

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล

วิเชียร ชาลี^{1*}

มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยใช้คอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 ลบ.มม. และบ่มคอนกรีตในน้ำจืดมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้น นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล และเก็บตัวอย่างคอนกรีตมาเจาะทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทำละลาย) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังจากแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ผลการวิจัยพบว่า ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีต อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) กลับส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าลดลง นอกจากนี้พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น

คำสำคัญ : เถ้าแกลบเปลือกไม้ / การกักเก็บคลอไรด์ / อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน / สภาวะแวดล้อมทะเล

* Corresponding author : wichian@buu.ac.th

1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

2 ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Chloride Binding Capacity of Concrete Containing Rice Husk Bark Ash under Marine Environment

Wichian Chalee^{1*}

Burapha University, Muang, Chonburi 20131

and Chai Jaturapitakkul²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

Abstract

In this research, the effect of ground rice husk-bark ash (GRBA) and W/B ratios on chloride binding capacity of concrete under marine environment were studied. Control concretes were designed using Portland cement type I with W/B ratios of 0.45 and 0.65. Concretes containing GRBA were cast using GRBA to replace Portland cement type I at percentages of 15, 25, 35, and 50% by weight of binder at the same W/B ratios of the control concretes. The 200-mm concrete cube specimens were cast. The specimens were cured in water for 28 days then were exposed to tidal zone of marine environment. Consequently, free chloride (acid soluble) and total chloride (water soluble) contents in the concrete were measured after the concrete was exposed to the tidal zone of marine environment for 5 years.

The results showed that the percentage of chloride binding capacity compared to total chloride content (P_b) increased with the increase of GRBA in the concrete. However, the use of high volume GRBA in concrete (50% replacement) results in decreases the percentage of chloride binding capacity. Also, it was found that the decrease of W/B ratio resulted in the increase of P_b of concrete.

Keywords : Rice Husk-Bark Ash / Chloride Binding / W/B Ratio / Marine Environment

* Corresponding author : wichian@buu.ac.th

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตจะบ่งชี้ถึงปริมาณคลอไรด์อิสระ (free chloride) ที่มาทำลายคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล ถ้าคลอไรด์ทั้งหมด (total chloride) ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตถูกดักจับไว้มาก จะส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่มาทำลายเหล็กเสริมน้อยลง และยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ [1-4] ดังนั้นแนวทางการพิจารณาวัสดุประสานเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ต่อเหล็กเสริมคอนกรีต นอกจากจะพิจารณาในด้านของความทึบน้ำและกำลังอัดที่สูงเพื่อป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงการดักจับคลอไรด์อิสระของวัสดุประสานนั้นด้วย ในงานวิจัยที่ผ่านมา [4] พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลให้ผลไปในทิศทางที่ดี ทั้งสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์และเพิ่มความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้การทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตลดน้อยลงและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลให้นานขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ความต้องการที่จะใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีในเชิงพาณิชย์มีมากขึ้น ส่งผลให้เถ้าถ่านหินไม่เพียงพอต่อความต้องการที่จะใช้ และราคาก็สูงมากขึ้น ดังนั้นการพัฒนาวัสดุประสานอื่นที่หาได้ง่ายและมีปริมาณมากในประเทศ จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาเพื่อให้ได้ข้อมูลมากขึ้น การศึกษาที่ผ่านมา [5, 6] พบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้มีคุณสมบัติเบื้องต้นที่สามารถเป็นวัสดุประสานได้และสามารถนำไปใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีตที่ให้คุณสมบัติเชิงกลและ

