
ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล
Threshold Chloride Level of Concrete Contained with Rice Husk-Bark ash under Marine
Environment

วิเชียร ชาลี*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Wichian Chalee*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล โดยใช้คอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม.³ และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. โดยมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10 20 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำจืดอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลใน จ.ชลบุรี ทำการเก็บตัวอย่างทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) และคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทำละลาย) ในคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ฝังเหล็ก และการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งฝังเหล็กกับการกัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต สามารถวิเคราะห์หาระดับคลอไรด์วิกฤติในแต่ละส่วนผสมได้ ผลการวิจัยพบว่า ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้สูงขึ้นและมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้น

คำสำคัญ : เถ้าแกลบเปลือกไม้ คลอไรด์วิกฤติ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สิ่งแวดล้อมทะเล

*E-mail: wichian@buu.ac.th

Abstract

In this research, the effect of ground rice husk-bark ash (GRBA) and W/B ratios on threshold chloride level of concrete under marine environment were studied. Control concretes were prepared using Portland cement type I with W/B ratios of 0.45 and 0.65. Concretes contained with GRBA were cast using GRBA to replace Portland cement type I at the percentages of 15, 25, 35, and 50% by dry weight of binder at the same W/B ratios of the control concretes. Concrete cube specimens of 200x200x200 mm³ were cast and steel bars of 12-mm in diameter and 50-mm in length were embedded with concrete coverings of 10, 20, 50, and 75 mm. Subsequently, the hardened concrete specimens were cured under fresh water for 28 days and then they were exposed to a tidal zone of marine environment in Chonburi province. The specimens were tested for free chloride (water soluble chloride) and total chloride (acid soluble chloride) contents at the position of embedded steel bar and corrosion of the embedded steel bar after being exposed to tidal zone of sea water for 2, 3, 5, and 7 years. The threshold chloride level was evaluated from the relationship between chloride content at the position of the embedded steel bar and initial corrosion of embedded steel bar. The results showed that the threshold chloride level of concrete was decreased with increasing GRBA replacement and with increasing in W/B ratio.

Keywords : rice husk-bark ash, threshold chloride, W/B ratio, marine environment.

บทนำ

กระบวนการการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เริ่มต้นเมื่อมีปริมาณคลอไรด์เพียงเล็กน้อยที่ผิวเหล็ก ซึ่งปริมาณคลอไรด์ดังกล่าวเรียกว่า ระดับคลอไรด์วิกฤติ (threshold chloride level) โดยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ชัดเจน งานวิจัยที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาระดับคลอไรด์วิกฤติโดยพิจารณาจากความเสี่ยงที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมจากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Castellote *et al.*, 2002 ; Nygaard *et al.*, 2005 ; Izquierdo *et al.*, 2004 ; Ki Yong Ann *et al.*, 2007) ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน จะส่งผลให้เหล็กที่ฝังในคอนกรีตเกิดสนิมได้แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของวัสดุประสานในคอนกรีต และลักษณะผิวของเหล็กเสริมตลอดจนสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัส Thomas (2004) ได้ศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทย ซึ่งเป็นภูมิภาคเขตร้อนชื้น พบว่า ระดับคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลงเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheewaket *et al.*, 2012) ที่มีการศึกษาระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลของประเทศไทย ซึ่งเป็นภูมิภาคเขตร้อนชื้น และจะเห็นว่าผลของเถ้าถ่านหินต่อแนวโน้มของระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเขตร้อนชื้น และเขตร้อน เป็นไปในทิศทางเดียวกัน แสดงว่าสภาพภูมิอากาศไม่ได้มีผลชัดเจนต่อระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีต

การศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้ มีคุณสมบัติเบื้องต้นที่เป็นวัสดุพอซโซลานและสามารถนำไปใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีตได้ หากมีผลการศึกษาเกี่ยวกับเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มากพอ จะเพิ่มความมั่นใจในการการพัฒนาวัสดุนี้เพื่อนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ ซึ่งเป็นการจัดการกับปัญหาสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง รวมถึงเป็นการลดกำลังการผลิตปูนซีเมนต์ที่ต้องใช้พลังงานและความร้อนในการเผาวัตถุดิบ จนก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในอากาศ งานวิจัยที่ผ่านมา (Tangchirapat *et al.*, 2008 ; Sata *et al.*, 2012 ; Sata *et al.*, 2007 Chindapasirt *et al.*, 2007) พบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ผสมในคอนกรีตส่งผลให้สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความคงทนมีทิศทางที่ดี โดยสามารถพัฒนาเพื่อใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลได้ แต่การใช้งานดังกล่าวจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนให้ครอบคลุมมากขึ้น เช่น การต้านทานการเกิดสนิมเหล็ก การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ การกักเก็บคลอไรด์ และระดับคลอไรด์วิกฤติ เป็นต้น

