในเกลือและมีก๊าซออกซิเจนร่วมอยู่ด้วยการกัดกร่อนของคลอไรด์จะเริ่มเกิดเมื่อสารละลายคลอไรด์กระทำต่อฟิล์มบางๆ (passive films) ที่หุ้มเหล็กเสริมไว้ จนเมื่อฟิล์มเสียหายและออกซิเจนของคลอไรด์กับก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยากับเหล็กจนเหล็กเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตซึ่งสนิมเหล็กเหล่านี้เกิดการขยายตัวและมีปริมาตรสูงกว่าโลหะเดิม เมื่อปริมาตรนี้เพิ่มขึ้นจะเกิดแรงดันขึ้นรอบๆ เหล็กที่ฝังในคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวจนแตกร้าวและก่อความเสียหายแก่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในที่สุด [1]

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash, POFA) เป็นผลพลอยได้จากการนำส่วนที่เหลือจากการผลิตน้ำมันปาล์ม เช่น เปลือกของผลปาล์ม กะลา ทะลายปาล์มเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียสโดยในปี 2559 ปริมาณผลผลิตของปาล์มน้ำมันของประเทศไทยประมาณ 11.68 ล้านตัน/ปี [2] ซึ่งเมื่อนำมาเผาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเกิดขึ้นสูงถึง 3 แสนตัน/ปี (ร้อยละ 2.6 โดยน้ำหนัก) [3] และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี เนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นหนึ่งในวัสดุหลักในการผลิตน้ำมันปาล์ม โดยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มทางภาคใต้ของประเทศไทย

การวิจัยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตได้ เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้ และลดผลกระทบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีออกไซด์ของซิลิกาเป็นจำนวนมากและได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง [4-5] โดยองค์ประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญของเถ้าปาล์มน้ำมันคือ ออกไซด์ของซิลิกาซึ่งทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี การศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต [6,7,8,9]

นอกจากนี้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต [10] เพิ่มการต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของคอนกรีต [11] และลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา [12] ได้อีกด้วย

การศึกษาการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการขัดสีของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สามารถบอกได้ถึงความทนของคอนกรีตจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน นอกจากทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลงแล้วยังสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี [13, 14, 15] ซึ่งต้องบดวัสดุปอซโซลานให้มีความละเอียดสูงทั้งนี้การศึกษาการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ร่วมกับการขัดสีของคอนกรีตยังมีน้อย ในงานวิจัยนี้จึงใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่มีความละเอียดของอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 10 ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่นิยมบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดของอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนอกจากจะช่วยลดเวลาในการเตรียมตัวอย่างแล้วยังช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการบดเถ้าปาล์มน้ำมันได้อีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 10±2 ได้แก่ กำลังอัด การทนทานต่อการขัดสีและการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์

2. การทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

2.1.1 ปูนซีเมนต์

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ซึ่งมีสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C150 [16] โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 13.5 และขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 14.6 ไมโครเมตรดังแสดงในตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ OPC มีออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อะลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

วัสดุประสาน	ความ ถ่วงจำเพาะ	ปริมาณอนุภาคค้ำ ตะแกรงเบอร์ 325 (%)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, d_{50} (ไมโครเมตร)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC)	3.15	13.5	14.6
เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OPOFA)	1.89	94.4	46.5
เถ้าปาล์มน้ำมันหลังบด (GPOFA)	2.39	9.4	9.2

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

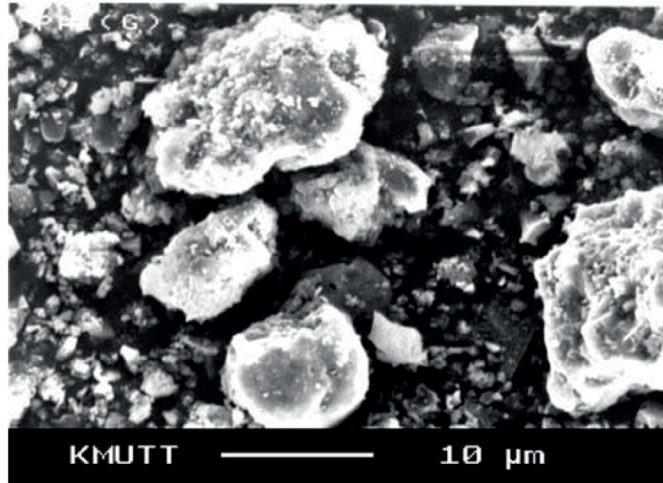
องค์ประกอบทางเคมี (%)	OPC	GPOFA
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	20.9	46.4
อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3)	4.8	1.8
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.4	2.0
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.4	9.5
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.3	4.8
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.2	0.2
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.4	21.6
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.7	7.5
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	1.0	5.7

