

## การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อเพิ่มการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูง ที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

ปกป้อง รัตนชู<sup>1\*</sup> อิศราพงษ์ ขานทอง<sup>2</sup> วีรชาติ ตั้งจิรภัทร<sup>3</sup>  
และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล<sup>4</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อเพิ่มความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เศษคอนกรีตจากการรีไซเคิลโครงสร้างมาอยู่เป็นมวลรวมแทนที่การใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติทั้งหมด โดยใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากนั้นจึงทดสอบการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตโดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านด้วยวิธีเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในสภาวะเปียกสลับแห้งซึ่งเป็นการจำลองจากสภาพแวดล้อมทะเล ผลการทดลองพบว่าการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบมีผลโดยตรงต่อการลดการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดสามารถช่วยเพิ่มการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ นอกจากนี้ระยะเวลาแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต ผลการทดสอบสามารถใช้ประเมินแนวโน้มความสามารถต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมคลอไรด์ได้

**คำสำคัญ :** เถ้าขานอ้อย / มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต / คอนกรีตกำลังสูง / การต้านทานคลอไรด์

\* Corresponding Author: pokpong.pnu@hotmail.com

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>4</sup> ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

# Use of Ground Bagasse Ash to Increase Chloride Resistance of High Strength Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate

Pokpong Rattanachu<sup>1\*</sup> Isarapong Karntong<sup>2</sup> Weerachart Tangchirapat<sup>3</sup>  
and Chai Jaturapitakkul<sup>4</sup>

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

## Abstract

This research aimed to use ground bagasse ash to increase the chloride resistance of high strength concrete containing recycled concrete aggregate. Recycled concrete aggregate obtained from crushing demolished concrete structure was used to fully replace naturally coarse aggregate in the concrete. Ground bagasse ash was used to partially replace ordinary Portland cement (OPC) at 20, 35 and 50% by weight of binder. Chloride resistance of high strength concrete in terms of the current passed by the impressed voltage and the chloride penetration depth of concrete under wet-dry cycles, which are used to simulate the tidal zone of seawater, were investigated. The results indicated that the replacement of crushed limestone with the recycled concrete aggregate had a negative impact on the chloride resistance of concrete. The use of ground bagasse ash to replace OPC could improve the chloride resistance of concrete containing recycled concrete aggregate. The chloride penetration depth of the concrete exhibited a good relationship with the current and can be used to predict the chloride resistance of concrete exposed to the chloride environment.

**Keywords** : Bagasse Ash / Recycled Concrete Aggregate / High Strength Concrete / Chloride Resistance

---

\* Corresponding Author: pokpong.pnu@hotmail.com

<sup>1</sup> Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>4</sup> Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

## 1. บทนำ

การใช้คอนกรีตเป็นวัสดุในงานก่อสร้างเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากคอนกรีตมีราคาในการก่อสร้างที่ถูกกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น เหล็ก ไม้ เป็นต้น นอกจากนี้ โครงสร้างที่ทำด้วยคอนกรีตมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน อย่างไรก็ตามในบางสภาพแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น ในบริเวณที่มีสารซัลเฟตได้แก่ ในดิน น้ำใต้ดิน น้ำเสียจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น สามารถส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตที่ก่อสร้างในบริเวณดังกล่าวมีอายุการใช้งานที่สั้นลงได้

สภาพแวดล้อมทะเลเค็มเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหาย เนื่องจากในน้ำทะเลมีปริมาณสารละลายเกลือประมาณร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก และมีคลอไรด์ประมาณร้อยละ 54.3 โดยน้ำหนักของสารละลายเกลือทั้งหมด [1] ซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบต่างๆ ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (tidal zone) [2] อีออนคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตผ่านทางช่องว่างหรือโพรงคาปิลลารี (capillary pore) ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ทำให้การรับกำลังและความทนทานของโครงสร้างลดลง ส่งผลให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลงตามไปด้วย

ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาการนำเศษคอนกรีตที่ได้จากการรื้อถอนโครงสร้างคอนกรีตมาย่อยเพื่อใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมของคอนกรีต เนื่องจากเป็นการช่วยลดปัญหาในด้านสถานที่จัดทิ้งที่มีอยู่จำกัดและเป็นอีกแนวทางในการลดการใช้มวลรวมจากธรรมชาติ แต่ปัญหาที่พบคือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีคุณภาพที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ เนื่องจากมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีความพรุนมากกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตจึงส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [3-5] นอกจากนี้ Limbachiya และคณะ [6] พบว่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตลดลงเมื่อมีการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติใน

ปริมาณที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Toolkasikorn และคณะ [7] ที่พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีระยะเวลาการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ

วัสดุปอซโซลานเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการนำมาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มคุณภาพให้กับคอนกรีต จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น [8-13] มีการพัฒนากำลังในช่วงอายุปลายที่สูงขึ้นและช่วยเพิ่มความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดีขึ้น เช่นเดียวกับเถ้าขานอ้อยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตน้ำตาล เมื่อนำมาบดให้มีอนุภาคที่เล็กลงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมของคอนกรีตได้ [14] งานวิจัยของ Chusilp และคณะ [15] พบว่าการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน ได้สูงถึงร้อยละ 113 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าขานอ้อยบดละเอียดเป็นส่วนผสม นอกจากนี้การแทนที่เถ้าขานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าขานอ้อยบดละเอียดเป็นส่วนผสมประมาณ 3 เท่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rerkpiboon และคณะ [16] ที่พบว่าเถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยเพิ่มความต้านทานคลอไรด์และซัลเฟตของคอนกรีตให้ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ามวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีคุณภาพสามารถนำมาใช้แทนที่มวลรวมจากธรรมชาติในการผลิตคอนกรีตได้ [17, 18] นอกจากนี้การเลือกใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น สามารถเพิ่มคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้ดีขึ้น [6, 7, 19] ดังนั้นเพื่อเป็นการส่งเสริมและเพิ่มความเชื่อมั่นในการนำเศษคอนกรีตและเถ้าขานอ้อยมาใช้ในงานคอนกรีตต่อไปในอนาคต งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำเศษคอนกรีตมาใช้เป็นมวลรวมหยาบและเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการบดมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง โดยศึกษาความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า

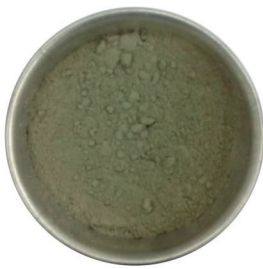
และจำลองคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นในทะเล ซึ่งผล  
ที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการประเมินผลกระทบของคลอไรด์  
ต่อคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่สัมผัสกับ  
สภาวะแวดล้อมทะเลต่อไป

## 2. การทดสอบ

### 2.1 วัสดุประสาน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้เป็นวัสดุประสาน  
หลัก และเถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล จ.ราชบุรี ที่ผ่านการ

บดจนมีความละเอียดของอนุภาคข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์  
325 ร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก (ดังแสดงในรูปที่ 1) ใช้เป็นวัสดุ  
ปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ  
20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งสมบัติของปูน  
ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าขานอ้อยบดละเอียด  
แสดงในตารางที่ 1



ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
ประเภทที่ 1



เถ้าขานอ้อยก่อนบด



เถ้าขานอ้อยบดละเอียด

รูปที่ 1 วัสดุประสาน

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าขานอ้อยบดละเอียด
Silicon Dioxide (SiO <sub>2</sub> )	20.1	72.0
Aluminium Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.8	4.1
Ferric Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.4	3.0
Calcium Oxide (CaO)	65.4	5.9
Magnesium Oxide (MgO)	1.3	1.1
Potassium Oxide (K <sub>2</sub> O)	2.7	4.0
Sulfur Trioxide (SO <sub>3</sub> )	0.1	1.2
Loss On Ignition (LOI)	1.7	7.5
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.27
ร้อยละที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)	20.0	0.7
ขนาดอนุภาค, d <sub>50</sub> (ไมโครเมตร)	15.0	7.5

## 2.2 มวลรวม

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยหินปูนย่อยและมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่ได้จากการย่อยเศษโครงสร้างคอนกรีตที่มีกำลังอัดประมาณ 50 เมกะปาสคาล

โดยมวลรวมหยาบที่ใช้มีขนาดค้ำงบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 12.5 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ ซึ่งสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบแสดงในตารางที่ 2



หินปูนย่อย



มวลรวมหยาบ  
จากการย่อยเศษคอนกรีต

รูปที่ 2 มวลรวมหยาบ

ตารางที่ 2 สมบัติของมวลรวม

สมบัติ	หินปูนย่อย	มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต
โมดูลัสความละเอียด	6.40	6.13
ความถ่วงจำเพาะ	2.71	2.45
การดูดซึมน้ำ (%)	0.57	5.44
ปริมาณช่องว่าง (%)	1.55	12.63

## 2.3 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 3 โดยคอนกรีตควบคุม (CT) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวและใช้มวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมด ส่วนผสมคอนกรีตที่เหลือใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดและใช้เถ้า

ขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (RA, RA20, RA35 และ RA50) โดยคอนกรีตทุกส่วนผสมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 150 ถึง 200 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

ตัวอย่าง	ส่วนผสม (กก/ม <sup>3</sup> )							กำลังอัด (เมกะ- ปาสคาล)	
	ปูนซีเมนต์	เถ้า ชาน อ้อย	หินปูน ย่อย <sup>a</sup>	มวลรวม หยาบจาก การย่อยเศษ คอนกรีต <sup>ี</sup>	ทราย	น้ำ ประสิทธิผล	สารลด น้ำ <sup>b</sup>	28 วัน	90 วัน
								28 วัน	90 วัน
CT	560	-	990	-	750	170	1.5	61.6	69.7
RA	560	-	-	925	710	170	1.5	62.7	69.1
RA 20	450	110	-	890	710	170	2.3	61.3	70.8
RA 35	365	195	-	885	705	170	2.8	56.0	63.6
RA 50	280	280	-	880	700	170	3.4	49.9	56.9

a หินปูนย่อยและมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเตรียมไว้ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง

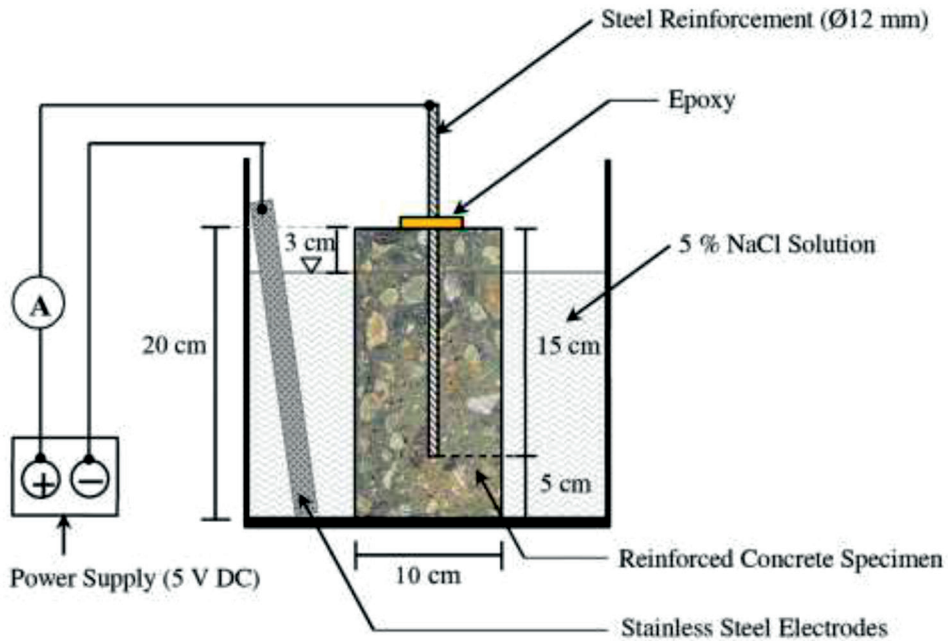
b สารลดน้ำพิเศษมีน้ำเป็นส่วนผสมอยู่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3 พบว่าที่อายุ 28 วัน คอนกรีต CT, RA, RA20, RA35 และ RA50 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 61.6, 62.7, 61.3, 56.0 และ 49.9 เมกะปาสคาล และมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 69.7, 69.1, 70.8, 63.6 และ 56.9 เมกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ เห็นได้ว่าส่วนผสมของคอนกรีตในงานวิจัยนี้สามารถใช้ออกแบบคอนกรีตกำลังสูงให้มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า 55 เมกะปาสคาล ที่กำหนดตามมาตรฐาน ACI 363R [20] ได้

#### 2.4 การทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน คอนกรีต

การทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตด้วยวิธีเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า ซึ่งประยุกต์ตามมาตรฐาน NT BUILD 356 [21] โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ที่ศูนย์กลางหน้าตัดตัวอย่าง ลึก 150 มม. หลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก และนำไปบ่มในน้ำจืดมีอายุครบ 28 และ 90 วัน แล้วนำไปทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต โดยนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และต่อเข้ากับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 5 โวลต์ โดยขั้วบวกต่อกับเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตและขั้วลบต่อเข้ากับแผ่นสแตนเลสที่แช่อยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างทุกๆ 6 ชั่วโมง เป็นเวลา 14 วัน



รูปที่ 3 ชุดทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีต

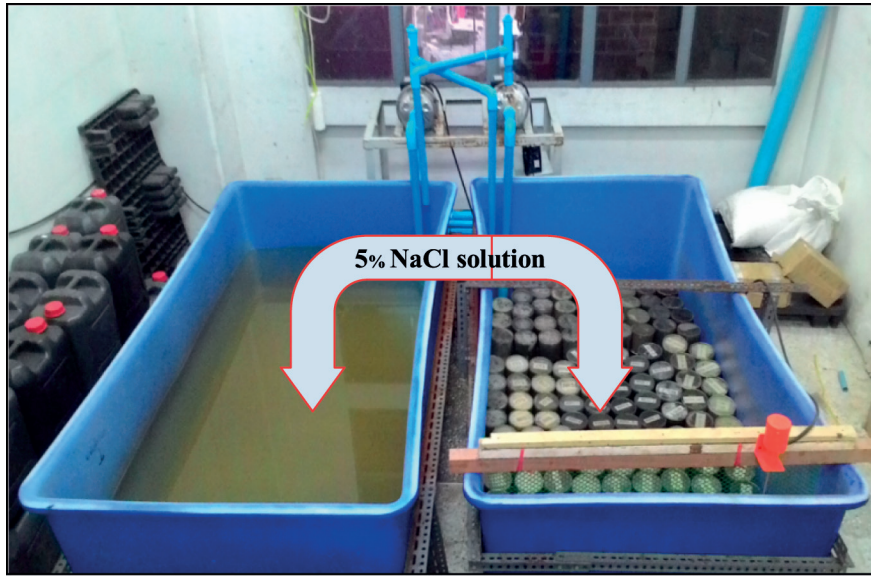
**2.5 การทดสอบระยะเวลาแทรกซึมคลอไรด์  
ในสถานะเปียกสลับกแห้ง**

นำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ที่อายุการบ่ม 90 วัน มาตัดแบ่งครึ่งที่กึ่งกลางความสูง แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าว (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. และสูง 100 มม.) มาทำการหล่ออีพ็อกซีรอบผิวโดยเว้นให้สารละลายสามารถซึมผ่านได้เพียงด้านเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ใน

สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยจำลองให้อยู่ในสถานะเปียก 6 ชั่วโมง สลับกับสถานะแห้ง 18 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการจำลองสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงในทะเล ดังแสดงในรูปที่ 5 หลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 24 เดือน นำตัวอย่างคอนกรีตมาทำการกัดผ่าซีกและพ่นบริเวณผิวที่แตกด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เพื่อทำการหาระยะการแทรกซึมคลอไรด์ [22]



รูปที่ 4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบค่าระยะแทรกซึมคลอไรด์



รูปที่ 5 ชุดทดสอบค่าระยะแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในสภาวะเปียกสลับแห้ง (สภาวะเปียก 6 ชั่วโมง และสภาวะแห้ง 18 ชั่วโมง)

### 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

#### 3.1 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต

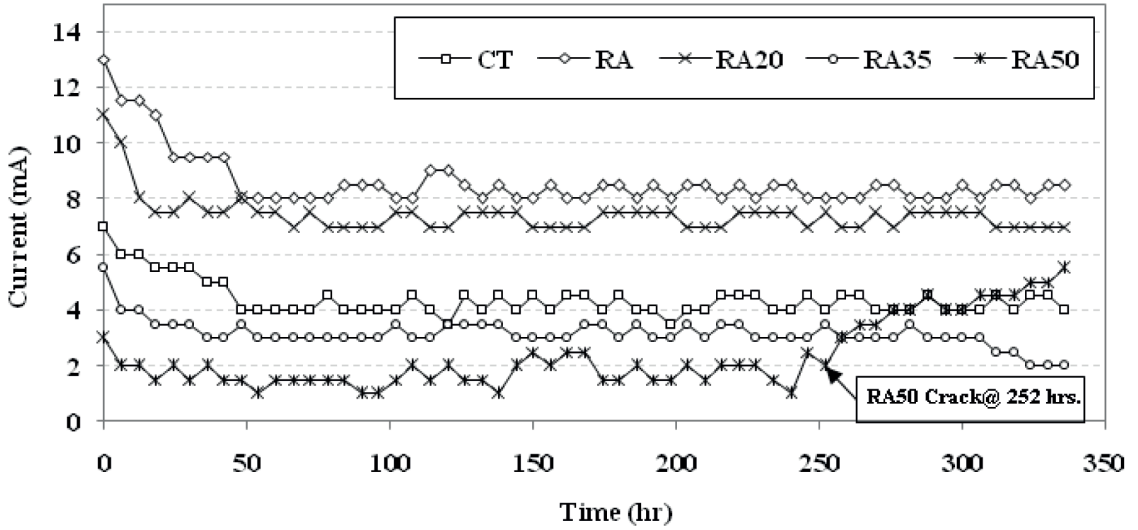
การทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตด้วยวิธีเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า ได้ทำการประยุกต์มาจากมาตรฐาน NT BUILD 356 [21] ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตเป็นตัวบ่งบอกถึงโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต เนื่องจากการกัดกร่อนหรือการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี กล่าวคือมีการไหลของกระแสไฟฟ้าจากจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปสู่จุดที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำและเกิดขึ้นภายในคอนกรีต โดยมีคลอไรด์ไอออนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการนี้ ดังนั้นเมื่อทราบถึงค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตก็สามารถทำให้ทราบโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ ทั้งนี้หากคอนกรีตมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านที่ต่ำแสดงว่าคอนกรีตดังกล่าวมีความสามารถต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสูง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านและระยะเวลาในการทดสอบคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงใน

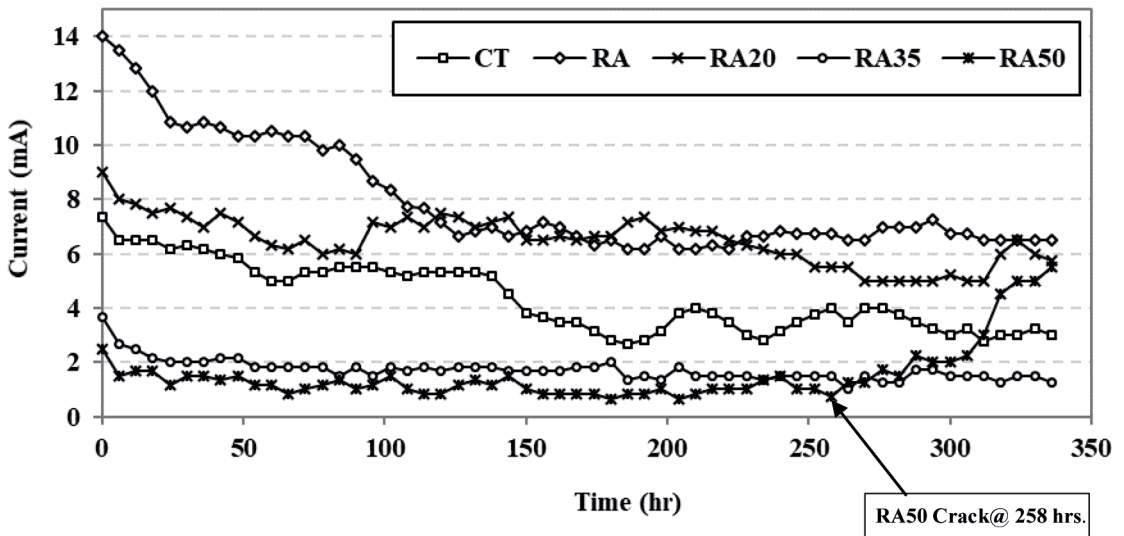
รูปที่ 6a พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม (คอนกรีต RA) มีค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่ากับ 8.5 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ (คอนกรีต CT) ซึ่งมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่ากับ 4 มิลลิแอมแปร์ เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีความพรุนหรือโพรงอากาศสูง ซึ่งเป็นผลมาจากมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีความพรุนที่สูงกว่าหินปูนย่อยประมาณ 8 เท่า (ปริมาณช่องว่างเท่ากับร้อยละ 12.63 และ 1.55 ดังแสดงในตารางที่ 2) ทำให้คลอไรด์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเนื้อคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตได้ง่ายส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมีค่าสูง

การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถช่วยลดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัด โดยที่เวลา 168 ชั่วโมงหลังการทดสอบ พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (คอนกรีต RA20, RA35 และ RA50





a) อายุการปัม 28 วัน



b) อายุการปัม 90 วัน

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตและเวลาการทดสอบ

ตามลำดับ) มีค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่ากับ 7.0, 3.5 และ 2.5 มิลลิแอมแปร์ หรือมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเส้นใยในส่วนผสม (คอนกรีต RA) ประมาณ 1.2, 2.4 และ 3.5 เท่าตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเส้นใยชานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุ

ประสาน สามารถช่วยลดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมได้ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของเส้นใยชานอ้อยบดละเอียดและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลานเข้าไปอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต [23, 24] ทำให้

คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คลอไรด์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Toolkasikorn และคณะ [7] ที่พบว่าการใช้เถ้าแกลบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถช่วยลดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตได้

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านและเวลาการทดสอบคอนกรีตที่อายุการบ่ม 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 6b พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอายุการบ่ม 28 วัน

ซึ่งเป็นผลมาจากการเติมเต็มช่องว่างภายในคอนกรีตด้วยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามสังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (คอนกรีต RA50) แม้จะมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านที่ต่ำที่สุด แต่คอนกรีต RA50 ดังกล่าวมีการแตกร้าวเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (ดังแสดงในรูปที่ 7) โดยที่อายุการบ่ม 28 และ 90



ตำแหน่งที่เกิดการแตกร้าว

รูปที่ 7 การแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคอนกรีต RA50

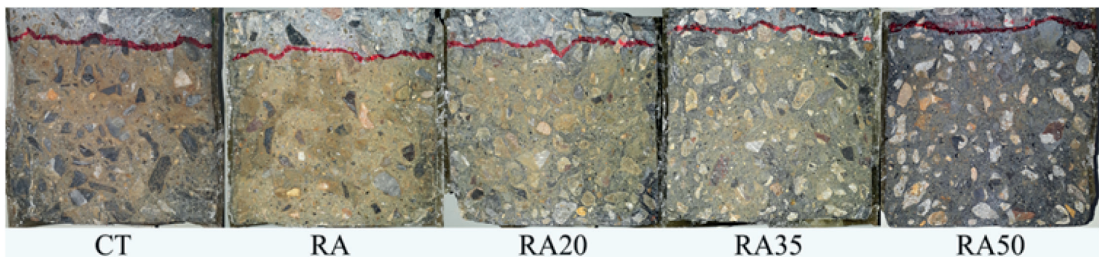
วัน คอนกรีต RA50 เกิดรอยแตกร้าวเมื่อระยะเวลาการทดสอบผ่านไป 252 และ 258 ชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องจากคอนกรีต RA50 มีกำลังอัดต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตอัตราส่วนผสมอื่นๆ อีกทั้งการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้ฟิล์มบางๆ ของ  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (passive film) ที่เกิดขึ้นจากความเป็นด่างสูงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เคลือบผิวเหล็กเพื่อป้องกัน

คลอไรด์ไอออนไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมลดน้อยลง โดยค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) บริเวณรอบๆ เหล็กเสริมของคอนกรีต RA และ RA50 เท่ากับ 12.0 และ 7.5 ตามลำดับ ดังนั้นสนิมจึงเกิดได้ง่ายและรุนแรงขึ้นแม้ว่าคลอไรด์ไอออนจะแทรกซึมเข้ามาสู่เหล็กได้น้อยก็ตาม จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกร้าวของเนื้อคอนกรีต