โดยระดับคลอไรด์วิกฤติมีประโยชน์อย่างมากในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่คำนึงถึงความคงทน ทั้งนี้เนื่องจากสามารถใช้ในการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เหมาะสม เพื่อให้สอดคล้องกับอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลได้ นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ประเมินสถานะของการกัดกร่อนในโครงสร้างคอนกรีตเดิมที่มีการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลอยู่แล้วได้อีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ ซึ่งเป็นการนำวัสดุที่มีอยู่ในประเทศมาใช้ประโยชน์ ตลอดจนเพิ่มข้อมูลด้านความคงทนให้ครอบคลุมและส่งเสริมการนำเถ้าแกลบเปลือกไม้ไปใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเลจริง ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยให้เป็นรูปธรรมมากขึ้น

วิธีการดำเนินการวิจัย วัสดุประสาน

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบเปลือกไม้เป็นวัสดุประสานดังนี้

เถ้าแกลบเปลือกไม้

เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ใช้เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบที่ได้จากโรงสีข้าวและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ มีอัตราส่วนระหว่างแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนการเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก และมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาคงที่ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่บดละเอียดมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.15 น้ำหนักค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 3 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 9,460 ซม.²/ก. และมีค่าเฉลี่ยของอนุภาค (d_{50}) ที่ทดสอบจากการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เท่ากับ 10.04 ไมโครเมตร ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้พบว่า มีผลรวมออกไซด์ของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 90.66 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 และมีปริมาณของ SO₃ และค่า LOI เท่ากับร้อยละ 0.09 และ 5.71 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานของ ASTM C 618 คือร้อยละ 4 และ 10 ตามลำดับ ดังนั้นสามารถจัดให้อยู่ในพอซโซลาน Class N ได้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้แสดงดังตารางที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3.15 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C150 ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	วัสดุประสาน	
	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เก้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด (GRBA)
Silicon dioxide, SiO ₂	20.80	87.0
Aluminum oxide, Al ₂ O ₃	5.50	1.08
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	3.16	2.58
Calcium oxide, CaO	64.97	1.25
Magnesium oxide, MgO	1.06	0.5
Sodium oxide, Na ₂ O	0.08	0.08
Potassium oxide, K ₂ O	0.55	1.0
Sulfur trioxide, SO ₃	2.96	0.09
Loss On Ignition, LOI	2.89	5.71

มีค่าน้ำหนักค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 20 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 3,250 ซม.²/ก. และมีค่าเฉลี่ยของอนุภาค (d₅₀) ที่ทดสอบจากการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เท่ากับ 25 ไมโครเมตร ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) อะลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) รวมกันได้ร้อยละ 94.4 (ตารางที่ 1)

มวลรวม

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดโดยมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่มากที่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74 ร้อยละการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.75 และ 0.98 ตามลำดับ

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

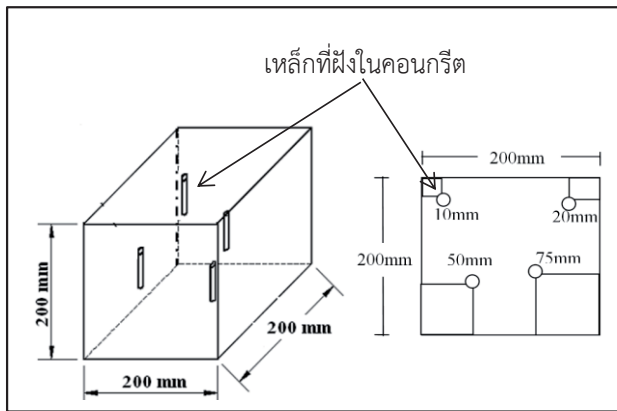
การศึกษานี้ใช้เก้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดจนมีน้ำหนักค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 แทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ซึ่งใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทซิลิโพลีเมทาไมนฟอรัมาลดีไฮด์คอนเดนเซตควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 50-100 มม. หล่อตัวอย่างคอนกรีตตามส่วนผสมในตารางที่ 2 หล่อตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.³ และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 10 20

50 และ 75 มม. เพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีต หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง (น้ำขึ้น-ลง วันละสองรอบ) สมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตมีค่าระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์และการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 1

หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลครบ 2 3 5 และ 7 ปี ได้นำคอนกรีตมาทุบดูการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยการวัดพื้นที่ของการเกิดสนิม และนำตัวอย่างคอนกรีตบริเวณรอบผิวเหล็กที่ฝังมาบดให้ละเอียด นำผงตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 มาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (acid-soluble chloride) ตาม ASTM C 1152 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (total chloride content) นอกจากนั้นทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (free chloride content) โดยใช้เป็นตัวทำละลาย (water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตบริเวณรอบผิวเหล็กเสริม เพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 2 จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตกับการเกิดสนิมของเหล็กเสริม สามารถนำมาวิเคราะห์หาระดับคลอไรด์วิกฤติในแต่ละส่วนผสมได้