คุณสมบัติด้านความคงทนไปในทิศทางที่ดี หากศึกษาเถ้าแกลบเปลือกไม้อย่างจริงจังจนสามารถพัฒนาไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้ จะเป็นพื้นฐานในการพัฒนาวัสดุทางเลือกใหม่ในงานคอนกรีตและเป็นการจัดการกับปัญหาสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำเสนอคำร้อยละการกักเก็บคลอไรด์เมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ซึ่งทำให้ทราบถึงปริมาณคลอไรด์ที่ถูกดักจับไว้และปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของซีเมนต์เฟสที่ส่งผลต่อการทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีต เพื่อจะได้ฐานข้อมูลประกอบการเลือกส่วนผสมคอนกรีตที่ป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทะเลได้ ตลอดจนใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายสถานะการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลได้ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้จากการทดลองในสภาวะแวดล้อมทะเลจริง และเก็บข้อมูลต่อเนื่องถึงระยะเวลา 5 ปี

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่บดละเอียด โดยค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.15 ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม.

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน

ลักษณะทางกายภาพ	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด (GRBA)
Specific Gravity	3.15	2.15
Retained on a Sieve No.325	N/A	3.0
Mean Particle Size (µm)	25	10.8

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เก้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด (GRBA)
Silicon dioxide	20.80	87.0
Aluminum oxide	5.50	1.08
Iron oxide	3.16	2.58
Calcium oxide	64.97	1.25
Magnesium oxide	1.06	0.5
Sodium oxide	0.08	0.08
Potassium oxide	0.55	1.0
Sulfur trioxide	2.96	0.09
Loss On Ignition	2.89	5.71

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ใช้เก้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียด จนมีน้ำหนักด่างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 50-100 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทซิลิโพนตเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซตช่วยในการเพิ่มความสามารถได้ ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตตามส่วนผสมในตารางที่ 3 เป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 ลบ.มม. หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลัดแห้งคุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไป

แช่ มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และมีอนุภาคน้ำอยู่ระหว่าง 20 ถึง 30 องศาเซลเซียส หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลครบ 5 ปี นำตัวอย่างทรงลูกบาศก์มาเจาะบริเวณกึ่งกลาง และนำแท่งตัวอย่างที่เจาะมาตัดที่ระดับความลึกต่างๆ แล้วบดให้ละเอียดและนำผงตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ที่ความลึกต่างๆ มาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตาม ASTM C 1152 [7] เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) นอกจากนั้นทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 [8] โดยรูปที่ 1 แสดงการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)						W/B
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด (GRBA)	หิน	ทราย	น้ำ	SP	
I45	424	-	979	767	190	-	0.45
I65	295	-	1,039	814	192	-	0.65
I45GRBA 15	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	814	192	0.30	0.65	0.65
I65GRBA 50	148	148	982	814	192	0.30	0.65



รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 กำลังอัดคอนกรีต

เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ไม่เกิน

ร้อยละ 35 มีแนวโน้มของกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 25 ถึงแม้จะมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ถือได้

ว่ามีค่าค่อนข้างสูงและผลของปฏิกิริยาปอซโซลานน่าจะส่งผลให้การพัฒนากำลั่งอัดในระยะยาวมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และส่งผลให้กำลั่งอัดในช่วงต้นมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน เมื่อพิจารณากำลั่งอัดหลังจากแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่า กำลั่งอัดทุกส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 มีกำลั่งอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเปลือกไม้ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่ามีปริมาณ SiO_2 สูงมาก (ร้อยละ 87) ประกอบกับขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ผ่านการบดละเอียด จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวดีขึ้น [9, 10] โดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ซึ่งพบว่ากำลั่งอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดทุกส่วนผสมมีค่าสูง

กว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หลังแช่น้ำทะเล 5 ปี ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 มีกำลั่งอัดเท่ากับ 295, 353, 346, 340 และ 291 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณสูงขึ้น มีแนวโน้มให้กำลั่งอัดมีค่าลดลง โดยปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ส่งผลดีต่อกำลั่งอัดของคอนกรีตจะต้องไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลั่งอัดคอนกรีตที่มีค่าต่ำลงเมื่อแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 เป็นผลมาจากการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณสูง ปูนซีเมนต์มีปริมาณน้อย กำลั่งคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงต่ำ ประกอบกับปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่เพียงพอที่จะเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าแกลบเปลือกไม้ได้สมบูรณ์ [11]