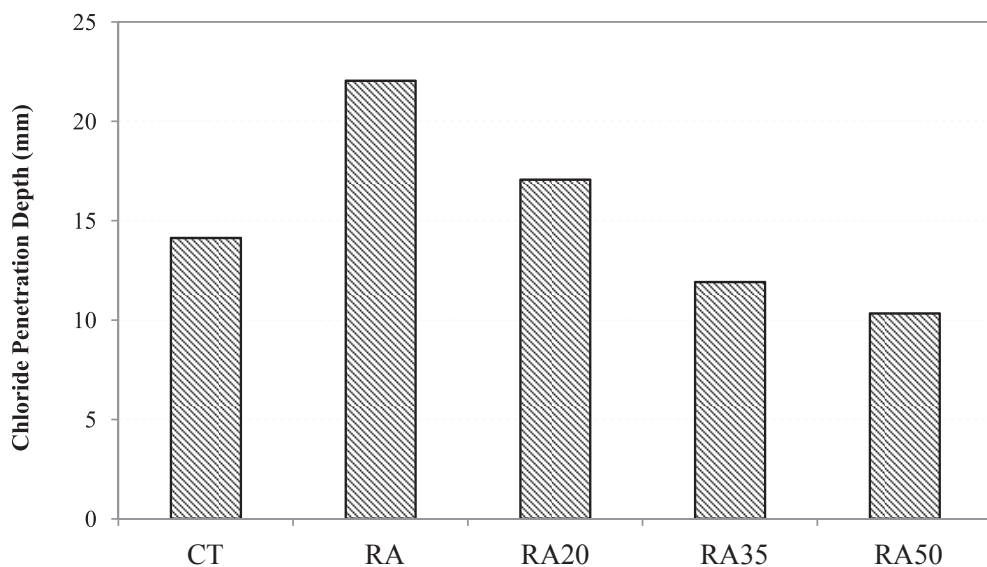
### 3.2 ระยะเวลาแทรกซึมคลอไรด์

หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในสภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งเป็นการจำลองสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติของน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 2 ปี จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์-ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เพื่อหาระยะเวลาแทรกซึมคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 พบว่าการแทนที่หินปูนย่อยด้วยมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความ

ต้านทานคลอไรด์ลดลง โดยคอนกรีต CT และ RA มีระยะเวลาแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 14.1 และ 22.1 มม. ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [6, 7, 25] เนื่องจากความพรุนของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ส่งผลให้คลอไรด์ไอออนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อย



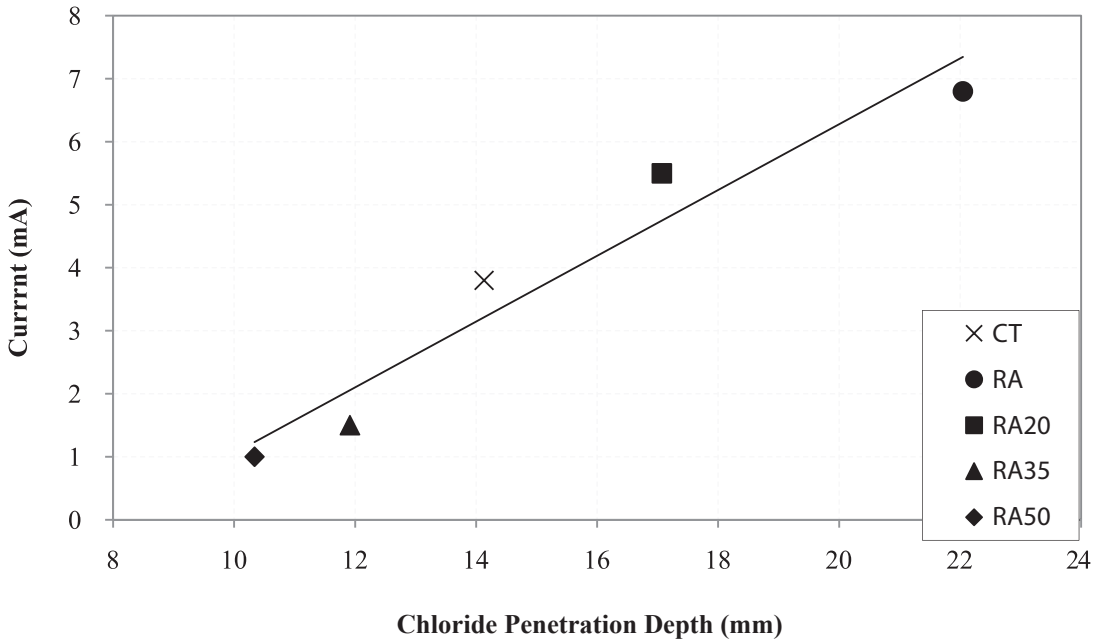
รูปที่ 8 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต



รูปที่ 9 ระยะเวลาแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตพบว่าระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ เช่น เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ และเถ้าถ่านหิน เป็นต้น [7, 23, 26] โดยคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตและใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (คอนกรีต RA20, RA35 และ RA50) มีค่าระยะการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 17.1, 10.9 และ 11.3 มม. ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ใน

ปริมาณสูงขึ้นไปทำให้ระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยลดระยะการแทรกซึมคลอไรด์ให้ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กของเถ้าขานอ้อยบดละเอียดเข้าไปอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตรวมถึงผลิตผลที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน เช่น แคลเซียม-ซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) สามารถช่วยดักจับไอออนคลอไรด์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ [23, 24] ส่งผลให้คลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้ยากขึ้น ระยะการแทรกซึมคลอไรด์จึงลดลง



