Science and Engineering Connect, ISSN 3027-7914 (Online)
Vol. 47 No. 3 pp. 257-277 (2024)

บทความวิจัย (Research Article)

ผลกระทบของขนาดมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อสมบัติการไหลและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง

Effect of Coarse Recycled Aggregate Size on Flowability and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete

พลพันธ์ เศรษฐพิทยากุล, บุราฉัตร กิตติกรจรัส, อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ*
Ponpan Setpittayakul, Burachat Kittikornjarus, Anuwat Attachaiyawuth*
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา และ กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี ประเทศไทย
Faculty of Engineering at Sriracha and The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Group, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi, Thailand
กิตติศักดิ์ กลัดกลีบ, ศุภวิชญ์ โทมา, ชยภัทร ดำทอง
Kittisak Kladkleeb, Supawit Thoma, Chayaphat Domthong
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี ประเทศไทย
Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi, Thailand
*Corresponding author E-mail: anuwat@eng.src.ku.ac.th

Received 15 July 2024; Revised 13 September 2024; Accepted 20 September 2024

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ : คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างหลักที่ใช้มากที่สุดในโลก การผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของคอนกรีตปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 8 ของการปล่อยแก๊ส CO_2 ทั้งหมดทั่วโลก หนึ่งในวิธีการที่ได้รับความนิยมในการลดการปล่อยแก๊สดังกล่าวคือการนำคอนกรีตที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ในรูปของมวลรวม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อนำเสนอสัดส่วนขนาดมวลรวมรีไซเคิลที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง โดยพิจารณาทั้งสมบัติการไหลและกำลังรับแรงอัด เพื่อเป็นข้อมูลโน้มน้าวให้ผู้ใช้คอนกรีตในประเทศไทยหันมาใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมากขึ้น วิธีการนี้สามารถลดการใช้งานหินธรรมชาติที่ได้มาจากการทำลายธรรมชาติ ลดการเกิดแก๊สเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดภาวะโลกร้อนและภาวะโลกเดือดในปัจจุบัน

วิธีดำเนินการวิจัย : การศึกษานี้พิจารณาสัดส่วนของมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 1/2 นิ้ว และ 3/8 นิ้ว ที่อัตราส่วน 0:100 20:80 40:60 60:40 80:20 และ 100:0 ศึกษาส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ร้อยละ 35 40 และ 45 ประเมินสมบัติการไหลโดยพิจารณาค่าการไหลแผ่และระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐาน ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน

ผลการวิจัย : ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษสูงถึงร้อยละ 1.4–1.5 เมื่อใช้มวลรวมหยาบขนาด 1/2 นิ้วเพียงอย่างเดียว ซึ่งส่งผลกระทบต่อราคาของคอนกรีต เนื่องจากสารลดน้ำพิเศษมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานอยู่ในช่วง 3.8–28 วินาที ซึ่งระยะเวลาน้อยกว่า 5 วินาทีจะมีความเสี่ยงเกิดการแยกตัว คอนกรีตที่มีระยะเวลาน้อยกว่า 5 วินาทีพบมากในส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 40 และ 45 อย่างไรก็ตาม ไม่พบการแยกตัวในทุกส่วนผสม กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 29.5 เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับอายุ 3 วัน สัดส่วนของขนาดมวลรวมหยาบ 1/2:3/8 นิ้ว ที่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดสำหรับส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 35 40 และ 45 คือ 20:80 40:60 และ 80:20 โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 592.8 489.3 และ 424.8 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ
สรุป : การใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมาผลิตคอนกรีตใหม่ควรคำนึงถึงสัดส่วนขนาดมวลรวมเพื่อให้ได้คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองที่มีสมบัติที่เหมาะสมที่สุด ไม่แนะนำให้ใช้มวลรวมขนาดเดียว เนื่องจากต้องใช้สารลดน้ำพิเศษปริมาณสูงและไม่ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด สัดส่วนที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ W/C จากผลการทดสอบสัดส่วนของขนาดมวลรวมหยาบ 1/2:3/8 นิ้ว ที่แนะนำคือ 20:80 40:60 และ 80:20 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ W/C ร้อยละ 35 40 และ 45 ตามลำดับ
การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติ : วิศวกรและผู้ใช้คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองสามารถประยุกต์ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ได้โดยใช้สัดส่วนของขนาดมวลรวมหยาบ 1/2:3/8 นิ้ว ที่เหมาะสมที่สุดต่อส่วนผสมที่มี W/C ร้อยละ 35 40 และ 45 ได้ ส่วนผสมเหล่านี้ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงแม้ว่าจะใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้งหมด ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ได้ในหลากหลายโครงการเพื่อส่งเสริมสมรรถนะและความยั่งยืนของการผลิตคอนกรีต

คำสำคัญ : มวลรวมหยาบรีไซเคิล, สัดส่วนของขนาด, ระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐาน, กำลังรับแรงอัด

Abstract

Background and Objectives: Concrete is the most widely used construction material globally. The production of cement, the primary component of concrete, accounts for approximately 8% of global carbon dioxide (CO_2) emissions. One popular method for reducing such gas emissions involve the use of recycled concrete aggregate. The present research then aimed to determine an optimum size ratio for recycled aggregate in self-compacting concrete, taking into account both the flowability and compressive strength. The aim is to provide convincing information to concrete users in Thailand to increase the use of coarse recycled

aggregate. The approach can reduce the reliance on natural gravel, mitigate environmental degradation and decrease the greenhouse effect by lowering CO_2 emissions, which are primary contributors to global warming and the recent phenomenon of global boiling.

Methodology: The present study considered coarse aggregate size ratios of 1/2 inch and 3/8 inch at 0:100, 20:80, 40:60, 60:40, 80:20, and 100:0. Mixtures with water-to-cement (W/C) ratios of 35%, 40%, and 45% were tested. Flowability was determined by considering the slump flow and the flow time through a standard funnel. Compressive strength was determined at 3, 7, and 28 days.

Main Results: The results indicate that higher amounts of superplasticizer, at 1.4–1.5%, were required when using only the ½-inch coarse aggregate size; this would clearly adversely affects the cost of concrete. The flow time through the standard funnel ranged from 3.8 to 28 seconds. A flow time of shorter than 5 seconds posed a risk of segregation. Concrete mixtures with flow times shorter than 5 seconds were observed in samples with water-to-cement (W/C) ratios of 35% and 40%. However, no segregation was found in any mixtures. The average compressive strength increased by approximately 29.5% at 28 days when compared to that at 3 days. The ratio of coarse aggregate sizes (1/2 inch to 3/8 inch) that yielded the highest compressive strengths in the mixtures with W/C ratios of 35%, 40%, and 45% were 20:80, 40:60, and 80:20, respectively, with compressive strengths of 592.8, 489.3, and 424.8 ksc.

Conclusions: Utilizing coarse recycled aggregate for new concrete production should take into account the size ratio of the aggregate to achieve self-compacting concrete with optimal properties. It is not recommended to use a single aggregate size as doing so requires a higher amount of superplasticizer and may not yield a specimen with the highest compressive strength. A suitable size ratio depends on the water-to-cement (W/C) ratio. The recommended size ratios when using aggregates of 1/2 inch to 3/8 inch are 20:80, 40:60, and 80:20 for concrete with W/C ratios of 35%, 40%, and 45%, respectively.

Practical Application: Engineers and self-compacting concrete users can apply the findings from the present research by utilizing the optimal coarse aggregate size ratios of 1/2 inch to 3/8 inch in a mixture with water-to-cement (W/C) ratio of either 35%, 40%, and 45%. These mixtures would result in concretes achieving high compressive strengths, even when

using 100% coarse recycled aggregate. These data can be effectively applied to various projects to enhance the performance and sustainability of concrete production.