2.1.2 เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด

เถ้าปาล์มน้ำมันได้จากการเผาากปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้างานวิจัยนี้เก็บตัวอย่างของเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม จ.ชุมพร รูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และมีรูพรุน สมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงในตารางที่ 1 พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าความถ่วงจำเพาะก่อนบดเท่ากับ 1.89 และหลังบดเท่ากับ 2.39 ก่อนบดมีปริมาณวัสดุที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 94.4 โดยน้ำหนัก และหลังบดเท่ากับ 9.4 โดยน้ำหนักและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) ลดลงจาก 46.5

ไมโครเมตร (ก่อนบด) เหลือเท่ากับ 9.2 ไมโครเมตร (หลังบด)

สมบัติทางเคมีของวัสดุประสานแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีผลรวมขององค์ประกอบ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 50.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณต่ำกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันในงานวิจัยของ Kroehong และคณะ [17] เล็กน้อยที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 56.9 ถึง 58.6 นอกจากนี้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานวิจัยนี้ยังมีค่า CaO เท่ากับร้อยละ 9.5 และมีค่าปริมาณ LOI เท่ากับร้อยละ 5.7 โดยน้ำหนัก และยังพบอีกว่ามีองค์ประกอบของ K_2O เท่ากับร้อยละ 21.6 โดยน้ำหนัก ซึ่งอาจมาจากปุ๋ยที่ใช้ปลูกต้นปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันบด

2.1.2 มวลรวมและสารลดน้ำพิเศษ

มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตในงานวิจัยนี้ใช้ทรายแม่น้ำที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความชื้นความละเอียดเท่ากับ 3.09 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66 ขณะที่มวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 3/4 นิ้ว มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.75 การดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบเท่ากับร้อยละ 0.66 และ 0.44 ตามลำดับ และใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท F ชนิดแนฟทาลีน (Sulphonated Naphthalene Formaldehyde) เพื่อปรับความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตให้มีค่ายุบตัวระหว่าง 5-10 เซนติเมตร

2.2 วิธีการวิจัย

2.2.1 ส่วนผสมคอนกรีต

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมให้มีกำลังอัดเท่ากับ 400 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานในปริมาณเท่ากับ 425 กก/ม³ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และมีการยุบตัวของคอนกรีตทุกส่วนผสมระหว่าง 5-10 เซนติเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์+เถ้าปาล์มน้ำมันบด) ส่วนผสมของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของคอนกรีต

ตัวอย่าง	ส่วนผสม (กก/ม ³)						ค่าการยุบตัว (ซม)
	ปูนซีเมนต์	เถ้าปาล์ม น้ำมัน	ทราย	หิน	น้ำ	สารลดน้ำ พิเศษ (SP)	
CT	425	0	765	980	190	1.28	8.0
GPOFA15	360	65	765	955	190	1.70	7.5
GPOFA25	318	107	765	940	190	1.91	7.0
GPOFA35	276	149	765	925	190	2.13	9.0
GPOFA50	213	212	765	910	190	2.55	8.5

SP คือ สารลดน้ำพิเศษที่มีปริมาณน้ำอยู่ประมาณ 50% โดยน้ำหนัก

2.2.2 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 [18] ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ถอดแบบหลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตแล้วประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำสะอาด เพื่อรอการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28, 90 และ 180 วัน แต่ละอายุการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ยของการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง

2.2.3 การทดสอบความต้านทานการขัดสี

การทดสอบความต้านทานการขัดสีของคอนกรีต

ทดสอบโดยวิธี Rotating-Cutter Method ตามมาตรฐาน ASTM C944 [19] โดยนำตัวอย่างคอนกรีตเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร มาตัดตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของแท่งตัวอย่างให้มีขนาดความสูง 50 ± 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตมาขัดด้วยหัวขัด (Dressing Wheel) โดยมีความเร็วในการขัด 200 รอบต่อนาที ภายใต้น้ำหนักกดเนื่องจากการขัดสี่ทุกๆ 2 นาที โดยทดสอบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28, 90 และ 180 วัน เครื่องมือทดสอบความต้านทานการขัดสีแสดงในรูปที่ 2 โดยค่าสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสี่ใช้ 3 ตัวอย่างในการหาค่าเฉลี่ยของแต่ละอายุทดสอบ