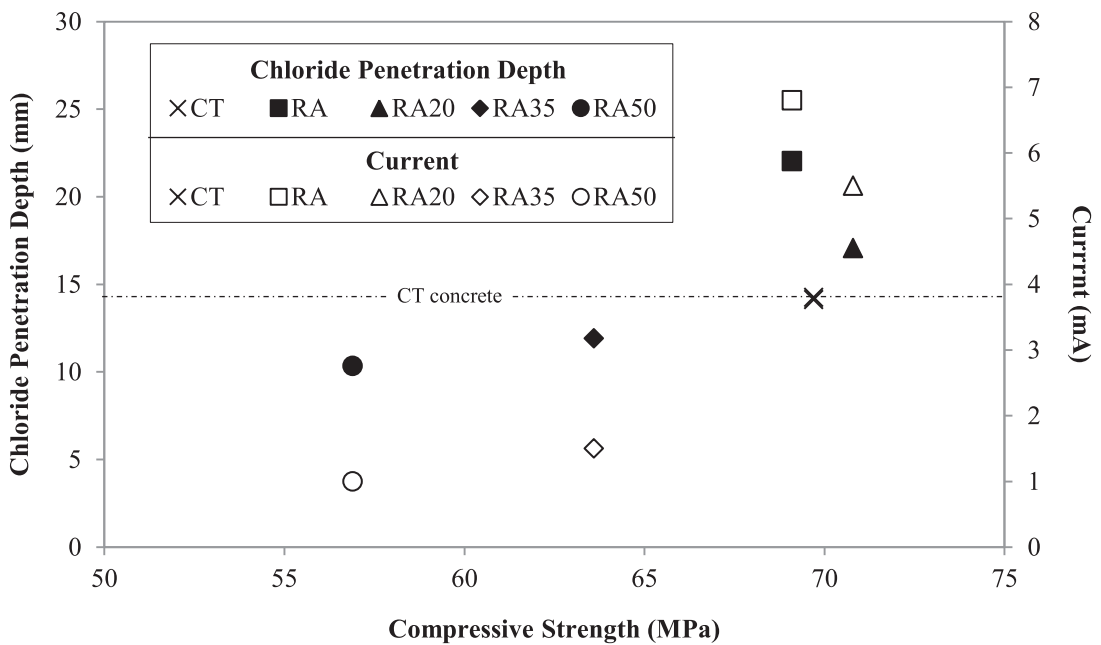
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตที่อายุ 90 วัน และระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 2 ปี

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตที่อายุ 90 วัน และระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 2 ปี พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตที่ทดสอบด้วยการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้ามีทิศทางเดียวกับผลการทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตด้วยวิธีการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งที่

จำลองจากสภาพแวดล้อมทะเล กล่าวคือคอนกรีตที่มีระยะการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำ ค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตก็มีค่าต่ำเช่นกัน แสดงว่าการทดสอบแบบการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถใช้ประเมินถึงแนวโน้มความสามารถด้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลได้

เมื่อพิจารณาผลกระทบของกำลังอัดที่มีต่อความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 11 พบว่ากำลังอัดมีผลกระทบต่อความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบของการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยและผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียด ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีต RA มีค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 69.1 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 99 ของคอนกรีต CT แต่มีค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 6.8 มิลลิแอมแปร์หรือคิดเป็น

ร้อยละ 179 ของคอนกรีต CT และระยะเวลาแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 2 ปี เท่ากับ 22.1 มม. หรือคิดเป็นร้อยละ 156 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต RA50 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 56.9 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 82 ของคอนกรีต CT แต่มีค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 1.0 มิลลิแอมแปร์ และระยะเวลาแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 2 ปี เท่ากับ 10.3 มม. หรือคิดเป็นร้อยละ 26 และ 73 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 90 วัน ค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตที่อายุ 90 วัน และระยะเวลาแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่อายุ 2 ปี

#### 4. สรุปผลการวิจัย

1. การใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติมีผลโดยตรงต่อการลดลงของความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูง ถึงแม้ว่ากำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ
2. การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขานอ้อย

- บดละเอียดสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทนที่เถ้าขานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านและระยะแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม
3. กำลังอัดของคอนกรีตมีอิทธิพลต่อความต้านทาน

คลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดซึ่งเพิ่มความต้านทาน คลอไรด์ได้ดี

4. ค่าความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตแบบเร่งด้วยกระแสไฟฟ้ามีทิศทางเดียวกันกับระยะแทรกซึมของคลอไรด์ในสภาวะเปียกสลับแห้งที่จำลองจากสภาพแวดล้อมทะเล กล่าวคือ คอนกรีตที่มีค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านที่ต่ำมีค่าระยะการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำเช่นเดียวกัน ดังนั้นผลจากการทดสอบแบบเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถใช้ประเมินแนวโน้มความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่สัมผัสสภาพแวดล้อมทะเลได้

