

สมบัติของคอนกรีตที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรมที่มีกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบเปลือกไม้ และมวลรวมรีไซเคิล

ไชนันท์ รัตนโชติพันธ์¹ ณัฐพงษ์ มกระธัช^{2*} วีรชาติ ตั้งจิรภัทร¹

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล¹ และ กษิตศ มานะพัฒนานุกุล²

บทคัดย่อ

คอนกรีตนี้ถูกทำขึ้น โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรมทั้งในวัสดุประสานและมวลรวมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ผสมแยกกับเถ้าปาล์มน้ำมัน (PA) และเถ้าแกลบเปลือกไม้ (RA) นำมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต นอกจากนี้มวลรวมรีไซเคิลถูกนำมาใช้แทนที่มวลรวมธรรมชาติเพื่อที่หล่อตัวอย่างคอนกรีต (คอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA) สมบัติของคอนกรีต ได้แก่ กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้รับการประเมินและเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม (คอนกรีต CON) ผลการวิจัยพบว่าวัสดุประสาน CCR-PA และ CCR-RA สามารถนำมาใช้เป็นสารยึดเกาะในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล แม้ว่าวัสดุประสาน CCR-PA และ CCR-RA มีหรือไม่มีปูนซีเมนต์ การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA คล้ายกับคอนกรีต CON นอกจากนี้วัสดุประสาน CCR-PA และ CCR-RA สามารถปรับปรุงการแทรกซึมของคลอไรด์และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่าคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA สามารถใช้เป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมชนิดใหม่ เพราะคอนกรีตเหล่านี้สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : วัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรม, กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าปาล์มน้ำมัน, เถ้าแกลบเปลือกไม้, มวลรวมรีไซเคิล

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: nattapongm@kmutmb.ac.th รับเมื่อ 23 มีนาคม 2559 ตอบรับเมื่อ 9 กันยายน 2559

Properties of concrete made from industrial wastes containing calcium carbide residue palm oil fuel ash rice husk-bark ash and recycled aggregates

**Chaiyanunt Rattanashotinunt¹, Nattapong Makaratat^{2*}, Weerachart Tangchirapat¹,
Chai Jaturapitakkul¹ and Kasidid Manaputtananukul²**

Abstract

This concrete was made by using several industrial wastes in both binder and aggregates. Calcium carbide residue (CCR) mixed separately with palm oil fuel ash (PA) and rice husk-bark ash (RA), and was used as a binder instead of Portland cement in the concrete mixture. Furthermore, recycled aggregates were fully replaced natural aggregates in order to cast concrete specimens (CCR-PA and CCR-RA concretes). Concrete properties namely compressive strength, chloride migration, and water permeability of CCR-PA and CCR-RA concretes were evaluated and compared with the conventional concrete (CON concrete). The results indicated that CCR-PA and CCR-RA binders could be used as a new cementitious material in recycled aggregate concrete, even though the CCR-PA and CCR-RA binders contained no Portland cement. The characteristic compressive strength of CCR-PA and CCR-RA concretes developed similar to CON concrete. Moreover, CCR-PA and CCR-RA binders in the mixtures were effectively improving the chloride migration and water permeability of recycled aggregate concretes. These results also suggested that CCR-PA and CCR-RA concretes can be used as a new environmental friendly concrete because of these concretes can reduce as much as CO₂ emissions and environmental problems.

Keywords : Industrial wastes, Calcium carbide residue, Palm oil fuel ash, Rice husk-bark ash, Recycled aggregates

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

² Department of Civil and Environmental Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok.

* Corresponding author, E-mail: nattapongm@kmutnb.ac.th Received 23 March 2016, Accepted 9 September 2016

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการศึกษาวัสดุที่สามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตมากขึ้นเพื่อลดปัญหาสภาวะโลกร้อน เพราะการผลิตปูนซีเมนต์จำนวน 1 ตัน ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศประมาณ 900 กิโลกรัม [1] และเป็นที่คาดการณ์ว่าอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 5-7 % ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก [2-4] นอกจากนี้การใช้ปริมาณคอนกรีตจำนวนมากในการก่อสร้างเนื่องจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ ทำให้ทรัพยากรธรรมชาติ เช่น ทรายและหินปูนถูกนำมาใช้เป็นมวลรวมในอุตสาหกรรมคอนกรีตมากกว่าพันล้านลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต [5-6] ซึ่งทรายและหินปูนเป็นทรัพยากรที่มีจำกัดและกลายเป็นไม่เพียงพอต่อความต้องการของมวลรวมในอุตสาหกรรมคอนกรีต

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งก๊าซนี้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น การตัดโลหะ งานเชื่อม และใช้ในการบ่มผลไม้ให้สุกเร็วขึ้น เป็นต้น ปัจจุบันการผลิตก๊าซอะเซทิลีนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม จึงส่งผลให้มีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งเพิ่มมากขึ้น โรงงานแห่งหนึ่งที่ผลิตก๊าซอะเซทิลีนมีการทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์สูงมากถึง 12,000 ตัน/ปี [7] ส่วนใหญ่นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปกองทิ้งไว้เป็นบริเวณกว้างซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมบริเวณข้างเคียง ดังรูปที่ 1.1 แสดงพื้นที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุพลอยได้จากการนำเศษกะลา เส้นใย และผลของปาล์มภายหลังจากการสกัดน้ำมันปาล์มออกแล้ว ไปเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิต

กระแสไฟฟ้า ส่วนเถ้าแกลบเปลือกไม้เป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยนำแกลบจากโรงสีข้าวและเปลือกไม้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบเปลือกไม้มีลักษณะเป็นผงและมีน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ซึ่งทำให้เกิดปัญหาด้านสภาวะแวดล้อมข้างเคียงและเป็นปัญหาในเรื่องของการกำจัดทิ้งเช่นกัน ดังรูปที่ 1.2 และ 1.3 แสดงพื้นที่ทิ้งเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบเปลือกไม้ ตามลำดับ

มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตหรือมวลรวมรีไซเคิล เป็นวัสดุที่เคยใช้งานมาแล้วจากงานคอนกรีตซึ่งงานวิจัยนี้ใช้มวลรวมรีไซเคิลจากการย่อยเศษหัวเสาเข็ม เพราะในแต่ละโครงการก่อสร้างมีการใช้เสาเข็มและมีการตัดหัวเสาเข็มจำนวนมาก ทำให้มีเศษคอนกรีตจากหัวเสาเข็มเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากต้องนำไปกำจัดทิ้งซึ่งต้องหาพื้นที่ทิ้งและเสียค่าใช้จ่ายในการนำไปทิ้ง ดังรูปที่ 2 แสดงพื้นที่ทิ้งของหัวเสาเข็ม

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม ได้แก่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแยกกับเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบเปลือกไม้ นำมาใช้เป็นวัสดุประสาน และมวลรวมรีไซเคิลนำมาใช้แทนที่มวลรวมธรรมชาติเพื่อที่หล่อตัวอย่างคอนกรีต โดยทำการศึกษาสมบัติของคอนกรีต เช่น กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะส่งเสริมให้ผู้ใช้คอนกรีตที่เป็นรูปธรรมใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรมในงานคอนกรีตได้ คอนกรีตเหล่านี้ไม่เพียงแต่สามารถช่วยลดปัญหาของวัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรม แต่ยังลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทาง

2. การทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

2.1.1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR)

งานวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างของกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน จังหวัดสมุทรสาคร นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาตากแดดให้แห้งจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก แล้วจึงนำไปบดด้วยเครื่องบดวัสดุให้มีปริมาตรอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

2.1.2 เถ้าปล้มน้ำมัน (PA) และเถ้าแกลบเปลือกไม้ (RA)

เถ้าปล้มน้ำมันในงานวิจัยนี้ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าชีวมวล จังหวัดชุมพร ส่วนเถ้าแกลบเปลือกไม้ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จังหวัดฉะเชิงเทรา นำเถ้าปล้มน้ำมันและเถ้าแกลบเปลือกไม้ไปบดในเครื่องบดวัสดุให้มีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

2.1.3 ปูนซีเมนต์ (OPC)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ถูกนำมาใช้เป็นสารเร่งกำลังในช่วงอายุต้น โดยใช้ร่วมกับวัสดุประสานในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (CCR + (PA หรือ RA) + OPC)

2.1.4 มวลรวมรีไซเคิล (RFA และ RCA)

มวลรวมรีไซเคิล นำมาจากโรงย่อยวัสดุ จังหวัดสระบุรี ซึ่งมวลรวมที่ย่อยแล้วจะนำมาแยกขนาดระหว่างมวลรวมละเอียดรีไซเคิล (RFA) กับมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) โดยใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร เมื่อแยกวัสดุทั้งสองชนิดแล้วนำมาล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้งแล้ว จึงนำมาใช้เป็นมวลรวมในงานวิจัยนี้

2.1.5 น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ (SP)

น้ำใช้น้ำประปา และใช้สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F

2.2 วิธีการวิจัย

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างและส่วนผสมคอนกรีต

นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดผสมแยกกับเถ้าปล้มน้ำมันบดและเถ้าแกลบเปลือกไม้บดในอัตราส่วนเท่ากับ 40:60 และ 50:50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต และใช้มวลรวมหยาบและละเอียดรีไซเคิล (RCA และ RFA) แทนที่หินปูนย่อย (NCA) และทราย (NFA) ตามลำดับ ส่วนผสมคอนกรีตใช้ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 450 กก/ม³ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 ควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 5-10 ซม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F ช่วยปรับความชื้นเหลวของคอนกรีต และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังโดยการแทนที่ในวัสดุประสานร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำการผสมคอนกรีตเพื่อหล่อตัวอย่างคอนกรีต

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมให้มีกำลังอัดเท่ากับ 300 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน ส่วนผสมคอนกรีตควบคุมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เป็นวัสดุประสานในปริมาณเท่ากับ 300 กก/ม³ และใช้มวลรวมธรรมชาติ มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 โดยตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.2.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 ซม สูง 20 ซม ถอดแบบหลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตแล้วประมาณ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำสะอาด เพื่อรอการทดสอบกำลัง

อัตราของคอนกรีตที่อายุ 7, 28, 60, และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 [8]

2.2.3 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต

การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตตามมาตรฐานของ NT BUILD 492 [9] เพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีต โดยอาศัยหลักการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันคงที่ระหว่างขั้วด้านบนและด้านล่าง ทำการปรับกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามมาตรฐานของ NT BUILD 492 [9] เมื่อครบตามเวลาที่ใช้ในการทดสอบแล้ว นำก้อนตัวอย่างไปทำการกัดผ่าซีก เพื่อนำก้อนตัวอย่างที่กัดผ่าซีกไปฉีดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) แล้ววัดค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต (D_{nssm}) ตามสมการที่ (1) ทำการทดสอบหาค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}} \right) \quad (1)$$