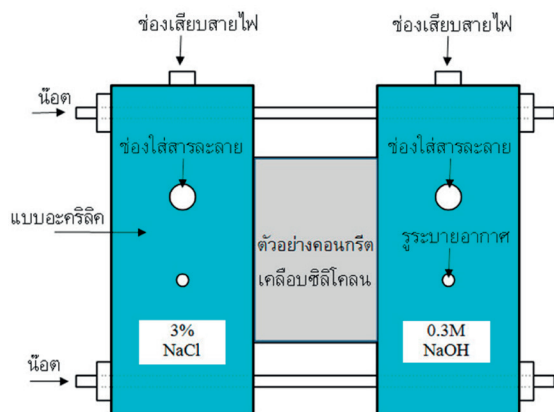


รูปที่ 2 เครื่องมือทดสอบความต้านทานการขัดสี

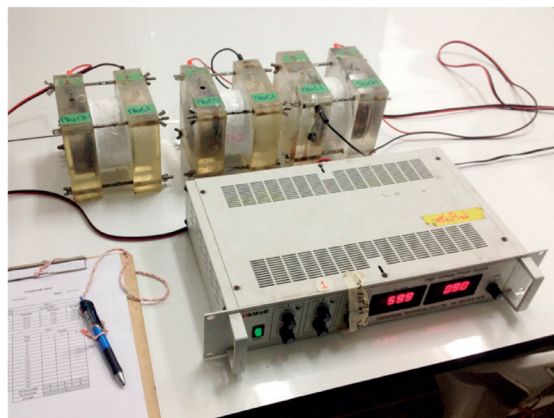
2.2.4 การทดสอบค่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า

การทดสอบค่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 [20] เริ่มจากนำตัวอย่างคอนกรีตเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร มาตัดตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของแท่งตัวอย่างโดยให้มีขนาดความสูง 50 ± 3 มิลลิเมตรทำการ

วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง จากนั้นเคลือบผิวด้านข้างตัวอย่างโดยรอบด้วยซิลิโคน ยกเว้นส่วนผิวหน้าด้านบนและด้านล่าง นำชิ้นตัวอย่างประกอบเข้ากับชุดทดสอบแสดงในรูปที่ 3 (ก) โดยจัดเตรียมลักษณะการทดสอบในห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ทำการบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านทุกๆ 30 นาที ต่อเนื่องจนครบ 6 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3 (ข)



(ก) การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีต



(ข) ชุดทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

รูปที่ 3 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า

ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่อายุ 28, 90 และ 180 วัน แต่ละอายุใช้ 3 ตัวอย่างเป็นค่าเฉลี่ยค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้นำไปคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างทดสอบได้จากสมการที่ 1 [20]

$$Q_x = 900 (I_x + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (1)$$

เมื่อ

Q_x = ประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างทดสอบ
เส้นผ่านศูนย์กลาง x มิลลิเมตร (คูลอมป์)

I_x = ค่ากระแสเริ่มแรก (แอมแปร์)

I_t = ค่ากระแสที่เวลา t นาที (แอมแปร์)

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 กำลังอัด

ตารางที่ 4 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าเมื่ออายุ 28 และ 90 วัน กำลังของคอนกรีตควบคุมมีค่าเท่ากับ 367 และ 462 กก/ซม² ตามลำดับและคอนกรีตที่มีการพัฒนา กำลังอัดอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 490 กก/ซม² ที่อายุ 180 วัน

กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 45-99 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีต

การแทนที่อัตราส่วนร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยมีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่างร้อยละ 80-99 ของคอนกรีตควบคุม เช่น GPOFA15 และ GPOFA25 คอนกรีต มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 362 และ 296 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 99 และ 81 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ และกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 426 และ 373 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 92 และ 81 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน และที่อายุของคอนกรีต 180 วัน กำลังอัดของ GPOFA15 และ GPOFA25 คอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 462 และ 390 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 94 และ 80 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GPOFA50) ทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 168, 206 และ 225 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 46, 45 และ 46 ของคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับอย่างไรก็ตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานให้ผลของกำลังอัดค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ซึ่งคล้ายกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นเมื่อมีการแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เช่น งานวิจัยของ Boga และ Topcu [21] ที่พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในคอนกรีตร้อยละ

15, 30 และ 45 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่สูงขึ้น

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตที่อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น เช่น ร้อยละ 50 ส่งผลให้ความพรุนในเนื้อคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ยังมีความพรุนเหลืออยู่ถึงแม้จะผ่านการบดให้ละเอียดแล้วก็ตาม อีกทั้งการลดปริมาณ Ca(OH)_2 ที่เกิดจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมทำให้ผลผลิตของ Ca(OH)_2 และ C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตลดลง ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตและปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้น้อยตามไปด้วย [22]

แม้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตมีแนวโน้มส่งผลให้กำลังอัดลดลง อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีค่ากำลังอัดมากกว่า 280 กก/ซม² ตั้งแต่อายุ 28 วัน และสามารถพัฒนากำลังอัดถึง 355 กก/ซม² ที่อายุ 180 วัน ขณะเดียวกันการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่อัตราส่วนร้อยละ 15 ยังมีค่ากำลังอัดสูงถึง 462 กก/ซม² ที่อายุ 180 วันอีกด้วย

