



Journal of Thailand Concrete Association วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

STRENGTH, CHLORIDE MIGRATION, AND WATER PERMEABILITY OF CONCRETE MADE FROM INDUSTRIAL WASTES

กำลังอัด, การแทรกซึมของคลอไรด์, และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ทำจากวัสดุกองทิ้งจาก
อุตสาหกรรม

ไชยพันธ์ รัตนโชตินันท์¹ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร² ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³

¹นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received: July 5, 2016

Received Revised Form:

July 28, 2016

Accepted: Aug 4, 2016

ABSTRACT:

This research aimed to study concrete properties such as compressive strength, chloride migration, and water permeability of concrete made from industrial wastes. The wastes were Gground calcium carbide residue (CCR) and ground fly ash (FA) and were mixed together for use as a binder. Recycled aggregates were used in place of natural aggregates to produce concrete (CCR-FA concrete). Properties of CCR-FA concretes were evaluated and compared with the conventional concrete made from Portland cement and natural aggregates (CON concrete). The results showed that the use of CCR-FA binder in recycled aggregate concrete did not change the characteristic compressive strength of concrete. Compressive strength of CCR-FA concretes was similar to that of CON concrete. The chloride migration and water permeability of CCR-FA concretes were the same or lower than that of CON concrete. These results indicated that CCR-FA concretes could be used as a new environmental friendly concrete because these concretes can reduce environmental problems by using the industrial wastes as raw material to produce concrete.

KEYWORDS: chloride migration, water permeability, calcium carbide residue, fly ash, recycled aggregates

บทคัดย่อ :

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ทำจากวัสดุกองทิ้งจากอุตสาหกรรม ได้แก่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์บด (CCR) ผสมกับเถ้าถ่านหินบด (FA) เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ และใช้มวลรวมรีไซเคิลแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติในการผลิตคอนกรีต (คอนกรีต CCR-FA) ผลการทดสอบสมบัติของคอนกรีต CCR-FA ได้รับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์และมวลรวมจากธรรมชาติ ผลการวิจัยพบว่าการใช้วัสดุประสาน CCR-FA ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล ไม่ได้เปลี่ยนแปลงลักษณะการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีต CCR-FA คล้ายคลึงกับคอนกรีตควบคุม การแทรกซึมของคลอไรด์และการ

ซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CCR-FA มีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม จากการวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าคอนกรีต CCR-FA สามารถใช้เป็นคอนกรีตชนิดใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะคอนกรีตเหล่านี้สามารถลดปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยการนำวัสดุกองทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ในงานคอนกรีต

**Corresponding Author,
Email address:
weerachart.tan@kmutt.ac.th*

คำสำคัญ: การแทรกซึมของคลอไรด์, การซึมของน้ำ, กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าถ่านหิน, มวลรวมรีไซเคิล

1. บทนำ

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุที่พลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งก๊าซอะเซทิลีนนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเชื่อม การตัดโลหะ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ติดไฟ นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรเพื่อให้ความร้อนในการบ่มผลไม้ให้สุกเร็วขึ้น ปัจจุบันพบว่าความต้องการใช้ก๊าซอะเซทิลีนของภาคอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งมีจำนวนมาก ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณข้างเคียง นอกจากนี้ความเป็นด่างที่สูงของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำให้พื้นที่บริเวณที่กองทิ้งไม่สามารถนำไปใช้งานเกษตรกรรมได้

เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า กากที่เหลือจากการเผาถ่านหินประกอบด้วยเถ้าถ่านหินและเถ้าหินเตา (ประมาณร้อยละ 80 และ 20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ) ปัจจุบันมีการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ผสมในงานคอนกรีต โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนหรือใช้เป็นสารผสมเพิ่ม แต่ปริมาณส่วนใหญ่ยังคงต้องนำไปทิ้ง ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง และคาดว่าแนวโน้มของเถ้าถ่านหินจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม ดังนั้นหากสามารถนำเถ้าถ่านหินมาใช้ได้ในปริมาณที่มากขึ้นก็จะเป็นการลดปัญหามลภาวะสิ่งแวดล้อมได้อีกทาง