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม ³)						W/B
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้ากลบเปลือกไม้บดละเอียด (GRBA)	หิน	ทราย	น้ำ	สารลดน้ำ (SP)	
I45	424	-	979	767	190	-	0.45
I65	295	-	1,039	814	192	-	0.65
I45GRBA15	360	64	957	767	190	0.85	0.45
I45GRBA 25	318	106	938	767	190	1.70	0.45
I45GRBA 35	276	148	925	767	190	2.54	0.45
I45GRBA 50	212	212	952	767	190	3.82	0.45
I65GRBA 15	251	44	1,023	814	192	-	0.65
I65GRBA 25	221	74	1,012	814	192	-	0.65
I65GRBA 35	192	103	1,000	814	192	0.30	0.65
I65GRBA 50	148	148	982	814	192	0.30	0.65



ก) ตำแหน่งของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

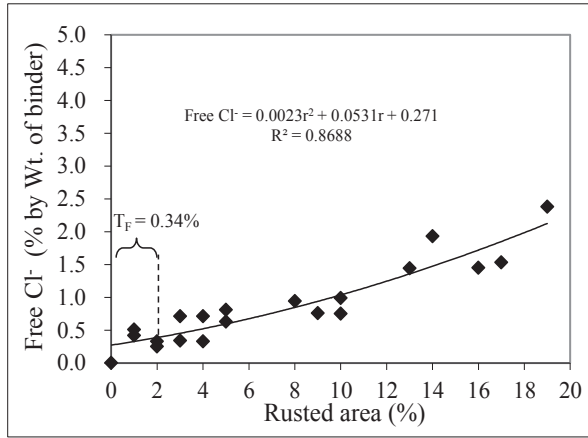
ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

ภาพที่ 1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตโดย ก) ตำแหน่งของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

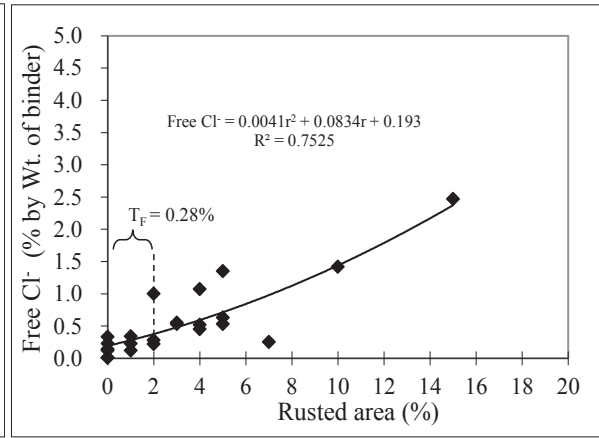
คอนกรีตบริเวณผิวเหล็กที่ฝังในคอนกรีต



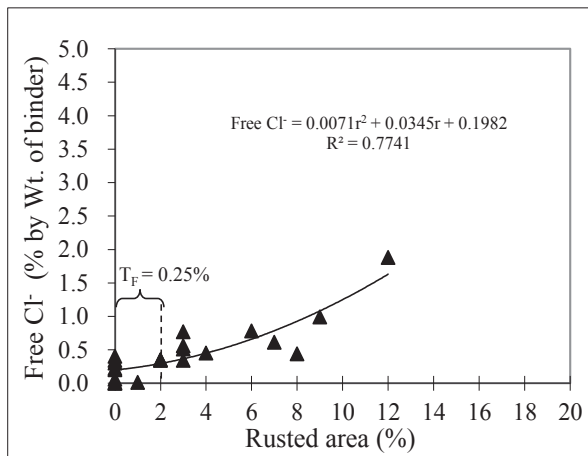
ภาพที่ 2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต



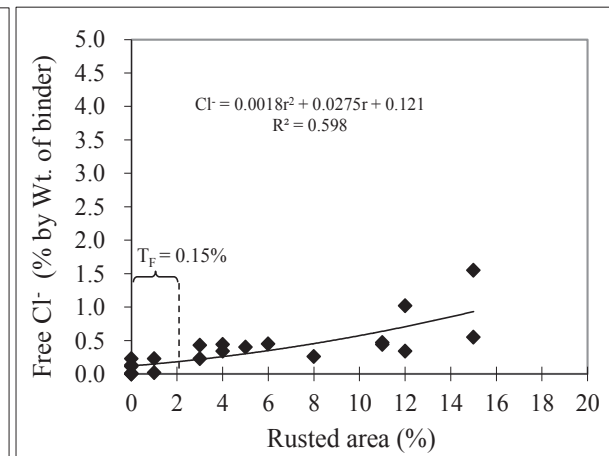
ก) คอนกรีตธรรมดา



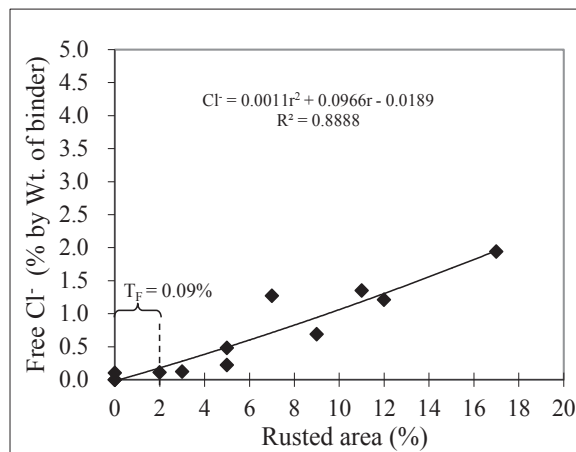
ข) คอนกรีตผสม GRBA ร้อยละ 15



ค) คอนกรีตผสม GRBA ร้อยละ 25



ง) คอนกรีตผสม GRBA ร้อยละ 35



จ) คอนกรีตผสม GRBA ร้อยละ 50

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี

การหาระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้

ระดับคลอไรด์วิกฤติ (Threshold chloride level) เป็นปริมาณคลอไรด์ที่กระตุ้นให้เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเป็นสนิม โดยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยทางกายภาพของโพรงซีเมนต์เพสต์และเหล็กเสริม เช่น ความพรุนของคอนกรีต ลักษณะผิวของเหล็กเสริม เป็นต้นและปัจจัยทางเคมี เช่น ความเป็นด่างในโพรงซีเมนต์เพสต์ องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน เป็นต้น (Thangavel *et al.*, 1998 ; Alonso *et al.*, 2000 ; Thomas, 2004 ; Ki Yong Ann *et al.*, 2007) การทดสอบหาระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตไม่มีมาตรฐานรองรับ ดังนั้นการศึกษาที่ผ่านมา นักวิจัยได้พยายามหาระดับคลอไรด์วิกฤติจากการทดสอบที่กำหนดเอง โดยให้มีความสอดคล้องกับความหมายของระดับคลอไรด์วิกฤติมากที่สุด ซึ่งส่วนใหญ่มีแนวทางการทดสอบในสองลักษณะ ได้แก่ การพิจารณาจากระดับความเสี่ยงของการเริ่มต้นเกิดสนิมที่ได้จากวิธีการทางไฟฟ้าเคมี และการทดสอบจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ใกล้ผิวเหล็ก กับการกัดกร่อนเหล็กเสริมที่สามารถมองเห็นได้จริง โดยพิจารณาในช่วงเริ่มต้นของการกัดกร่อน ซึ่งการระบุระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตสามารถพิจารณาในรูปของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (total chloride content) หรือ ปริมาณคลอไรด์อิสระ (free chloride content) ก็ได้

การศึกษาครั้งนี้ ทำการหาระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นปริมาณคลอไรด์อิสระ (T_f) และปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (T_T) จากความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต กับปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 20 50 และ 75 มม. โดยใช้ผลทดสอบหลังจากที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี และกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ได้จากการศึกษาเป็นปริมาณคลอไรด์ที่เริ่มทำให้เหล็กที่ฝังในคอนกรีตเกิดสนิมเฉลี่ยในช่วงร้อยละ 0-2 ซึ่งเป็นวิธีเดียวกันกับการหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheewaket *et al.*, 2012) ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่บริเวณใกล้ผิวเหล็ก ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 หลังแช่ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 2 3 5 และ 7 ปี เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตธรรมดาดังภาพที่ 3(ก) พบว่า สมการความสัมพันธ์

ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Cl^-) และร้อยละการเกิดสนิม (r) ในคอนกรีตธรรมดา คือ $Free\ Cl^- = 0.0023(r^2) + 0.0531(r) + 0.271$ เมื่อแทนปริมาณร้อยละพื้นที่สนิมเหล็ก (r) เท่ากับ 0 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 1.50 1.75 และ 2.00 ได้ $Free\ Cl^-$ เท่ากับ ร้อยละ 0.27 0.29 0.30 0.31 0.33 0.34 0.36 0.37 และ 0.39 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์อิสระที่ก่อให้เกิดพื้นที่ของสนิมเหล็กในช่วงร้อยละ 0 ถึง 2 มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ดังกล่าวนี้ ได้กำหนดให้เป็นระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระ (T_f) ของคอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ตัวอย่างการหาระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แสดงดังภาพที่ 3(ข) 3(ค) 3(ง) และ 3(จ) ตามลำดับ ซึ่งได้ระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระ เท่ากับ ร้อยละ 0.28 0.25 0.15 และ 0.09 ตามลำดับ นอกจากนี้ ระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์ทั้งหมด (T_T) ของคอนกรีตทุกส่วนผสมก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน และแสดงระดับคลอไรด์วิกฤติของทุกส่วนผสมดังตารางที่ 3