3.2 การทดสอบความต้านทานการซัดสี

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีแสดงในตารางที่ 5 โดยคอนกรีตควบคุมมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีเท่ากับ 2.67 และ 2.27 กรัม ที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ และลดลงเหลือ 2.15 กรัม ที่อายุ 180 วันแสดงให้เห็นว่าเมื่ออายุการบ่มของคอนกรีตเพิ่มขึ้นกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีของคอนกรีตจึงมีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisen และคณะ [23] ที่ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และสอดคล้องกับงานของ Bumrungrsri และคณะ [24] ที่ศึกษาการใช้วัสดุเหลือทิ้งในการทำอิฐพบว่ากำลังอัดที่สูงขึ้นทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีลดลง

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าลดลงตามอายุของการบ่มที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ที่อายุ 28 และ 90 วัน GPOFA 15 คอนกรีตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีเท่ากับ 2.83 และ

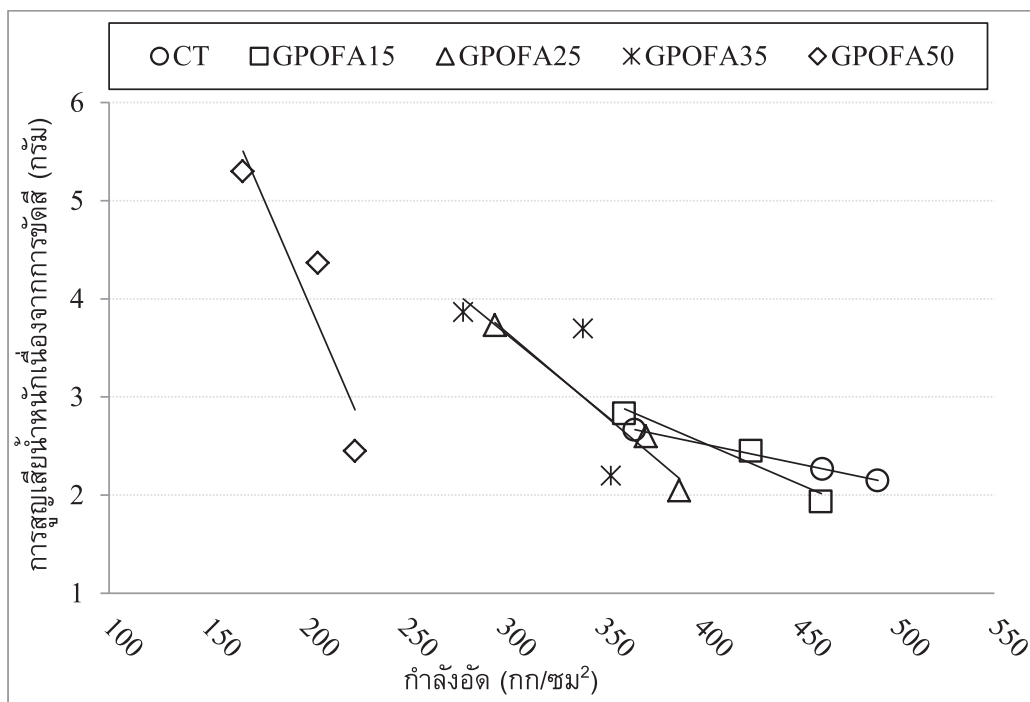
2.45 กรัม หรือร้อยละ 106 และ 108 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ ที่อายุ 180 วัน ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีของ GPOFA15 คอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1.93 กรัม หรือร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมถึงแม้จะมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีและกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าเมื่อกำลังอัดและอายุการบ่มของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีของคอนกรีตถึงแม้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เช่น GPOFA25 และ GPOFA35 คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 390 กก/ซม² และ 355 กก/ซม² หรือร้อยละ 80 และ 72 ของคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 180 วัน ตามลำดับ มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีเท่ากับ 2.05 และ 2.20 กรัม หรือร้อยละ 95 และ 102 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีลดลง เนื่องจากขนาดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดเล็กช่วยลดช่องว่างในคอนกรีตและการทำปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยให้วัสดุประสานจับตัวกันได้แน่นขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตเพิ่มขึ้น พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากค่ากำลังอัดที่ลดลง ตัวอย่างเช่น GPOFA50 คอนกรีต ที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีเท่ากับ 5.30 และ 4.37 กรัม หรือร้อยละ 199 และ 193 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 45 และ 46 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ที่อายุ 180 วันค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีของ GPOFA50 คอนกรีตลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 2.45 กรัม หรือร้อยละ 114 ของคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีค่ากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 46 ของคอนกรีตควบคุม เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะ GPOFA50 คอนกรีต มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมมาก อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่

