

ผลกระทบของมอร์ตาร์ไหลได้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงหินปูนและโคลนเผาต่อค่าการไหลแผ่ ความหนืดและกำลังรับแรงอัด

Effects of Self-Compacting Mortar Partially Replaced Cement with Limestone Powder and Calcined Clay on Slump Flow, Viscosity, and Compressive Strength

บุราฉัตร กิตติกรจรัส¹ ธนิตา อาจจุฬา² ธัญลักษณ์ คำสอน³ นันทพงศ์ พิระขัมม์⁴
รक्तिพงษ์ สหมิตรมงคล⁵ และ อนูวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ^{6*}

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา^{1,2,3,4,6*}

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี⁵

E-mail: burachat@eng.src.ku.ac.th¹, thanita.ac@live.ku.th², thanyalak.kam@live.ku.th³,

nanthapong.p@live.ku.th⁴, raktipong.sah@kmutt.ac.th⁵, anuwat@eng.src.ku.ac.th^{6*}

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงหินปูนและโคลนเผาสำหรับผลิตมอร์ตาร์ไหลได้ โดยทดสอบสมบัติการไหลและสมบัติทางกลคือค่าการไหลแผ่ ความหนืดและกำลังรับแรงอัด เพื่อเสนอเป็นวัสดุทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยโคลนเผาคือร้อยละ 15 และ 25 ขณะที่ปริมาณแทนที่ด้วยผงหินปูนคือร้อยละ 15 ผลการวิจัยพบว่ามอร์ตาร์มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยโคลนเผาร้อยละ 15 ดังนั้นจึงต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นประมาณ 2.0–2.5 เท่า เพื่อมีค่าการไหลแผ่ที่เหมาะสม และต้องใช้สารผสมเพิ่มมากถึง 5–6 เท่า เมื่อเพิ่มผงหินปูนร้อยละ 15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ร้อยละ 40 เหมาะสมที่สุดเนื่องจากความหนืดของมอร์ตาร์เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยมีระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานมากขึ้นไม่เกิน 3 วินาที เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที และมีระยะเวลาไหลผ่านเริ่มต้น 4–6 วินาที การแทนที่ด้วยโคลนเผาร้อยละ 15 ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20–38 ที่อายุ 28 วัน โดยมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 700–830 กก./ชม.² นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เป็นร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 15 พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 15–20 โดยมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 450–590 กก./ชม.² โคลนเผาสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตมอร์ตาร์ไหลได้ มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นและมีสมบัติการไหลที่ดีที่สุดเมื่อมีอัตราส่วน W/B ร้อยละ 40 โคลนเผาเป็นวัสดุทางเลือกเพื่อช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้



คำสำคัญ: ค่าการไหลแผ่; ความหนืด; มอร์ตาร์ไหลได้; ผงหินปูน; โคลนเผา

Abstract

This paper presents the effects of partial cement replacement by limestone and calcined clay for producing self-compacting mortar by testing flowability and mechanical properties with slump flow viscosity and compressive strength in order to propose an alternative which is eco-friendly material in construction industry. Amount of cement replacement by calcined clay were 15% and 25%, amount of limestone replacement was 15%. The results showed that the tested viscosity increased when replacing cement by calcined clay of 15% so that it necessary to use higher superplasticizer approximately 2–2.5 times for achieving the suitable slump flow. And it needed superplasticizer of 5–6 times when increasing limestone powder of 15%. Water to binder ratio (W/B) of 40% was suitable because the viscosity of mortar slightly changed with the increase of funnel time not over 3 s after 20 mins after mixing and the initial funnel time was 4–6 s. Replacement amount by calcined clay of 15% resulted in the increased of compressive strength of approximately 20–38% at 28 days with the compressive strength of approximately 700–830 ksc. Moreover, when the replacement ratio was 25% with limestone of 15%, it was found that the compressive strength decreased approximately 15–20% which were 450–490 ksc. Calcined clay can be used to replace cement for producing self-compacting mortar, the mechanical properties was improved and flowability was the most improved with the W/B of 40%. Calcined clay was an alternative material for reducing the demand of cement use.

Keywords: Slump flow; viscosity; self-compacting mortar; limestone powder; calcined clay

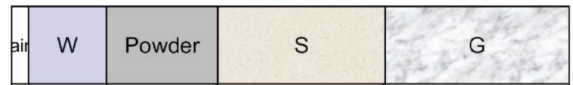
1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากมีราคาต่ำกว่าวัสดุก่อสร้างอื่น เช่น เหล็ก เป็นต้น คอนกรีตมีส่วนผสมหลักที่ทำให้มีกำลังสูงคือปูนซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังสูงเมื่อแข็งตัว ปูนซีเมนต์ผลิตจากกระบวนการเผาหินปูนด้วยความร้อนสูง ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน ในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา ผลกระทบจากการปล่อย