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อระดับคลอไรด์วิกฤติ

พิจารณาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 ดังแสดงในภาพที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ ซึ่งพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระดับคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลง โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งปริมาณคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมด เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดในอัตราร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระเท่ากับ ร้อยละ 0.34, 0.28, 0.25, 0.15 และ 0.09 ตามลำดับ และคอนกรีตกลุ่มนี้มีระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์ทั้งหมดเท่ากับ ร้อยละ 0.39, 0.35, 0.34, 0.20 และ 0.11 ตามลำดับ

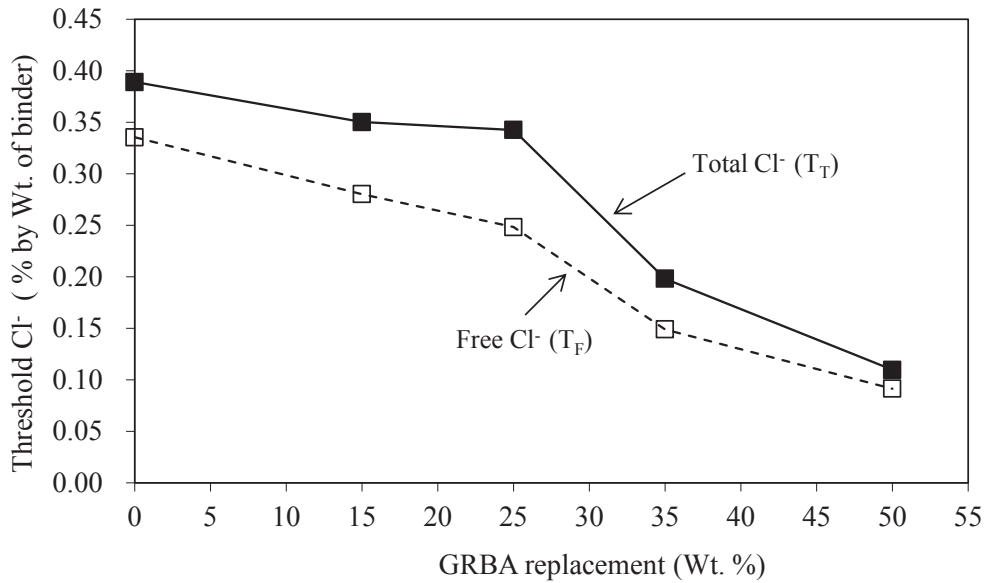
เมื่อพิจารณากลไกการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่า เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบางๆ

ตารางที่ 3 ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด

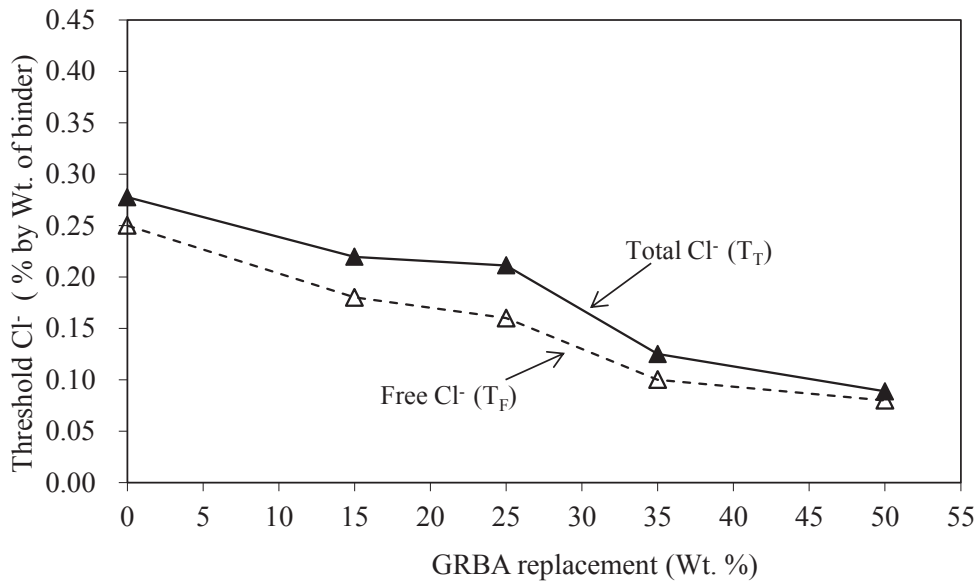
ส่วนผสม	ระดับคลอไรด์วิกฤติ (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน)	
	คลอไรด์อิสระ (T_f)	คลอไรด์ทั้งหมด (T_T)
I45	0.34	0.39
I45GRBA15	0.28	0.35
I45GRBA25	0.25	0.34
I45GRBA35	0.15	0.20
I45GRBA50	0.09	0.11
I65	0.25	0.28
I65GRBA15	0.18	0.22
I65GRBA25	0.16	0.21
I65GRBA35	0.10	0.13
I65GRBA50	0.08	0.09