ไม่มากจนเกินไป เช่น อัตราส่วนร้อยละ 15 หรือ 25 เพราะการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดช่วยลดช่องว่างในคอนกรีต ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดเล็ก

รวมถึงการทำปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งมีผลทำให้คอนกรีตจับตัวกันแน่นขึ้นจึงมีการต้านทานการขีดสีที่เพิ่มขึ้น



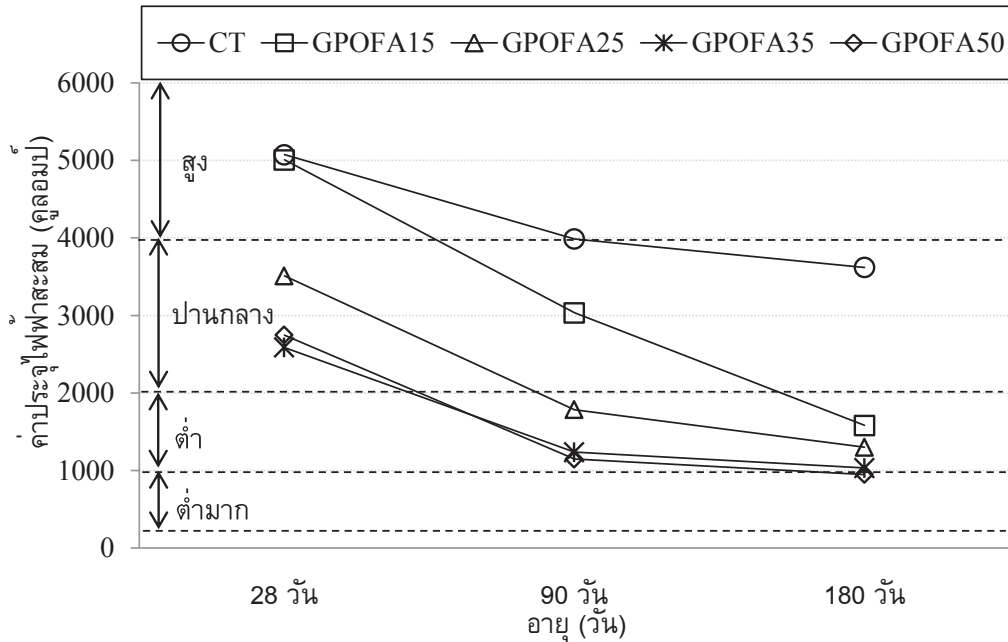
3.3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า

ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีเร่งด้วยไฟฟ้า พบว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าประจุไฟฟ้าสะสมเท่ากับ 5075, 3989 และ 3620 คุลอมป์ ที่อายุ 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับมาตรฐาน ASTM C1202 [20] กำหนดให้คอนกรีตที่มีค่าประจุไฟฟ้าสะสมมากกว่า 4000 คุลอมป์ อยู่ในระดับ “สูง” ส่วนระดับ “ปานกลาง” คือคอนกรีตที่มีค่าประจุไฟฟ้าสะสมระหว่าง 2000-4000 คุลอมป์

คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อัตราส่วนร้อยละ 15 และ 25 ได้แก่ GPOFA15 และ GPOFA25 คอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าประจุไฟฟ้าสะสมเท่ากับ 5008 และ 3511 คุลอมป์ ซึ่งจัดอยู่ในระดับ “สูง” และ “ปานกลาง” ตามลำดับ

หลังจากนั้นค่าประจุไฟฟ้าสะสมลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น โดยที่อายุ 90 วัน GPOFA15 และ GPOFA25 คอนกรีต มีค่าประจุไฟฟ้าสะสมเท่ากับ 3035 และ 1784 คุลอมป์ ซึ่งจัดอยู่ในระดับ “ปานกลาง” และ “ต่ำ” (1000-2000 คุลอมป์) ตามลำดับเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 180 วัน ค่าประจุไฟฟ้าสะสมของ GPOFA15 และ GPOFA25 คอนกรีตเท่ากับ 1583 และ 1301 คุลอมป์ ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในระดับ “ต่ำ” นอกจากนี้ GPOFA35 และ GPOFA50 คอนกรีต มีค่าประจุไฟฟ้าสะสม เท่ากับ 2584 และ 2747 คุลอมป์ ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในระดับ “ปานกลาง” หลังจากนั้นที่อายุ 90 วัน คอนกรีตสามารถต้านทานต่อคลอไรด์ได้ดีขึ้น โดย GPOFA35 และ GPOFA50 คอนกรีต มีค่าประจุไฟฟ้าสะสมจัดอยู่ในระดับ “ต่ำ” ยิ่งไปกว่านั้น GPOFA50 คอนกรีต

มีค่าประจุไฟฟ้าสะสมเท่ากับ 949 คูลอมป์ ซึ่งจัดอยู่ในระดับ “ต่ำมาก” ที่อายุ 180 วัน