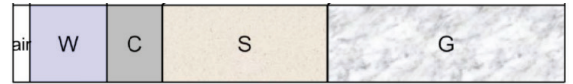
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ได้รับความสนใจในมุมของการลดผลกระทบด้วยการใช้วัสดุทดแทน งานวิจัยจำนวนมากศึกษาวัสดุทดแทนต่าง ๆ เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์แต่ยังคงสมบัติทางกลไว้หรืออาจพัฒนาสมบัติทางกลได้ หนึ่งในวัสดุที่ได้รับความนิยมมากคือเถ้าลอย (Fly ash) เถ้าลอยนอกจากจะช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้อย่างดีแล้ว ยังสามารถเพิ่มความทนทานของคอนกรีตได้ดี [1–5]

หนึ่งในวัสดุประสานที่ได้รับความนิยมในการนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาคือปูนซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของหินปูนและโคลนเผา (Limestone Calcined Clay Cement, LC3) ซึ่งเริ่มการศึกษาที่ประเทศอินเดีย [6–8] วัสดุชนิดนี้สามารถช่วยให้คอนกรีตมีความทนทานสูงขึ้น สามารถต้านทานซัลเฟตและการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี [9–12] ดังนั้นผงหินปูนและโคลนเผาจึงเป็นวัสดุทางเลือกที่นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ได้อย่างดี

คอนกรีตบางชนิดถูกพัฒนาเพื่อเพิ่มความทนทานและลดโอกาสความไม่สมบูรณ์ของคอนกรีตเนื่องจากความเชี่ยวชาญของคณาจารย์เขตคอนกรีตโดยทำให้คอนกรีตไหลได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง คอนกรีตชนิดนี้เรียกว่า Self-compacting concrete (SCC) ถูกพัฒนาโดยศาสตราจารย์ Okamura และทีมงานจาก University of Tokyo ในปี ค.ศ. 1986 [13] ปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับ SCC เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา แสดงดังภาพที่ 1 คอนกรีตสามารถไหลได้จากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ที่เกิดแรงผลักดันจากการใช้สารลดน้ำพิเศษ แรงผลักดันนี้ส่งผลให้ส่วนผสมสามารถเคลื่อนตัวได้ดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีปูนซีเมนต์ปริมาณมากเพื่อเพิ่มแรงผลักดันดังกล่าว ทำให้ส่งผลลบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณมาก นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดเรื่องปริมาณมวลรวมหยาบเนื่องจากมวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากเมื่อเทียบกับมวลรวมละเอียด ดังนั้น Japan Society of Civil Engineers (JSCE) จึงแนะนำปริมาณมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมไม่ควรมีค่ามากกว่าร้อยละ 33 โดยปริมาตรคอนกรีต [14] เป็นเรื่องน่าสนใจหากสามารถประยุกต์วัสดุ LC3 แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของ SCC



ส่วนผสมของคอนกรีตไหลได้

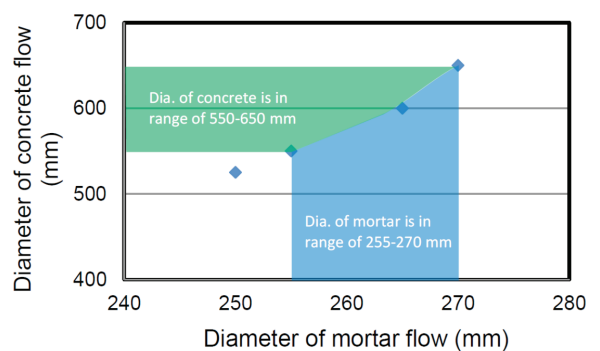


ส่วนผสมของคอนกรีตธรรมดา

W คือ น้ำ, Powder คือ วัสดุประสาน, C คือปูนซีเมนต์, S คือ มวลรวมละเอียด, G คือ มวลรวมหยาบ

ภาพที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตไหลได้และคอนกรีตธรรมดา

สมบัติการไหลของคอนกรีตไหลได้ (SCC) สามารถประเมินได้ด้วยการทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตและมอร์ตาร์ แสดงดังภาพที่ 2 [15] สามารถประยุกต์ทรัพยากรในการทดสอบสมบัติการไหลของคอนกรีตได้ การทดสอบคอนกรีตต้องใช้วัสดุทั้งหมดมากกว่าการทดสอบมอร์ตาร์ประมาณ 20 เท่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงดำเนินการทดสอบมอร์ตาร์เพื่อประเมินสมบัติการไหลของคอนกรีต



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของมอร์ตาร์และคอนกรีต [15]

คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาความเป็นไปได้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนและโคลนเผาในการผลิตคอนกรีต โดยเน้นไปที่การผลิตมอร์ตาร์

หรือคอนกรีตไหลได้ (SCC) เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ที่ใช้ ผลักดันการใช้วัสดุทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สมบัติเบื้องต้นของมอร์ตาร์ไหลได้ที่สามารถนำไปผลิตคอนกรีตได้ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 255–277 มม. [15]