เมื่อ D_{nssm} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ($\text{ม}^2/\text{วินาที}$); U คือ ค่าความต่างศักย์ (โวลต์); T คือ อุณหภูมิของสารละลาย (องศาเซลเซียส); L คือ ความหนาของตัวอย่าง (มม); X_d คือ ค่าเฉลี่ยการแทรกซึม (มม); และ t คือ ระยะเวลาการทดสอบ (ชั่วโมง)

2.2.4 การทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

การทดสอบหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตอาศัยหลักการไหลของน้ำที่คงที่ ทำการทดสอบโดยการให้ความดันต่อเนื่องคงที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตในทิศทางเดียว และใช้แรงดันน้ำคงที่เท่ากับ 5 บาร์ ให้น้ำ

ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4 บันทึกค่าปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตกับเวลาจนกระทั่งอัตราการไหลของน้ำ (Q) ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่าคงที่ นำค่าอัตราการไหลของน้ำที่มีค่าคงที่มากำหนดหาสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตตามสมการที่ (2) ทำการทดสอบหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 90 วัน

$$K = \frac{\rho L g Q}{PA} \quad (2)$$

เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำ (ม/วินาที); ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ ($\text{กม}/\text{ม}^3$); L คือ ความหนาของตัวอย่าง (ม); g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก ($\text{ม}/\text{วินาที}^2$); Q คือ อัตราการไหลของน้ำ ($\text{ม}^3/\text{วินาที}$); P คือ แรงดันน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่าง (นิวตัน/ ม^2); และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ม^2)

3. ผลการวิจัย

3.1 สมบัติจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุประสาน

จากภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของวัสดุด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าภาคเคลือบเคลือบคาร์ไบด์บด เถ้าปาล์มน้ำมันบด และเถ้ากลบเปลือกไม้บด มีรูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม และมีพื้นผิวขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน พบว่า ภาคเคลือบเคลือบคาร์ไบด์บด เถ้าปาล์มน้ำมันบด เถ้ากลบเปลือกไม้บด ปูนซีเมนต์ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.42, 2.33, 2.15, และ 3.15 ตามลำดับ นอกจากนี้มี

ปริมาณวัสดุที่ล้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.1, 1.7, 1.9, และ 13.5 โดยน้ำหนัก และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) ทดสอบโดยเครื่อง Particle Size Analyzer มีค่าเท่ากับ 4.4, 10.7, 10.9, และ 14.6 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติทางเคมีของวัสดุประสานพบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์ มี CaO สูงถึงร้อยละ 56.5 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณ LOI (Loss on Ignition) สูงถึงร้อยละ 36.1 โดยน้ำหนัก เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ LOI มีค่าสูงประมาณ 950 องศาเซลเซียส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีองค์ประกอบของ Ca(OH)_2 เป็นส่วนใหญ่ ทำให้กากแคลเซียมคาร์ไบด์สลายตัวเป็น CaO และไอน้ำระเหยออกไป [10]

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบเปลือกไม้ มีค่า SiO_2 เท่ากับร้อยละ 55.5 และ 74.8 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลรวมขององค์ประกอบ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของเถ้าปาล์ม น้ำมันและเถ้าแกลบเปลือกไม้ พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 70.3 และ 75.8 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้มีปริมาณ SO_3 เท่ากับร้อยละ 2.3 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สำหรับค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบเปลือกไม้ มีค่าเท่ากับร้อยละ 7.9 และ 11.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งเถ้าแกลบเปลือกไม้ มีปริมาณค่า LOI สูงกว่าที่กำหนดโดยมาตรฐาน ASTM C618 [11] (ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก) อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมา [12-13] พบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุพอซโซลานที่ดีสามารถนำมาใช้งานคอนกรีตได้ แม้ว่าจะมีค่า LOI สูงกว่าที่กำหนดโดยมาตรฐาน ASTM C618 [11]

3.1.2 มวลรวม

ลักษณะรูปร่างของมวลรวมรีไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีลักษณะรูปร่างใกล้เคียงกับมวลรวมหยาบจากธรรมชาติหรือหินปูนย่อย คือ มีความเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน ขนาดเฉลี่ยของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีขนาดเล็กกว่าหินปูนย่อย ที่ผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิลส่วนใหญ่มีซีเมนต์เฟสติดอยู่ มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าโมดูลัสความละเอียดต่ำกว่าหินปูนย่อย โดยค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและหินปูนย่อยมีค่าเท่ากับ 6.7 และ 7.2 ตามลำดับ มวลรวมหยาบรีไซเคิลและหินปูนย่อยมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.6 และ 2.7 มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.8 และ 0.4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบรีไซเคิล พบว่า ซีเมนต์เฟสหรือมอร์ตาร์จากเศษคอนกรีตเดิมที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีความพรุน ทำให้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าและมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าหินปูนย่อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Poon et al. [14] Katz [15]

นอกจากนี้ค่าความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบรีไซเคิล ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C131 [16] พบว่า มวลรวมหยาบรีไซเคิล (ร้อยละ 19.4 โดยน้ำหนัก) มีค่าความต้านทานการสึกกร่อนสูงกว่าหินปูนย่อย (ร้อยละ 18.8 โดยน้ำหนัก) เล็กน้อย เนื่องจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลในงานวิจัยนี้ ได้จากการย่อยเศษหัวเสาเข็มที่มีกำลังสูง ซีเมนต์เฟสหรือมอร์ตาร์ที่เกาะติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีกำลังสูงตามด้วย