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาภายใต้โครงการทุนพัฒนาอาจารย์และบุคลากรสำหรับสถาบันอุดมศึกษาในเขตพัฒนาเฉพาะกิจจังหวัดชายแดนภาคใต้ประจำปีการศึกษา 2558 และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภายใต้โครงการทุนวิจัยและวิชาการตามแผนและกลยุทธ์เพื่อการพัฒนา (สัญญาเลขที่ CE-KMUTT 6113) ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Learning Center for Earth Science and Astronomy in 2558 [Online], Available: <http://www.lesa.biz/earth/hydrosphere/sea-water>.
2. Gao, J., Yu, Z., Song, L., Wang, T. and Wei, S., 2013, "Durability of Concrete Exposed to Sulfate Attack under Flexural Loading and Drying-Wetting Cycles," *Construction and Building Materials*, 39, pp. 33-38.
3. Purushothaman, R., Amirthavalli, R.R. and Karan, L., 2015, "Influence of Treatment Methods on the Strength and Performance Characteristics of Recycled Aggregate Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (5), 04014168.
4. Yang, H., Lv, L., Deng, Z. and Lan, W., 2017, "Residual Compressive Stress-Strain Relation of

Recycled Aggregate Concrete After Exposure to High Temperatures," *Structural Concrete*, 18 (5), pp. 479-486.

5. Somna, R. and Jaturapitakkul, C., 2011 "Use of Ground Bagasse Ash to Improve Compressive Strength, Water Permeability, and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete," *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (4), pp. 369-381. (In Thai).
6. Limbachiya, M., Meddah, M.S. and Ouchagour, Y., 2012, "Use of Recycled Concrete Aggregate in Fly-Ash Concrete," *Construction and Building Materials*, 27 (1), pp. 439-449.
7. Toolkasikorn, P., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2014, "Strength and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete Containing Ground Rice Husk Ash," *Journal of Thailand Concrete Association*, 2, pp. 8-16. (In Thai)
8. Chalee, W., Ausapanit, P. and Jaturapitakkul, C., 2010, "Utilization of Fly Ash Concrete in Marine Environment for Long Term Design Life Analysis," *Materials & Design*, 31 (3), pp. 1242-1249.
9. Kroehong, W., Damrongwiriyanupap, N., Sinsiri, T. and Jaturapitakkul, C., 2016, "The Effect of Palm Oil Fuel Ash as a Supplementary Cementitious Material on Chloride Penetration and Microstructure of Blended Cement Paste," *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (12), pp. 4799-4808.
10. Gastaldini, A.L.G., da Silva, M.P., Zamberlan, F.B. and Mostardeiro Neto, C.Z., 2014, "Total Shrinkage, Chloride Penetration, and Compressive Strength of Concretes that Contain Clear-Colored Rice Husk Ash," *Construction and Building Materials*, 54, pp. 369-377.
11. Chatveera, B. and Srinourn, P., 2012, "A Study of Properties of Mortar Portland Cement Type V Mixed with Ground Rice Husk Ash and Limestone Powder," *KMUTT Research and Development Journal*, 35 (2), pp. 201-218. (In Thai).

12. Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindapasirt, 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).
13. 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).
14. Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Tavares, L.M. and Fairbairn, E.M.R., 2008, "Pozzolanic Activity and Filler Effect of Sugar Cane Bagasse Ash in Portland Cement and Lime Mortars," *Cement and Concrete Composites*, 30 (5), pp. 410-418.
15. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2009, "Utilization of Bagasse Ash as a Pozzolanic Material in Concrete," *Construction and Building Materials*, 33, pp. 3352-3358.
16. Rerkpiboon, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2015, "Strength, Chloride Resistance, and Expansion of Concretes Containing Ground Bagasse Ash," *Construction and Building Materials*, 101 (Part 1), pp. 983-989.
17. González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F. and Carro-López, D., 2016, "Study of Recycled Concrete Aggregate Quality and Its Relationship with Recycled Concrete Compressive Strength Using Database Analysis," *Materiales de Construcción*, 66 (323), pp. e089.
18. Kou, S.C. and Poon, C.S., 2015, "Effect of the Quality of Parent Concrete on the Properties of High Performance Recycled Aggregate Concrete," *Construction and Building Materials*, 77, pp. 501-508.
19. Tangchirapat, W., Khamklai, S. and Jaturapitakkul, C., 2012, "Use of Ground Palm Oil Fuel Ash to Improve Strength, Sulfate Resistance, and Water Permeability of Concrete Containing High Amount of Recycled Concrete Aggregates," *Materials and Design*, 41, pp. 150 -157.
20. ACI 363R, 2010, Report on High-Strength Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
21. NT BUILD 356, 1989, Concrete, Repairing Materials and Protective Coating: Embedded Steel Method, Chloride Permeability, Nordtest Building Method, Espoo, FL.
22. Otsuki, N., Miyazato, S. and Yodsudjai, W., 2003, "Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (5), pp. 443-451.
23. Chindapasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V., 2008, "Resistance to Chloride 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.
24. 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.
25. Somna, R., Jaturapitakkul, C. and Made, A.M., 2012, "Effect of Ground Fly Ash and Ground Bagasse Ash on the Durability of Recycled Aggregate Concrete," *Cement and Concrete Composites*, 34 (7), pp. 848-854.
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. 197-213. (In Thai).