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุที่ผลิตในประเทศไทยทั้งหมด โดยวัสดุประสานที่ใช้มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โคลนเผาและผงหินปูน ภาพที่ 3 และ 4 แสดงลักษณะทางกายภาพของโคลนเผาและผงหินปูนตามลำดับ โคลนเผามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 15 ไมโครเมตร ลักษณะเป็นผงสีส้ม ในขณะที่ผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10 ไมโครเมตร ลักษณะเป็นผงสีขาว มวลรวมละเอียดคือทรายแม่น้ำความถ่วงจำเพาะ 2.65 มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.69 และมีอัตราการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.81 สารลดน้ำพิเศษใช้เพื่อเพิ่มสมบัติการไหลเป็นชนิดโพลีคาบออกซิเลท (PCE) ประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 [17] สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิตมอร์ตาร์ไหลได้ แสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 3 ลักษณะของโคลนเผา



ภาพที่ 4 ลักษณะของผงหินปูน

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้	สมบัติของวัสดุ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ตามมาตรฐาน มอก. เล่ม 15-2555, ASTM C150-07
ผงหินปูน	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10 ไมโครเมตร, ความถ่วงจำเพาะ 2.68
โคลนเผา	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 15 ไมโครเมตร, ความถ่วงจำเพาะ 2.82
น้ำประปา	น้ำประปาทั่วไป
มวลรวมละเอียด	ทรายแม่น้ำความถ่วงจำเพาะ 2.65, ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4, โมดูลัสความละเอียด 2.69 อัตราการดูดซึมน้ำ ร้อยละ 0.81
สารลดน้ำพิเศษ	ชนิด polycarboxylic ether (PCE), ประเภท F, ความถ่วงจำเพาะ 1.08

2.2 การทดสอบค่าการไหลแผ่

สมบัติการไหลของมอร์ตาร์ถูกทดสอบด้วยการวัดค่าการไหลแผ่หลังจากที่เทมอร์ตาร์ใส่โคนมาตรฐานและยกขึ้น ร่องนอมอร์ตาร์หยุดนิ่ง การไหลแผ่มักมีลักษณะเป็นวงกลม ในบางครั้งเป็นวงรีอาจขึ้นอยู่กับส่วนผสมเข้ากันไม่ดี การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่จึงวัดสองทิศทางตั้งฉากกัน เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่ที่เหมาะสมสำหรับมอร์ตาร์ไหลได้อยู่ในช่วง 250–275 มม. [16] ขนาดโคนมาตรฐานและลักษณะการทดสอบวัดค่าการไหลแผ่แสดงดังภาพที่ 5

2.3 การทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์

ความหนืดของมอร์ตาร์ถูกวัดด้วยระยะเวลาที่ใช้ในการไหลผ่านกรวยมาตรฐาน (V-funnel time) การทดสอบเริ่มจากเทมอร์ตาร์จนเต็มอุปกรณ์ทดสอบ จากนั้นปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลในแนวตั้งอย่างอิสระ จนผู้จับเวลามองจากด้านบนแล้วเห็นแสงที่ปลายกรวยก็ให้หยุดเวลา ระยะเวลาที่จับได้คือระยะเวลาไหลผ่านซึ่งบ่งบอกความหนืดของส่วนผสม หากส่วนผสมใช้เวลามากหมายความว่ามีความหนืดมาก โดยทั่วไปมอร์ตาร์ที่มีความหนืดที่เหมาะสมจะใช้ระยะเวลาในการไหลผ่านกรวยมาตรฐาน 3–10 วินาที [13] ขนาดกรวยมาตรฐานและลักษณะการทดสอบวัดระยะเวลาไหลผ่านกรวย แสดงดังภาพที่ 6 [16]

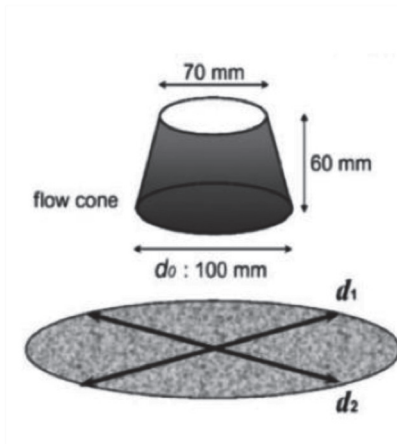
2.4 ขั้นตอนการผสมและทดสอบมอร์ตาร์

มอร์ตาร์ทุกส่วนผสมถูกผสมด้วยขั้นตอนเหมือนกันทุกประการโดยใช้เครื่องผสมมอร์ตาร์ขนาด 2 ลิตร เริ่มจากผสมวัสดุประสานและมวลรวมละเอียดให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นเติมน้ำที่ผสมสารลดน้ำพิเศษไว้แล้วลงในเครื่องผสมและ