ที่มีสภาพเป็นด่างเคลือบผิวเหล็กไว้ และฟิล์มนี้ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก (Neville, 1996) สำหรับการกัดกร่อนในช่วงต้นฟิล์มบางจะถูกเจาะโดยคลอไรด์อิสระ และจะกระตุ้นให้ผิวเหล็กเสริมกลายเป็นสภาพเป็นขั้วบวก พื้นผิวด้านที่ไม่ถูกกระตุ้นก็จะมีสภาพเป็นขั้วลบ ซึ่งทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น มีขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) เชื่อมกันโดยน้ำซึ่งมีคลอไรด์ในโพรงของซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ประจุไฟฟ้าบวกเฟอร์รัสไอออน (Fe^{++}) ที่ขั้วบวกจะวิ่งไปสู่สื่ออิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบ (e^-) วิ่งตามเหล็กเสริมไปที่ขั้วลบ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ Fe^{++} ทำให้เกิด $Fe(OH)_2$ และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจนทำให้เกิดสนิมได้ (Neville, 1996) จากกลไกการเกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเริ่มต้นสังเกตได้ว่า ปริมาณคลอไรด์อิสระ (Cl^-) ในโพรงของคอนกรีตมีผลในการเร่งให้เกิดสนิมเร็วขึ้น แต่ความเป็นด่างในโพรงคอนกรีตบริเวณใกล้ผิวเหล็กเสริมจะช่วยให้การเกิดสนิมในเหล็กช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (Thangavel *et al.*, 1998 ; Alonso *et al.*, 2000) ที่พบว่า คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอัตราส่วนของ Cl^-/OH^- สูงจะส่งผลให้ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตมีค่าต่ำลง กล่าวคือ ถ้าความเป็นด่างในโพรงซีเมนต์เพสต์มีค่าต่ำ (OH^- ต่ำ) และปริมาณคลอไรด์อิสระในโพรงของซีเมนต์เพสต์บริเวณใกล้ผิวเหล็กเสริมมีค่าสูง (Cl^- สูง) จะมีผลให้อัตราส่วน Cl^-/OH^- มีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้การกัดกร่อนเหล็กเสริมเกิดขึ้นได้เร็ว ซึ่งหมายถึง ระดับ

ของปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าต่ำลง นอกจากนั้นคอนกรีตที่มีความพรุนสูง จะทำให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลง เนื่องจากการกัดกร่อนเหล็กเสริมจะเกิดได้เร็วกว่าคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำ ดังนั้นผลการศึกษาค้นคว้าที่พบว่า ระดับคลอไรด์วิกฤติที่ลดลงเมื่อแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น น่าจะเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นด่างในคอนกรีตกับซิลิกาหรืออะลูมินาในเถ้าแกลบเปลือกไม้ ซึ่งมีผลทำให้สภาพความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ฟิล์มบางที่เคลือบผิวเหล็กเสริมจึงถูกทำลายโดยคลอไรด์และเร่งให้เกิดสนิมในเหล็กได้ง่ายขึ้น จึงมีผลให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้นเกิดสนิมเหล็กได้เร็ว ถึงแม้จะมีปริมาณคลอไรด์ที่ต่ำก็ตาม จึงเป็นผลให้คอนกรีตดังกล่าวมีระดับคลอไรด์วิกฤติที่ต่ำลง นอกจากนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt *et al.*, 2007) พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูง (ร้อยละ 35-50) มีความทึบน้ำต่ำและมีความพรุนสูง ซึ่งเป็นผลให้การแทรกซึมของน้ำและออกซิเจนเข้าในเนื้อคอนกรีตได้เร็ว อาจส่งผลให้การกัดกร่อนเริ่มต้นเกิดขึ้นได้เร็ว ถึงแม้ปริมาณคลอไรด์จะต่ำก็ตาม การศึกษาค้นคว้านี้สังเกตได้ว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในช่วงร้อยละ 15-25 ส่งผลต่อการลดลงของระดับคลอไรด์วิกฤติน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในช่วงร้อยละ 25-50 เช่น ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 เมื่อแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตเพิ่มจากร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 25 ส่งผล