มวลรวมรีไซเคิลเป็นมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ทิ้งแล้ว เช่น หัวยางซีเมนต์ที่ตัดทิ้ง ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่ไม่ได้คุณภาพ และการรื้อถอนหรือทำลายสิ่งปลูกสร้างเดิมเพื่อสร้างสิ่งปลูกสร้างใหม่ ทำให้มีเศษคอนกรีตเหลือทิ้งจำนวนมาก หากไม่มีการกำจัดหรือจัดเก็บที่ดีย่อมส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและทัศนียภาพบริเวณนั้นๆ ดังนั้นการนำเศษคอนกรีตเหลือทิ้งเหล่านี้มาทำการย่อยให้เป็นมวลรวมเพื่อใช้ใน

งานคอนกรีต ก็จะเป็นการช่วยลดปัญหาการกองทิ้งของเศษคอนกรีตได้อีกทางหนึ่ง

จากปัญหาด้านมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากวัสดุกองทิ้งจากอุตสาหกรรมที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้มีการวิจัยเพื่อนำวัสดุกองทิ้งจากอุตสาหกรรมเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต ซึ่งเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และมวลรวมจากธรรมชาติ นอกจากนี้ยังสามารถลดปัญหามลภาวะสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาปูนซีเมนต์และระเบิดภูเขาเพื่อย่อยหินสำหรับผลิตคอนกรีต อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาปริมาณการทิ้งของวัสดุกองทิ้งจากอุตสาหกรรมได้อีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้วัสดุกองทิ้งจากอุตสาหกรรม ได้แก่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าถ่านหิน และมวลรวมรีไซเคิลมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีต โดยศึกษาสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินบดเป็นวัสดุประสาน และใช้มวลรวมรีไซเคิลแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ ผลการทดสอบได้รับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์และมวลรวมจากธรรมชาติ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะส่งเสริมให้ผู้ใช้อคอนกรีตสามารถนำวัสดุกองทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตได้

2. การทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์บด (CCR)

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างแคลเซียมคาร์ไบด์กับน้ำในกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน งานวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างของกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน จังหวัดสมุทรสาคร นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาตากแดดให้แห้งจนมีความชื้นประมาณร้อยละ

1-2 โดยน้ำหนัก แล้วจึงนำไปบดด้วยเครื่องบดวัสดุให้มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

จากภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของวัสดุพบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์บดมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมและมีความพรุน ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน พบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์บดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.42 มีปริมาณวัสดุที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 2.1 โดยน้ำหนัก และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 4.4 ไมโครเมตร

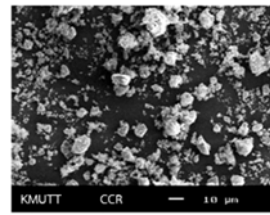
ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน พบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์บดมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงถึงร้อยละ 56.5 โดยน้ำหนัก และมีค่าปริมาณการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูงถึงร้อยละ 36.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิจัยก่อนหน้าของ อรรถเดช อับดุลมาติน และคณะ [1] และ Jaturapitakkul และ Roongreung [2]

2.1.2 เถ้าถ่านหินบด (FA)

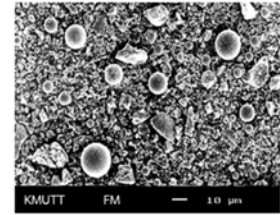
เถ้าถ่านหินได้จากการเผาถ่านหินซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง [3-5] ซึ่งประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ มีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยงานวิจัยนี้ได้ตัวอย่างของเถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

รูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินบดมีรูปร่างของอนุภาคทรงกลมกระจายอยู่โดยทั่วไปและแตกเป็นเหลี่ยมมุม แต่ยังมีอนุภาคทรงกลมหลงเหลือและกระจายอยู่ สมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินบดแสดงในตารางที่ 1 พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.39 มีปริมาณวัสดุที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนัก และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 9.2 ไมโครเมตร

สมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหินบดแสดงในตารางที่ 2 พบว่ามีผลรวมขององค์ประกอบ SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 60.8 โดยน้ำหนัก มีค่า CaO เท่ากับร้อยละ 24.2 โดยน้ำหนัก และมีค่าปริมาณ LOI เท่ากับร้อยละ 5.3 โดยน้ำหนัก จากสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหินบดในการวิจัยนี้ สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class C ได้ ตามมาตรฐาน ASTM C618 [6]



(1.1) กากแคลเซียมคาร์ไบด์บด



(1.2) เถ้าถ่านหินบด

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดและเถ้าถ่านหินบด

2.1.3 ปูนซีเมนต์ (OPC)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ถูกนำมาใช้เป็นสารเร่งกำลังในงานวิจัย โดยใช้แทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (CCR + FA + OPC)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

วัสดุ ประสาน	ความ ถ่วงจำเพาะ	ปริมาณอนุภาคค้ำ บนตะแกรงเบอร์ 325 (%)	ขนาดอนุภาค เฉลี่ย, d_{50} (ไมโครเมตร)
OPC	3.15	13.5	14.6
CCR	2.42	2.1	4.4
FA	2.39	0.6	9.2

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	OPC	CCR	FA
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	20.9	4.3	39.3
อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3)	4.7	0.4	14.9
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.4	0.9	6.6
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.4	56.5	24.2
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.2	1.7	1
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.2	0	0.4
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.3	0	1.8
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.7	0.1	5.3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการ เผา (LOI)	0.9	36.1	5.3

2.1.4 ปูนซีเมนต์ (OPC)

มวลรวมละเอียดรีไซเคิลและมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RFA และ RCA ตามลำดับ) นำมาจากโรงย่อยวัสดุ จังหวัดสระบุรี ซึ่งมวลรวมรีไซเคิลที่ย่อยแล้วจะนำมาแยกขนาดระหว่างมวลรวมละเอียดกับมวลรวมหยาบโดยใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร เมื่อแยกวัสดุทั้งสองชนิดแล้วนำมวลรวมรีไซเคิลมาล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้งแล้วจึงนำมวลรวมรีไซเคิลเหล่านั้นมาใช้แทนที่มวลรวมจากธรรมชาติในงานวิจัยนี้ โดยสมบัติทางกายภาพของมวลรวมแสดงในตารางที่ 3

ลักษณะรูปร่างของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะรูปร่างใกล้เคียงกับมวลรวมหยาบจากธรรมชาติหรือหินปูนย่อย (NCA) คือ มีความเป็นเหลี่ยมมุมและรูปร่างไม่แน่นอนที่ผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิลส่วนใหญ่มีซีเมนต์เพสต์ยึดเกาะติดอยู่ โดยมวลรวมหยาบรีไซเคิลและหินปูนย่อยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.7 และ 7.2, มีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวแห้งเท่ากับ 2.6 และ 2.7, และมีการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.8 และ 0.4 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบรีไซเคิล พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าและค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าหินปูนย่อยเนื่องจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีความพรุนจากซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์เดิมที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahal [7] และ Poon และคณะ [8] นอกจากนี้ค่าความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบรีไซเคิล ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C131 [9] พบว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลมีความต้านทานการสึกกร่อนเท่ากับร้อยละ 19.4 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าสูงกว่าหินปูนย่อย (ร้อยละ 18.8 โดยน้ำหนัก) เล็กน้อยเนื่องจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลในงานวิจัยนี้ได้จากการย่อยเศษหัวเสาเข็มที่มีกำลังสูง ซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่เกาะติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมมีกำลังสูงตามด้วย

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

สมบัติทางกายภาพ	NCA	RCA	NFA	RFA
โมดูลัสความละเอียด	7.2	6.7	3.2	3.4
ความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวแห้ง	2.7	2.6	2.6	2.5
การดูดซึมน้ำ (%)	0.4	1.8	0.8	3.7
ความต้านทานการสึกกร่อน (%)	18.8	19.4	-	-

สำหรับมวลรวมละเอียดรีไซเคิล มีองค์ประกอบของส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์จากเศษคอนกรีต มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน และมีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่กว่ามวลรวมละเอียดจากธรรมชาติหรือทรายแม่น้ำ (NFA) โดยมวลรวมละเอียดรีไซเคิลและทรายแม่น้ำมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.4 และ 3.2, มีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวแห้งเท่ากับ 2.5 และ 2.6, และมีการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 3.7 และ 0.8 ตามลำดับ

2.1.5 น้ำและสารลดน้ำพิเศษ (SP)

งานวิจัยนี้ใช้น้ำประปา และใช้สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.2.1 ส่วนผสมคอนกรีต

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมให้มีกำลังอัดเท่ากับ 300 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานในปริมาณเท่ากับ 300 กก/ม³ และใช้มวลรวมจากธรรมชาติ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.70 และค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 50-100 มม

ส่วนคอนกรีตที่ทำจากวัสดุกองทิ้งจากอุตสาหกรรม นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้านหินบดในอัตราส่วนเท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนัก ใช้เป็นวัสดุประสาน โดยใช้ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 450 กก/ม³ และใช้มวลรวมรีไซเคิลแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 ควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 50-100 มม โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังโดยแทนที่ในวัสดุประสานร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนผสมของคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ส่วนผสมของคอนกรีต

คอนกรีต	ส่วนผสมของคอนกรีต (กก/ม ³)								W/B	ค่ายุบตัว (มม)
	CCR	FA	OPC	NFA	RFA	NCA	RCA	SP		
CON	-	-	300	810	-	1035	-	-	0.70	75
CCR-FA-P0	135	315	-	-	738	-	945	4.5	0.40	90
CCR-FA-P10	121.5	283.5	45	-	741	-	950	5	0.40	80
CCR-FA-P20	108	252	90	-	744	-	955	5.5	0.40	80

2.2.2 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 ซม สูง 20 ซม ถอดแบบหลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตแล้วประมาณ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำสะอาด เพื่อรอการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 28, 60, และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 [10]

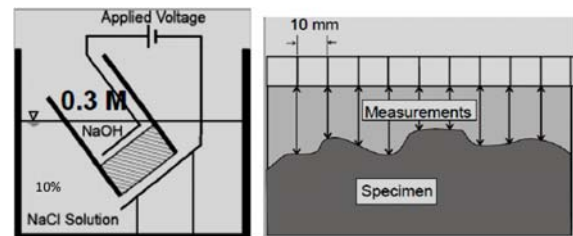
2.2.3 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

การทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีต โดยอาศัยหลักการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันคงที่ระหว่างผิวด้านบนและด้านล่าง ตามมาตรฐานของ NT BUILD 492 [11] ทำการทดสอบหาค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วันโดยการทดสอบเริ่มจากนำตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 ซม สูง 20 ซม ที่มีอายุครบกำหนดการทดสอบ มาตัดตามแนวขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของตัวอย่างให้มีขนาดความหนา 5 ซม เพื่อหลีกเลี่ยงส่วนบนที่อาจมีผลของการเย็นน้ำและส่วนล่างที่มีมวลรวมมากเกินไปเนื่องจากการกระทุ้งแน่น จากนั้นนำก้อนตัวอย่างประกอบเข้าชุดทดสอบ และเติมสารละลายลงในชุดทดสอบ ทำการต่ออุปกรณ์เข้ากับเครื่องทดสอบ และทำการปรับกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมตามมาตรฐานของ NT BUILD 492 [11] เมื่อครบตามเวลาที่ใช้ในการทดสอบแล้ว นำก้อนตัวอย่างไปทำการกัดดำซีก เพื่อนำก้อนตัวอย่างที่กัดดำซีกไปฉีดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO₃) แล้ววัดค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้น

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต (D_{nssm}) ตามสมการที่ (1)

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

เมื่อ D_{nssm} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต (ม²/วินาที), U คือ ค่าความต่างศักย์ (โวลต์), T คือ อุณหภูมิของสารละลาย (องศาเซลเซียส), L คือ ความหนาของตัวอย่าง (มม), X_d คือ ค่าเฉลี่ยการแทรกซึมของคลอไรด์ (มม), และ t คือ ระยะเวลาการทดสอบ (ชั่วโมง)



รูปที่ 2 การทดสอบหาค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐานของ NT BUILD 492 [11]

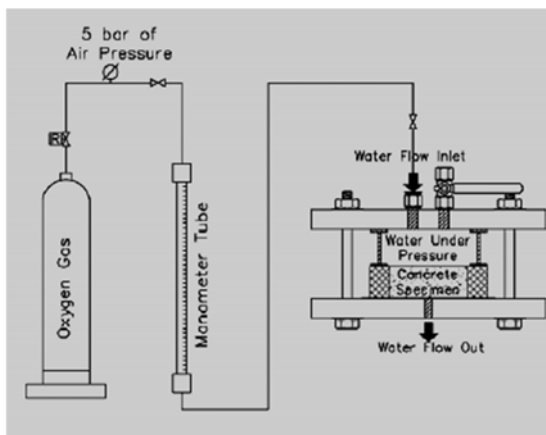
2.2.4 การทดสอบการซึมของน้ำ

การทดสอบหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตอาศัยหลักการไหลของน้ำที่คงที่ ทำการทดสอบโดยการให้ความดันต่อเนื่องคงที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตในทิศทางเดียว ทำการทดสอบหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน การทดสอบใช้

ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 ซม สูง 20 ซม ที่มีอายุครบกำหนดการทดสอบ มาตัดตามแนวขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของตัวอย่างให้มีขนาดความหนา 4 ซม ทำความสะอาดผิวของก้อนตัวอย่างให้สะอาดปราศจากฝุ่น เพื่อให้อีพ็อกซี (Epoxy) ยึดเกาะติดกับผิวคอนกรีตได้ดี หลังจากนั้นทำการหล่ออีพ็อกซีรอบก้อนตัวอย่างโดยก้อนตัวอย่างอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของแบบหล่อ หลังจากหล่ออีพ็อกซีแล้วประมาณ 24 ชั่วโมง นำก้อนตัวอย่างมาประกอบเข้ากับชุดทดสอบ และนำชุดทดสอบไปติดตั้งกับเครื่องทดสอบค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3 การทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตใช้แรงดันน้ำคงที่เท่ากับ 5 บาร์ให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต บันทึกค่าปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตกับเวลาจนกระทั่งอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างมีค่าคงที่ นำค่าอัตราการไหลของน้ำที่มีค่าคงที่มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตตามสมการที่ (2)

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

เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (ม/วินาที), คือ ρ ความหนาแน่นของน้ำ (กก/ม³), L คือ ความหนาของตัวอย่าง (ม), g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (ม/วินาที²), Q คือ อัตราการไหลของน้ำ (ม³/วินาที), P คือ แรงดันน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่าง (นิวตัน/ม²), และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ม²)



รูปที่ 3 การทดสอบหาค่าการซึมของน้ำ โดยอาศัยหลักการไหลของน้ำผ่านคอนกรีตที่คงที่

3. ผลการวิจัย

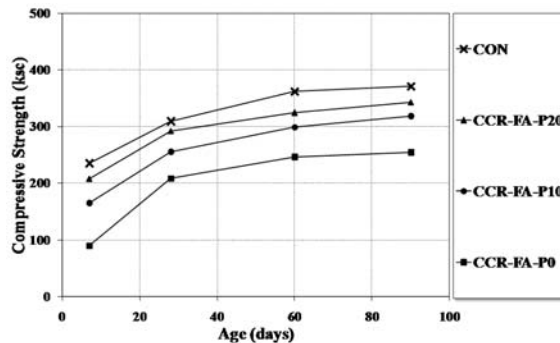
3.1 กำลังอัด

คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์และมวลรวมจากธรรมชาติหรือคอนกรีต CON ได้ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตให้มีกำลังอัดเท่ากับ 300 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต CCR-FA พบว่าคอนกรีต CON มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, และ 90 วันเท่ากับ 235, 309, 362, และ 371 กก/ซม² ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4

คอนกรีต CCR-FA ที่ไม่มีปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต CCR-FA-P0 พบว่ามีค่ากำลังอัดเท่ากับ 209 กก/ซม² หรือร้อยละ 68 ของคอนกรีต CON ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 254 กก/ซม² หรือร้อยละ 68 ของคอนกรีต CON ที่อายุ 90 วันตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่ากำลังอัดของคอนกรีต CCR-FA-P0 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มแม้ว่าวัสดุประสานนี้ไม่มีปูนซีเมนต์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Makaratat และคณะ [12] ที่รายงานว่าพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานมีลักษณะคล้ายกับการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์และมวลรวมจากธรรมชาติ จากผลการวิจัยพบอีกว่าคอนกรีต CCR-FA-P0 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต CON ทุกอายุการทดสอบ เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีต CCR-FA-P0 เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การใช้มวลรวมรีไซเคิลยังส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต CCR-FA-P0 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Katz [13] และ Chen และคณะ [14] ที่พบว่าซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่ยึดเกาะติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมรีไซเคิลมีความแข็งแรงน้อยกว่ามวลรวมจากธรรมชาติส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง

คอนกรีต CCR-FA ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวเร่งกำลังในคอนกรีต แทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานหรือคอนกรีต CCR-FA-P10 และ CCR-FA-P20 ตามลำดับ พบว่าคอนกรีต CCR-FA-P10 และ CCR-FA-P20 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 255 และ 292 กก/ซม² หรือร้อยละ 83 และ 94 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ และมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นที่อายุ 90 วันเท่ากับ 318 และ 343 กก/ซม² หรือร้อยละ 86 และ 92 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต CCR-FA-P10 และ CCR-FA-P20 มีการพัฒนา กำลังอัดในลักษณะที่คล้ายคลึงกับคอนกรีต CON และพบว่ากำลังอัดของคอนกรีต CCR-FA มีค่า

สูงขึ้นตามการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็นการเพิ่ม C_3S และ C_2S ตลอดจน $Ca(OH)_2$ เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น [15-16] โดยคอนกรีต CCR-FA-P20 สามารถพัฒนากำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดของคอนกรีต CON (ประมาณร้อยละ 90 ของคอนกรีต CON) ทั้งที่คอนกรีต CCR-FA-P20 ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานหรือเพียง 90 กก/ม³ เทียบกับคอนกรีต CON ที่ใช้ปูนซีเมนต์ 300 กก/ม³



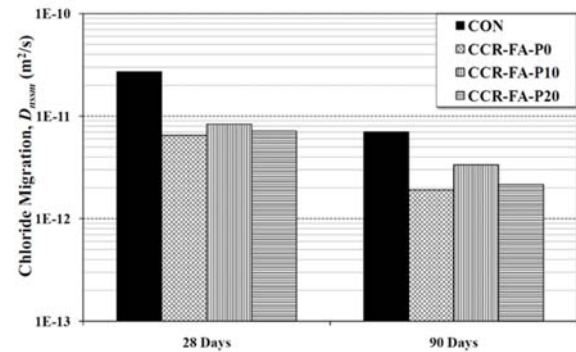
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตและอายุการทดสอบ

3.2 การแทรกซึมของคลอไรด์

รูปที่ 5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต CCR-FA ที่อายุ 28 และ 90 วัน เทียบกับคอนกรีตควบคุม พบว่าคอนกรีต CON มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตเท่ากับ 27.1×10^{-12} และ 7.0×10^{-12} ม²/วินาที ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

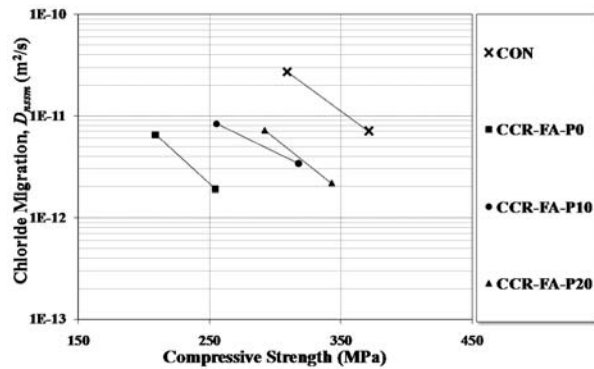
สำหรับคอนกรีต CCR-FA-P0, CCR-FA-P10, และ CCR-FA-P20 ที่อายุ 28 วัน มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตเท่ากับ 6.5×10^{-12} , 8.4×10^{-12} , และ 7.2×10^{-12} ม²/วินาที และที่อายุ 90 วัน มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตเท่ากับ 1.9×10^{-12} , 3.4×10^{-12} , และ 2.2×10^{-12} ม²/วินาที ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต CCR-FA มีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CON เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานและขนาดอนุภาคที่เล็กของกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดและเถ้าถ่านหินบดเข้าไปอุดช่องว่างในโพรงของคอนกรีตส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตมีค่าต่ำซึ่งสอดคล้องกับ

งานวิจัยของ Isaiia และคณะ [17], Vazquez และคณะ [18], และ ประจักษ์ ทูลกลสิกร และคณะ [19] รายงานว่าขนาดอนุภาคที่เล็กของวัสดุปอซโซลานสามารถอุดช่องว่างในโพรงของคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบขึ้น ส่งผลให้ช่วยเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าคอนกรีต CCR-FA-P0, CCR-FA-P10, และ CCR-FA-P20 มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีต CON แม้ว่าคอนกรีต CCR-FA มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต CON ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ ประจักษ์ ทูลกลสิกร และคณะ [19] และ Chindaprasirt และคณะ [20] ที่รายงานว่าวัสดุปอซโซลานสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีความสมบูรณ์มากขึ้นส่งผลให้ขนาดและปริมาณโพรงในคอนกรีตมีค่าลดลง ทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตเป็นไปได้อย่างยากขึ้น จากผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าวัสดุประสาน CCR-FA สามารถช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าคอนกรีต CCR-FA มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต CON