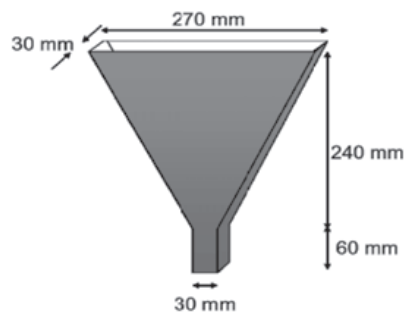
ผสมเป็นเวลา 120 วินาที ทดสอบวัดค่าการไหลแผ่และความหนืดทันทีหลังผสม จากนั้นพักส่วนผสมไว้เป็นเวลา 30 นาที จึงดำเนินการทดสอบอีกครั้งเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดและสมบัติการไหล ในช่วง 30 นาทีแรกประหนึ่งว่ามอร์ตาร์ได้ถูกขนย้ายไปหน่วยงานต้องมีความพร้อมใช้งาน หากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไหลมีค่าไม่อยู่ในช่วง 250–275 มม. ต้องปรับปริมาณสารลดน้ำพิเศษและเริ่มผสมใหม่อีกครั้งเมื่อได้ค่าการไหลแผ่ที่เหมาะสม ณ เวลา 30 นาทีหลังผสมแล้วจึงเก็บตัวอย่างขนาด 5x5x5 ซม. จำนวน 6 ตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [18] ที่อายุ 3 วัน และ 28 วัน อย่างละ 3 ตัวอย่าง ขั้นตอนการผสมแสดงดังภาพที่ 7

2.5 ปัจจัยที่ศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยโคลนเผาและผงหินปูนในสัดส่วนต่างกัน ส่วนผสมมีทั้งหมด 4 ชุดตัวอย่าง โดยชื่อชุดตัวอย่างประกอบไปด้วยตัวเลข 3 ตัว ตัวที่หนึ่งแสดงร้อยละของปูนซีเมนต์ต่อวัสดุประสาน ตัวที่สองแสดงร้อยละของโคลนเผาต่อวัสดุประสานและตัวที่สามแสดงร้อยละของผงหินปูนต่อวัสดุประสาน เช่น ชุดตัวอย่าง 60–25–15 เป็นชุดตัวอย่างที่มีปูนซีเมนต์ร้อยละ 60 โคลนเผาร้อยละ 25 และผงหินปูนร้อยละ 15 ในแต่ละชุดตัวอย่างมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันเพื่อศึกษาปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมของแต่ละส่วนผสม ตารางที่ 2 แสดงปัจจัยที่ศึกษาในการออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ไหลได้สำหรับงานวิจัยนี้ ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้ขึ้นอยู่กับแต่ละส่วนผสมโดยค่าที่แสดงในตารางที่ 2 เป็นค่าที่แต่ละส่วนผสมต้องการเพื่อให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่อยู่ในช่วง 250–275 มม.



ภาพที่ 5 โคลนมาตรฐานสำหรับทดสอบการไหลแผ่



ภาพที่ 6 กรวยมาตรฐานสำหรับทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์



ภาพที่ 7 ลำดับขั้นตอนการผสมและการทดสอบ

ตารางที่ 2 ปัจจัยในการออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ไหลได้

ชุดตัวอย่าง	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B, ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อัตราส่วนสารลดน้ำพิเศษต่อวัสดุประสาน (SP/B, ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อัตราส่วนปูนซีเมนต์:โคลนเผา:ผงหินปูน (โดยน้ำหนัก)
100-0-0	25	1.2	100:0:0
	30	1.0	
	35	0.7	
	40	0.6	
	45	0.5	
	50	0.5	
	55	0.4	
85-15-0	30	2.5	85:15:0
	35	2.2	
	40	1.5	
70-15-15	35	5.3	70:15:15
	40	4.0	
60-25-15	35	5.3	60:25:15
	40	4.3	

ตารางที่ 3 สมบัติที่สภาวะสดและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ไหลได้

ชุดตัวอย่าง	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B, ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าการไหลแผ่ (Flow diameter, มม.)		ระยะเวลาไหลผ่านกรวยทดสอบ (V-funnel time, วินาที.)		กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 3 ตัวอย่าง (กก./ซม. ²)	
		ทันทีหลังผสม	20 นาทีหลังผสม	ทันทีหลังผสม	20 นาทีหลังผสม	อายุ 3 วัน	อายุ 28 วัน
100-0-0	25	268	256	11.0	13.0	740.7	818.7
	30	269	260	7.0	7.0	620.2	628.8
	35	267	258	5.5	5	539.9	655.2
	40	270	262	3.6	4.0	505.5	506.2
	45	260	255	3.0	4.0	436.0	564.2
	50	267	262	3.4	3.0	409.5	473.6
	55	264	255	3.1	4.0	321.3	433.6
85-15-0	30	260	255	11.0	15.0	667.1	831.8
	35	270	270	10.0	14.0	509.6	792.5
	40	258	255	5.0	8.0	551.4	700.1
70-15-15	35	272	265	16.0	17.8	437.9	549.9
	40	270	265	4.0	4.0	376.6	457.6
60-25-15	35	270	255	14.0	23.0	477.6	593.7
	40	265	255	6.0	7.0	417.3	503.7

3.