Keywords: Coarse Recycled Aggregate, Size Ratio, Flow Time through the Standard Funnel, Compressive Strength

Introduction

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและการพัฒนาสิ่งปลูกสร้างในปัจจุบันได้นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความต้องการวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างอาคาร สะพาน ถนน และโครงสร้างพื้นฐานอื่น ๆ มาอย่างยาวนานเนื่องจากใช้งานง่าย มีกำลังรับแรงอัดสูง สามารถหล่อให้เป็นรูปตามต้องการ เป็นวัสดุที่มีความทนทาน และราคาถูกเมื่อเทียบกับโครงสร้างเหล็ก ซึ่งคอนกรีตเป็นวัสดุที่ถูกผลิตและใช้งานมากที่สุดในโลก โดยมากกว่า 4 พันล้านลูกบาศก์เมตรถูกใช้งานในแต่ละปี ซึ่งใช้ทรัพยากรธรรมชาติในปริมาณมหาศาล เช่น หิน ดิน และทราย การผลิตคอนกรีตมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง ไม่ว่าจะเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มากเกินไปซึ่งคอนกรีตมีส่วนผสมหลักคือปูนซีเมนต์ซึ่งได้มากจากการระเบิดภูเขาเพื่อนำหินปูนมาเผาตามกระบวนการจนได้ผลิตภัณฑ์ผงปูนซีเมนต์ออกมา การผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของคอนกรีตนี้ปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 8% ของการปล่อยแก๊ส CO_2 ทั้งหมดทั่วโลก ทำให้เกิดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน การแก้ปัญหานี้จำเป็นต้องหาวิธีการที่ยั่งยืนในการใช้ทรัพยากรและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

หนึ่งในวิธีการที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมาคือการนำคอนกรีตที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ (Recycled Concrete) ด้วยวิธีการหลากหลาย การนำคอนกรีตที่ผ่านการใช้งานแล้วมาผ่านกระบวนการรีไซเคิลไม่เพียงแต่ช่วยลดปริมาณขยะก่อสร้างที่ต้องกำจัด แต่ยังช่วยลดความต้องการในการสกัดหินและทรายจากธรรมชาติอีกด้วย กระบวนการนี้ยังสามารถลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตปูนซีเมนต์ที่เป็นส่วนประกอบหลักของคอนกรีตได้ มีนักวิจัยได้ทบทวนงานวิจัยการนำคอนกรีตใช้แล้วกลับมารีไซเคิลในช่วงปี ค.ศ. 2000–2017 พบว่าสามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติได้ถึง 60% และลดปริมาณขยะที่ต้องกำจัดได้มากกว่า 50% นอกจากนี้การใช้คอนกรีตรีไซเคิลสามารถลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 30% [1] เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คอนกรีตใหม่ อย่างไรก็ตาม การนำคอนกรีตใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ยังต้องเผชิญกับความท้าทายหลายประการ เช่น ความแข็งแรงของคอนกรีตรีไซเคิลที่อาจต่ำกว่าคอนกรีตใหม่ อัตราการดูดซึมน้ำที่สูงกว่ามวลรวมธรรมชาติมาก รวมถึงปัญหาการควบคุมคุณภาพของวัสดุรีไซเคิลที่ไม่สม่ำเสมอ ด้วยเหตุนี้ การวิจัยและพัฒนากระบวนการรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพและได้มาตรฐานจึงมีความสำคัญยิ่งต่อการส่งเสริมการใช้คอนกรีตรีไซเคิลในวงกว้าง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความเป็นไปได้ในการนำคอนกรีตที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่เป็นมวลรวมหยาบรีไซเคิล

ศึกษาผลกระทบของขนาดคละของมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อสมบัติการไหลและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง แม้ว่าการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติจะทำให้สมบัติหลายประการของคอนกรีตแย่ลง แต่หากใช้ในปริมาณที่เหมาะสมก็อาจเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการก่อสร้างได้ การวิจัยนี้จะช่วยส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง คณะผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลโน้มน้าวให้ผู้ใช้คอนกรีตในประเทศไทยหันมาใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมากขึ้น ลดการใช้งานหินธรรมชาติที่ได้มาจากการทำลายธรรมชาติ ลดปริมาณการเกิดแก๊สเรือนกระจก ลดการปล่อย CO_2 ที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดภาวะโลกร้อนและภาวะโลกเดือดในปัจจุบัน

Tam และคณะ [1] ได้ทบทวนงานวิจัยการใช้มวลรวมรีไซเคิลในช่วงปี ค.ศ. 2000–2017 สามารถสรุปได้ว่าการใช้มวลรวมรีไซเคิลในงานก่อวิศวกรรมโยธาเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนที่ช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม แต่จะต้องพัฒนามาตรฐาน หรือกฎหมายให้ทันซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการส่งเสริมการใช้งานอย่างแพร่หลาย อุปสรรคที่สำคัญของการใช้มวลรวมรีไซเคิลคือ การขาดความรู้ความเข้าใจ เกี่ยวกับการใช้งานมวลรวมรีไซเคิล การควบคุมคุณภาพมวลรวมหรือคอนกรีต ดังนั้นจำเป็นต้องเพิ่มความรู้ความเข้าใจให้แก่วิศวกรหรือผู้เกี่ยวข้อง เพื่อเพิ่มปริมาณการใช้มวลรวมรีไซเคิล ความทนทานของคอนกรีตเป็นอีกสมบัติที่สำคัญในการพิจารณาการใช้งานคอนกรีต Thomas และคณะ [2] ได้ศึกษาความทนทานของคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Aggregate Concrete, RAC) ในสภาพแวดล้อมที่มีความรุนแรง พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตรีไซเคิลลดลงประมาณ 3% เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไปเมื่อใช้มวลรวมรีไซเคิลคุณภาพสูง และมีอัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน W/C และปริมาณการแทนที่ของมวลรวมรีไซเคิล จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตรีไซเคิลลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการแทนที่มวลรวมรีไซเคิลในปริมาณมาก ผู้วิจัยสรุปว่าการใช้มวลรวมรีไซเคิลในคอนกรีตที่มี W/C ต่ำสามารถลดความแตกต่างด้านความทนทานระหว่างคอนกรีตรีไซเคิลและคอนกรีตทั่วไปได้ และแนะนำให้ลดอัตราส่วน W/C ลดลง 0.1 สำหรับคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการแทนที่มวลรวมหยาบ 100% และลดลง 0.05 สำหรับคอนกรีตรีไซเคิลในสภาพแวดล้อมที่มีการเกิดคาร์บอเนชั่น Zhihui Liu [3] ได้ทบทวนงานวิจัยคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล (RCA) ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา พบว่าวิธีการออกแบบผสมที่ใช้ส่วนใหญ่ยังไม่มีวิธีการที่แน่นอน และมักใช้วิธีการทดสอบแบบลองผิดลองถูก (Trial-and-Error Method) ซึ่งอาจไม่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล (High-Strength Recycled Aggregate Concrete, HSRAC) จะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของมวลรวมรีไซเคิลเพิ่มขึ้น โดยปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมคือไม่เกินร้อยละ 30 เช่นเดียวกับกำลังรับแรงดึง การซึมผ่านของน้ำใน HSRAC มักเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมวลรวมรีไซเคิลเพิ่มขึ้น ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (Resistance to Chloride Ion Diffusion) ลดลงเมื่อปริมาณมวลรวมรีไซเคิลเพิ่มขึ้น และการต้านทานคาร์บอเนชั่น (Carbonation Resistance) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณมวลรวมรีไซเคิลเพิ่มขึ้น เห็นได้ว่าสมบัติด้านความทนทานแย่ลงเมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมรีไซเคิล ใน ปี ค.ศ. 2024 Liang และคณะ [4] ได้ศึกษาการเพิ่มปริมาณน้ำและวิธีการเติมน้ำต่อประสิทธิภาพของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล (Recycled Aggregate Concrete, RAC) พบว่าการเติมน้ำเพิ่มเติมปริมาณร้อยละ 100 ของความสามารถในการดูดซึมน้ำของ

มวลรวม (Water Absorption, WA) ทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้น (Workability) แต่ส่งผลกระทบเชิงลบต่อสมบัติทางกลและความทนทาน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride Ion Diffusion Coefficient) ลดลงเมื่อใช้วิธีการเติมน้ำล่วงหน้าด้วยปริมาณร้อยละ 75 ของ WA และความต้านทานการเกิดคาร์บอเนชั่น (Carbonation Resistance) ที่มีการเติมน้ำล่วงหน้าด้วยปริมาณร้อยละ 75 ของ WA สูงกว่าวิธีการชดเชยน้ำในขั้นตอนผสม สรุปได้ว่าการใช้วิธีการเติมน้ำล่วงหน้าด้วยปริมาณร้อยละ 75 WA เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติทางกลและความทนทานของ RAC ได้ มีกรณีศึกษาของการประยุกต์มวลรวมหยาบรีไซเคิลกับคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) ในปี 2023 Sua-iam และ Makul [5] ได้ศึกษาวิจัยกรณีศึกษาอิทธิพลของการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate, RCA) และการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ (Polymer-based Coating) ต่อสมบัติของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองโดยมีการทดลองใช้วิธีการเคลือบพอลิเมอร์สองวิธีเพื่อประเมินผลกระทบต่อการทำงานและสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การศึกษาได้เตรียมส่วนผสมของ SCC โดยใช้ทรายจากแม่น้ำ (Natural Fine Aggregate, NFA) และหินปูนบด (Natural Coarse Aggregate, NCA) และมีการใช้ RCA เป็นการแทนที่ NFA และ NCA ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C33 ผลการวิจัยพบว่าการแทนที่ NCA ด้วย RCA และการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ส่งผลให้ค่าการไหลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้น จำเป็นต้องเพิ่มสารลดน้ำพิเศษช่วยให้สามารถทำงานได้ จากผลการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นซึ่งเป็นบางส่วนของงานวิจัยทั่วโลกในช่วง 10–20 ปีที่ผ่านมาพบว่ามีผลลัพธ์ไปในทางเดียวกันคือ มวลรวมรีไซเคิลสามารถใช้แทนที่มวลรวมธรรมชาติได้บางส่วนหรือแทนที่ได้ทั้งหมด แต่จะส่งผลต่อสมบัติทั้งทางกายภาพ ทางกล และทางเคมี โดยมากจะส่งผลทางลบ ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ความทนทานลดลง อัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ความทนทานต่อการขัดสีลดลง ความต้านทานต่อคลอไรด์หรือคาร์บอเนชั่นลดลง เป็นต้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ชัดเจนในการศึกษาขนาดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง โดยพิจารณาขนาดมวลรวม 1/2 นิ้ว และ 3/8 นิ้ว ตามสัดส่วนต่าง ๆ ต่อสมบัติการไหลและกำลังรับแรงอัด เพื่อเป็นข้อมูลให้วิศวกรและผู้เกี่ยวข้องได้นำไปประยุกต์กับโครงการของตัวเองได้

Research Methodology

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุที่หาได้ในประเทศไทย สามารถหาได้ตามท้องตลาดทั่วไป โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. เล่ม 15-2555 [6] น้ำประปาทั่วไป มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution) แสดงดัง Figure 1 ใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท F ชนิด polycarboxylic ether (PCE) และมวลรวมหยาบที่ใช้เป็นคอนกรีตรีไซเคิลทั้งหมด โดยนำตัวอย่างก้อนคอนกรีตที่วิบัติจากการทดสอบมาเข้าเครื่องย่อยคอนกรีตที่สามารถปรับขนาดหลังย่อยได้ จากนั้นนำมาร่อนแยกเป็นสองขนาดคือ ขนาดผ่านตะแกรง 1 นิ้ว ค้าง 1/2 นิ้ว (ประมาณ 0.95 ซม.) ขนาดผ่านตะแกรง 1/2 นิ้ว ค้าง 3/8 นิ้ว (ประมาณ 1.25 ซม.)

สมบัติของวัสดุที่ใช้แสดงดัง Table 1 และตัวอย่างของขนาดมวลรวมหยาบรีไซเคิลแสดงดัง Figure 2

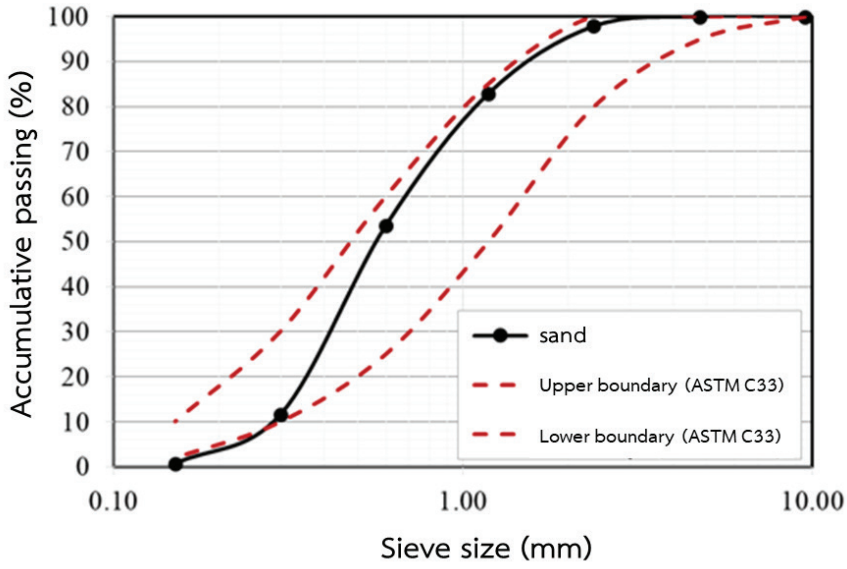

Figure 1 Particle size distribution of fine aggregates

Figure 2 Samples of coarse recycled aggregates used in this work

Table 1 Materials properties

Material	Property
Portland cement type 1	Conforming to TIS Vol. 15-2555
Water	Tab water
Fine aggregate	River sand with specific gravity of 2.65, passing sieve No.4, Fineness modulus of 2.69 and water absorption of 0.81%
Coarse aggregate	Recycled concrete with size of
Superplasticizer type F	Polycarboxylic ether (PCE) with specific gravity of 1.08

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง

การออกแบบส่วนผสมดำเนินการตามข้อแนะนำของ Japan Society of Civil Engineer JSCE, Recommendation for Self-Compacting Concrete [7] โดยใช้อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ร้อยละ 45 (s/m 45%) ใช้อัตราส่วนมวลรวมหยาบต่อคอนกรีตร้อยละ 30 (G/C 30%) และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Water to cement ratio, W/C) ร้อยละ 35 40 และ 45 โดยหลังจากนี้จะแทนด้วย W/C เมื่อพิจารณาออกแบบตามอัตราส่วนนี้แล้วจะได้อัตราส่วนวัสดุทั้งหมดสำหรับคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองตาม Table 2 เมื่อมวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตพิจารณาต่อ 1 หน่วยปริมาตร ดังนั้นการปรับค่า W/C จึงต้องปรับปริมาณปูนซีเมนต์ไปพร้อมกันเพื่อให้ได้ปริมาตรคอนกรีต 1 หน่วยปริมาตร เนื่องจากน้ำและปูนซีเมนต์มีความถ่วงจำเพาะไม่เท่ากัน จึงทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ใน Table 2 ถูกปรับตามค่า W/C ปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงดัง Table 3 ศึกษา W/C ร้อยละ 35 40 และ 45 ร่วมกับสัดส่วนมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 1/2 นิ้ว : 3/8 นิ้ว เท่ากับ 0:100, 20:80, 40:60, 60:40, 80:20 และ 100:0 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการเตรียมส่วนผสมและทดสอบนั้น มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีไม่เพียงพอสำหรับ 1 ตัวอย่าง จึงทำให้ส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 45 ร่วมกับสัดส่วนมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 1/2 นิ้ว : 3/8 นิ้ว เท่ากับ 100:0 ไม่มีผลการทดสอบ ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับส่วนผสมโดยกำหนดให้ส่วนผสมต้องมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 60–80 ซม.

Table 2 Material quantities used per cubic meter of concrete

W/C	Material weight (kg)				
	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Superplasticizer	Water
35 %	575	820	795	Vary	200
40 %	535				215
45 %	500				225

Table 3 Parameters studied in this work

Specimen	W/C (% by weight)	Size ratio 1/2:3/8 (inch)	SP/C (% by weight)
1	35	0:100	Vary to achieve slump flow diameter of 60–80 cm.
2		20:80	
3		40:60	
4		60:40	
5		80:20	
6		100:0	
7	40	0:100	
8		20:80	
9		40:60	
10		60:40	
11		80:20	
12		100:0	
13	45	0:100	
14		20:80	
15		40:60	
16		60:40	
17		80:20	

ขั้นตอนการผสมคอนกรีต

ขั้นตอนการผสมคอนกรีตอ้างอิงจากงานวิจัยในช่วงปี ค.ศ. 2016–2022 [8–11] โดยเริ่มต้นจากการผสมวัสดุแห้งได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทราย และมวลรวมหยาบรีไซเคิล เข้าด้วยกันและผสมเป็นเวลา 30 วินาที ด้วยเครื่องผสมคอนกรีตชนิด Pan type ที่มีความเร็ว 50 รอบต่อนาที จากนั้นนำน้ำที่ผสมสารลดน้ำพิเศษเตรียมไว้แล้วเทลงในเครื่องผสมและผสมเป็นเวลา 120 วินาที จะได้ส่วนผสมคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองที่พร้อมนำไปทดสอบค่าการไหลแผ่และระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานต่อไป ขั้นตอนการผสมคอนกรีตแสดงดัง Figure 3

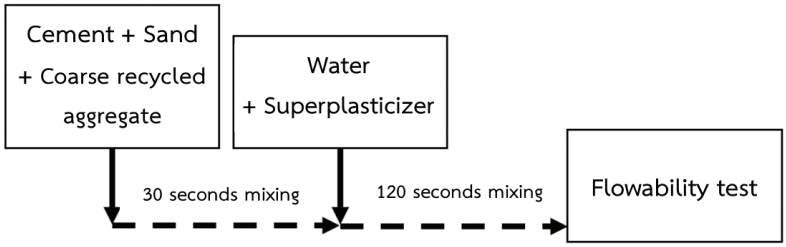

Figure 3 Mixing procedures

วิธีการทดสอบสมบัติการไหลของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง

การทดสอบสมบัติการไหลของคอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบคือ ทดสอบค่าการไหลแผ่เพื่อระบุความสามารถในการไหลของคอนกรีตซึ่งคอนกรีตควรมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 60-75 ซม. การวัดค่าการไหลแผ่จะวัดสองครั้งตั้งฉากกันดัง Figure 4 และนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นค่าการไหลแผ่ของส่วนผสม [11] และทดสอบระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานเพื่อระบุค่าความหนืดของคอนกรีตโดยใส่คอนกรีตให้เต็มกรวยทดสอบจากนั้นเริ่มจับเวลาเมื่อปล่อยให้คอนกรีตไหลออกจนเห็นแสงลอดจากปลายกรวยเมื่อมองจากด้านบนให้หยุดเวลา ระยะเวลาที่วัดคือระยะเวลาไหลผ่านกรวยทดสอบซึ่งควรมีค่าไม่น้อยว่า 5 วินาที เนื่องจากคอนกรีตจะมีความเสี่ยงต่อการแยกตัว (ไหลเร็วเกินไป) และไม่ควรมีค่าเกิน 60 วินาที เพราะคอนกรีตจะมีความหนืดเกินไป (ไหลช้าเกินไป) ไม่สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ [12] ทุกส่วนผสมจะถูกทดสอบเหมือนกันทุกประการโดยจะทดสอบเพียงครั้งเดียวหลังผสม ไม่ทดสอบซ้ำเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการสูญเสียมอร์ตาร์ที่ติดกับอุปกรณ์เพราะปริมาณมอร์ตาร์ที่ติดค้างกับอุปกรณ์นั้นไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความหนืด หากส่วนผสมมีความหนืดมากจะสูญเสียมอร์ตาร์มาก ปัจจัยเรื่องรูปร่างของมวลรวมหยาบรีไซเคิลถูกตั้งสมมติฐานให้มีรูปร่างใกล้เคียงกันในทุกส่วนผสม อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบค่าการไหลแผ่และระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานแสดงดัง Figure 4 และ Figure 5 ตามลำดับ

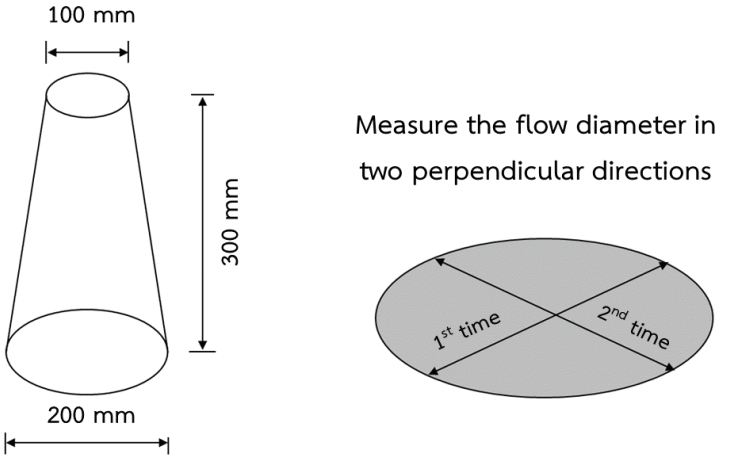

Figure 4 Flow diameter measurement

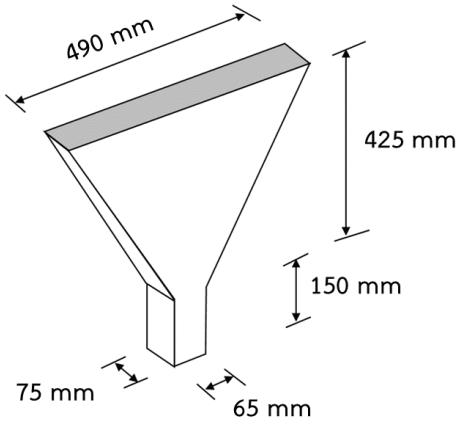

Figure 5 Size of standard funnel for viscosity test of self-compacting concrete

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบกำลังรับแรงอัด

หลังจากทดสอบสมบัติการไหลของคอนกรีตเสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำคอนกรีตไปเข้าแบบหล่อเพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้แบบหล่อรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ความสูง 20 ซม. จำนวน 9 ตัวอย่าง เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน อย่างละ 3 ตัวอย่าง โดยในขั้นตอนการหล่อตัวอย่างมีการเคาะข้างแบบเล็กน้อยเพื่อให้ส่วนผสมเต็มแบบหล่อ แกะแบบเมื่อครบ 24 ชม. หลังผสมและนำไปบ่มในน้ำจนได้อายุครบกำหนดทดสอบ การทดสอบกำลังรับแรงอัดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C39 [13]

Results and Discussion

จากการทดสอบที่ได้ดำเนินการตามขั้นตอนใน Research Methodology สามารถแสดงผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐาน และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองได้ดัง Table 4 และสามารถอภิปรายผลการทดสอบในหัวข้อที่สำคัญได้ดังนี้

Table 4 Test results of flowability and compressive strength (f'c)

Specimen	W/C (% by weight)	Size ratio 1/2:3/8 (inch)	SP/C (% by weight)	Flow diameter (cm.)	Funnel time (second)	f'c at 28 days (ksc)
1	35	0:100	1.10	75.0	22.18	532.4
2		20:80	1.00	77.5	13.49	592.8
3		40:60	0.60	70.5	9.55	513.4
4		60:40	0.70	63.5	8.92	517.0
5		80:20	0.60	76.0	28.09	488.0
6		100:0	1.50	71.0	13.3 0	494.5
7	40	0:100	0.50	67.0	28.09	425.0
8		20:80	0.70	76.0	9.07	481.0
9		40:60	0.50	75.0	4.47	452.9
10		60:40	0.50	68.5	3.81	373.7
11		80:20	0.60	76.0	17.6 0	489.3
12		100:0	1.40	68.0	5.57	441.5
13	45	0:100	0.55	64.0	5.14	405.2
14		20:80	0.50	65.5	4.38	353.5
15		40:60	0.50	65.0	4.48	424.8
16		60:40	0.50	62.0	7.67	337.2
17		80:20	0.50	71.0	10.38	357.3

ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้

ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้สำหรับทุกส่วนผสมแสดงดัง Table 4 ซึ่งเป็นปริมาณที่ทำให้ส่วนผสมคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 60–80 ซม. Figure 6 แสดงตัวอย่างของส่วนผสมที่มีค่าการไหลแผ่ 75 ซม. และเมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของขนาดมวลรวมหยาบรีไซเคิล (1/2:3/8) และปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้สามารถแสดงได้ดัง Figure 7 พบว่าปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้ในส่วนผสมที่มี W/C ร้อยละ 35 (W/C 35%) มีค่าแตกต่างกันมากเมื่อสัดส่วนของขนาดมวลรวมหยาบเปลี่ยนแปลง มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.6–1.5 เนื่องจากส่วนผสมนี้มีปริมาณน้ำน้อย จำเป็นต้องเพิ่มสารลดน้ำ

พิเศษเพื่อเพิ่มความสามารถในการไหล พบว่าส่วนผสมที่ต้องการสารลดน้ำพิเศษเกินร้อยละ 1.0 คือเมื่อใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาดเดียว (0:100 และ 100:0) สามารถอธิบายได้ว่าหากพิจารณาน้ำหนักที่เท่ากัน มวลรวมหยาบขนาดเล็ก (3/8 นิ้ว) จะมีจำนวนมากกว่ามวลรวมหยาบขนาดใหญ่ (1/2 นิ้ว) ซึ่งอาจขัดขวางการไหลได้ และหากใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ (1/2 นิ้ว) เพียงอย่างเดียวจะขัดขวางการได้เช่นเดียวกันเพราะมีน้ำหนักมากตามขนาดที่เพิ่มขึ้น ส่วนผสมที่ใช้สารลดน้ำพิเศษน้อยคืออัตราส่วนขนาดมวลรวมหยาบ 1/2:3/8 เท่ากับ 40:60 และ 60:40 ซึ่งเป็นการคละขนาดเล็ก-ใหญ่ที่เหมาะสม ใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่ในช่วง 60–80 ซม. ขณะที่ส่วนผสมที่มีค่า W/C ร้อยละ 40 และ 45 นั้นมีการเปลี่ยนแปลงการใช้สารลดน้ำพิเศษไม่มากอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5–0.7 อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 1/2 นิ้วเพียงขนาดเดียว (100:0) จำเป็นต้องใช้สารลดน้ำพิเศษถึงร้อยละ 1.4 เนื่องจากมวลรวมขนาดใหญ่ขัดขวางการไหลอย่างมีนัยสำคัญ จำเป็นต้องเพิ่มแรงผลักระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของคอนกรีต [12] ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่จำเป็นจะมีค่าลดลงเมื่อมีค่า W/C เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำช่วยให้คอนกรีตไหลได้ดี อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่ใช้ W/C ร้อยละ 40 ใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.50 ซึ่งน้อยกว่าตัวอย่างที่ใช้ W/C ร้อยละ 45 คือใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.55 เมื่ออัตราส่วนขนาดมวลรวมหยาบ 1/2:3/8 เท่ากับ 100:0 แต่ให้ค่าการไหลแผ่ใกล้เคียงกันและอยู่ในช่วงที่เหมาะสม อาจเกิดได้จากสภาวะแวดล้อมขณะเตรียมส่วนผสมหรือขณะทดสอบ อย่างไรก็ตามความแตกต่างมีค่าเล็กน้อย หากพิจารณาแนวโน้มของผลทดสอบทั้งหมดจะสามารถอภิปรายผลกระทบของปัจจัยที่ศึกษาได้

Figure 6 Sample of mixture with slump flow diameter of 75 cm

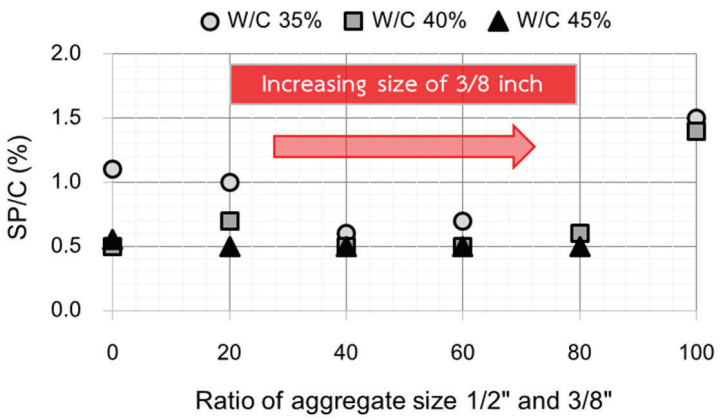

Figure 7 Amount of superplasticizer to achieve flow diameter of 60–80 cm

ค่าการไหลแผ่ต่อปริมาณสารลดน้ำพิเศษ

พิจารณา Figure 8 แสดงปริมาณสารลดน้ำพิเศษและค่าการไหลแผ่ของทุกตัวอย่าง พื้นที่แรเงาแสดงค่าการไหลแผ่ในช่วง 60–80 ซม. ทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์ และมีตัวอย่างที่ใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.4–1.5 คือตัวอย่างที่ใช้มวลรวมหยาบขนาด 1/2 นิ้วขนาดเดียวร่วมกับ W/C ร้อยละ 35 และ 40 ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ไม่มากจึงต้องใช้สารลดน้ำพิเศษปริมาณสูง ดังนั้นหากต้องการคอนกรีตกำลังสูงที่มีค่า W/C น้อยกว่าร้อยละ 40 และใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียวควรพิจารณาปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ต้องใช้ประกอบด้วย เนื่องจากสารลดน้ำพิเศษมีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งอาจกระทบราคาต่อหน่วยของคอนกรีตได้ สำหรับส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 45 นั้นปริมาณสารลดน้ำพิเศษไม่กระทบมาเนื่องจากปริมาณค่อนข้างคงที่ที่ร้อยละ 0.5 แม้ว่าจะใช้มวลรวมขนาด 1/2 หรือ 3/8 เพียงขนาดเดียวก็ตาม

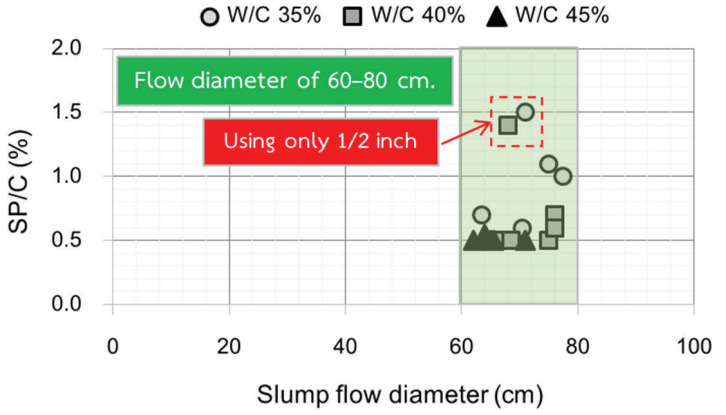

Figure 8 Relationship between amount of superplasticizer and flow diameter

ระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐาน

ความหนืดของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองบ่งบอกความสามารถในการทำงานได้อีกทางหนึ่ง [12, 14] ในบางครั้งแม้ว่าคอนกรีตจะมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม หากมีความหนืดมากจะทำให้คอนกรีตไหลได้ช้าซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถไหลเข้าแบบหล่อได้เต็ม อาจเกิดผลเสียได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนผสมที่มี W/C น้อยกว่าร้อยละ 30 และหากส่วนผสมมีความหนืดน้อยซึ่งจะมีระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานไม่เกิน 5 วินาทีอาจเกิดการแยกตัวได้ [12] จากผลการทดสอบทั้งหมดพบว่ามี 4 ส่วนผสมที่มีระยะเวลาไหลผ่านกรวยน้อยกว่า 5 วินาที คือส่วนผสมที่ 9 10 14 และ 15 อย่างไรก็ตามทั้ง 4 ส่วนผสมนี้ไม่เกิดการแยกตัวซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ Figure 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของขนาดมวลรวมหยาบรีไซเคิล (1/2:3/8) และระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานของทุกตัวอย่าง ผลการทดสอบระบุได้ชัดเจนว่าส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 45 มีระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานประมาณ 5–10 วินาที ยกเว้นส่วนผสมที่มีสัดส่วนของขนาดมวลรวมหยาบรีไซเคิล (1/2:3/8) เท่ากับ 80:20 ซึ่งมีระยะเวลา 10.38 วินาที แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 45 นี้มีปริมาณน้ำสูงทำให้ระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานค่อนข้างน้อยอยู่ในช่วง 5–10 วินาที ซึ่งมีความเสี่ยงที่จะเกิดการแยกตัวได้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังไม่พบการแยกตัวในทุกส่วนผสม พบว่าระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานของส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 40 มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสัดส่วนมวลรวมหยาบรีไซเคิล มีระยะเวลาอยู่ระหว่าง 3.8–28 วินาที สัดส่วนที่ใช้เวลามากที่สุดคือ 0:100 ใช้เวลา 28 วินาที ซึ่งเกิดจากมวลรวมจำนวนมากขัดกันระหว่างไหลผ่านกรวยจึงทำให้ใช้เวลานานกว่าส่วนผสมอื่น เมื่อเพิ่มสัดส่วนมวลรวมขนาด 1/2 นิ้วลงไปทำให้ระยะเวลาลดลงต่อเนื่องซึ่งเป็นการคละขนาดที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการไหลผ่านที่ดี อย่างไรก็ตามเมื่อสัดส่วนมวลรวมหยาบรีไซเคิลเท่ากับ 80:20 ระยะเวลาการไหลเพิ่มเป็น 17.6 วินาที ซึ่งอาจเป็นเพราะปริมาณมวลรวมขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นไปขัดขวางการไหลหรืออาจเกิดจากความแปรปรวนของการทดสอบเนื่องจากเป็นการทดสอบครั้งเดียว และเมื่อใช้มวลรวมขนาด 1/2 นิ้วเพียงอย่างเดียว ระยะเวลาที่ใช้ลดลงเท่ากับ 5.57 วินาที ตามเส้นประใน Figure 9 ซึ่งเมื่อพิจารณาแนวโน้มแล้วควรจะมีระยะเวลาเพิ่มขึ้นเพราะมีแค่มวลรวมขนาดใหญ่เท่านั้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าแม้ว่าปริมาณมวลรวมขนาดใหญ่จะเพิ่มขึ้นแต่จำนวนนั้นลดลงเมื่อเทียบกับมวลรวมขนาดเล็กอาจส่งผลให้ระยะเวลาไหลผ่านกรวยลดลง แนวโน้มระยะเวลาการไหลของส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 35 คล้ายกับส่วนผสม W/C ร้อยละ 40 ตามเส้นประ ซึ่งเกิดจากสัดส่วนของขนาดมวลรวมหยาบส่งผลให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงไปดังคำอธิบายข้างต้น อย่างไรก็ตามระยะเวลาไหลผ่านกรวยของทุกตัวอย่างอยู่ในช่วง 3.8–28.09 วินาที ซึ่งไม่พบการแยกตัว แสดงให้เห็นว่าทุกส่วนผสมสามารถนำไปใช้งานได้ พบจุดที่น่าสังเกตในผลการทดสอบระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานของสัดส่วนมวลรวมหยาบรีไซเคิลเท่ากับ 0:100 โดยส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 35 40 มีระยะเวลามากกว่า 20 วินาที ซึ่งมีความหนืดมากเนื่องจากปริมาณน้ำไม่สูงมาก แต่ส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 45 มีระยะเวลา 5.14 วินาที ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำสูงที่สุด ปริมาณสูงนี้ทำให้มีปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีตมากอาจช่วยให้ลดความเสียดทานระหว่างการกระทบของมวลรวมหยาบรีไซเคิลได้

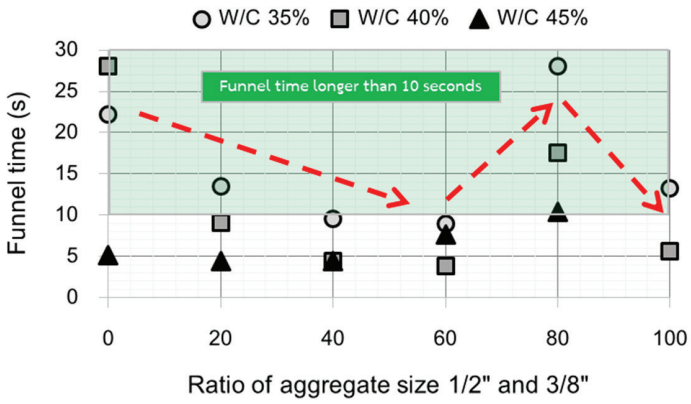

Figure 9 Change of funnel time with size ratio

การพัฒนากำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ของส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 35 40 และ 45 แสดงดัง Figure 10 11 และ 12 ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มการพัฒนาเป็นไปตามทฤษฎีโดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาทุกส่วนผสมพบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน พัฒนาจากที่อายุ 3 วัน เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 29.5 และมีตัวอย่างที่พัฒนากำลังอัดน้อยที่สุดและมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 11.3 และ 91.5 ตามลำดับ สามารถสังเกตได้ชัดเจนว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วันมีค่าค่อนข้างสูงโดยมีค่าตั้งแต่ 251.3–517.0 กก./ซม.^{2} เนื่องจากส่วนผสมถูกออกแบบให้เป็นคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์สูงในการทำปฏิกิริยากับสารลด Figure 9 Change of funnel time with size ratio พิเศษเพื่อสร้างแรงผลักระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์และทำให้คอนกรีตไหลได้ดี จึงทำให้มีกำลังรับแรงอัดสูงมากอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [12] และกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันมีค่าตั้งแต่ 337.2–592.8 กก./ซม.^{2} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้มวลรวมรีไซเคิลเป็นส่วนผสมของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองได้ดี สามารถผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูงได้ อย่างไรก็ตามพบว่าบางชุดตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน น้อยกว่าที่อายุ 3 วัน เช่นตัวอย่างสัดส่วนมวลรวมหยาบรีไซเคิล 100:0 ใน Figure 11 สามารถอธิบายได้ว่าการพัฒนากำลังในช่วง 3–7 วัน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นนั้นมีค่าไม่มากนักเพราะคอนกรีตอยู่ในช่วงพัฒนากำลังรับแรงอัดเริ่มต้น และความไม่แน่นอนของรูปร่างและปริมาณมอร์ตาร์ที่ติดอยู่กับมวลรวมหยาบรีไซเคิลส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเช่นเดียวกัน ในกรณีนี้อาจเป็นไปได้ว่าตัวอย่างที่นำมาทดสอบที่อายุ 7 วัน ประกอบด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีลักษณะพรุนหรือมีมอร์ตาร์ติดอยู่ปริมาณมากซึ่งลดทอนกำลังรับแรงอัด จึงทำให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน น้อยกว่าที่อายุ 3 วัน

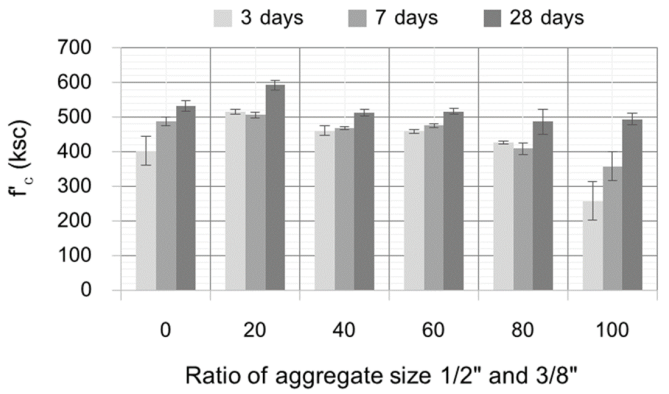

Figure 10 Compressive strength of mixture with W/C 35% at 3, 7 and 28 days

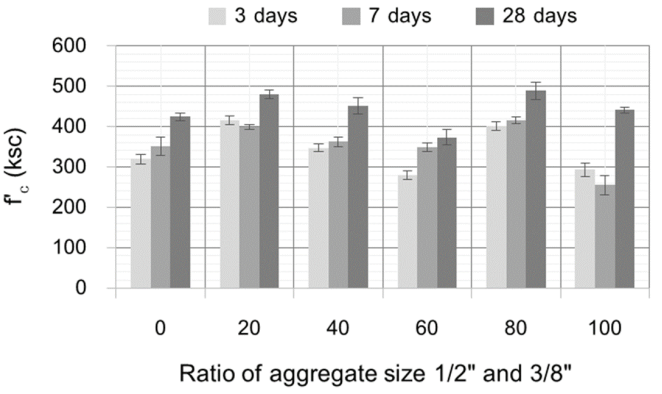

Figure 11 Compressive strength of mixture with W/C 40% at 3, 7 and 28 days

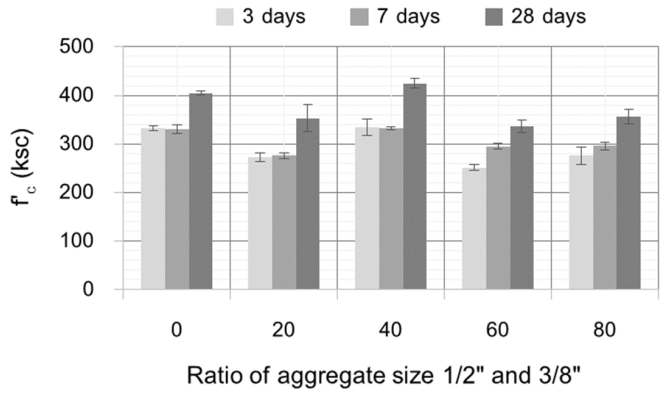

Figure 12 Compressive strength of mixture with W/C 45% at 3, 7 and 28 days

กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน

กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันของทุกส่วนผสมแสดงดัง Figure 13 สังเกตได้อย่างชัดเจนว่าสัดส่วนของขนาดมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 1/2:3/8 นิ้ว ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของชุดตัวอย่างทั้งหมดที่มีค่า W/C ร้อยละ 35 40 และ 45 เมื่อพิจารณาการใช้สัดส่วนของขนาดมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 1/2:3/8 ตั้งแต่ 0:100 จนถึง 100:0 พบว่าส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 35 มีกำลังรับแรงอัดในช่วง 488.0–592.8 กก./ซม.^{2} ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากสามารถใช้กับงานก่อสร้างที่ต้องการคอนกรีตกำลังสูงได้ ซึ่งสัดส่วนขนาดมวลรวม 1/2:3/8 นิ้ว ที่ให้กำลังสูงสุดคือ 20:80 ดังกรอบหมายเลข 1 ใน Figure 13 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีขนาดคละเหมาะสมร่วมกับปริมาณ W/C ร้อยละ 35 สำหรับส่วนผสมที่มี W/C ร้อยละ 40 ผลสอบแสดงแนวโน้มคล้ายกับส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 35 แม้ว่าจะมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อสัดส่วนขนาดมวลรวม 1/2:3/8 นิ้ว เท่ากับ 80:20 โดยมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 489.3 กก./ซม.^{2} ดังกรอบหมายเลข 2 ใน Figure 13 อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังรับแรงอัดเมื่อสัดส่วนขนาดมวลรวม 1/2:3/8 นิ้ว เท่ากับ 20:80 มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยเท่านั้นโดยมีค่าเท่ากับ 481.0 กก./ซม.^{2} สามารถระบุได้ว่าส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 35 และ 40 มีกำลังอัดสูงสุดเมื่อใช้สัดส่วนขนาดมวลรวม 1/2:3/8 นิ้ว เท่ากับ 20:80 ซึ่งเป็นการคละขนาดที่เหมาะสม สำหรับส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 40 นั้นมีกำลังรับแรงอัดระหว่าง 337.2–424.8 กก./ซม.^{2} พบว่าสัดส่วนขนาดมวลรวม 1/2:3/8 นิ้ว ที่ดีที่สุดคือ 40:60 ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 424.8 กก./ซม.^{2} ซึ่งต่างจากส่วนผสมอื่นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามสัดส่วนขนาดมวลรวม 1/2:3/8 นิ้ว เท่ากับ 20:80 กลับให้ค่ากำลังรับแรงอัดค่อนข้างต่ำเพียง 353.5 กก./ซม.^{2} เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ค่า W/C ร้อยละ 35 และ 40 ที่ให้กำลังสูงสุด ดังนั้นการเลือกใช้สัดส่วนขนาดมวลรวมจำเป็นต้องพิจารณาค่า W/C ร่วมด้วยเพื่อให้ได้กำลังอัดสูงสุดในการใช้งาน

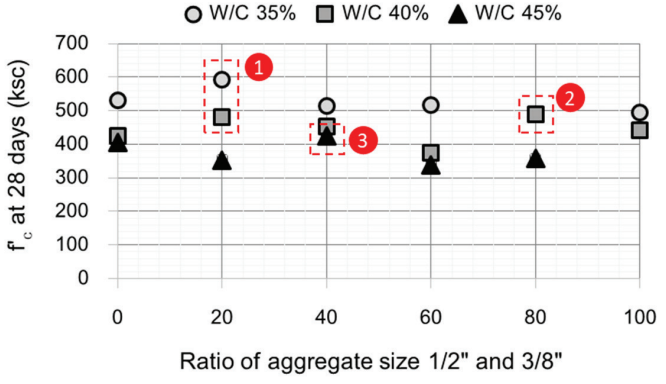

Figure 13 Compressive strength at 28 days of all mixtures

Conclusions

จากผลการทดสอบที่ผู้วิจัยและคณะได้ดำเนินการตามระเบียบวิธีวิจัยสามารถสรุปได้เป็นหัวข้อที่สำคัญตามวัตถุประสงค์คือเพื่อให้การนำคอนกรีตที่ใช้แล้วหรือได้มาจากการรื้อถอนสิ่งก่อสร้าง มีความเป็นไปได้มากขึ้น อีกทั้งช่วยโน้มน้าววิศวกรและผู้เกี่ยวข้องให้หันมาพิจารณาคอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบในงานก่อสร้าง สรุปเนื้อหางานวิจัยได้ตามหัวข้อดังนี้

1. คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองที่มีค่า W/C ร้อยละ 35 และ 40 มีความต้องการสารลดน้ำพิเศษสูงในกรณีที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 1/2 นิ้ว เพียงอย่างเดียว เนื่องจากต้องการแรงผลักมวลรวมเพื่อให้เกิดการไหลมากขึ้น โดยต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษประมาณ ร้อยละ 1.4–1.5 ดังนั้นผู้ใช้งานควรพิจารณาปริมาณสารลดFigure 13 Compressive strength at 28 days of all mixtures พิเศษประกอบการใช้งานเนื่องจากกระทบราคาต่อหน่วยของคอนกรีตโดยตรง

2. ระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานอยู่ในช่วง 3.8–28 วินาที และไม่พบการแยกตัว การเพิ่มสัดส่วนมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 1/2 นิ้ว จาก 0 เป็น 20 40 และ 60 ทำให้ไหลผ่านกรวยได้ดีขึ้น (ระยะเวลาลดลง) แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนมากกว่านั้นจะทำให้คอนกรีตไหลได้ช้าลง อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้เป็นเพียงการวัดความหนืดและการแยกตัวเท่านั้น ระยะเวลาไหลผ่านไม่เกิน 30 วินาทีถือว่าสามารถนำไปใช้งานได้ดี

3. การพัฒนากำลังรับแรงอัดจาก 3 วัน ไปถึง 28 วัน เฉลี่ยทุกตัวอย่างเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 29.5 กำลังรับแรงอัดในช่วงต้นที่ 3 วันมีค่าสูงเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไปเนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์สูงเพราะถูกออกแบบเป็นคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองที่ต้องการปูนซีเมนต์มากในการสร้างแรงผลักให้เกิดการไหล ดังนั้นมวลรวมหยาบรีไซเคิลสามารถนำไปใช้กับคอนกรีตกำลังสูงได้

4. สัดส่วนของมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 1/2:3/8 นิ้ว ที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดสำหรับส่วนผสมที่ใช้ W/C ร้อยละ 35 40 และ 45 คือ 20:80 80:20 และ 40:60 ตามลำดับ โดยมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดของแต่ละส่วนผสมเท่ากับ 592.8 489.3 และ 424.8 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ จากผลการทดสอบสามารถให้ข้อแนะนำได้ว่าไม่ควรเลือกใช้มวลรวมขนาดเดียว ควรเลือกคละขนาดที่เหมาะสมตามค่า W/C ของส่วนผสม นอกจากจะช่วยให้มีกำลังทีดีที่สุดแล้ว ยังช่วยลดปริมาณสารลดน้ำพิเศษได้อีกทางหนึ่ง

Acknowledgements

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยนี้ ผ่านโครงการสนับสนุนกลุ่มวิจัย (Research Group) คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา ปีงบประมาณ 2565 รหัสโครงการวิจัย KUSRC65-8001

References

1. Tam, V., Soomro, M. and Evangelista, A., 2018, "A Review of Recycled Aggregate in Concrete Applications (2000–2017)," *Construction and Building Materials,* 172, pp. 272-292. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240.
2. Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejos, P. and Sánchez de Juan, M., 2013, "Durability of Recycled Aggregate Concrete," *Construction and Building Materials,* 40, pp. 1054-1065. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106
3. Liu, Z., Zhao, Y.G., Ma, L. and Lin, S., 2024, "Review on High-Strength Recycled Aggregate Concrete: Mix Design, Properties, Models and Structural Behaviour," *Structures,* 64, p. 106598. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106598
4. Liang, C., Chen, H., Li, R., Chi, W., Wang, S., Hou, S., Gao, Y. and Zhang, P., 2024, "Effect of Additional Water content and Adding Methods on the Performance of Recycled Aggregate Concrete," *Construction and Building Materials,* 423, p. 135868. https://doi.org/10.1016/ j.conbuildmat.2024.135868
5. Sua-iam, G. and Makul, N., 2023, "Self-Compacting Concrete Produced with Recycled Concrete Aggregate Coated by a Polymer-Based Agent: A Case Study," *Case Studies in Construction Materials,* 19, p. e02351. https://doi.org/https://doi.org/ 10.1016/j.cscm.2023. e02351
6. Thailand Industrial Standard, 2012, Specifications for Portland Cement Type 1, 12 p. (In Thai)
7. Japan Society of Civil Engineers, 1999, Recommendation for Self-Compacting Concrete, 77 p.
8. Attachaiyawuth, A., Rath, S., Tanaka, K. and Ouchi, M., 2016, "Improvement of Self-Compactability of Air-Enhanced Self-Compacting Concrete with Fine Entrained Air," *Journal of Advanced Concrete Technology,* 14 (3), pp. 55-59.
9. Ouchi, M., Kameshima, K. and Attachaiyawuth, A., 2017, "Improvement in Self-Compacting Properties of Fresh Concrete by Eliminating Large Air Bubbles Using an Antifoaming Agent," *Journal of Advanced Concrete Technology,* 15 (1), pp. 10-18.

10. Attachaiyawuth, A., Puthipad, N. and Ouchi, M., 2022, “Effects of Air-Entraining Agent, Defoaming Agent and Mixing Time on Characteristic of Entrained Bubbles in Air-Enhanced Self-Compacting Concrete Mixed at Concrete Plant,” *Engineering Journal,* 26 (2), pp. 37-48. https://doi.org/10.4186/ej.2022.26.2.37
11. Attachaiyawuth, A., Puthipad, N. and Ouchi, M., 2023, “Stability Improvement of Bubbles by Entraining Fine Air in Self-Compacting Concrete Proportioned at Factory Scale,” *Asia-Pacific Journal of Science and Technology,* 28 (2), pp. 1–10. https://doi.org/10.14456/ apst.2023.17
12. Okamura, H. and Ouchi, M., 2003, "Self-Compacting Concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology,* 1 (1), pp. 5-15.
13. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2021, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia.
14. Ouchi, M., Edamatsu, Y., Ozawa, K. and Okamura, H., 1999, "A Simple Evaluation Method for Interaction between Coarse aggregate and Mortar's Particles in Self-Compacting Concrete," *Transaction of The Japan Concrete Institute,* 21, pp. 1-6.