ตารางที่ 4 กำลั่งอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน และแช่น้ำทะเล 5 ปี

ส่วนผสม	กำลั่งอัด (กก./ตร.ซม.)	
	28 วัน	5 ปี
I45	451	445
I45GRBA15	429	463
I45GRBA25	408	449
I45GRBA35	394	422
I45GRBA50	393	405
I65	309	295
I65GRBA15	338	353
I65GRBA25	329	346
I65GRBA35	311	340
I65GRBA50	286	291

3.2 การกักเก็บคลอไรด์

โดยทั่วไป การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตคำนวณได้จากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ ในการศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต

ที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในรูปของร้อยละปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ซึ่งแสดงรายละเอียดการคำนวณดังตารางที่ 5 และ 6 สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และ 0.65 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

Mix	Distance from surface (mm)	Total Cl ⁻ (%by Wt. of binder)	Free Cl ⁻ (%by Wt. of binder)	Fixed Cl ⁻ (%by Wt. of binder)	Average Cl ⁻ binding (%by Wt. of binder)	Average total Cl ⁻ (%by Wt. of binder)	Cl ⁻ binding (%of total Cl ⁻), P_b
I45	5	1.09	0.96	0.13	0.09	0.64	14.5
	10	0.65	0.57	0.08			
	15	0.44	0.39	0.05			
	20	0.38	0.27	0.11			
I45R15	5	1.09	0.90	0.19	0.16	0.48	33.7
	10	0.41	0.26	0.15			
	15	0.16	0.06	0.1			
	20	0.27	0.06	0.21			
I45R25	5	0.96	0.86	0.1	0.14	0.47	29.6
	10	0.49	0.27	0.22			
	15	0.19	0.09	0.1			
	20	0.22	0.09	0.13			
I45R35	5	0.55	0.51	0.04	0.08	0.27	28.0
	10	0.19	0.13	0.06			
	15	0.22	0.07	0.15			
	20	0.11	0.06	0.05			
I45R50	5	0.35	0.34	0.01	0.04	0.22	16.9
	10	0.19	0.15	0.04			
	15	0.19	0.12	0.07			
	20	0.16	0.13	0.03			

ตารางที่ 6 ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

Mix	Distance from surface (mm)	Total Cl ⁻ (%by Wt. of binder)	Free Cl ⁻ (%by Wt. of binder)	Fixed Cl ⁻ (%by Wt. of binder)	Average Cl ⁻ binding (%by Wt. of binder)	Average total Cl ⁻ (%by Wt. of binder)	Cl ⁻ binding (%of total Cl ⁻), P _b
I65	5	1.12	1.03	0.09	0.07	0.68	10.0
	10	0.68	0.64	0.04			
	15	0.46	0.38	0.08			
	20	0.44	0.38	0.06			
I65R15	5	0.90	0.8	0.1	0.07	0.38	18.5
	10	0.33	0.23	0.1			
	15	0.14	0.11	0.03			
	20	0.14	0.09	0.05			
I65R25	5	0.76	0.71	0.05	0.09	0.38	24.7
	10	0.44	0.24	0.2			
	15	0.19	0.11	0.08			
	20	0.11	0.07	0.04			
I65R35	5	0.60	0.51	0.09	0.05	0.26	20.2
	10	0.22	0.17	0.05			
	15	0.11	0.09	0.02			
	20	0.11	0.06	0.05			
I65R50	5	0.41	0.39	0.02	0.02	0.22	10.2
	10	0.22	0.15	0.04			
	15	0.11	0.10	0.01			
	20	0.14	0.12	0.02			

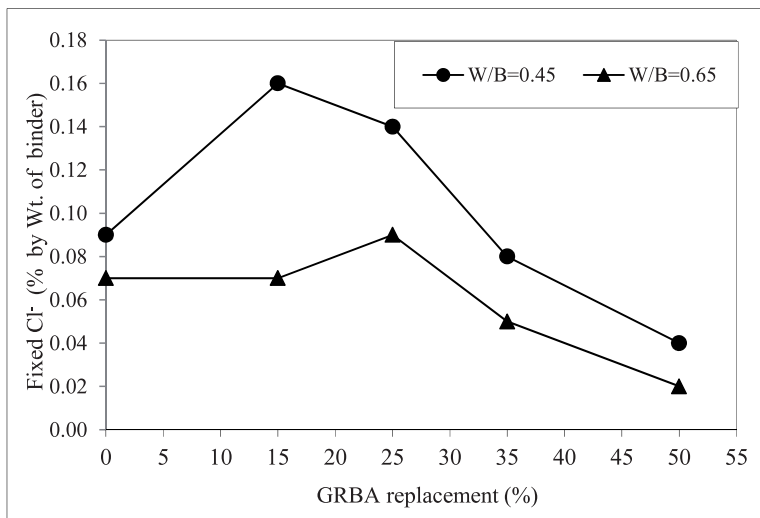
รูปที่ 2 แสดงผลของแก้วเคลือบเปลือกไม้ต่อปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บ (Fixed chloride) ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่า การใช้แก้วเคลือบเปลือกไม้ผสมในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้คอนกรีตมีการกักเก็บคลอไรด์มากขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้แก้วเคลือบเปลือกไม้สูงถึงร้อยละ 50 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตมีความชัดเจนมากขึ้นเมื่อพิจารณา

ในรูปของร้อยละปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งพบว่า ค่า P_b มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่แก้วเคลือบเปลือกไม้ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 และการแทนที่แก้วเคลือบเปลือกไม้ปริมาณสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) กลับส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง โดยทั่วไปแล้ว วัสดุประสานที่มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ที่ดี ทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่

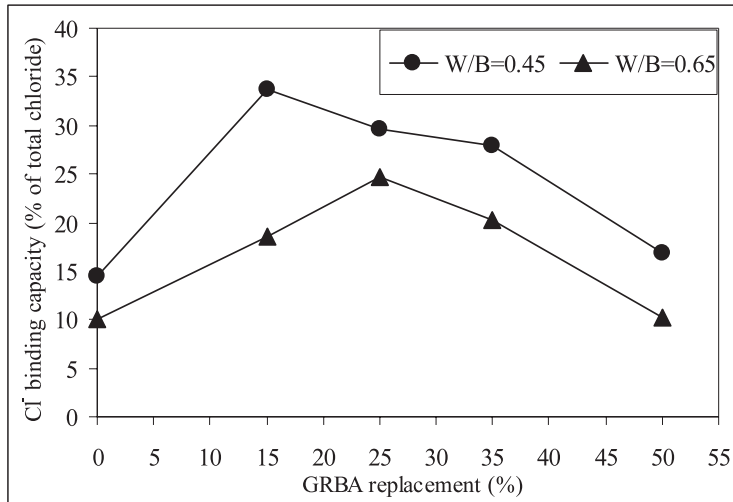
ในโพรงของคอนกรีตมีค่าลดลงและการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ก็จะต่ำลงด้วย การดักจับคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C_3A และก่อให้เกิดแคลเซียมคลอไรด์อะลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) บางครั้งเรียกว่าเกลือของฟรีเดล (Friedel's salt) [12] การศึกษาครั้งนี้พบว่า ถ้าแลกเปลี่ยนเกลือที่ไม่ผสมในคอนกรีตที่มีปริมาณของสารประกอบประเภทอะลูมิเนียมต่ำมาก (ร้อยละ 1.08) ซึ่งมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเกลือแลกเปลี่ยนในวัสดุประสานจึงไม่น่าจะส่งผลต่อการดักจับคลอไรด์ไอออนที่เกิดจากกลไกทางเคมีได้ อย่างไรก็ตาม การดักจับคลอไรด์ไอออนอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการดักจับทางกายภาพ โดยคลอไรด์ไอออนสามารถที่จะถูกดักจับที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เจลที่เป็นของแข็ง เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต เป็นต้น [12] ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เกลือแลกเปลี่ยนไม่ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 และสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว นั่นหมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีมากและการดักจับคลอไรด์ไอออนทางกายภาพที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

จึงมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ถ้าแลกเปลี่ยนเกลือไม่ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการแทนที่ถ้าแลกเปลี่ยนเกลือไม่ปริมาณที่สูงมากกว่าร้อยละ 35 ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเกลือแลกเปลี่ยนไม่ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีค่า P_0 เท่ากับ 14.5, 33.7, 29.6, 28.0 และ 16.9 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ดังรูปที่ 3) พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้ค่า P_0 เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีมากและการดักจับคลอไรด์ไอออนทางกายภาพที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจึงมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง



รูปที่ 2 ผลของเกลือแลกเปลี่ยนไม่และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



รูปที่ 3 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

4. สรุปผล

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูงถึงร้อยละ 50

2) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น

3) ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15-35 มีความเหมาะสมที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลเนื่องจากให้กำลังอัดที่สูงและความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ที่สูงด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 12/2553

6. เอกสารอ้างอิง

1. Ki Yong Ann and Ha-Won Song, 2007, "Chloride Threshold Level for Corrosion of Steel in Concrete", *Corrosion Science*, Vol. 49, pp. 4113-4133.
2. Yuan, Q., Shi, C., Schutter, G.D., Audenaert, K., and Deng, D., 2009, "Chloride Binding of Cement-based Materials Subjected to External Chloride Environment - A Review", *Constr Build Mater*, Vol. 23, pp. 1-13.
3. Baweja, D., Roper, H., and Sirivatnanon, V., 1998, "Chloride-induced Steel Corrosion in Concrete; Part. 1 Corrosion Rates, Corrosion Activity, and Attack Areas", *ACI Material Journal*, pp. 207-217.
4. Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C., and Chalee, W., 2010, "Long Term Performance of Chloride Binding Capacity in Fly Ash Concrete in a Marine Environment", *Construction and Building Material*, Vol. 24, pp. 1352-1357.
5. Chindapasirt, P., Homwuttivong, 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*, Vol. 21, No. 7, pp. 1492-1499.

6. Jaturapitakkul, C., Wongpha, J., and Sukunpree, S., 2002, "Development of Rice Husk-bark Ash in Concrete", 8th National Conference on Civil Engineering, Khon Kaen, Thailand, October 23-29, 2002, pp. 163-172. (In Thai)

7. ASTM. Standard Test Method for Acid-soluble Chloride in Mortar and Concrete, C1152 M-04E01. *Annual Book of ASTM Standards 2008*; 04.02.

8. ASTM. Standard Test Method for Water-soluble Chloride in Mortar and Concrete, C1218 M-99R08. *Annual Book of ASTM Standards 2008*; 04.02.

9. Tangchirapat, W., Buranasing, R., Jaturapitakkul C., and Chindaprasirt, P., 2008, "Influence

of Rice Husk Bark Ash on Mechanical Properties of Concrete Containing High Amount of Recycled Aggregates," *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp. 1812-1819.

10. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., 2005, "Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 4, pp. 425-428.

11. Suwanmaneechot, P., Jaturapitakkul, C., and Chalee, W., 2009, "Chloride Penetration of Concrete Containing Rice Husk-bark Ash in Marine Exposure Site", 4th *International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications*, Nagoya, Japan, August 24-26, 2009, pp. 725-730.

12. Tangtermsirikul, S., 2003, *Durability and Mix Design of Concrete*, 1st ed., Printing House of Thammasat University.