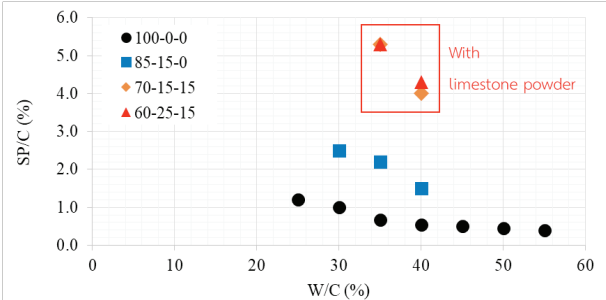
ผลการวิจัยและการอภิปราย

ผลการทดสอบสมบัติการไหล ความหนืดและกำลังรับแรงอัดแสดงดังตารางที่ 3 สามารถอภิปรายผลการทดสอบในแต่ละหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

3.1 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่จำเป็นเพื่อให้ส่วนผสมมีสมบัติเป็นมอร์ตาร์ไหลได้

มอร์ตาร์ไหลได้ที่มีสมบัติการไหลเหมาะสมซึ่งสามารถนำไปผสมกับมวลรวมหยาบสำหรับนำไปผลิตเป็นคอนกรีตไหลได้จำเป็นต้องมีค่าการไหลอยู่ระหว่าง 250–275 มม. [13] เพื่อให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแมื่อดังกล่าว จำเป็นต้องใช้สารลดน้ำพิเศษช่วยเพิ่มสมบัติการไหลและป้องกันการแยกตัว ซึ่งปริมาณที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับแต่ละส่วนผสม หากส่วนผสมมีปริมาณน้ำสูงจะใช้สารลดน้ำพิเศษน้อยกว่าส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำต่ำหรือส่วนผสมมอร์ตาร์ต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นตามปริมาณมวลรวมละเอียดที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม [19] ภาพที่ 8 แสดงปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมสำหรับทุกส่วนผสม สังเกตได้อย่างชัดเจนว่าปริมาณสารลดน้ำพิเศษมีแนวโน้มลดลงเมื่อมอร์ตาร์มีค่า W/B เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำในส่วนผสมสามารถช่วยเพิ่มสมบัติการไหลได้ดี ชุดตัวอย่าง 100-0-0 ที่มีวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวต้องการอัตราส่วน SP/B ประมาณร้อยละ 0.4–1.2 เมื่อมีค่า W/B อยู่ในช่วงร้อยละ 55–25 ปริมาณที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ส่วนผสมมีความชื้นเหลวมากขึ้นจึงต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษน้อยลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มโคลนเฝาร้อยละ 15 ของน้ำหนักวัสดุประสาน (85-15-0) พบว่าปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ส่วนผสมต้องการมีค่าเพิ่มขึ้น พิจารณาส่วนผสมที่มีค่า W/B ร้อยละ 30 35 และ 40 ค่า SP/B ที่ต้องการมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.5 2.2 และ 1.5 ตามลำดับ โคลนเฝาดูดซึมน้ำในส่วนผสมทำให้ต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพิ่ม

มากขึ้นประมาณ 2–3 เท่าของส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 8 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่จำเป็น

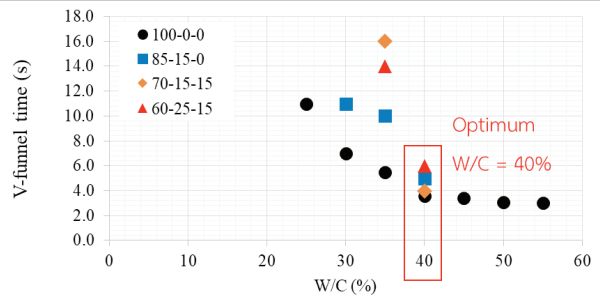
สำหรับทุกส่วนผสม

สำหรับกรณีที่มีมอร์ตาร์มีส่วนผสมของทั้งโคลนเฝ้าและผงหินปูนร้อยละ 15 (70-15-15) ร่วมกับค่า W/B ร้อยละ 35 และ 40 ส่วนผสมต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 5.3 และ 4.0 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์และโคลนเฝ้าประมาณ 2.4–2.6 เท่า เปรียบเทียบกับชุดตัวอย่าง (85-15-0) แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนร้อยละ 15 ยิ่งทำให้ส่วนผสมต้องการสารลดน้ำพิเศษมากขึ้นเนื่องจากผงหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อย [3] เมื่อใช้ในปริมาณมากจะทำให้ส่วนผสมมีความชื้นเหลวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีผงหินปูน อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณโคลนเฝ้าจากร้อยละ 15 (70-15-15) เป็นร้อยละ 25 (60-25-15) พบว่าปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่จำเป็นมีค่าใกล้เคียงกันมากโดยมีค่าประมาณร้อยละ 5.3 และ 4.1 สำหรับมอร์ตาร์ที่มีค่า W/B ร้อยละ 35 และ 40 ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณโคลนเฝาร้อยละ 10 (ชุดตัวอย่าง 70-15-15 เปรียบเทียบกับ 60-25-15) ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการไหลแม่มมีวัสดุประสานสามชนิด อาจเนื่องมาจากวัสดุประสานอื่นคือปูนซีเมนต์และผงหินปูนเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมการไหล

3.2 ความหนืดของมอร์ตาร์

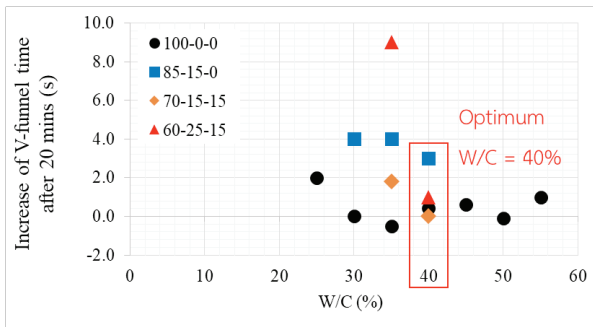
3.2.1 ความหนืดเริ่มต้นของมอร์ตาร์

สามารถวัดได้โดยวัดระยะเวลาในการไหลผ่านกรวยมาตรฐาน ภาพที่ 9 แสดงระยะเวลาในการไหลผ่านกรวยมาตรฐานของทุกส่วนผสม พบว่าส่วนผสมมีความหนืดลดลง (ระยะไหลผ่านกรวยลดลง) เมื่อมีค่า W/B มากขึ้น ปริมาณน้ำที่มากขึ้นสามารถช่วยให้มอร์ตาร์มีสมบัติการไหลที่ดีทั้งค่าการไหลแผ่มากขึ้นและความหนืดลดลง ชุดตัวอย่างที่มีปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (100-0-0) ใช้เวลาไหลผ่านกรวยเท่ากับ 11 วินาที เมื่อมีค่า W/B ร้อยละ 25 จากนั้นใช้เวลาลดลงเหลือ 7 วินาที เมื่อเพิ่มค่า W/B เป็นร้อยละ 30 และมีค่าลดลงอย่างมากเหลือประมาณ 3 วินาที เมื่อเพิ่มค่า W/B อยู่ในช่วงร้อยละ 40-55 และไม่พบการแยกตัวในทุกส่วนผสม มอร์ตาร์มีความหนืดมากขึ้นเมื่อมีโคลนเผาในส่วนผสมร้อยละ 15 (85-15-0) ระยะเวลาไหลผ่านกรวยมีค่าเท่ากับ 11 10 และ 5 วินาที เมื่อมีค่า W/B เท่ากับร้อยละ 30 35 และ 40 ตามลำดับ โคลนเผาในส่วนผสมดูดซึมน้ำทำให้มอร์ตาร์มีความหนืดมากขึ้นเช่นเดียวการทดสอบการไหลแผ่ ซึ่งเมื่อความหนืดมากจึงต้องการการลดน้ำพิเศษปริมาณสูง เมื่อเพิ่มผงหินปูนลงในมอร์ตาร์ยิ่งทำให้มีความหนืดมากขึ้นโดยมีระยะเวลาไหลผ่านกรวยเท่ากับ 16 วินาที เมื่อเพิ่มผงหินปูนร้อยละ 15 (70-15-15) ร่วมกับ W/B ร้อยละ 35 อย่างไรก็ตามพบว่ามอร์ตาร์ที่มีค่า W/B ร้อยละ 40 มีความหนืดใกล้เคียงกันโดยมีระยะเวลาไหลผ่านกรวยไม่เกิน 10 วินาที ซึ่งอยู่ในช่วง 3.6-9 วินาที เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณน้ำอิสระเพียงพอให้มอร์ตาร์มีความชื้นเหลวที่เหมาะสม แม้บางส่วนจะถูกดูดซึมจากโคลนเผาหรือผงหินปูน ดังนั้นค่า W/B ที่เหมาะสมสำหรับมอร์ตาร์คือร้อยละ 40



ภาพที่ 9 ความหนืดเริ่มต้นของมอร์ตาร์

3.2.2 ความหนืดของมอร์ตาร์เมื่อผ่านไป 20 นาที โดยทั่วไปแล้วมอร์ตาร์จะมีความหนืดมากขึ้น (ระยะเวลาไหลผ่านกรวยมากขึ้น) เมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากปริมาณน้ำบางส่วนเริ่มทำปฏิกิริยาและระเหยสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลต่อสมบัติการไหลชัดเจน ภาพที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาทีเพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืดช่วงต้นก่อนที่จะนำไปเข้าแบบหล่อ ชุดตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (100-0-0) เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อยมาก ระยะเวลาเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -0.1 ถึง 2 วินาที หมายความว่าสามารถนำไปผสมเพื่อผลิตคอนกรีตไหลได้และสามารถมีสมบัติการทำงานได้ดีใน 20 นาทีแรก สำหรับชุดตัวอย่างที่มีผงหินปูนรวมถึงโคลนเผามีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของความหนืดลดลงเมื่อค่า W/B มากขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณน้ำอิสระในมอร์ตาร์มากขึ้นทำให้ปริมาณน้ำที่เหลือเพียงพอในการช่วยรักษาสถิติการไหลได้ดี หากใช้ค่า W/B ร้อยละ 40 ความหนืดไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญในช่วง 20 นาทีแรก ยกเว้นชุดตัวอย่าง 85-15-0 ที่มีระยะเวลาไหลผ่านกรวยเพิ่มขึ้น 3 วินาที สามารถสรุปได้ว่าค่า W/B ร้อยละ 40 เหมาะสมที่สุดสำหรับมอร์ตาร์ไหลได้เมื่อพิจารณาสมบัติการไหล