สำหรับมวลรวมละเอียดรีไซเคิล มีองค์ประกอบของส่วนที่เป็นซีเมนต์เฟสหรือมอร์ตาร์จากเศษคอนกรีต

ลักษณะมีความเป็นเหลี่ยมเป็นมุมสูง รูปร่างไม่แน่นอน และมีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่กว่ามวลรวมละเอียดจากธรรมชาติหรือทรายแม่น้ำ โดยค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดรีไซเคิลและทรายแม่น้ำมีค่าเท่ากับ 3.4 และ 3.2 ตามลำดับ มวลรวมละเอียดรีไซเคิลและทรายแม่น้ำมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.5 และ 2.6 มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 3.7 และ 0.8 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยสมบัติทางกายภาพของมวลรวมได้แสดงในตารางที่ 4

3.2 กำลังอัดของคอนกรีต

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์และมวลรวมธรรมชาติ (คอนกรีต CON) ให้มีกำลังอัดเท่ากับ 300 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรมที่มีกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบเปลือกไม้ และมวลรวมรีไซเคิล (คอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA) ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 จากงานวิจัยพบว่าคอนกรีต CON มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, และ 90 วัน เท่ากับ 235, 309, 362 และ 371 กก/ซม² ตามลำดับ

คอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA ที่ไม่มีปูนซีเมนต์พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 มีค่าเท่ากับ 193 และ 191 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 247 และ 239 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่ากำลังอัดของคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม แม้ว่าสารยึดเกาะนี้ไม่มีปูนซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Makaratat [7] Jaturapitakkul and Roongreung [10] Airdeaw et al [17] ลักษณะการพัฒนากำลังอัดคล้าย

กับของคอนกรีต CON และพบว่ากำลังอัดของคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 มีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CON ทุกอายุการทดสอบ เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง Ca(OH)_2 ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ กับ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ในวัสดุปอซโซลานเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การใช้มวลรวมรีไซเคิลยังส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ Poo et al. [14] Katz [15], Somna et al. [18] รายงานว่าซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่เกาะติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมรีไซเคิลมีความแข็งแรงน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติ ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง

การใช้ปูนซีเมนต์แทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เป็นตัวเร่งกำลังในคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA พบว่าคอนกรีต CCR-PA-P10 และ CCR-RA-P10 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 245 และ 269 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน และพัฒนากำลังอัดที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 280 และ 341 กก/ซม² ตามลำดับ คอนกรีต CCR-PA-P10 และ CCR-RA-P10 มีการพัฒนากำลังอัดในลักษณะที่คล้ายคลึงกับคอนกรีต CON, CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 โดยมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 ทุกอายุการทดสอบ สำหรับการใส่ปูนซีเมนต์แทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เป็นตัวเร่งกำลังในคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA พบว่าคอนกรีต CCR-PA-P20 และ CCR-RA-P20 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 292 และ 344 กก/ซม² ที่อายุ 28 วันและเพิ่มขึ้นเป็น 334 และ 409 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ และจากผลการวิจัยพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน เพราะการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็นการเพิ่ม C_3S และ C_2S ตลอดจน $Ca(OH)_2$ เพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีต [17]

เป็นที่น่าสังเกตว่ากำลังอัดของคอนกรีต CCR-RA มีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีต CCR-PA แสดงให้เห็นว่าวัสดุประสาน CCR-RA สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าวัสดุประสาน CCR-PA เนื่องจากเถ้าแกลบเปลือกไม้มีปริมาณ SiO_2 (74.8%) ที่สูงกว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Sata et al. [13] Ismail and Waliuddin [19] Jaubertie et al. [20] ที่รายงานว่าเถ้าแกลบและเถ้าแกลบเปลือกไม้มีปริมาณค่า SiO_2 ที่สูง (มากกว่า 70%) ช่วยเพิ่มการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีต นอกจากนี้ผลที่ได้พบว่าคอนกรีต CCR-RA-P20 สามารถพัฒนา กำลังอัดมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่ออกแบบกำลังอัดให้มีค่าเท่ากับ 300 กก/ซม² ตั้งแต่ที่อายุ 28 วัน

3.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน เทียบกับคอนกรีตควบคุม พบว่าคอนกรีต CON มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วันเท่ากับ 27.14×10^{-12} และ 7.03×10^{-12} ม²/วินาที ตามลำดับ

ผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA ที่ไม่มีปูนซีเมนต์ พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 2.10×10^{-12} และ 2.18×10^{-12} ม²/วินาที และมีค่าลดลงเท่ากับ 0.58×10^{-12} และ 0.11×10^{-12} ม²/วินาที

ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ จากผลการวิจัยพบว่าคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีต CON แม้ว่าคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต CON เนื่องจากคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานและขนาดอนุภาคที่เล็กของกากแกลบเชิยคาร์ไบด์บด เถ้าปาล์ม น้ำมันบด และเถ้าแกลบเปลือกไม้บด อุดช่องว่างในโพรงของคอนกรีตส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตมีค่าต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Chindaprasirt et al. [21] ที่รายงานว่าวัสดุปอซโซลานช่วยในการปรับปรุงความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน มีความสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดและปริมาณโพรงในคอนกรีตมีค่าลดลง ทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตเป็นไปได้ยากขึ้นแม้ว่าคอนกรีตดังกล่าวไม่มีปูนซีเมนต์และใช้มวลรวมรีไซเคิล นอกจากนี้ Isaiia et al. [22] Vazquez et al. [23] รายงานว่าขนาดอนุภาคที่เล็กของวัสดุปอซโซลานสามารถอุดช่องว่างในโพรงของคอนกรีตทำให้คอนกรีตที่บดส่งผลให้เพิ่มการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต

คอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นตัวเร่งกำลัง, คอนกรีต CCR-PA-P10 และ CCR-RA-P10 (ใช้ปูนซีเมนต์ 45 กก/ม³) มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ 3.58×10^{-12} และ 2.15×10^{-12} ม²/วินาที และที่อายุ 90 วันมีค่าลดลงเท่ากับ 2.38×10^{-12} และ 0.31×10^{-12} ม²/วินาที ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หรือใช้ปูนซีเมนต์ 90 กก/ม³ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต

CCR-PA-P20 และ CCR-RA-P20 มีค่าเท่ากับ 2.31×10^{-12} และ 1.84×10^{-12} ม²/วินาที ที่อายุ 28 วัน และมีค่าลดลงเท่ากับ 1.24×10^{-12} และ 0.26×10^{-12} ม²/วินาที ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ จากผลการวิจัยเป็นที่น่าสังเกตว่าคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตไม่แตกต่างกันมากนัก และมีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CON ทั้งนี้เป็นเพราะว่าคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีต CON ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.70 มีผลทำให้ช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต จากผลการวิจัยเห็นได้ชัดเจนว่าวัสดุประสาน CCR-PA และ CCR-RA สามารถช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต CON

3.4 การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีต CON มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 6.03×10^{-13} ม/วินาที โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 371 กก/ซม² ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ Chindaprasirt et al. [12] Somna et al. [18] Tangchirapat et al. [24] ที่รายงานว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานและใช้มวลรวมจากธรรมชาติ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วงระหว่าง 5.4×10^{-13} ถึง 28.9×10^{-13} ม/วินาที ที่อายุ 28 และ 90 วัน

คอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA ที่ไม่มีปูนซีเมนต์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 มีค่าเท่ากับ 7.10×10^{-13} และ 2.16×10^{-13} ม/วินาที ที่อายุ 90 วัน โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 247 และ 239 กก/ซม² ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CCR-PA-P0 และ CCR-RA-P0 มีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าคอนกรีต CON แม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่า วัสดุประสาน CCR-PA และ CCR-RA สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลได้ คล้ายกับผลการวิจัยการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Chindaprasirt et al. [12] Chusilp et al. [25] ที่รายงานว่าวัสดุปอซโซลานสามารถปรับปรุงความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตที่บดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเป็นไปได้ยากขึ้น

การใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวเร่งกำลังแทนที่ในวัสดุประสาน พบว่าการใช้ปูนซีเมนต์แทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน, คอนกรีต CCR-PA-P10 และ CCR-RA-P10 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 1.21×10^{-13} และ 1.76×10^{-13} ม/วินาที ที่อายุ 90 วัน โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 280 และ 341 กก/ซม² ตามลำดับ สำหรับการใส่ปูนซีเมนต์แทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน, คอนกรีต CCR-PA-P20 และ CCR-RA-P20 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 2.16×10^{-13} และ 1.10×10^{-13} ม/วินาที ที่อายุ 90 วัน โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 334 และ 409 กก/ซม²

ตามลำดับ จากผลการวิจัยเห็นได้ชัดว่าคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA ที่ใช้กากแกลบเชิยคาร์ไบด์บดผสมแยกกับเถ้าปาล์มน้ำมันบดและเถ้าแกลบเปลือกไม้บดเป็นวัสดุประสานที่มีความละเอียดสูง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าคอนกรีต CON และเมื่อใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในปริมาณมากขึ้น ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าลดลง ถึงแม้ว่าคอนกรีตจะใช้มวลรวมริไซเคิลก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ammadnua et al. [26] ที่ศึกษาการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแกลบเชิยคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานและใช้มวลรวมธรรมชาติ พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในวัสดุประสานเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดต่ำลง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตแสดงในรูป 9 ผลการวิจัยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA ที่อายุ 90 วันมีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าคอนกรีต CON ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่าวัสดุประสาน CCR-PA และ CCR-RA สามารถใช้เป็นสารยึดเกาะชนิดใหม่สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมริไซเคิล ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความต้านทานการซึมของน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต และยังสามารถใช้เป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมชนิดใหม่ เพราะคอนกรีตเหล่านี้สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

สิ่งแวดล้อมโดยการใช้วัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรมแทนที่ปูนซีเมนต์และมวลรวมธรรมชาติ

4. สรุปผล

(1) วัสดุประสาน CCR-PA และ CCR-RA สามารถนำมาใช้เป็นสารยึดเกาะชนิดใหม่ในคอนกรีตมวลรวมริไซเคิล แม้ว่าสารยึดเกาะนี้ไม่มีปูนซีเมนต์

(2) กำลังอัดของคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและมีการพัฒนากำลังอัดที่คล้ายคลึงกับคอนกรีต CON การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA มีค่าเพิ่มขึ้น และพบว่าคอนกรีต CCR-RA-P20 (ใช้ปูนซีเมนต์ 90 กก/ม³) มีกำลังอัดสูงที่สุดเท่ากับ 344 และ 409 กก/ซม² ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

(3) การใช้ CCR-PA และ CCR-RA เป็นสารยึดเกาะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความต้านทานการซึมของน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต

(4) คอนกรีต CCR-PA และ CCR-RA สามารถใช้เป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมชนิดใหม่ เพราะคอนกรีตเหล่านี้สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยการใช้วัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรมแทนที่ปูนซีเมนต์และมวลรวมจากธรรมชาติ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติ สำหรับโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการเมธีวิจัยอาวุโส สัญญาเลขที่ RTA5380002 และ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับโครงการทุนวิจัย วิชาการตามแผนและกลยุทธ์เพื่อการพัฒนา สัญญาเลขที่ CE-KMUTT5903 ที่ได้สนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.K. Mehta, “Global Concrete Industry Sustainability”, *Concrete International* 31, 2009, pp. 45-48.
- [2] V.M. Malhotra, M.H. Zhang and G.H. Learman, “Long-Term Performance of Steel Reinforcing Bars in Portland Cement Concrete and Concrete Incorporating Moderate and High Volumes of ASTM Class F Fly Ash”, *ACI Materials Journal* 97, 2000, pp. 409-417.
- [3] J.S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino and E.M. Gartner, “Sustainable Development and Climate Change Initiatives” *Cement and Concrete Research* 38, 2008, pp. 115-127.
- [4] M.B. Ali, R. Saidur and M.S. Hossain, “A Review on Emission Analysis in Cement Industries”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 15, 2011, pp. 2252-2261.
- [5] T.R. Naik, “Sustainability of Concrete Construction”, *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 13, 2008, pp. 98-103.
- [6] C. Meyer, “The Greening of the Concrete Industry”, *Cement and Concrete Composite* 31, 2009, pp. 601-605.
- [7] N. Makaratat, “Use of Calcium Carbide Residue-Fly Ash as Binder to Produce High Workability Concrete”, *The Journal of Industrial Technology* 10, 2014, pp. 106-120. (in Thai)
- [8] ASTM C39/C39M-05, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
- [9] NT Build 492, “Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments”, Nordtest Method, 1999.
- [10] C. Jaturapitakkul and B. Roongreung, “Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 15, 2003, pp. 470-475.
- [11] ASTM C618-12a, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [12] P. Chindapasirt, S. Homwuttiwong and C. Jaturapitakkul, “Strength and Water Permeability of Concrete containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk-Bark Ash”, *Construction and Building Materials* 21, 2007, pp. 1492-1499.
- [13] V. Sata, C. Jaturapitakkul and K. Kiattikomol, “Influence of Pozzolan from Various By-Product Materials on Mechanical Properties of High-Strength Concrete”, *Construction and Building Materials* 21, 2007, pp. 1589-1598.

- [14] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam, H. Fok and S.C. Kou, "Influence of Moisture States of Natural and Recycled Aggregate on the Slump and Compressive Strength of Concrete", *Cement and Concrete Research* 34, 2004, pp. 1-6.
- [15] A. Katz, "Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete", *Cement and Concrete Research* 33, 2003, pp. 703-711.
- [16] ASTM C131/C131M-14, "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- [17] S. Airdeaw, N. Makaratat and C. Jaturapitakkul, "Properties of Calcium Carbide Residue-Palm Oil Fuel Ash Concrete using Portland Cement as an Accelerator", In: *Proceedings of the 15th National Convention on Civil Engineering*, Ubon Ratchathani, Thailand, 2010, MAT.011.
- [18] R. Somna, C. Jaturapitakkul and A.M. Made, "Effect of Ground Fly Ash and Ground Bagasse ash on the Durability of Recycled Aggregate Concrete", *Cement and Concrete Composite* 34, 2012, pp. 848-854.
- [19] M.S. Ismail and A.M. Waliuddin, "Effect of Rice Husk Ash on High Strength Concrete", *Construction and Building Materials* 10, 1996, pp. 521-526.
- [20] R. Jauberthie, F. Rendell, S. Tamba and I. Cisse, "Origin of the Pozzolanic Effect of Rice Husks", *Construction and Building Materials* 14, 2000, pp. 419-423.
- [21] P. Chindaprasirt, S. Rukzon and V. Sirivivatnanon, "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, 2008, pp. 932-938.
- [22] G.C. Isaia, A.L.G. Gastaldini and R. Moraes, "Physical and Pozzolanic Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High Performance Concrete", *Cement and Concrete Composite* 25, 2003, pp. 69-76.
- [23] E. Vazquez, C.F. Hendriks and G.M.T. Janssen, "Influence of Mechanical grinding on the Pozzolanic Activity of Residual Sugarcane Bagasse Ash", In: *International RILEM conference on the use of recycled materials in building and structures*, 2004, pp. 731-740.
- [24] W. Tangchirapat, S. Khamklai and C. Jaturapitakkul, "Use of Ground Palm Oil Fuel Ash to Improve Strength, Sulfate Resistance, and Water Permeability of Concrete containing High Amount of Recycled Concrete", *Materials & Design* 41, 2012, pp. 150-157.
- [25] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul and K. Kiattikomol, "Utilization of Bagasse Ash as a Pozzolanic Material in Concrete", *Construction and Building Materials* 23, 2009, pp. 3352-3358.
- [26] K. Amnadhua, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, "Strength, Water Permeability, and Heat Evolution of High Strength Concrete Made from the Mixture of Calcium Carbide Residue and Fly Ash", *Materials & Design* 51, 2013, pp. 894-901.