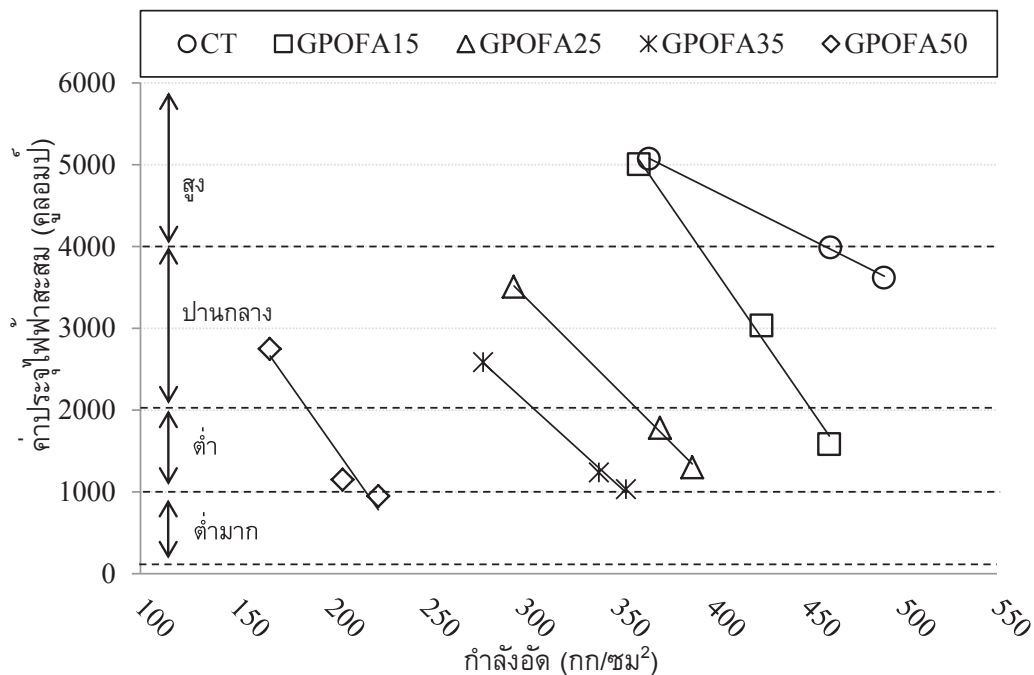


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีเร่งด้วยไฟฟ้าและอายุการบ่มคอนกรีต ที่อายุ 28, 90 และ 180 วัน

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีเร่งด้วยไฟฟ้าและอายุการบ่มของคอนกรีต พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าประจุไฟฟ้าสะสมมีแนวโน้มลดลง

ผลการศึกษายังแสดงอีกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดและอายุการบ่มของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าประจุไฟฟ้าสะสมของคอนกรีตมีค่าลดลง โดยที่อายุ 180 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าประจุไฟฟ้าสะสมจัดอยู่ในระดับ “ต่ำ” ขณะที่คอนกรีตควบคุมมีค่าประจุไฟฟ้าสะสมจัดอยู่ในระดับ “ปานกลาง” ที่เป็นเช่นนี้เพราะคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีปฏิกิริยาปอซโซลานที่มีผลผลิตของ C-S-H ที่สามารถดูดซับคลอไรด์ที่ผิวได้ [25] และผลที่เกิดจากการลด $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมคอนกรีตพบว่าสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากขึ้นในงานวิจัยของ Chalee

และ Chuapob [26] พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวมีผลทำให้คอนกรีตมีความแน่นและลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี ได้อย่างชัดเจน และงานวิจัยของ Rukzon และ Chindapasirt [27] พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียด (ขนาดอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3) ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 30 มีค่าประจุไฟฟ้าสะสมของคอนกรีตจัดอยู่ในระดับ “ต่ำมาก” อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดขนาดอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 10 สามารถให้ผลที่ดีต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้เช่นกัน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีเร่งด้วยไฟฟ้าและกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28, 90 และ 180 วัน

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีเร่งด้วยไฟฟ้าและกำลังอัดของคอนกรีตพบว่าเมื่อคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกันแต่มีอายุการบ่มที่แตกต่างกัน เช่น คอนกรีตควบคุมมีกำลังอัดเท่ากับ 367 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน และ GPOFA35 คอนกรีตมีกำลังอัดเท่ากับ 355 กก/ซม² ที่อายุ 180 วัน พบว่าค่าประจุไฟฟ้าสะสมของคอนกรีตควบคุมมีค่าเท่ากับ 5075 คูลอมป์ ขณะที่ GPOFA35 คอนกรีต มีค่าประจุไฟฟ้าสะสมเท่ากับ 1033 คูลอมป์แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตและอายุในการบ่มช่วยเพิ่มการต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้เป็นอย่างดีผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสม เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้ากลบ เถ้าขานอ้อยและเถ้ากลบ-เปลือกไม้ [13, 28, 29, 30] ในส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งพบว่าสามารถต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ส่วนผสมด้วยวัสดุปอซโซลาน

การผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตช่วยให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อคลอไรด์มากขึ้น แม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงก็ตามซึ่งเป็นผลมาจากการลด Ca(OH)_2 เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีความพรุนเหลืออยู่ การกระจายตัวของเถ้าปาล์มน้ำมันจึงทำให้คอนกรีตเกิดช่องว่างจากความพรุนของเถ้าปาล์มน้ำมัน และผลิตภัณฑ์จาก C-S-H ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานร่วมกับปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ไอออนของคลอไรด์ถูกจำกัดไม่ให้เข้าไปแทรกตัวในคอนกรีต [31, 32] จึงทำให้การไหลของอิเล็กโทรไลต์ลดลงก่อนที่จะเข้าไปถึงเหล็ก [33, 34] ในงานวิจัยนี้พบว่าคอนกรีตสามารถต้านทานต่อคลอไรด์มากยิ่งขึ้นเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นในส่วนผสมผลของการบ่มคอนกรีตการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยให้โพรงในเฟสดีมีขนาดเล็กลงซึ่งสามารถดูดซับและช่วยชะลอการเคลื่อนที่ของไอออนคลอไรด์ได้ [14, 31, 35]

4. สรุปผลการวิจัย

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อัตราส่วนร้อยละ 15 และ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเล็กน้อย โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 80-90 ของคอนกรีตควบคุม

2. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีลดลงโดยเฉพาะคอนกรีตที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุ 180 วัน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีคิดเป็นร้อยละ 95 และ 102 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ แม้มีค่ากำลังอัดเพียงร้อยละ 80 และ 72 ของคอนกรีตควบคุม

3. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

4. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตทำให้คอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น และเพิ่มความสามารถต่อการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการซัดสีแม้ว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมก็ตาม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) จากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนการทำวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับโครงการทุนวิจัย วิชาการตามแผนและกลยุทธ์เพื่อการพัฒนา สัญญาเลขที่ CE-KMUTT 6002 ที่ได้สนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

1. Gonzales, J.A., Feliu, S., Rodriguez, P., Ramirez, E., Alonso, C. and Andrade, S., 1996, "Some Questions on the Corrosion of Steel in Concrete-Part I : When,

How and How much Steel Corrodes," *Materials and Structures*, 29, pp. 40-46.

2. Office of Agricultural Economics, 2016, Page[Online], Available : [https://www.moac.go.th/ewt_dl_link.php?nid=17642Forecasting Production, Marketing and Price Trends for 2016-2017](https://www.moac.go.th/ewt_dl_link.php?nid=17642Forecasting%20Production,%20Marketing%20and%20Price%20Trends%20for%202016-2017) [1 February 2016]. (In Thai).

3. Charoennatkul, C., 2014, "Interlocking Blocks Containing Oil Palm Ash and Shells Waste," *Journal of Community Development and Life Quality*, 2 (1), pp. 103-112.

4. Tangchirapat, W., Seating, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. and Siripanichgorn, A., 2007, "Use of Waste Ash from Palm Oil Industry in Concrete," *Waste Management*, 27 (1), pp. 81-88.

5. Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A., 1996, "Palm Oil Fuel Ash-a Potential Pozzolanic Material in Concrete Construction," *International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21st Century*, Bangkok, Thailand, p. D361-6.

6. Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2004, "Utilization of Palm Oil Fuel Ash in High-strength Concrete," *Journal of Construction Engineering and Management*, 16 (6).

7. Awal, A.S.M.A. and Hussin, M.W., 1999, "Durability of High Performance Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash," pp. 465-474, in M.A. Lacasse and D.J. Vanier (Eds.) *Durability of Building Materials and Components*, Institute for Research and Construction, Ottawa, Canada.

8. Tay, J.H. and Show, K.Y., 1995, "Use of Ash derived from Oil-Palm Waste Incineration as a Cement Replacement Material," *Resources Conservation Recycling*, 131 (1), pp. 27-36.