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

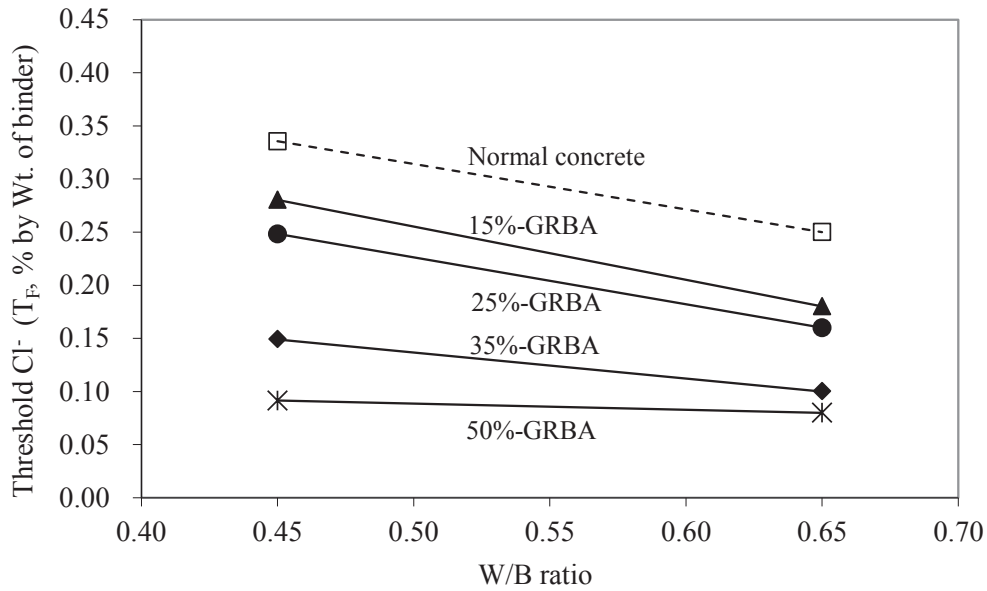


ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65

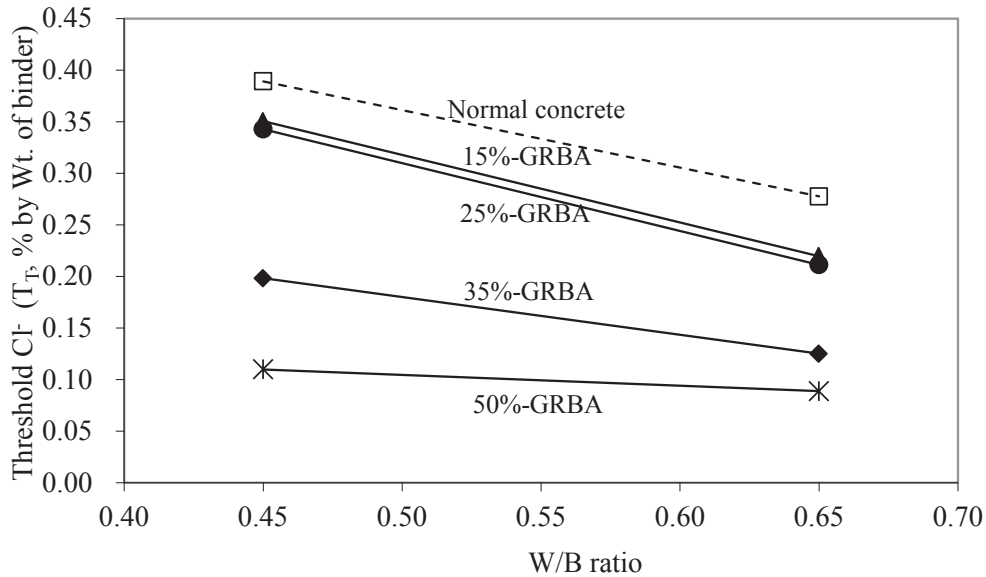
ภาพที่ 4 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

ให้ค่าคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระลดลงแค่ร้อยละ 0.03 โดย น้ำหนักวัสดุประสาน (ลดลงจากร้อยละ 0.28 ในคอนกรีตที่ผสม เถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 0.25 ในคอนกรีตที่ผสม เถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 25) ในขณะที่การเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบ เปลือกไม้จากร้อยละ 25 เป็นร้อยละ 50 ส่งผลให้ระดับคลอไรด์วิกฤติ ลดลงมากถึงร้อยละ 0.16 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ลดลงจากร้อยละ 0.25 ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 25 เป็นร้อยละ 0.09 ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 50) ซึ่งจากผล

การศึกษาที่ผ่านมา (Chalee *et al.*, 2012) พบว่า การใช้เถ้าแกลบ เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 และ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลทำให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึม ของคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน แต่การแทนที่ เถ้าแกลบเปลือกไม้มากถึงร้อยละ 50 กลับทำให้สัมประสิทธิ์การ แทรกซึมของคลอไรด์สูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นระดับคลอไรด์วิกฤติ ที่ใกล้เคียงกันในกลุ่มคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 15-25 และลดลงอย่างมากในคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้สูง



ก) ปริมาณคลอไรด์อิสระ



ข) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

ภาพที่ 5 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล ในสภาพเปียกสลับแห้ง

ถึงร้อยละ 50 น่าจะมีผลมาจากความพรุนในเนื้อคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเถ้ากลบเปลือกไม้โดยแนวโน้มดังกล่าวนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ดังแสดงในภาพที่ 4(ข)

ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อระดับคลอไรด์วิกฤติ

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมด

ดังแสดงในภาพที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลง และเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระ (T_F) และคลอไรด์ทั้งหมด (T_T) การที่ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น เป็นผลจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง จะมีความพรุนสูง ความชื้นและออกซิเจนสามารถแทรกซึมเข้าไปถึงเหล็กเสริมได้ง่าย

และส่งผลให้เหล็กเกิดการกัดกร่อนได้เร็วกว่าภายใต้ปริมาณคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (Yoon-Seok Choi *et al.*, 2006) จึงส่งผลให้ระดับคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลง นอกจากนี้พบว่า การลดลงของระดับคลอไรด์วิกฤติทั้งที่เป็นคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมดเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น มีความชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณต่ำ (ร้อยละ 15-25) มากกว่าในคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูง (ร้อยละ 35-50) เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มจาก 0.45 เป็น 0.65 ส่งผลให้ระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ลดลงร้อยละ 0.10 (ลดจากร้อยละ 0.28 ในคอนกรีตที่มี $W/B = 0.45$ เป็นร้อยละ 0.18 ในคอนกรีตที่มี $W/B = 0.65$) ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า การเพิ่มของ W/B จาก 0.45 เป็น 0.65 ส่งผลให้ระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์อิสระในคอนกรีตลดลงเพียงร้อยละ 0.01 (ลดจากร้อยละ 0.09 ในคอนกรีตที่มี $W/B = 0.45$ เป็นร้อยละ 0.08 ในคอนกรีตที่มี $W/B = 0.65$) และมีแนวโน้มเหมือนกันกับระดับคลอไรด์วิกฤติที่เป็นคลอไรด์ทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 5(ข) การที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ผสมในคอนกรีตปริมาณต่ำมากกว่าปริมาณสูง น่าจะเป็นผลจากความพรุนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูงไม่ได้ขึ้นกับปริมาณน้ำเป็นหลัก แต่จะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะมีความชัดเจนมากในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หรือวัสดุปอซโซลานอื่นๆ ในปริมาณสูง (ณัฐกร แนบทอง และวิเชียร ชาลี, 2555) ส่วนกลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณต่ำ ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำจะมีความชัดเจนมากกว่า ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณน้ำที่แปรเปลี่ยนมีผลต่อความพรุนในคอนกรีตกลุ่มนี้มากกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณสูง จึงเป็นเหตุให้ปริมาณน้ำส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณต่ำมากกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูง

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาดังนี้

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระดับ

คลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลงโดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งปริมาณคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมด

2. การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในช่วงร้อยละ 15-25 ส่งผลต่อการลดลงของระดับคลอไรด์วิกฤติน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในช่วงร้อยละ 25-50

3. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลง โดยมีความชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณต่ำ (ร้อยละ 15-25) มากกว่าในคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูง (ร้อยละ 35-50)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทนอดทนทุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ วจพ. 9 /2556

เอกสารอ้างอิง

- ณัฐกร แนบทอง และวิเชียร ชาลี. (2555). การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 17(2), 38-49.
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. & Castro, P., (2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. *Cement and Concrete Research*, 30, 1047-1055.
- ASTM C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- ASTM C150.(1997). Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- ASTM C1218. (2008). Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*
- ASTM C1152. (2008). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*
- Castellote, M., Andrade, C. & Alonso, C., (2002). Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values. *Corrosion Science*, 44, 2409-2424.

- Chalee, W., Sasakul, T., Suwanmaneechot, P. & Jaturapitakkul C., (2012). Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment. *Cement and Concrete Composites, In Press, Corrected Proof*.
- Cheewaket, C., Jaturapitakkul, C. & Chalee, W., (2012). Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. *Construction and Building Materials, 37*, 693-698.
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. & Jaturapitakkul, C., (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials, 21*, 1492-1499.
- Izquierdo, D., Alonso, C., Andrade, C. & Castellote, M., (2004). Potentiostatic determination of chloride threshold values for rebar depassivation Experimental and statistical study. *Elec Act, 49*, 2731-2739.
- Ki Yong Ann & Ha-Won Song, (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science, 49*, 4113-4133.
- Neville, A.M., (1996). *Properties of Concrete, 4th ed.*, England, Addison Wesley
- Nygaard, PV. & Geiker, MR., (2005). A method for measuring the chloride threshold level required to initiate reinforcement corrosion in concrete. *Marine Structure, 38*, 489-494.
- Sata, V., Tangpagasit, J., Jaturapitakkul, C. & Chindaprasirt, P., (2012). Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and Concrete Composites, 34*, 94-100.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C. & Kiattikomol, K., (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials, 21*, 1589-1598.
- Tangchirapat, W., Buranasing, R., Jaturapitakkul, C. & Chindaprasirt, P., (2008). Influence of rice husk bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates. *Construction and Building Materials, 22*, 1812-1819.
- Thangavel, K. & Rengaswamy, NS., (1998). Relationship between chloride/hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete. *Cement and Concrete Composites, 20*, 283-292.
- Thomas, M.D.A., (1996). Chloride threshold in marine concrete. *Cement and Concrete Research, 26*, 513-519.
- Yoon-Seok Choi, Jung-Gu Kim & Kwang-Myong Lee, (2006). Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete. *Corrosion Science, 48*, 1733-1745.