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีต

Concrete	Mix proportions (kg/m ³)									W/B	Slump (mm)
	CCR	PA	RA	OPC	NFA	RFA	NCA	RCA	SP		
CON	-	-	-	300	810	-	1035	-	-	0.70	75
CCR-PA-P0	180	270	-	-	-	720	-	915	12.6	0.40	90
CCR-PA-P10	162	243	-	45	-	725	-	925	11.7	0.40	80
CCR-PA-P20	144	216	-	90	-	730	-	935	10.8	0.40	70
CCR-RA-P0	225	-	225	-	-	710	-	905	18.9	0.40	90
CCR-RA-P10	202.5	-	202.5	45	-	715	-	915	17.1	0.40	90
CCR-RA-P20	180	-	180	90	-	720	-	925	15.3	0.40	90

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Sample	Specific gravity	Retained on a 45- μ m sieve (No. 325) (%)	Median particle size, d ₅₀ (μ m)
OPC	3.15	13.5	14.6
CCR	2.42	2.1	4.4
PA	2.33	1.7	10.7
RA	2.15	1.9	10.9

ตารางที่ 3 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical composition (%)	OPC	CCR	PA	RA
Silicon dioxide (SiO ₂)	20.9	4.3	55.5	74.8
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	4.7	0.4	9.2	0.2
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	3.4	0.9	5.6	0.8
Calcium oxide (CaO)	65.4	56.5	12.4	5.9
Magnesium oxide (MgO)	1.2	1.7	4.6	0.6
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.2	0.0	0.0	0.2
Potassium oxide (K ₂ O)	0.3	0.0	0.0	2.0
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.7	0.1	2.3	0.5
Loss on Ignition (LOI)	0.9	36.1	7.9	11.2

ตารางที่ 4 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

Properties	NFA	RFA	NCA	RCA
Fineness modulus	3.2	3.4	7.2	6.7
Specific gravity	2.6	2.5	2.7	2.6
Absorption (%)	0.8	3.7	0.4	1.8
Los Angeles abrasion value (%)	-	-	18.8	19.4



(1.1) พื้นที่ทิ้งกากเคลเซียมคาร์ไบด์



(1.2) พื้นที่ทิ้งเถ้าปลาล์มน้ำมัน

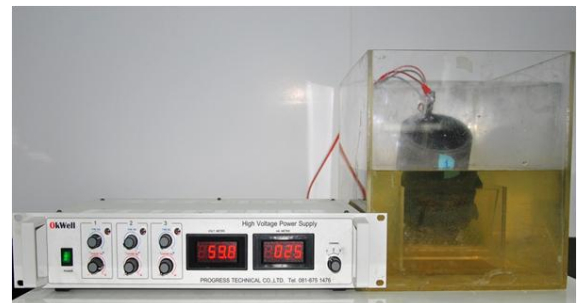
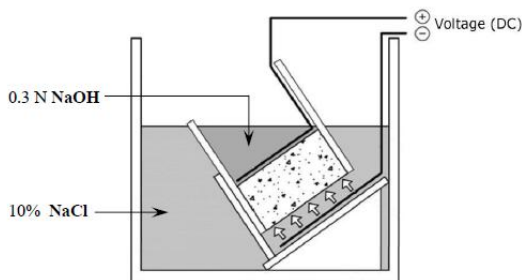


(1.3) พื้นที่ทิ้งเถ้าเคลือบเปลือกไม้

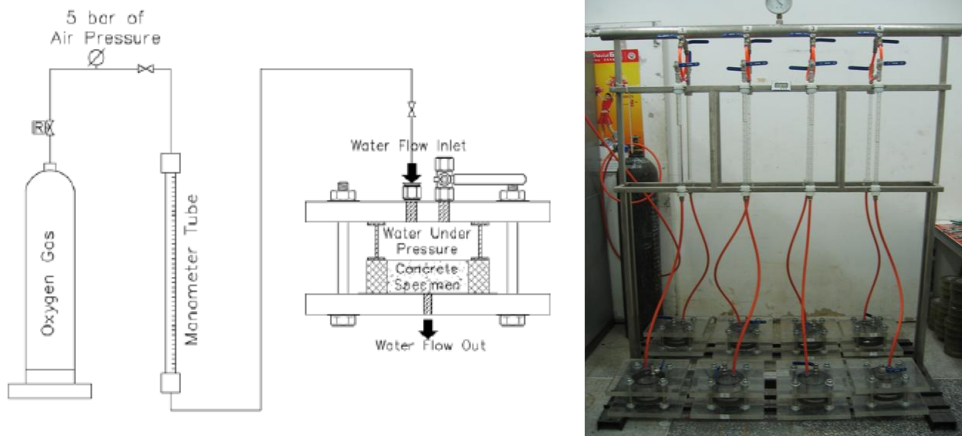
รูปที่ 1 พื้นที่ทิ้งกากเคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าปลาล์มน้ำมัน และ เถ้าเคลือบเปลือกไม้



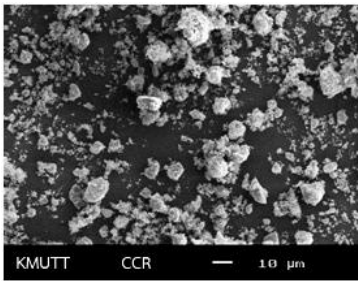
รูปที่ 2 พื้นที่ทิ้งหัวเสาเข็ม



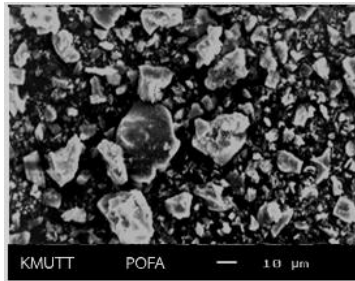
รูปที่ 3 การทดสอบหาค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต ตามมาตรฐานของ NT BUILD 492 [9]