9. Tay, J.H., 1995, "Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2 (2), pp. 94-105.

10. Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and Jaturapitakkul, C., 2007, "Strength and Water Permeability of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk-bark Ash," *Construction and Building Materials*, 21 (7), pp. 1492-9.
11. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W. and Saeting, T., 2007, "Evaluation of the Sulfate Resistance of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash," *Construction and Building Materials*, 21 (7), pp. 1399-405.
12. Ramjan, S., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2016, "Effect of Palm Oil Fuel Ash on Alkali-Silica Reaction of Mortar," *KMUTT Research and Development Journal*, 39 (3), pp. 379-394. (In Thai)
13. Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V., 2008, "Resistance to Chloride Ion Penetration of Blended Portland cement Mortar containing Palm Oil Fuel Ash, Rice Husk Ash and Fly Ash," *Construction and Building Materials*, 22 (5), pp. 932-938.
14. Bamağa, S., Ismail, M.A. and Hussin, M.W., 2010, "Chloride Resistance of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash," *Concrete Research*, 1 (4), pp. 158-166.
15. Rukzon, S. and Chindaprasirt, P., 2008, "Strength and Chloride Penetration of Mortar with Mixture Proportioning in Ternary Cementitious System," *KMUTT Research and Development Journal*, 31 (4), pp. 859-869. (In Thai)
16. American Society for Testing and Material, 2012, "ASTM C150/150M Standard Specification for Portland Cement," Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia. (DOI : 10.1520/C0150_C0150M-12)
17. Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P., 2012, "A Study Microstructure of Blended Cement Paste Containing Palm Oil Fuel Ash," *KMUTT Research and Development Journal*, 35 (2), pp. 187-200. (In Thai)
18. American Society for Testing and Material, 2012, "ASTM C39/C39M Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia. (DOI : 10.1520/C0039_C0039M-12)
19. American Society for Testing and Material, 2012, "ASTM C944 Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-cutter method. American Society for Testing and Materials," Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia. (DOI:10.1520/C0944_C0944M-12)
20. American Society for Testing and Material, 2010, "ASTM C1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia. (DOI : 10.1520/C1202-12)
21. Boga, A.R. and Topcu, I.B., 2012, "Influence of Fly Ash on Corrosion Resistance and Chloride Ion Permeability of Concrete," *Construction and Building Materials*, 31, pp. 258-264.
22. Lam, L., Wong, Y.L. and Poon, C.S., 2008, "Degree of Hydration and Gel/space Ratio of High-volume Fly Ash/cement Systems," *Cement and Concrete Research*, 30 (5), pp. 747-56.
23. Srisen, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2014, "Properties of Concrete using Fly Ash and Calcium Carbide Residue as a Cementitious Material," *KMUTT Research and Development Journal*, 37 (2), pp. 165-175. (In Thai)
24. Bumrungsri, C., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2011, "Development of Concrete Block Made from Waste Materials without Portland Cement," *Annual Concrete Conference 7*, 19-21 October, Rayong Resort Hotel, Rayong, MAT138-143. (In Thai)
25. Filho, J.H., Medeiros, M.H.F., Pereira, E., Helene, P. and Isaia, G.C., 2013, "High-volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime : Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated test," *Journal*

of Materials in Civil Engineering, 25 (3), pp. 411-418.

26. Chalee, W. and Chuapolb, T., 2013, "Evaluation of Chloride Penetration in Fly Ash Concrete under Marine Environment by Ultrasonic Wave," *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (2), pp. 185-201. (In Thai)

27. Rukzon, S. and Chindapasirt, P., 2012, "Utilization of Bagasse Ash in High-strength Concrete," *Materials and Design*, 34, pp. 45-50.

28. Rerkpiboon, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2015, "Strength, Chloride Resistance, and Expansion of Concretes containing Ground Bagasse Ash," *Construction and Building Materials*, 101, pp. 983-989.

29. Rasheeduzzafar, A.A., 1992, "Influence of Cement Composition on Concrete Durability," *American Concrete Institute Materials Journal*, 89 (6), pp. 574-586.

30. Ramezani pour, A.A. and Malhotra, V.M., 1995, "Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride-ion Penetration and Porosity of Concretes incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume," *Cement and Concrete Composites*, 17 (2), pp. 125-133.

31. Pradhan, B., 2014, "Corrosion Behavior of Steel Reinforcement in Concrete exposed to Composite Chloride-sulfate Environment," *Construction and Building Materials*, 72, pp. 398-410.

32. Leng, F., Feng, N. and Lu, X., 2000, "An Experimental Study on the Properties of Resistance to Diffusion of Chloride Ions of Fly Ash and Blast Furnace Slag Concrete," *Cement and Concrete Research*, 30 (6), pp. 989-992.

33. Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T., 2005, "Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore size of Blended Cement Paste," *Cement Concrete Composites*, 27 (4), pp. 425-428.

34. Rukzon, S. and Chindapasirt, P., 2009, "Effect of Grinding on Chemical and Physical Properties of Rice Husk Ash," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16 (2), pp. 242-247.

35. Horsakulthai, V., Phiuvanna, S. and Kaenbud, W., 2011, "Investigation on the Corrosion Resistance of Bagasse-rice Husk-wood Ash Blended Cement Concrete by Impressed Voltage," *Construction and Building Materials*, 25 (1), pp. 54-60.