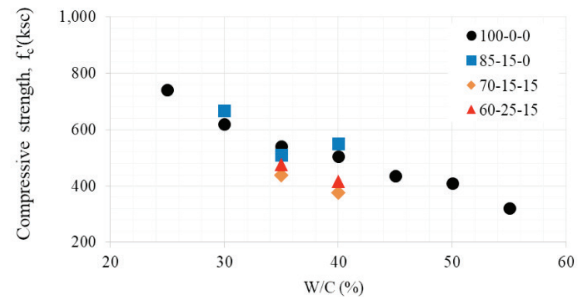
ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงความหนืด
เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที

3.3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

3.3.1 กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างมีอายุ 3 วัน

ภาพที่ 11 แสดงกำลังรับแรงอัดของทุกอย่างเมื่อมีอายุ 3 วัน กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อค่า W/B เพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วน้ำที่อยู่ในช่องว่างจะระเหยกลายเป็นช่องว่างทำให้เป็นจุดอ่อน ปริมาณช่องว่างขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในส่วนผสม มอร์ตาร์ที่มีโคลนเฝ้าร้อยละ 15 (85-15-0) มีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงมากกับส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ล้วน มีค่าแตกต่างกันประมาณร้อยละ 10 เพื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีค่า W/B ร้อยละ 30 35 และ 40 โดยมีค่าประมาณ 640 520 และ 500 กก./ชม.² ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มผงหินปูนในส่วนผสมร้อยละ 15 (70-15-15) พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อเทียบกับชุดตัวอย่าง 85-15-0 โดยมีค่าลดลงจาก 509.6 เป็น 437.9 กก./ชม.² และจาก 551.4 เป็น 376.6 กก./ชม.² คิดเป็นร้อยละ 14.1 และ 31.7 สำหรับมอร์ตาร์ที่มีค่า W/B ร้อยละ 35 และ 40 ตามลำดับ โดยทั่วไปผงหินปูนทำหน้าที่อุดช่องว่างในมอร์ตาร์ซึ่งจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากปริมาณแทนที่ร้อยละ 15 อาจมากเกินไปทำให้มีผงหินปูนส่วนที่เหลือพอสมควรประกอบกับปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ไป ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงจึงทำให้กำลังรับแรงอัด

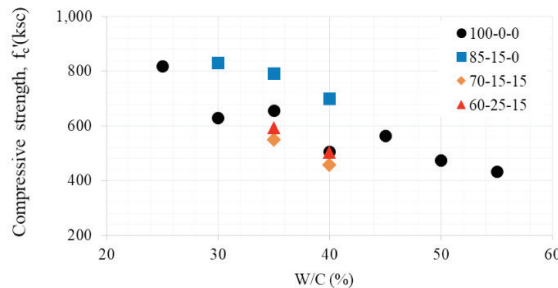
มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณโคลนเฝ้าจากร้อยละ 15 (70-15-15) เป็นร้อยละ 25 (60-25-15) พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณร้อยละ 9-10 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 438.0 เป็น 477.7 กก./ชม.² และจาก 376.6 เป็น 417.3 กก./ชม.² คิดเป็นร้อยละ 9.1 และ 10.8 สำหรับมอร์ตาร์ที่มีค่า W/B ร้อยละ 35 และ 40 ตามลำดับ อาจมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาลูมิโนคาร์บอนเนตจากปริมาณโคลนเฝ้าที่เหมาะสมทำให้มีกำลังรับแรงอัดมากขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่มีปริมาณโคลนเฝ้าน้อยกว่า [6]



ภาพที่ 11 กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างมีอายุ 3 วัน

3.3.2 กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน ภาพที่ 12 แสดงผลของกำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน แนวโน้มกำลังรับแรงอัดคล้ายกับผลกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน โดยมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นและการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ที่มีวัสดุประสานคือปูนซีเมนต์และโคลนเฝ้า (85-15-0) มีกำลังรับแรงอัดมากกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยโคลนเฝ้าร้อยละ 15 กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 628.9 เป็น 831.8 กก./ชม.² จาก 655.3 เป็น 792.5 กก./ชม.² และจาก 506.2 เป็น 700.1 กก./ชม.² สำหรับส่วนผสมที่มีค่า W/B ร้อยละ 30 35 และ 40 ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่า 400 กก./ชม.² ซึ่งเพียงพออย่างมากสำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป และหากพิจารณาการแทนที่ให้มากที่สุด การแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 ด้วยโคลนเฝ้า และร้อยละ 15 ด้วยผงหินปูนสามารถ