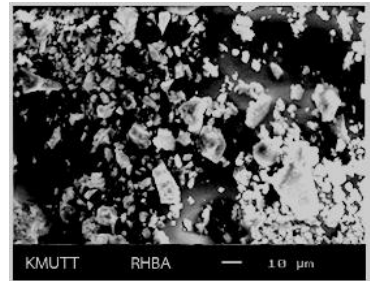
รูปที่ 4 การทดสอบหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยอาศัยหลักการไหลของน้ำที่คงที่



(5.1) กากเคลเซียมคาร์ไบด์บด

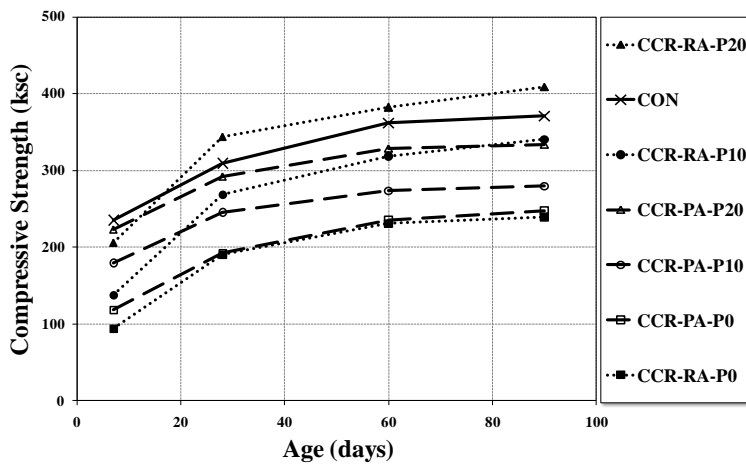


(5.2) เถ้าปลัมน้ำมันบด

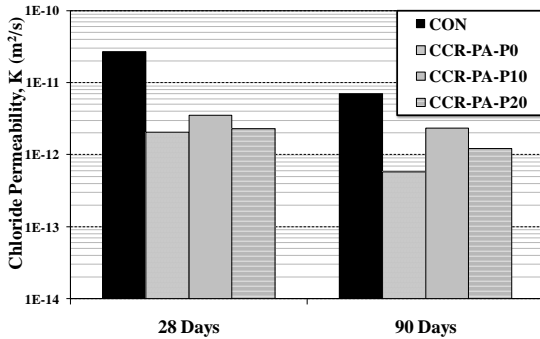


(5.3) เถ้าแกลบเปลือกไม้บด

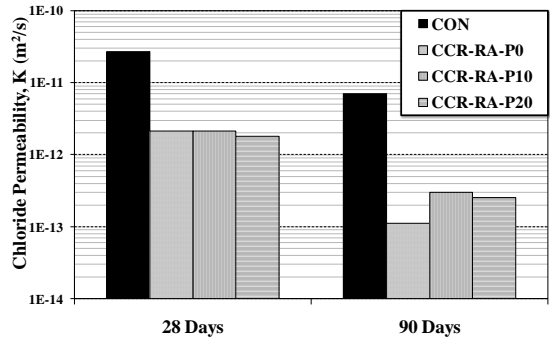
รูปที่ 5 ภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของวัสดุประสาน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุการทดสอบ

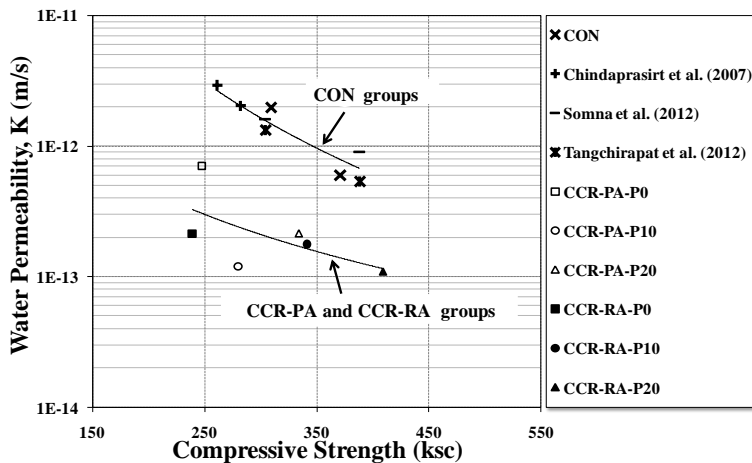


(7.1) คอนกรีต CON และ CCR-PA

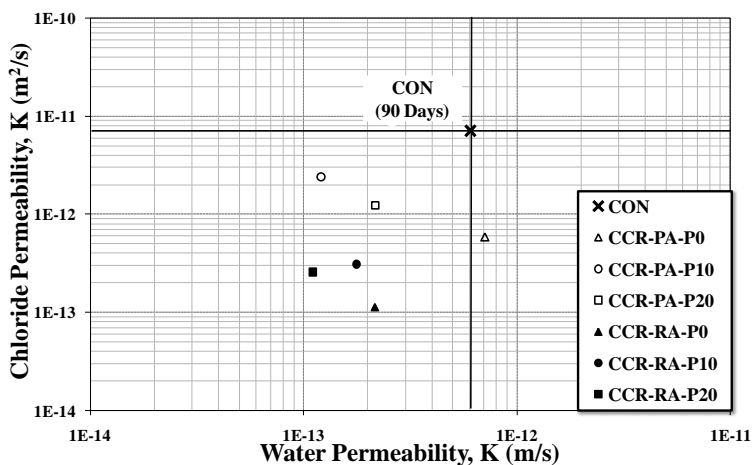


(7.2) คอนกรีต CON และ CCR-RA

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตกับอายุการทดสอบ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตกับกำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมของน้ำกับการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต