คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลผ่านการปรับปรุงด้วยวิธีคาร์บอเนชั่น
High-Strength Concrete Containing Recycled Aggregate Treated by Using Carbonation Technique.

อามีน เบ็ญอะฮ์หมัด[1,*] ปกป้อง รัตนชู[2,] อรรคเดช อับดุลมาติน[2,] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร[3] และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล[4]

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ
[2]อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ จ.นราธิวาส
[3]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ
[4]ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ
**Corresponding author; E-mail address: amin.benahmad11@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน ในอัตราส่วนผสม 75:25 โดยน้ำหนัก และแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ (NCA) ด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการคาร์บอเนชั่น 3 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 นำมวลรวมหยาบรีไซเคิลบ่มด้วย CO_2 โดยตรง (RC) วิธีที่ 2 นำมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ผ่านการแช่สารละลายแคลเซียมคาร์ไบด์แล้วบ่มด้วย CO_2 (RCC) และวิธีที่ 3 นำมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ผ่านการแช่สารละลายแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแล้วบ่มด้วย CO_2 (RCCF) ซึ่งทั้งสามวิธีทำการบ่ม CO_2 ที่ระยะเวลา 1, 3 และ 7 วัน จากนั้นนำ RCA ที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดีของแต่ละวิธีมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีต ผลการวิจัยพบว่า การปรับปรุง RCA ทั้งสามวิธีสามารถเพิ่มคุณภาพ RCA ตั้งแต่ระยะเวลาการบ่ม CO_2 ที่ 1 วัน และระยะเวลาการบ่มที่ 7 วัน ให้สมบัติทางกายภาพดีที่สุด ส่วนวิธีการปรับปรุงที่ดีที่สุดคือ วิธี RCCF เมื่อเทียบกับการปรับปรุงอีก 2 วิธี และเมื่อนำ RCA ของแต่ละวิธีที่มาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต พบว่า ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่ใช้มวลรวม RC, RCC และ RCCF มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวม RCA ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพร้อยละ 6, 12 และ 14 และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 2, 5, และ 9 ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้มวลรวม RCA ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการคาร์บอเนชั่นมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีค่าการหดตัวแบบแห้งที่ลดลง

คำสำคัญ: มวลรวมหยาบรีไซเคิล, คาร์บอเนชั่น, คุณสมบัติทางกายภาพ, กำลังอัด, โมดูลัสยืดหยุ่น

Abstract

This research aims to investigate the compressive strength, modulus of elasticity and drying shrinkage of high-strength concrete using cement and fly ash as a binder at a ratio of 75:25 by weigh. Natural coarse aggregate (NCA) was replaced by recycled coarse aggregate (RCA) which was improved its physical properties by carbonation process. There were 3 methods to enhance RCA quality as follows: 1.) recycled coarse aggregate was directly cured by CO_2 (RC), 2.) recycled coarse aggregate was soaked in calcium carbide solution and then cured with CO_2 (RCC), and 3.) recycled coarse aggregate was soaked in calcium carbide mixed with fly ash solution and cured with CO_2 (RCCF). Treated aggregates from all methods were cured with CO_2 at the ages of 1, 3 and 7 days. RCA having the best physical properties from each method was used as a coarse aggregate in the concrete. The results showed that all methods had potential for improving RCA from CO_2 curing period of 1 day whereas the curing period of 7 days exhibited the best physical properties. It is noted that RCCF method was the best process to enhance properties of RCA. The compressive strengths of concretes containing treated RCA (RC, RCC and RCCF) at 28 days were higher than that of concrete containing untreated RCA by 6, 12 and 14% and the elastic modulus was increased by 2, 5, and 9%, respectively. Additionally, drying shrinkage of the concrete was reduced with the use of carbonation-enhanced RCA aggregates.

Keywords: Recycled coarse aggregate, Carbonation, Physical properties, Compressive strength, Modulus of elasticity

1. บทนำ

โลกปัจจุบันมีความเจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว มีการก่อสร้างขึ้นมาอย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็น อาคาร สะพาน ถนน เขื่อน เป็นต้น ทุกๆงานก่อสร้างล้วนมีการใช้คอนกรีตในการก่อสร้าง ซึ่งในคอนกรีตจะมีมวลรวมเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณมากถึงสามในสี่ส่วนของปริมาตรคอนกรีตทั้งหมด

ทำให้มวลรวมมีความต้องการอย่างมากต่องานก่อสร้าง และกระบวนการที่จะได้มวลรวมมายังส่งผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การระเบิดภูเขาเพื่อนำหินปูนย่อยเป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้มวลรวมที่นำมาใช้ผสมคอนกรีตจำเป็นต้องมีคุณภาพที่ดีจึงจะได้คอนกรีตที่ดีตามความต้องการของงานก่อสร้าง

ปัจจุบันอัตราการเพิ่มขึ้นของงานก่อสร้างสูงขึ้นทุกๆปีและงานก่อสร้างทุกประเภทมีการส่งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังอัด ทำให้สถานที่รับทดสอบมีเศษคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดและเพิ่มขึ้นทุกๆวัน จึงต้องมีการกำจัดทิ้งและหาวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการต่างๆ Poon และคณะ [1] ได้นำมวลรวมจากเศษคอนกรีตทั่วไป (NC) และคอนกรีตสมรรถนะสูง (HPC) มาใช้ผสมคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวม HPC มีการพัฒนากำลังอัดเร็วกว่า NC และมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ นอกจากนี้ Tangchirapat และคณะ [2] ได้ศึกษากำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นมวลรวม พบว่ากำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป เช่นเดียวกันกับ ปกป้อง และคณะ [3] พบว่าการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีผลด้านลบต่อกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น เนื่องจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าและการดูดซึมน้ำที่มากกว่ามวลรวมธรรมชาติ อย่างไรก็ตามได้มีงานวิจัยที่ศึกษาหาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของมวลรวมจากเศษคอนกรีตให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น ทั้งการขัดผิวมอร์ต้าเก่าที่ติดกับมวลรวมออก การเคลือบด้วยสารละลาย การแช่มวลรวมในน้ำปูนซีเมนต์ [4] และการบ่มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรง [5-6] เป็นต้น ซึ่งเป็นทางเลือกที่สามารถนำมาปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิลเพื่อให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นได้

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเห็นได้ว่าการนำมวลรวมรีไซเคิลมาใช้ในคอนกรีตโดยตรง ทำให้สมบัติของคอนกรีตลดลง เนื่องจากคุณภาพของมวลรวมรีไซเคิลต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำมวลรวมรีไซเคิลมาปรับปรุงด้วยวิธีการคาร์บอเนชั่นร่วมกับการแช่สารละลายที่มีความเป็นด่างสูง นั้นคือ สารละลายแคลเซียมคาร์ไบด์อิ่มตัว เพื่อเสริมการดูดซับแคลเซียมของสารละลายและช่วยเสริมปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นของมวลรวมรีไซเคิล โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพของมวลรวมรีไซเคิลที่นำไปใช้แทนที่มวลรวมธรรมชาติในคอนกรีตกำลังสูงได้ รวมทั้งศึกษากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

ประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และเถ้าถ่านหิน (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

2.2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตก๊าซอะเซทิลีนที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมงานเชื่อมและตัดโลหะ โดยนำมาบดจนมีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้ในการปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิล

2.3 มวลรวม

มวลรวมหยาบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 5 - 19 มม (ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 3/4 นิ้ว และค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) ประกอบด้วยมวลรวมหยาบธรรมชาติใช้เป็นหินปูนย่อย (NCA) และมวลรวมรีไซเคิล (RCA) ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 150x300 มม ที่ผ่านการทดสอบโดยมีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 30 ถึง 40 เมกะปาสคาล มาย่อยด้วยเครื่องย่อยคอนกรีตแบบขบ (Jaw crusher) ส่วนมวลรวมละเอียดใช้เป็นทรายแม่น้ำ (NFA) ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์

2.4 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

คาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีจำหน่ายทั่วไป ซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 99

2.5 วิธีการศึกษา

2.5.1 วิธีการทดสอบสมบัติของเถ้าถ่านหินและแคลเซียมคาร์ไบด์

สมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินและแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ทดสอบได้แก่ ความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM C188 [7] และความละเอียดโดยวิธีร่อนแบบเปียกตามมาตรฐาน ASTM C430 [8]

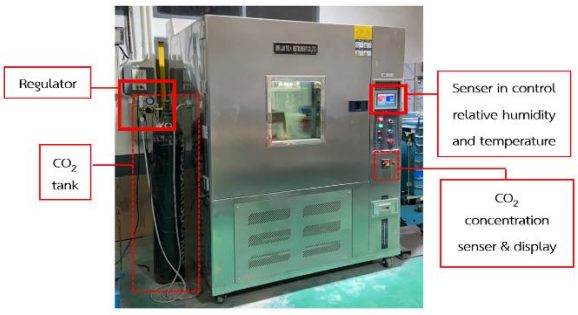
สมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหินและแคลเซียมคาร์ไบด์ทดสอบด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscope (XRF)

2.5.2 วิธีการทดสอบสมบัติของมวลรวม

สมบัติทางกายภาพของมวลรวมที่ทดสอบ ได้แก่ โมดูลัสความละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C136 [9] ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งและการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C127 [10] และความต้านทานการสึกกร่อนของหินโดยเครื่องลอสแองเจลีสตามมาตรฐาน ASTM C131 [11]

2.5.3 วิธีการปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิล

การปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิลในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการปรับปรุงด้วยกระบวนการคาร์บอเนชั่น โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 20±2 องศาเซลเซียส, ความชื้น (RH) ร้อยละ 70±5 และความเข้มข้นของ CO_2 ร้อยละ 20±3 [12-13] ดังรูปที่ 1 และใช้ระยะเวลาการบ่ม CO_2 ที่ 1, 3 และ 7 วัน เพื่อเทียบสมบัติทางกายภาพของมวลรวมรีไซเคิลหลังผ่านการปรับปรุงที่ระยะเวลาการบ่ม CO_2 แตกต่างกัน โดยมีวิธีการปรับปรุงอยู่ 3 วิธี ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบคาร์บอเนชั่น

ตารางที่ 1 วิธีการปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิล

วิธีที่	สัญลักษณ์	วิธีการปรับปรุง
1	RC	นำมวลรวมหยาบรีไซเคิลบ่มด้วย CO_2 โดยตรง
2	RCC	นำมวลรวมหยาบรีไซเคิลแช่สารละลายกากแคลเซียมคาร์ ไบด์อิ่มตัว (pH=11) 3 วัน [14] และนำออกมาตากอากาศที่อุณหภูมิห้อง 1 วัน แล้วไปบ่มด้วย CO_2
3	RCCF	นำมวลรวมหยาบรีไซเคิลแช่สารละลายกากแคลเซียมคาร์ไบด์อิ่มตัวผสมสารละลายเถ้าถ่านหินอิ่มตัว (pH=13) 3 วัน และนำออกมาตากอากาศที่อุณหภูมิห้อง 1 วัน แล้วไปบ่มด้วย CO_2

2.5.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

งานวิจัยนี้แบ่งตัวอย่างคอนกรีตกำลังสูงออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแรกคือคอนกรีตควบคุมที่ใช้มวลรวมธรรมชาติทั้งหมด (CT-NCA) ทั้งหินปูนย่อยและทรายแม่น้ำเป็นส่วนผสม กลุ่มที่สองคือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นมวลรวมรีไซเคิลแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดร่วมกับทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด (RCA) และกลุ่มที่สามมีส่วนผสมเช่นเดียวกันกับกลุ่มที่สอง แต่ใช้มวลรวมรีไซเคิลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการคาร์บอเนชั่นทั้ง 3 วิธี (RC, RCC, RCCF) มาใช้เป็นมวลรวมหยาบทั้งหมด ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุประสาน (OPC : FA) ในอัตราส่วน 75:25 [15] ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.27 ควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 150-200 มม โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ ซึ่งอัตราส่วนผสมของคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 2

มวลรวมหยาบอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งก่อนผสมคอนกรีต [3] โดยการแช่น้ำไว้ในถังเป็นเวลา 24 ชม. และขั้นตอนการผสมคอนกรีตใช้วิธี $TSMA_{P2}$ (two-stage mixing approach proportional-2) โดยแบ่งสัดส่วนการผสมออกเป็น 2 ส่วนตามข้อแนะนำของ Tam และคณะ [16] ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถช่วยให้รอยต่อระหว่างผิวของมวลรวมกับมอร์ต้าใหม่ (interface transition zone, ITZ) มีความแข็งแรงมากขึ้น และทำการหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม สูง 200 มม สำหรับทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น และหล่อคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 75x75x285 มม สำหรับทดสอบการหดตัวแบบแห้ง เมื่อเทคอนกรีตเข้าไปในแบบหล่อแล้ว ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบและนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำประปา

2.5.5 การทดสอบคอนกรีต

ทดสอบกำลังอัดที่อายุคอนกรีต 3, 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 [17] ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุคอนกรีต 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C469 [18] และทดสอบการหดตัวที่อายุคอนกรีต 0, 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C157 [19]

3. ผลการทดสอบ

3.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

สมบัติทางกายภาพของวัสดุในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 3 โดยมี OPC และFA เป็นวัสดุประสาน พบว่ามีปริมาณอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 11.35 และ 23.64 โดยน้ำหนัก และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และ 2.22 ตามลำดับ ขณะที่ CCR ที่ใช้ผสมเป็นสารละลายแคลเซียมคาร์ไบด์ พบว่ามีปริมาณอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 9.56 และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.59

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)	3.15	11.35
เถ้าถ่านหินจากโรงงาน (FA)	2.22	23.64
แคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด (CCR)	2.59	9.65

3.2 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสานและแคลเซียมคาร์ไบด์

สมบัติทางเคมีของวัสดุในงานวิจัยครั้งนี้แสดงในตารางที่ 4 โดย OPC มีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C150 TYPE I [20] และในส่วน FA พบว่า ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมไตรออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับร้อยละ 57.9 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 27.9 จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class C ที่กำหนดไว้โดยมาตรฐาน ASTM C618 [21] ส่วน CCR พบว่ามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักมีค่าเท่ากับร้อยละ 65.4 ขององค์ประกอบทางเคมีทั้งหมด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่มีปริมาณ LOI ที่สูง ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำที่ระเหยออกไปจากการทดสอบ LOI ที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง

Mix	Mix proportion (kg/m^3)						SP (%)	W/B	Slump (mm)
	OPC	FA	NFA	NCA	RCA	Water			
CT-NCA	415	140	775	970	-	150	0.4	0.27	200
RCA	415	140	775	-	970	150	0.45	0.27	165
RC	415	140	775	-	970	150	0.45	0.27	169
RCC	415	140	775	-	970	150	0.45	0.27	175
RCCF	415	140	775	-	970	150	0.45	0.27	177

ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมีของวัสดุ

Chemical composition (%)	OPC	FA	CCR
Silicon dioxide (SiO_2)	20.9	27.9	3.9
Aluminum trioxide (Al_2O_3)	4.8	14.4	2.3
Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.4	15.6	0.5
Calcium oxide (CaO)	63.3	27.9	65.4
Sulfur trioxide (SO_3)	2.7	7.1	0.7
Magnesium oxide (MgO)	1.3	2.2	0.7
Sodium oxide (Na_2O)	0.3	1.9	-
Potassium oxide (K_2O)	0.4	2.8	-
Loss on ignition (LOI)	2.9	0.2	26.5

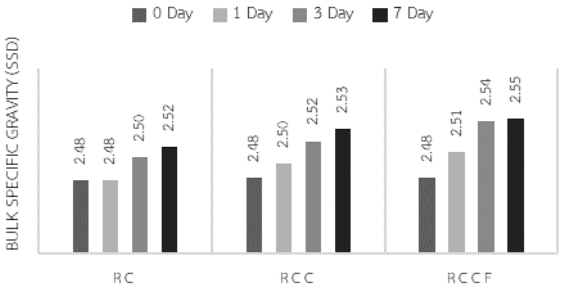
3.3 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

สมบัติสมบัติทางกายภาพของมวลรวมในงานวิจัยครั้งนี้แสดงในตารางที่ 5 โดยผลการทดสอบพบว่า RCA และ NCA มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.79 และ 7.20 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงอนุภาคของ RCA เล็กกว่า NCA และค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.48 และ 2.72, ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 5.23 และ 0.61 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า RCA มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า และค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า NCA เนื่องจาก RCA มีความพรุนจากมอร์ต้าเก่าที่ยึดเกาะผิวมวลรวม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3], [6], [22] นอกจากนี้ค่าความต้านทานการสึกกร่อนของหินโดยเครื่องลอสแองเจลีสของ RCA มีค่าสูงกว่าNCA โดยมีเท่ากับร้อยละ 29.17 ขณะที่ NCA มีค่าเท่ากับ 23.40 ทั้งนี้มีผลมาจากมอร์ต้าเก่าที่ติดกับ RCA มีความแข็งแรงน้อยกว่า NCA ขณะที่ NFA มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.43, ค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.59 และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.80

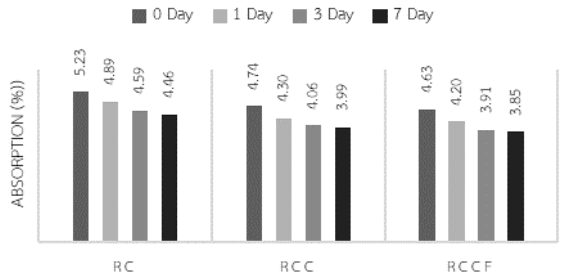
สำหรับผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของ RCA ที่ปรับปรุงด้วยกระบวนการคาร์บอเนชั่นทั้ง 3 วิธี (RC, RCC, RCCF) ได้ทดสอบสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังการปรับปรุงที่ระยะเวลาการบ่ม CO_2 1, 3 และ 7 วัน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2 โดยผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพหลังการปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิลด้วยวิธี RC, RCC และ RCCF พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งของมวลรวมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาการบ่ม CO_2 ที่นานขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 2.52, 2.53 และ 2.55 ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน ดังรูปที่ 2(ก) และในส่วนค่าการดูดซึมน้ำ มวลรวมรีไซเคิลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการคาร์บอเนชั่นสามารถลดค่าการดูดซึมน้ำได้เป็นอย่างดี เมื่อเทียบกับมวลรวม RCA ที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.23 โดยมวลรวม RC, RCC และ RCCF ที่มีการบ่ม CO_2 ที่อายุ 7 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 4.46, 3.99 และ 3.85 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2(ข) และเช่นเดียวกันกับค่าการสึกกร่อนของมวลรวมที่ลดลง มีค่าเท่ากับร้อยละ 26.75, 24.80 และ 24.10 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2(ค) ซึ่งจากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของมวลรวมรีไซเคิลที่ผ่านการปรับปรุงทั้ง 3 วิธี สามารถบอกได้ว่ากระบวนการคาร์บอเนชั่นมวลรวมรีไซเคิลสามารถช่วยให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และการปรับปรุงด้วยวิธี RCCF เป็นวิธีที่ให้ค่าการทดสอบสมบัติทางกายภาพดีที่สุด และเมื่อเทียบมวลรวมรีไซเคิลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธี RCCF กับ RCA ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง พบว่ามวลรวมรีไซเคิลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธี RCCF ทำให้ความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.82, การดูดซึมน้ำและการสึกกร่อนลดลงร้อยละ 26.38 และ 17.38 ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่า มวลรวมรีไซเคิลมีความแน่นขึ้น แข็งแรงขึ้นเนื่องจากการปรับปรุง

ตารางที่ 5 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

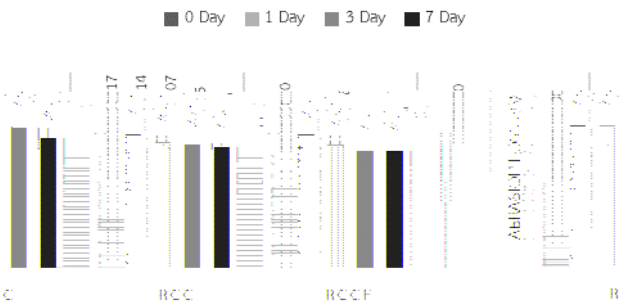
สมบัติทางกายภาพ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ	
	ทรายแม่น้ำ (NFA)	หินปูนย่อย (NCA)	มวลรวมรีไซเคิล (RCA)
โมดูลัสความละเอียด	2.43	7.20	6.79
ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)	2.59	2.72	2.48
การดูดซึมน้ำ (%)	0.80	0.61	5.23
ความต้านทานการสึกกร่อน (LA loss) (%)	N/A	23.40	29.17



รูปที่ 2(ก) ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)



รูปที่ 2(ข) ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 2(ค) ผลการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน (LA loss)

รูปที่ 2 แสดงผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของมวลรวมรีไซเคิลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคาร์บอเนชั่นทั้ง 3 วิธี

3.4 กำลังอัดของคอนกรีต

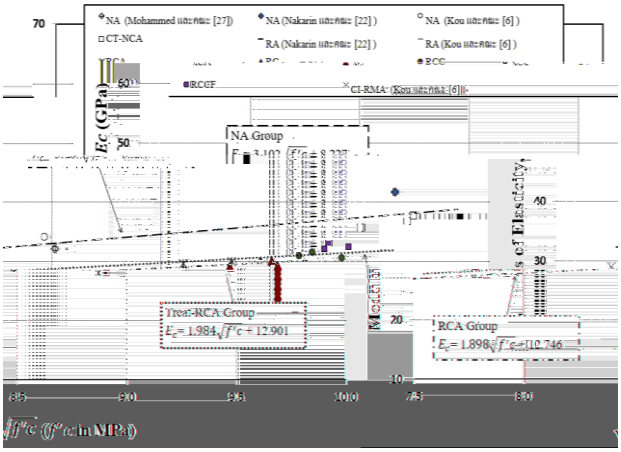
ตารางที่ 6 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT-NCA พบว่า คอนกรีต RCA มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีต CT-NCA ทุกช่วงอายุ โดยที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 56.6, 64.6 และ 75.6 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 83, 86 และ 86 ของคอนกรีต CT-NCA ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธี RCC และ RCCF ที่ช่วงอายุตั้งแต่ 3 วันขึ้นไป มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีต CT-NCA โดยคอนกรีต RCCF มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีต RCC เพียงเล็กน้อย ซึ่งคอนกรีต RCCF มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน เท่ากับ 64.4, 73.4 และ 86.3 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 95, 98 และ 97 ของคอนกรีต CT-NCA ตามลำดับ เห็นได้ว่าการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังระดับกลาง (กำลังอัด 30-40 เมกะปาสคาล) มาใช้ในคอนกรีตกำลังสูง ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต RCA มีค่าน้อยกว่าคอนกรีต CT-NCA สอดคล้องกับงานวิจัยของ Poon และคณะ [1] และ สุรศักดิ์ และคณะ [23] และเมื่อนำ RCA มาปรับปรุงด้วยกระบวนการคาร์บอนเนชั่นวิธี RC กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีต RCA แต่เมื่อนำมาปรับปรุงด้วยวิธี RCC และ RCCF ที่มีการแช่สารละลายด่างทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิลด้วยกระบวนการคาร์บอเนชั่นที่เสริมด้วยการแช่สารละลายด่าง ช่วยให้มวลรวมรีไซเคิลแน่นขึ้น ลดรูพรุนของมอร์-ต้าเก่าที่ติดอยู่กับมวลรวม ส่งผลให้ RCA มีความแข็งแรงมากขึ้นจึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลมีกำลังอัดใกล้เคียงคอนกรีต CT-NCA

ตารางที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีต

Mix	Compressive Strength (MPa) - Normalized Compressive Strength for NCA (%)		
	3-Days	7-Days	28-Days
CT-NCA	68.0 – (100)	75.1 – (100)	88.0 – (100)
RCA	56.6 – (83)	64.6 – (86)	75.6 – (86)
RC	59.1 – (87)	68.4 – (91)	80.1 – (91)
RCC	64.1 – (94)	71.7 – (96)	85.0 – (97)
RCCF	64.4 – (95)	73.4 – (98)	86.3 – (98)

3.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 3 โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วันของคอนกรีต CT-NCA, RCA, RC, RCC และ RCCF เท่ากับ 37.0, 29.5, 30.1 และ 32.4 จิกะปาสคาล ตามลำดับ และเมื่อเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต RCA กับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลผ่านการปรับปรุง (RC, RCC และ RCCF) พบว่าคอนกรีต RC, RCC และ RCCF มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าคอนกรีต RCA ร้อยละ 2, 5, และ 9 ตามลำดับ สังเกตได้จากรูปที่ 2 เส้นแนวโน้มของกลุ่ม Treat-RCA สูงกว่าเส้นแนวโน้มของกลุ่ม RCA ประมาณร้อยละ 3.6 เมื่อเทียบที่กำลังอัดเท่ากันตามสมการโมดูลัสยืดหยุ่นของกลุ่ม Treat-RCA และ RCA ซึ่งจากผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า คอนกรีต RC มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kou และคณะ [6] และ Luo และคณะ [24] โดยการศึกษาครั้งนี้มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 และการปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิลด้วยวิธี RCCF ที่มีการแช่สารละลายแคลเซียมคาร์ไบด์อิ่มตัวผสมสารละลายเถ้าถ่านหินอิ่มตัว มีความเป็นด่างสูง สามารถเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตให้ดีขึ้นถึงร้อยละ 9 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลไม่ผ่านการปรับปรุง และผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต CT-NCA มีค่าต่ำกว่างานวิจัยของนครินทร์ และคณะ [22] และ Kou และคณะ [6] เนื่องจากหินปูนย่อยที่นำมาใช้ในครั้งนี้มีค่าการ สึกกร่อน (LA Loss) มากกว่างานวิจัยที่ผ่านมา [22], [6]

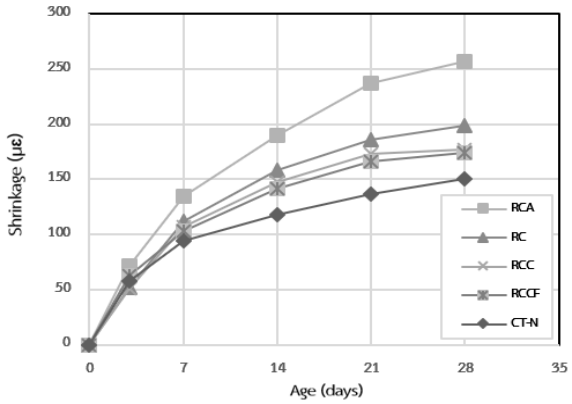


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

3.6 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเป็นสมบัติของคอนกรีตที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงยิ่งมีการใช้มวลรวมรีไซเคิลในส่วนผสมของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมรีไซเคิลมีรูพรุนของมอร์ต้าเก่า มีค่าการดูดซึมน้ำสูง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยจากธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งคอนกรีตทุกส่วนผสมมีการหดตัวแบบแห้งอย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 1 ถึง 7 วัน และจะค่อยๆลดลงหลังจากอายุ 14 วัน โดยที่อายุ 28 วัน คอนกรีต RCA มีค่าการหดตัวแบบแห้งสูงอยู่ที่ 257 ไมโครสเตรน และคอนกรีต CT-NCA มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 150 ไมโครสเตรน เนื่องจาก NCA มีการดูดซึมน้ำต่ำ และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่า RCA นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลผ่านการปรับปรุงทั้ง 3 วิธี (RC, RCC และ RCCF) มีค่าการหดตัวแบบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีต RCA โดยคอนกรีต RC, RCC และ RCCF มีค่าการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 28 วันเท่ากับ 199, 177 และ 173 ไมโครสเตรน ตามลำดับ โดยที่คอนกรีต RC สามารถลดการหดตัวแบบแห้งอยู่ร้อยละ 22.5 เมื่อเทียบกับคอนกรีต RCA ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kou และคณะ [6] และ Xuan และคณะ [26] ที่พบว่าการ

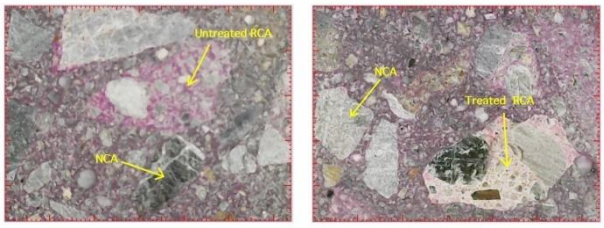
ปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิลด้วยกระบวนการคาร์บอเนชั่นสามารถลดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากผิวของมวลรวมรีไซเคิลมีความแน่น ทึบขึ้น ลดช่องว่างและค่าการดูดซึมน้ำ จึงทำให้ค่าการหดตัวแบบแห้งลดลง ในขณะที่คอนกรีต RCC และ RCCF ที่ใช้มวลรวมผ่านการแช่สารละลายด่างมีค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยกว่าคอนกรีต RCA อยู่ที่ร้อยละ 31.1 และ 32.7 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิลที่ผ่านการแช่สารละลายด่างสูงแล้วนำไปคาร์บอเนชั่นสามารถลดค่าการหดตัวแบบแห้งได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการปรับปรุงโดยการคาร์บอเนชั่นเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของคอนกรีต

3.7 ความเป็นด่างของมวลรวมในคอนกรีต

รูปที่ 5 เมื่อนำสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนมาฉีดที่ผิวคอนกรีตเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีผิวคอนกรีตระหว่างคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (RCA) และคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผ่านการปรับปรุง (RCCF) ถ้าผิวคอนกรีตมีความเป็นด่าง (pH>9) การฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีผิวเป็นสีชมพู และหากผิวคอนกรีตมีความเป็นด่างลดลง (pH<9) การฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีผิว ซึ่งพบว่าบริเวณมวลรวมรีไซเคิลผ่านการปรับปรุง RCCF ที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีผิว และบริเวณที่เป็นเนื้อมอร์ต้าของคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีชมพู เช่นเดียวกันกับคอนกรีต RCA มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีชมพูทั้งผิวคอนกรีต จะเห็นได้ว่ามวลรวมรีไซเคิลที่ผ่านการปรับปรุง (RCCF) มีความเป็นด่างลดลงเนื่องจากกระบวนการคาร์บอเนชั่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kou และคณะ [6] ที่พบว่ามอร์ต้าเก่ารีไซเคิลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการคาร์บอเนชั่นจะทำให้เนื้อของมอร์ต้าเก่ารีไซเคิลมีความเป็นด่างลดลง และผิวของมอร์ต้าเก่ารีไซเคิลแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และการหดตัวแบบแห้งลดลง เมื่อเทียบกับมอร์ต้าเก่ารีไซเคิลที่ไม่ผ่านการปรับปรุง



(ก) คอนกรีต RCA (ก) คอนกรีต RCCF

รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลการฉีดพ่นสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนบนผิวคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบงานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) กระบวนการคาร์บอเนชั่นสามารถช่วยปรับปรุงให้สมบัติทางกายภาพของมวลรวมรีไซเคิลดีขึ้นตั้งแต่อายุการบ่ม CO_2 ที่ 1 วัน และดีขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น

2) การนำมวลรวมรีไซเคิลแช่สารละลายความเป็นด่างสูง ไม่ว่าจะเป็นวิธีการปรับปรุง RCC และ RCCF ส่งผลให้มวลรวมมีสมบัติทางกายภาพที่ดีกว่าการบ่ม CO_2 โดยตรงเพียงอย่างเดียว

3) การปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิลด้วยวิธี RCCF ให้ผลของสมบัติทางกายที่ดีที่สุด และเมื่อเทียบกับมวลรวมรีไซเคิลไม่ผ่านการปรับปรุง พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.82, การดูดซึมน้ำลดลงร้อยละ 26.38 และการสึกกร่อนลดลงร้อยละ 17.38

4) การใช้มวลรวมรีไซเคิลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธี RCCF ในส่วนผสมคอนกรีตสามารถให้กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน เพิ่มขึ้นได้ร้อยละ 14 และ 9 ตามลำดับ และยังสามารถลดลงการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 28 วัน ได้ถึงร้อยละ 32.7 เมื่อเทียบกับคอนกรีต RCA

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการทุนสนับสนุนมูลฐาน (Fundamental Fund 2565 : โครงการเทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ Thailand 4.0)

เอกสารอ้างอิง

[1] Poon C.S., Shui Z.H. and Lam L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol. 18, pp. 461-468.

[2] 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, No. 8, pp. 1812-1819.