ทำได้และทำให้มอร์ตาร์มีสมบัติการไหลและสมบัติทางกลที่ดี



ภาพที่ 12 กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยและการอภิปรายในทุกหัวข้อสามารถสรุปได้ดังนี้

1. มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยโคลนเผาและผงหินปูนมีความต้องการสารลดน้ำพิเศษเพิ่มมากกว่าส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเนื่องจากวัสดุแทนที่มีสมบัติดูดซึมน้ำ ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ต้องการอาจมากถึงร้อยละ 4.0–5.3 ซึ่งมากกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนถึง 4–5 เท่าตัว ดังนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงราคาสารลดน้ำพิเศษในการประยุกต์วัสดุแทนที่ดังกล่าวเพื่อผลิตมอร์ตาร์หรือคอนกรีตไหลได้

2. ความหนืดของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อมีส่วนผสมของโคลนเผาและผงหินปูน แต่จะมีความหนืดมากขึ้นเล็กน้อยเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ล้วน หากมอร์ตาร์มีอัตราส่วน W/B ร้อยละ 40 โดยมีระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานประมาณ 4–6 วินาที ดังนั้นค่า W/B ร้อยละ 40 จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับประยุกต์โคลนเผาและผงหินปูน

3. กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของโคลนเผาและผงหินปูนมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่มีซีเมนต์ล้วนประมาณร้อยละ 15–20 แต่พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่ามากขึ้นประมาณร้อยละ 20–35 หากแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยโคลนเผาร้อยละ 15 โดยไม่มีผงหินปูน โคลนเผาสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ได้ดี เพิ่มสมบัติทางกลและเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยนี้ ขอทุนสนับสนุนโครงการวิจัยพื้นฐาน (Basic Research) ปีงบประมาณ 2564 มา ณ ที่นี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Meanyut B, Tangchirapat W and Jaturapitakkul C (2019). High-Strength Concrete Containing High Volume of Ground Bottom Ash. Journal of Thailand Concrete Association, 7 (2): 14–24. (In Thai)

[2] Kaewmanee K, Tangtermsirikul S and Komsan M (2015). Basic Properties and Durability of Concrete with Fly Ash and CaCO_3 Powder. Journal of Thailand Concrete Association, 3(2): 8–16.

[3] Makaratat N, Norrarat P, Jaturapitakkul C, and Songpiriyakij S (2019). Influence of High Volume Ternary Blend from Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag on Concrete Properties. Journal of Thailand Concrete Association, 7(2): 1–13. (In Thai)

[4] Srisen A, Tangchirapat W, and Jaturapitakkul C (2014). Properties of Concrete Using Fly Ash and Calcium Carbide Residue as a Cementitious Material. KMUTT Research and Development Journal, 37(2): 165–175. (In Thai)

[5] Kawaguchi N, Kohno K, and Mita M (1996). Influences of Superplasticizer, Mixing Time, Mixing Temperature and Cement Content on High-Volume Fly Ash Concrete. Materials Science Research International, 2(4): 242–247.

[6] K Scrivener, F Martirena, S Bishnoi, and S Maity (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 114: 49–56.

[7] Y Dhandapani, and M Santhanam (2020). Investigation on the microstructure-related characteristics to elucidate performance of composite cement with limestone-calcined clay combination. *Cement and Concrete Research*, 129: 105959.

[8] S Ferreira, M M C Canut, J Lund, and D Herfort 2019. Influence of fineness of raw clay and calcination temperature on the performance of calcined clay-limestone blended cements. *Applied Clay Science*, 169: 81–90.

[9] Y Dhandapani, T Sakthivel, M Santhanam, R Gettu, and R G Pillai (2018). Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107: 136–151.

[10] C Rodriguez and J I Tobon (2020). Influence of calcined clay/limestone, sulfate and clinker proportions on cement performance. *Construction and Building Materials*, 251: 119050.

[11] Z Shi et al. (2019). Sulfate resistance of calcined clay – Limestone – Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 116: 238–251.

[12] R G Pillai et al. (2019). Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined

clay cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 118: 111–119.

[13] Okamura H, and Ouchi M (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(15): 5–15.

[14] Japan Society of Civil Engineers (1999). Recommendation for Self-Compacting Concrete.

[15] Attachaiyawuth A (2015). Simple Evaluation of Flowability of Self-Compacting Concrete by Mortar Test. *TCA E-Magazine*. (In Thai)

[16] 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: 1–6.

[17] American Society for Testing and Materials (2017). ASTM C 494: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Philadelphia, ASTM.

[18] American Society for Testing and Materials (2020). ASTM C 109: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens. Philadelphia, ASTM.

[19] Rath S, Ouchi M, Puthipad N, and Attachaiyawuth A (2017). Improving the Stability of Entrained Air in Self-compacting Concrete by Optimizing the Mix Viscosity and Air Entraining Agent Dosage. *Construction and Building Material*, 148: 531–537.