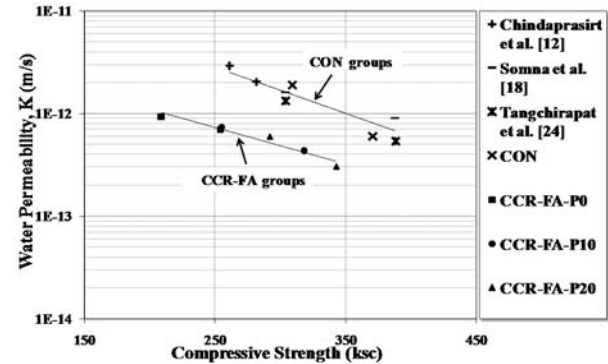
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

3.3 การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าคอนกรีต CON มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 19.1×10^{-13} และ 6.0×10^{-13} ม/วินาที โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 309 และ 371 กก/ซม² ตามลำดับ ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Chindaprasirt และคณะ [21], Somna และคณะ [22], และ Tangchirapat และคณะ [23] ที่รายงานว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานและใช้มวลรวมจากธรรมชาติ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วงระหว่าง 5.4×10^{-13} ถึง 28.9×10^{-13} ม/วินาที โดยมีกำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 261 ถึง 388 กก/ซม² ที่อายุ 28 และ 90 วัน

สำหรับคอนกรีต CCR-FA มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CCR-FA-P0, CCR-FA-P10, และ CCR-FA-P20 ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 9.4×10^{-13} , 7.4×10^{-13} , และ 5.9×10^{-13} ม/วินาที โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 209, 255, และ 292 กก/ซม² และที่อายุ 90 วันค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CCR-FA-P0, CCR-FA-P10, และ CCR-FA-P20 มีค่าเท่ากับ 7.0×10^{-13} , 4.3×10^{-13} , และ 3.0×10^{-13} ม/วินาที โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 254, 318, และ 343 กก/ซม² ตามลำดับ จากผลการวิจัยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CCR-FA มีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าคอนกรีต CON แม้ว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีต CCR-FA มีค่าต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าวัสดุประสาน CCR-FA สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลได้ คล้ายกับผลการวิจัยการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ

[21] และ Chusilp และคณะ [24] ที่รายงานว่าวัสดุพอลิโพลีเอทิลีนสามารถปรับปรุงความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากปฏิกิริยาพอลิโพลีเอทิลีน ส่งผลให้คอนกรีตที่บ่มขึ้น ทำให้การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเป็นไปได้ยากขึ้น



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต

ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่าวัสดุประสาน CCR-FA สามารถใช้เป็นสารยึดเกาะชนิดใหม่สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล โดยช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความต้านทานการซึมของน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตได้โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต CCR-FA มีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าคอนกรีต CON

3.4 ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อม

จากงานวิจัยข้างต้น กล่าวได้ว่าวัสดุประสาน CCR-FA สามารถนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติโดยสมบัติของคอนกรีต CCR-FA ได้รับการประเมินและเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม และพบว่าคอนกรีต CCR-FA สามารถใช้เป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมชนิดใหม่

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะส่งเสริมให้ผู้ใช้คอนกรีตใช้ประโยชน์จากวัสดุทิ้งจากอุตสาหกรรมในงานคอนกรีต โดยคอนกรีตเหล่านี้ไม่เพียงแต่สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยใช้วัสดุทิ้งจากอุตสาหกรรมแทนที่ปูนซีเมนต์และมวลรวมจากธรรมชาติ แต่ยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุทิ้งจากอุตสาหกรรมโดยไม่นำวัสดุทิ้งจากอุตสาหกรรมเหล่านี้ไปทิ้ง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณข้างเคียง

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) กากแคลเซียมคาร์ไบด์บดผสมกับเถ้าถ่านหินบดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานหรือสารยึดเกาะชนิดใหม่ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล โดยคอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดผสมกับเถ้าถ่านหินบดเป็นวัสดุประสานและใช้มวลรวมรีไซเคิลมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการทดสอบ และมีการพัฒนาน้ำกำลังอัดที่คล้ายคลึงกับคอนกรีตควบคุม

2) การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต CCR-FA มีค่าเพิ่มขึ้น และพบว่าคอนกรีต CCR-FA-P20 ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หรือเพียง 90 กก/ม³ มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดเท่ากับ 292 และ 343 กก/ซม² หรือร้อยละ 94 และ 92 ของคอนกรีตควบคุม, ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

3) การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์บดผสมกับเถ้าถ่านหินบดเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล ช่วยปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

4) คอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดผสมกับเถ้าถ่านหินบดเป็นวัสดุประสานและใช้มวลรวมรีไซเคิลสามารถใช้เป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมชนิดใหม่ เพราะคอนกรีตเหล่านี้สามารถลดปัญหาสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุกองทิ้งจากอุตสาหกรรม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติ สำหรับโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สำหรับโครงการเมธีวิจัยอาวุโส สัญญาเลขที่ RTA5380002 และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับโครงการทุนวิจัย วิชาการตามแผนและกลยุทธ์เพื่อการพัฒนา สัญญาเลขที่ CE-KMUTT5903 ที่ได้สนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2015, "Effect of types of superplasticizer on properties of paste and mortar", **Thailand Concrete Association Journal**, Vol. 3, No. 1, pp. 31-41.
- [2] Jaturapitakkul, C. and Roongreung, B., 2003, "Cementing material from calcium carbide residue-rice husk ash", **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 15, No. 5, pp. 470-475.
- [3] Cheerarot, R., Tangpagasit, J., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2003, "Effect of particle size of Mae Moh fly ash on strength activity index of mortar", **KMUTT Research and Development Journal**, Vol. 3, pp. 295-310.
- [4] Julnipitawong, P., and Tangtermsirikul, S., 2014, "A study on effect of strength acceleration compound on properties of concrete and mortar", **Thailand Concrete Association Journal**, Vol. 2, No. 1, pp. 17-29.
- [5] Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomo, K., 2007, "Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete", **Construction and Building Materials**, Vol. 21, No. 7, pp. 1589-1598.
- [6] American Society for Testing and Materials, "ASTM C618-12a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", **ASTM International**, West Conshohocken, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 1-5, 2015
- [7] Rahal, K., 2007, "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate", **Building and Environment**, Vol. 42, No. 1, pp. 407-415.
- [8] Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H. and Kou, S.C., 2004, "Influence of moisture states of natural and recycled aggregate on the slump and compressive strength of concrete", **Cement and Concrete Research**, Vol. 34, No. 1, pp. 1-6.

- [9] American Society for Testing and Materials, "ASTM C131 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, Philadelphia, 2001.
- [10] American Society for Testing and Materials, "ASTM C39: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *ASTM International*, West Conshohocken, Philadelphia, 2001.
- [11] Build, NordTest. "492. Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments", *Nordtest Method*, NT Build 492, 1999.
- [12] Makaratat, N., Jaturapitakkul, C., and Laosamathikul, T., 2010, "Effects of calcium carbide residue-fly ash binder on mechanical properties of concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, No. 11, pp. 1164-1170.
- [13] Katz, A., 2003, "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 703-711.
- [14] Chen, H.J., Ten, T. and Chen, K.U., 2003, "Use of building rubbles as recycled aggregates", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 1, pp. 125-132.
- [15] Airdeaw, S., Makaratat, N. and Jaturapitakkul, C., 2010 "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*, 2010 May 12-14; Ubonratchathani, Thailand.
- [16] Amnadhua, K., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2013, "Strength, water permeability, and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash", *Materials & Design*, Vol. 51, pp. 894-901.
- [17] Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G. and Moraes, R., 2003, "Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high performance concrete", *Cement and Concrete Composite*, Vol. 25, No. 1, pp. 69-76.
- [18] Vazquez, E., Hendriks, C.F. and Janssen, G.M.T., 2004, "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*, pp. 731-740.
- [19] Toolkasikorn, P., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2014, "Strength and chloride resistance of recycled aggregate concrete containing ground rice husk ash", *Thailand Concrete Association Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 8-16.
- [20] Chindaprasirt, 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*, Vol. 22, No. 5, pp. 932-938.
- [21] Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and Jaturapitakkul, C., 2007, "Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, pp. 1492-1499.
- [22] 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 Composite*, Vol. 34, No. 7, pp. 848-854.
- [23] 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 & Design*, Vol. 41, pp. 150-157.
- [24] Chusilp, N., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2009, "Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 11, pp. 3352-3358.