



Journal of Thailand Concrete Association

วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

Effect of bottom ash as partial fine aggregate replacement on fresh properties of self-compacting mortar

ผลกระทบของการแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเถ้าก้นเตาต่อสมบัติที่สภาวะสดของมอร์ตาร์เติมเต็มแบบด้วยตนเอง

อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ^{1*} สิริราช เพ็งแจ่ม² พลพันธ์ เศรษฐพิทยากุล³ รักษิตพงษ์ สหมิตรมงคล⁴

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง

²นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

³อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง

⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received April 30, 2020

Received Revised Form:

May 28, 2020

Accepted: June 3, 2020

ABSTRACT:

This paper presents the effects of partial fine aggregate replacement by bottom ash on flowability and viscosity of self-compacting mortar with cement paste to mortar volumetric ratio of 50% and 55% and water to cement ratio of 35%, 40% and 45%. Bottom ash replacement ratio were 0%, 15% and 30% by volume. Bottom ash was prepared to be wet surface dry condition according to ASTM C1761. The results show that the increase of wet surface dry bottom ash did not significantly reduced flowability of mortar because free water was not absorbed by bottom ash. Viscosity of mortar tended to decrease with 15% wet surface dry bottom ash replacement. On the other hand, it slightly increased with 30% replacement due to internal friction increment by rough surface. However, viscosity was not noticeably changed in mortar with W/C of 45% due to its high water content which was sufficient for deducting the increase in internal friction by bottom ash volumetric replacement of 30%. Bottom ash replacement up 30% did not significantly affect fresh properties of mortar. Therefore, this could be applied to concrete industry. Moreover, rate of change in flowability of mortar at 30 minutes after mixing decreased with the increase of bottom ash replacement. Flow diameter changed in range of ± 20 mm. Rate of change in viscosity decreased in mortar with cement to mortar ratio of 55%. V-funnel time changed in range of ± 2 seconds but the change was up to 5-6 seconds in mortar with cement to mortar ratio of 50% and W/C of 35%.

KEYWORDS: bottom ash, self-compacting mortar, flowability, viscosity, internal friction

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของการแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเถ้าก้นเตาต่อสมบัติการไหลและความหนืดของมอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์เฟสต่อมอร์ตาร์โดยปริมาตรร้อยละ 50 และ 55 ร่วมกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 35, 40 และ 45 ร้อยละการแทนที่

*Corresponding Author,
Email address:
anuwat@eng.src.ku.ac.th

เล็กน้อยเท่ากับ 0, 15 และ 30 โดยเล็กน้อยเตรียมให้อยู่ในสภาวะเปียกผิวแห้งก่อนการใช้งานตามมาตรฐาน ASTM C1761 ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณเล็กน้อยที่อยู่ในสภาวะเปียกผิวแห้งก่อนการใช้งานไม่ส่งผลให้การไหลมีค่าลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญเนื่องจากเล็กน้อยไม่ดูดซึมน้ำจากส่วนผสมแม้ว่าจะมีผิวขรุขระ ความหนืดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่เล็กน้อยร้อยละ 15 และความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อแทนที่ร้อยละ 30 ซึ่งเกิดจากผิวขรุขระทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามความหนืดไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญสำหรับมอร์ตาร์ที่มี W/C ร้อยละ 45 เนื่องจากมีปริมาณน้ำสูงเพียงพอในการช่วยลดแรงเสียดทานภายในที่เพิ่มขึ้นจากการแทนที่เล็กน้อยร้อยละ 30 การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเล็กน้อยถึงร้อยละ 30 ไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของมอร์ตาร์มากนักจึงเป็นอีกหนึ่งการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมคอนกรีต นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติการไหลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 30 นาทีมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เล็กน้อยโดยมีการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลอยู่ในช่วง ± 20 มม. ขณะที่ความหนืดเกิดการเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อมอร์ตาร์มีซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 55 โดยระยะเวลาการไหลผ่านกรวยรูปตัววีเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ± 2 วินาที แต่การเปลี่ยนแปลงจะสูงถึง 5-6 วินาทีเมื่อมอร์ตาร์มีซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 50 ประกอบกับ W/C ร้อยละ 35

คำสำคัญ: เล็กน้อย, มอร์ตาร์เติมเต็มแบบด้วยตนเอง, สมบัติการไหล, ความหนืด, แรงเสียดทานภายใน

1. บทนำ

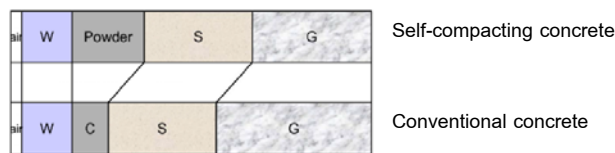
เล็กน้อย (Bottom ash) เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกรรมวิธีผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหินซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดทิ้งและก่อให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันวัสดุเหล่านี้จะมีปริมาณมากขึ้นตามความก้าวหน้าและการพัฒนาของประเทศ อย่างเช่น โรงไฟฟ้าบีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด (BLCP) ใช้ถ่านหินบิทูมินัสในการผลิตเชื้อเพลิงประมาณ 3.6 ล้านตันต่อปี จะเกิดเล็กน้อยเป็นวัสดุพลอยได้ประมาณ 0.36 ล้านตันต่อปี ซึ่งประกอบด้วยเถ้าลอย (fly ash) ร้อยละ 75-90 และเล็กน้อยร้อยละ 10-25 โดยเล็กน้อยมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายเถ้าลอยแต่จะมีขนาดใหญ่กว่าและมีผิวขรุขระจึงไม่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเนื่องจากมีรูปร่างไม่แน่นอนและมีค่าการดูดซึมน้ำมาก อย่างไรก็ตามนักวิจัยได้ศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานของเล็กน้อยแต่ละชนิดพบว่ากำลังอัดสูงมีศักยภาพในการนำไปใช้งานได้ [1,2,3]

ปัจจุบันมีการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมคอนกรีตอย่างมาก เนื่องจากสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตและทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้นในเรื่องความทนทานต่อคลอไรด์หรือซัลเฟต (โซเดียมซัลเฟต) ซึ่งเถ้าลอยส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้นอย่างชัดเจนโดยได้มีงานวิจัย

มากมายยืนยันตรงกัน [4,5,6,7,8] อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมคอนกรีตของประเทศไทยนำเล็กน้อยมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมคอนกรีตยังไม่เป็นที่แพร่หลาย เพราะลักษณะของเล็กน้อยมีขนาดใหญ่และมีรูพรุนซึ่งมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานอุตสาหกรรมคอนกรีต อย่างไรก็ตามพบว่า มีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาสมบัติของเล็กน้อยในงานคอนกรีต เล็กน้อยสามารถช่วยลดการหดตัวในคอนกรีตได้เป็นอย่างดี [9,10,11] เล็กน้อยเป็นมวลรวมเบาที่มีความพรุน มีอัตราการดูดซึมน้ำสูงและการดูดน้ำมีระยะเวลานานซึ่งทำให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) ก่อนชั่งชั่งยาก ดังนั้นจึงมีมาตรฐานการทดสอบและเตรียมมวลรวมประเภทนี้โดย ASTM C1761 [12] แนะนำการเตรียมสภาพมวลรวมประเภทนี้โดยให้มวลรวมอยู่ในสภาวะเปียกผิวแห้ง (Wet Surface Dry, WSD) เพื่อให้สามารถเตรียมวัสดุได้สะดวกมากขึ้น

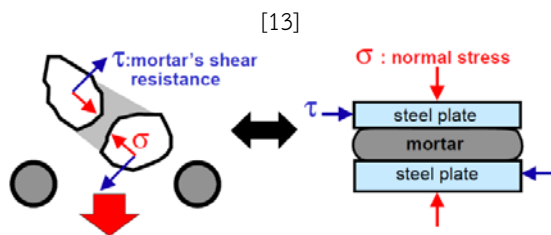
เทคโนโลยีคอนกรีตในหลายทศวรรษที่ผ่านมาถูกคำนึงถึงความทนทานเมื่อนำมาใช้เป็นโครงสร้างอาคาร โครงสร้างพื้นฐานหรือโครงสร้างอื่นๆ ความทนทานของโครงสร้างนอกจากจะต้องถูกออกแบบให้ดีแล้ว จำเป็นจะต้องประกอบไปด้วยวัสดุที่ดีและการก่อสร้างที่ได้คุณภาพ [13] หนึ่งในคอนกรีตพิเศษที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มความทนทานของโครงสร้างคือคอนกรีตไหลได้ (Self-

compacting concrete) เนื่องจากสามารถไหลเข้าเต็มแบบหล่อได้ด้วยน้ำหนักตัวเองทำให้คอนกรีตมีความแน่นมาก ส่วนผสมต้นแบบถูกวิจัยสำเร็จในปี ค.ศ. 1988 โดยโอกามูระและคณะ [13] โดยส่วนผสมเบื้องต้นแสดงดังภาพที่ 1 [13] คอนกรีตไหลได้ต้องการปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณสองเท่าเนื่องจากปูนซีเมนต์ต้องมากเพียงพอในการทำปฏิกิริยากับสารลดน้ำพิเศษเพื่อเกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ นอกจากนี้มวลรวมหยาบยังถูกจำกัดให้มีอัตราส่วนอยู่ระหว่างร้อยละ 28-33 ของคอนกรีตโดยปริมาตร [14] เนื่องจากเมื่อคอนกรีตไหลผ่านเหล็กเสริมในโครงสร้างระหว่างการหล่อคอนกรีต มอร์ตาร์จะถูกบีบอัดเนื่องจากการขยับตัวของมวลรวมหยาบซึ่งเปรียบเสมือนการทดสอบการรับแรงเฉือนของมอร์ตาร์เมื่อมีแรงตั้งฉากกระทำแสดงดังแสดงในรูปที่ 2 [15] ถ้าแรงตั้งฉากมากจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากทำให้คอนกรีตไหลได้ไม่ดี โดยแรงตั้งฉากนี้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณมวลรวมหยาบมีปริมาณมาก ดังนั้นปริมาณมวลรวมหยาบจึงจำเป็นต้องถูกจำกัดอยู่ในช่วงดังกล่าว



W คือน้ำ, Powder คือวัสดุผง, C คือปูนซีเมนต์, S คือมวลรวมละเอียด, G คือมวลรวมหยาบ

รูปที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตไหลได้และคอนกรีตธรรมดา



รูปที่ 2 แรงเสียดทานเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดจากแรงตั้งฉาก [15]

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาสมบัติการไหลและความหนืดของมอร์ตาร์ซึ่งมีความสำคัญต่อคอนกรีตไหลได้ เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเถ้าก้นเตา (Bottom ash) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าก้นเตามาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการผลิตคอนกรีตพิเศษ นอกจากนี้ยังช่วยลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้งได้อีกประการหนึ่ง

2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ที่สภาวะสด โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือการทดสอบสมบัติการไหลโดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแม่ (Deformability test) [16] และการทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์โดยกรวยทดสอบรูปตัววีมาตรฐานสำหรับมอร์ตาร์ (V-funnel) [16] วัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตและอุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วไป โดยเถ้าก้นเตาได้รับการสนับสนุนจากบริษัทผู้ดำเนินธุรกิจผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

เถ้าก้นเตาที่ใช้ถูกนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อให้มีขนาดเท่ากับมวลรวมละเอียด จากนั้นนำไปเตรียมให้เถ้าก้นเตาอยู่ในสภาวะเปียกผิวแห้ง (Wet Surface Dry, WDS) ตามมาตรฐาน ASTM C1761 [12] โดยการนำไปแช่น้ำ 1 วัน จากนั้นเถ้าก้นเตาถูกนำขึ้นมาเช็ดผิวออกด้วยกระดาษ paper towel จนกว่ากระดาษไม่ซับน้ำจากผิวเถ้าก้นเตา ถือว่าเถ้าก้นเตาอยู่ในสภาวะเปียกผิวแห้ง กระบวนการนี้ดำเนินการก่อนนำเถ้าก้นเตาไปใช้งานในการผสมมอร์ตาร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วัสดุอื่นที่นำมาผสมรวมกันได้แก่ น้ำ, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, สารลดน้ำพิเศษ และทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่สามารถหาได้ทั่วไปในประเทศไทย โดยทรายที่ใช้มีความชื้นอยู่ในช่วง 1.0% - 1.6% ซึ่งมีการปรับปริมาณน้ำชดเชยในส่วนผสมเนื่องจากความชื้นทรายที่ต่างกัน สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 1 และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุใช้ในการศึกษา

วัสดุ	สมบัติ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ตามมาตรฐาน มอก. เล่ม 15-2555
น้ำ	น้ำประปาทั่วไป
สารลดน้ำพิเศษ	สารผสมเพิ่มประเภท F ความถ่วงจำเพาะ 1.02
มวลรวมละเอียด	ทรายแม่น้ำความถ่วงจำเพาะ 2.6, ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4, ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.22%
เถ้าก้นเตา	ความถ่วงจำเพาะ 1.71, ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4, ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 13.32%

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
SiO ₂	55.29
Al ₂ O ₃	18.27
Fe ₂ O ₃	13.91
CaO	4.06
K ₂ O	2.35
TiO ₂	3.95
อื่นๆ	2.17

2.2 ส่วนผสมมอร์ตาร์

ส่วนผสมมอร์ตาร์มีทั้งหมด 54 ส่วนผสม โดยแบ่งเป็นมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ (p/m) ร้อยละ 50 และ 55 โดยปริมาตร ดังนั้นจะมีอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมอร์ตาร์ (f/m) เท่ากับร้อยละ 50 และ 45 ตามลำดับ แบ่งเป็นอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m) และอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมอร์ตาร์ (b/m) อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ (W/C) ร้อยละ 35, 40 และ 45 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตไหลได้ (Self-compacting concrete) [14] ปริมาณแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาบางส่วน

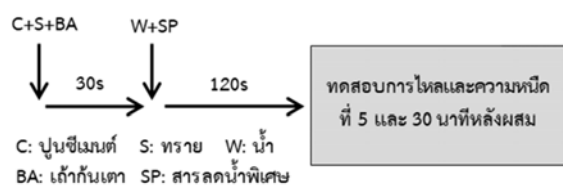
ด้วยเถ้าก้นเตา (b/m) ทั้งหมด 3 ค่าคือร้อยละ 0, 15 และ 30 โดยปริมาตร เพื่อศึกษาปริมาณมากที่สุดที่เป็นไปได้แต่ไม่ถึงกับแทนที่ทั้งหมด อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m) ที่ทำการทดสอบนั้นมีค่าเท่ากับอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมอร์ตาร์ (f/m) ลบด้วยอัตราส่วนเถ้าก้นเตาต่อมอร์ตาร์ (b/m) และเพื่อให้มอร์ตาร์สามารถไหลได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองจึงจำเป็นต้องใช้สารลดน้ำพิเศษ โดยอัตราส่วนสารลดน้ำพิเศษตอปูนซีเมนต์ (SP/C) ที่ใช้นั้นมีค่าร้อยละ 0.5, 0.8 และ 1.0 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาบางส่วน

W/C (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	p/m (ร้อยละโดยปริมาตร)	s/m (ร้อยละโดยปริมาตร)	b/m (ร้อยละโดยปริมาตร)	SP/C (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
35	50	50	0	0.5, 0.8, 1.0
		35	15	
		20	30	
50		0		
35		15		
20		30		
50		0		
35		15		
20		30		
45		0		
35		15		
15		30		
35	55	45	0	
		30	15	
		15	30	
45		0		
30		15		
15		30		
45		0		
30		15		
15		30		

2.3 ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์

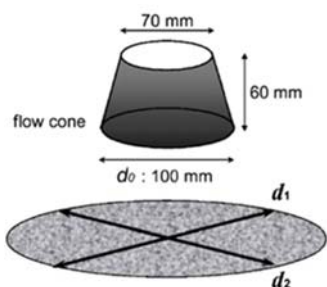
มอร์ตาร์ทุกส่วนผสมถูกผสมด้วยขั้นตอนที่เหมือนกันทุกประการโดยใช้เครื่องผสมมอร์ตาร์ขนาด 2 ลิตร เริ่มต้นจากใส่ปูนซีเมนต์, หยาบและเถ้าก้นเตาเปียกผิวแห้งลงในเครื่องผสมและผสมเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำน้ำที่ผสมกับสารลดน้ำพิเศษเรียบร้อยแล้วเทลงในเครื่องผสมและผสมเป็นเวลา 120 วินาที ใช้ผ้าขนหนูเช็ดน้ำปิดหมดทุกมุมภาชนะผสมเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ทั้งไว้จนถึงเวลาที่ 5 นาทีจึงนำไปทดสอบสมบัติการไหลและความหนืดตามลำดับ จากนั้นคลุมด้วยผ้าขนหนูอีกครั้งจนถึงเวลาที่ 30 นาที นำเข้าเครื่องผสมและเดินเครื่องผสมเป็นเวลา 5 วินาที แล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติการไหลและความหนืดอีกครั้งตามลำดับ เพื่อศึกษาความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์เมื่อถูกขนส่งจากโรงงานไปพื้นที่ใช้งานในระยะเวลาประมาณ 30 นาที ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์

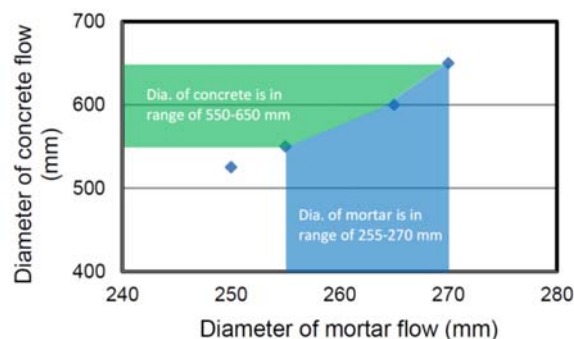
2.4 การทดสอบสมบัติการไหลของมอร์ตาร์

สมบัติการไหลของมอร์ตาร์สามารถทดสอบได้โดยโคนมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4 การทดสอบนี้เรียกว่าการทดสอบการเสียรูปของมอร์ตาร์ (Deformability Test) โดยมอร์ตาร์จะถูกเทลงในโคนขนาดมาตรฐาน จากนั้นโคนจะถูกดึงขึ้นในแนวตั้ง เส้นผ่านศูนย์กลางของการไหลแผ่จะถูกรวัด 2 แนวตั้งฉากกันแล้วนำมาเฉลี่ย เนื่องจากบางครั้งการไหลแผ่มีลักษณะเป็นวงรีเนื่องด้วยสาเหตุใดก็ตาม โดยช่วงการไหลแผ่ที่เหมาะสมสำหรับนำไปผสมกับมวลรวมหยาบเพื่อผลิตคอนกรีตไหลได้นั้นจะอยู่ในช่วง 250-280 มม.



รูปที่ 4 การทดสอบสมบัติการไหลของมอร์ตาร์ [16]

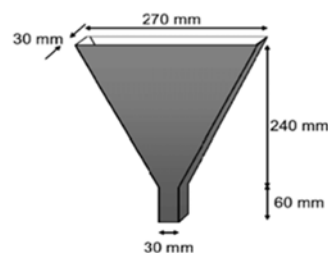
พบว่าเมื่อมอร์ตาร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลอยู่ในช่วง 255-275 มม. สามารถนำไปผสมมวลรวมหยาบประมาณร้อยละ 30 โดยปริมาตรจะทำให้คอนกรีตมีเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลอยู่ในช่วง 550-650 มม. แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งคอนกรีตจะมีการไหลที่ดีและไม่แยกตัว [17] อย่างไรก็ตามผลการทดสอบนี้ถูกทดสอบประเทศญี่ปุ่นทำให้สมบัติของวัสดุแตกต่างจากงานวิจัยนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดช่วงการไหลของมอร์ตาร์ที่เหมาะสมให้กว้างขึ้นเล็กน้อยซึ่งมีค่าเท่ากับ 250-280 มม.



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลระหว่างคอนกรีตและมอร์ตาร์ [17]

2.5 การทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์

ความหนืดของมอร์ตาร์สามารถทดสอบโดยกรวยมาตรฐานรูปตัววี (V-funnel) มีขนาดดังแสดงในรูปที่ 6 ขั้นตอนทดสอบเริ่มต้นจากเทมอร์ตาร์ลงในกรวยจนเต็มจากนั้นปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลจนกระทั่งผู้ทดสอบมองเห็นแสงลอดจากปลายกรวย ระยะเวลาที่มอร์ตาร์ไหลตั้งแต่เริ่มจนเมื่อผู้ทดสอบเห็นแสงคือเวลาที่บ่งบอกความหนืดของมอร์ตาร์ ซึ่งมอร์ตาร์ที่ใช้เวลาน้อยหมายความว่ามอร์ตาร์นั้นมีความหนืดต่ำ ซึ่งน้ำจะใช้ระยะเวลาประมาณ 1 วินาทีในการไหลผ่านกรวยทดสอบนี้ โดยมอร์ตาร์ที่มีความหนืดเหมาะสมจะใช้เวลาอยู่ในช่วง 3-13 วินาที [13]



รูปที่ 6 การทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์ [16]

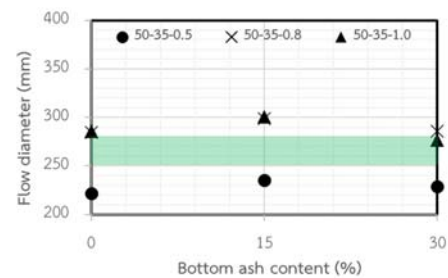
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากระเบียบวิธีวิจัยในหัวข้อที่ 2 สามารถอภิปรายผลการทดสอบสมบัติที่สภาวะสดของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยปริมาณเถ้าก้นเตาที่แตกต่างกันได้เป็น 2 ชุดคือสมบัติการไหลของมอร์ตาร์โดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและความหนืดของมอร์ตาร์โดยระยะเวลาไหลผ่านกรวยมาตรฐานได้ดังนี้

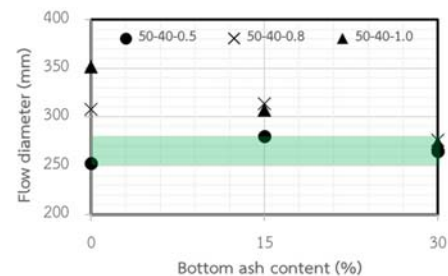
3.1 ผลของปริมาณแทนที่เถ้าก้นเตาต่อสมบัติการไหลของมอร์ตาร์

สมบัติการไหลของมอร์ตาร์ที่ทดสอบโดยการวัดการเสียรูป (Deformability test) เมื่อมีซีเมนต์เฟสต่อมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 50 (p/m 50%) และปริมาณเถ้าก้นเตาที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 7 แถบสีที่แรเงาแสดงถึงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่เหมาะสม (250-280 มม.) ที่มีการไหลที่ดีและไม่เกิดการแยกตัวจากผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำในส่วนผสมทุกค่าการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาเนื่องจากอนุภาคปูนซีเมนต์เกิดแรงผลึกมากขึ้นตามปริมาณสารลดน้ำ โดยเมื่อใช้อัตราส่วนสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 0.5-1.0 เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลมีค่าอยู่ในช่วง 220-300 มม., 250-350 มม., และ 275-350 มม. เมื่อมอร์ตาร์มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 35, 40 และ 45 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 ก), ข) และ ค) เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ส่วนผสมมีการไหลที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามค่าการไหลดังกล่าวมีอัตราการเพิ่มต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำจากร้อยละ 0.8 เป็น ร้อยละ 1.0 อาจเกิดจากปริมาณสารลดน้ำที่มากเกินไปกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่สามารถทำให้เกิดแรงผลึกได้ แม้ว่าจะเพิ่มปริมาณสารลดน้ำแต่การไหลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากอีกทั้งการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำมากเกินไปยังส่งผลให้มอร์ตาร์เกิดการแยกตัวดังที่พบในส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าก้นเตาและมีปริมาณ SP/C ร้อยละ 0.8-1.0 ทำให้มีค่าการไหลมากกว่า 300 มม. พิจารณาค่าการไหลเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าก้นเตาพบว่าโดยรวมเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 15 และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 30 ยกเว้นมอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำสูง (W/C 40%-45%) ประกอบกับปริมาณ SP/C ร้อยละ 0.8-1.0 และไม่มีการแทนที่เถ้าก้นเตาเนื่องจากเกิดการแยกตัว ดังแสดงในรูปที่ 7 ข) และ ค) แม้ว่าเถ้าก้นเตาจะมีผิวขรุขระซึ่งส่งผลให้การไหลแย่ลงเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างมวลรวมละเอียดเพิ่มขึ้นแต่ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาร้อยละ 15 ทำให้เส้นผ่าน

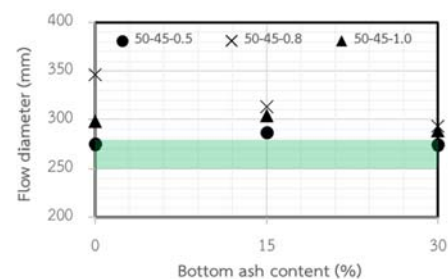
ศูนย์กลางการไหลเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเถ้าก้นเตาอยู่ในสภาวะเปียกผิวแห้งจึงไม่ดูดน้ำในมอร์ตาร์อย่างมีนัยยะสำคัญในช่วงที่มอร์ตาร์มีสภาวะสด ในขณะที่มวลรวมละเอียดปกติมีการดูดน้ำจากมอร์ตาร์ซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบางส่วนทำให้ปริมาณการดูดน้ำรวมจากมอร์ตาร์ลดลง อย่างไรก็ตามเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาเป็นร้อยละ 30 (เมื่อเทียบกับปริมาณร้อยละ 15) เนื่องจากการไหลที่แย่ลงจากแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นจากความขรุขระของผิวเถ้าก้นเตา มีค่ามากกว่าการไหลที่ดีขึ้นเนื่องจากปริมาณการดูดน้ำรวมลดลงจากการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ทำให้การไหลโดยรวมมีค่าลดลงเล็กน้อย



ก) p/m 50%, W/C 35%



ข) p/m 50%, W/C 40%

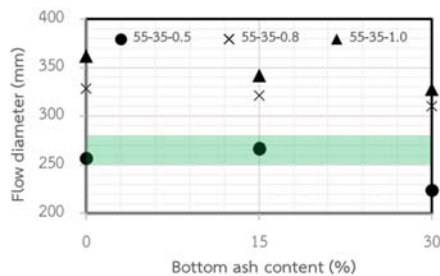


ค) p/m 50%, W/C 45%

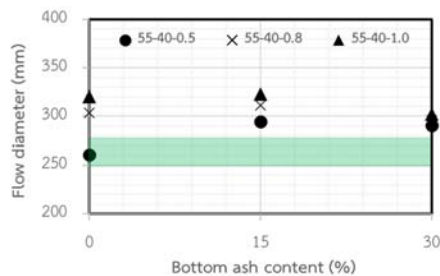
*การแสดงข้อมูลในภาพเรียงลำดับจาก p/m - W/C - SP/C เช่น 50-35-0.8 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนซีเมนต์เฟสต่อมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 50 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 35 และปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0.8

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่เถ้าก้นเตาต่อการไหลของส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 50

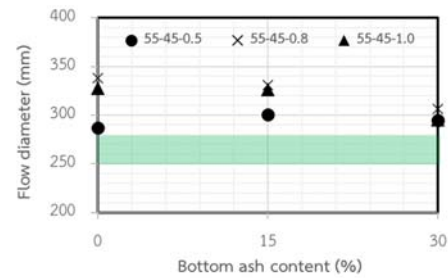
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและปริมาณแทนที่เถ้ากันเตา เมื่อมีค่าซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 55 (p/m 55%) แนวโน้มผลการทดสอบมีลักษณะคล้ายชุดตัวอย่างที่มี p/m ร้อยละ 50 โดยมีมอร์ตาร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำและอัตราส่วนผสมที่มีค่าต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำจากร้อยละ 0.8 เป็น ร้อยละ 1.0 เมื่อใช้อัตราส่วนสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 0.5-1.0 เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลมีค่าอยู่ในช่วง 230-360 มม., 260-330 มม., และ 275-340 มม. เมื่อมอร์ตาร์มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 35, 40 และ 45 ช่วงการไหลดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่มี p/m ร้อยละ 50 มาก หรือเพิ่มเพียงเล็กน้อยเนื่องจากปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มมากขึ้น ปริมาณซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 50-55 นั้นเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงมากทำให้ปริมาณมวลรวมละเอียดในส่วนผสมมีค่าต่ำ ความสามารถในการไหลจึงไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อพิจารณาความสามารถในการไหลเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้ากันเตาพบว่ามอร์ตาร์มีลักษณะคล้ายกับมอร์ตาร์ที่มี p/m ร้อยละ 50 เช่นเดียวกันโดยเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้ากันเตาร้อยละ 15 และจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้ากันเตาเท่ากับร้อยละ 30 ยกเว้นมอร์ตาร์บางส่วนผสมที่มีค่าการไหลเริ่มต้น (ไม่มีเถ้ากันเตา) มากกว่า 320 มม. เนื่องจากส่วนผสมมีการแยกตัวเกิดขึ้น



ก) p/m 55%, W/C 35%



ข) p/m 55%, W/C 40%



ค) p/m 55%, W/C 45%

*การแสดงข้อมูลในภาพเรียงลำดับจาก p/m - W/C - SP/C เช่น 50-35-0.8 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 50 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 35 และปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0.8

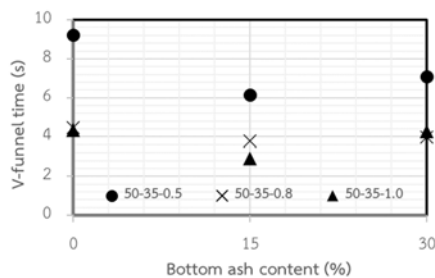
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่เถ้ากันเตาต่อการไหลของส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 55

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแม้เถ้ากันเตาจะมีผิวขรุขระแต่ถ้านำไปเตรียมให้อยู่ในสภาวะเปียกผิวแห้งด้วยการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 1 วัน ก่อนนำมาใช้งานก็จะไม่ทำให้การไหลมีค่าลดลงมากนักสามารถนำไปทดแทนมวลรวมละเอียดบางส่วนได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการไหลที่เหมาะสมในการนำไปผลิต Self-Compacting Concrete (250-280 มม.) พบว่าปริมาณสารลดน้ำที่ใช้อยู่ในช่วง 0.4-0.7% ซึ่งไม่แตกต่างจากปริมาณที่ใช้สำหรับมอร์ตาร์หรือคอนกรีตไหลได้ที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด

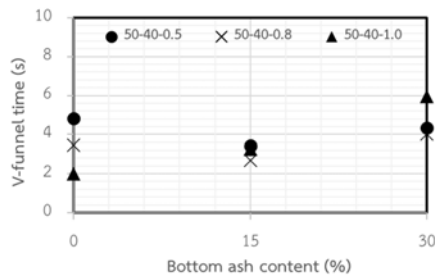
3.2 ผลของปริมาณแทนที่เถ้ากันเตาต่อสมบัติความหนืดของมอร์ตาร์

ความหนืดของมอร์ตาร์ที่ทดสอบโดยการวัดระยะเวลาไหลผ่านกรวยรูปตัววี (V-funnel) เมื่อมีซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 50 (p/m 50%) และปริมาณเถ้ากันเตาที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 9 แนวโน้มของความหนืดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการแทนที่เถ้ากันเตามีลักษณะคล้ายกันในทุกส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 35, 40 และ 45 โดยความหนืดจะมีค่าลดลงเมื่อแทนที่เถ้ากันเตาร้อยละ 15 และความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่จากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 30 ซึ่งสอดคล้องกับค่าการไหลที่อภิปรายในหัวข้อ 3.1 เมื่อมอร์ตาร์มีความหนืดลดลงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่ามอร์ตาร์ที่เกิดการแยกตัวจะมีแนวโน้มที่ต่ำออกไป พิจารณาส่วนผสม 50-40-1.0 และ 50-45-0.8 ในรูปที่ 9 ก) และ ข) ที่ไม่มีการแทนที่เถ้ากันเตาระยะเวลาไหลผ่านกรวยรูปตัววีมีค่าต่ำกว่า 2 ซึ่งแสดงว่ามอร์ตาร์มีความหนืดน้อยมากทำให้เกิดการแยกตัว แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความหนืดจึง

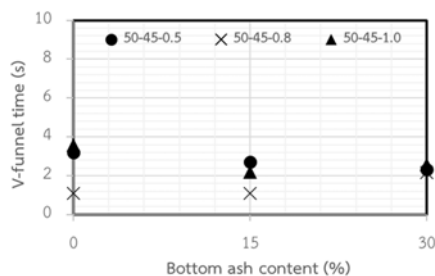
แตกต่างกันไป สาเหตุที่ทำให้ความหนืดมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 15 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำล่วน สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการไหลเนื่องจากปริมาณการดูดน้ำลดลงจากการแทนที่เถ้าก้นเตาที่ไม่ดูดน้ำจากมอร์ตาร์ และเมื่อเพิ่มปริมาณแทนที่เป็นร้อยละ 30 ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ร้อยละ 15 เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นจากจากผิวขรุขระของเถ้าก้นเตามีค่ามากกว่าความหนืดที่ลดลงตามปริมาณการดูดน้ำที่ลดลงจากปริมาณแทนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดโดยรวมของมอร์ตาร์มีค่ามากขึ้น



ก) p/m 50%, W/C 35%



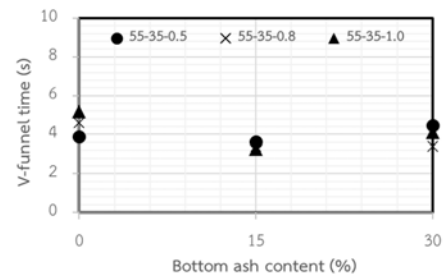
ข) p/m 50%, W/C 40%



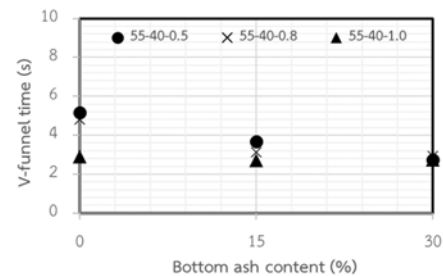
ค) p/m 50%, W/C 45%

*การแสดงข้อมูลในภาพเรียงลำดับจาก p/m - W/C - SP/C เช่น 50-35-0.8 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 50 อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 35 และปริมาณสารลดน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0.8

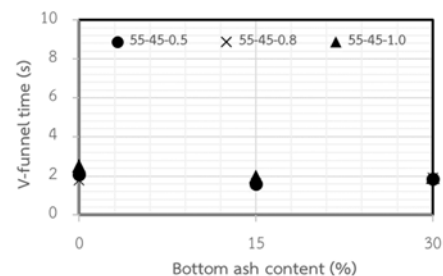
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่เถ้าก้นเตาต่อความหนืดของส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 50



ง) p/m 55%, W/C 35%



จ) p/m 55%, W/C 40%



ฉ) p/m 55%, W/C 45%

*การแสดงข้อมูลในภาพเรียงลำดับจาก p/m - W/C - SP/C เช่น 50-35-0.8 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 50 อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 35 และปริมาณสารลดน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0.8

รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่เถ้าก้นเตาต่อความหนืดของส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 55

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของมอร์ตาร์ที่มีซีเมนต์เฟสต่อมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 55 (p/m 55%) และปริมาณเถ้าก้นเตาที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 10 แนวโน้มของความหนืดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการแทนที่เถ้าก้นเตาสำหรับส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 มีลักษณะคล้ายกับมอร์ตาร์ที่มีซีเมนต์เฟสต่อมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 50 โดยความหนืดจะมีค่าลดลงเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 15 และความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่จากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 30 ระยะเวลาไหลผ่านกรวยรูปตัววีอยู่ระหว่าง 3-5 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 10 ก) แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เป็นร้อยละ 40 ดังแสดงในรูปที่ 10 ข) ความหนืดมีค่าลดลงต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาและใช้

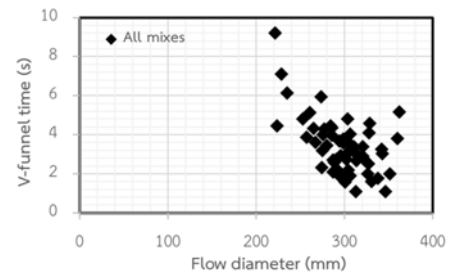
ปริมาณสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.5 และ 0.8 เนื่องจากมอร์ตาร์มีซีเมนต์เพสต์มากและมีปริมาณน้ำเพียงพอที่ทำให้ความหนืดมีค่าลดลงแม้จะเพิ่มปริมาณเถ้ากั้นเตาในส่วนผสม อย่างไรก็ตามพบว่าความหนืดมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.0 เนื่องจากมอร์ตาร์มีการไหลที่ดีมากโดยมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไหลมากกว่า 300 มม. ทำให้การเพิ่มปริมาณเถ้ากั้นเตาไม่ส่งผลต่อความหนืดของมอร์ตาร์ เช่นเดียวกับมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 45 ดังแสดงในรูปที่ 10 ข) มอร์ตาร์มีค่า V-funnel time อยู่ในช่วง 1.8-2.2 วินาที และมีค่าการไหล 290-340 มม. ซึ่งเป็นสมบัติการไหลที่สูงทำให้ค่าความหนืดไม่เปลี่ยนแปลงมากแม้ว่าจะมีปริมาณเถ้ากั้นเตาและสารลดน้ำที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบสมบัติความหนืดพบว่า V-funnel time อยู่ในช่วง 2-10 วินาที ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับ Self-Compacting Concrete [13] อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณเถ้ากั้นเตาส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำต่ำ และความหนืดมีค่าลดลงเมื่อมอร์ตาร์มีปริมาณน้ำสูง ดังนั้นการใช้งานนั้นผู้ออกแบบต้องระมัดระวังในกรณีที่มอร์ตาร์ความหนืดมีค่าลดลงเนื่องจากอาจทำให้เกิดการแยกตัวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอร์ตาร์ที่มีค่า V-funnel time น้อยกว่า 3 วินาที

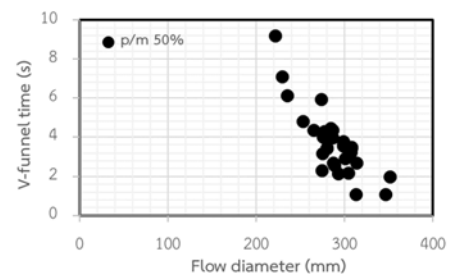
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการไหลและความหนืดของมอร์ตาร์

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลกับความหนืดของมอร์ตาร์โดย V-funnel time ที่แสดงในรูปที่ 11 โดยรูปที่ 11 ก), ข) และ ค) แสดงความสัมพันธ์ของทุกส่วนผสม, มอร์ตาร์ที่มี p/m ร้อยละ 50 และ มอร์ตาร์ที่มี p/m ร้อยละ 55 ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มโดยรวมมอร์ตาร์จะมีความหนืดลดลง (V-funnel time ลดลง) เมื่อมีการไหลที่ดีขึ้น (Flow diameter มากขึ้น) อย่างไรก็ตามเมื่อแยกพิจารณามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ร้อยละ 50 และ 55 พบว่าความสัมพันธ์ของสองชุดตัวอย่างมีค่าแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง มอร์ตาร์ที่มีค่า p/m ร้อยละ 50 แนวโน้มความสัมพันธ์ค่อนข้างชัดเจนโดยค่าความหนืดแปรผันตรงกับการไหลของมอร์ตาร์ ดังแสดงในรูปที่ 11 ข) ซึ่งมอร์ตาร์ที่มีความหนืดน้อยย่อมจะมีการไหลที่ดี แต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่ชัดเจนสำหรับมอร์ตาร์ที่มี p/m ร้อยละ 55 ดังแสดงในรูปที่ 11 ค) อาจมีสาเหตุมาจากซีเมนต์เพสต์ปริมาณค่อนข้างมากทำให้มีการหล่อลื่นที่ดีส่งผลให้ความหนืดมีค่าค่อนข้างน้อยโดยทุกส่วนผสมมีค่า V-funnel time

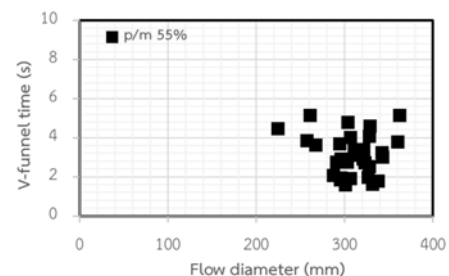
ต่ำกว่า 6 วินาที แม้ว่าค่าการไหลจะอยู่ในช่วงที่กว้างตั้งแต่ 220-360 มม. ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อมอร์ตาร์มีปริมาณซีเมนต์เพสต์มาก สมบัติการไหลจึงไม่แปรผันตรงกับความหนืดของมอร์ตาร์



ก) ทุกส่วนผสม



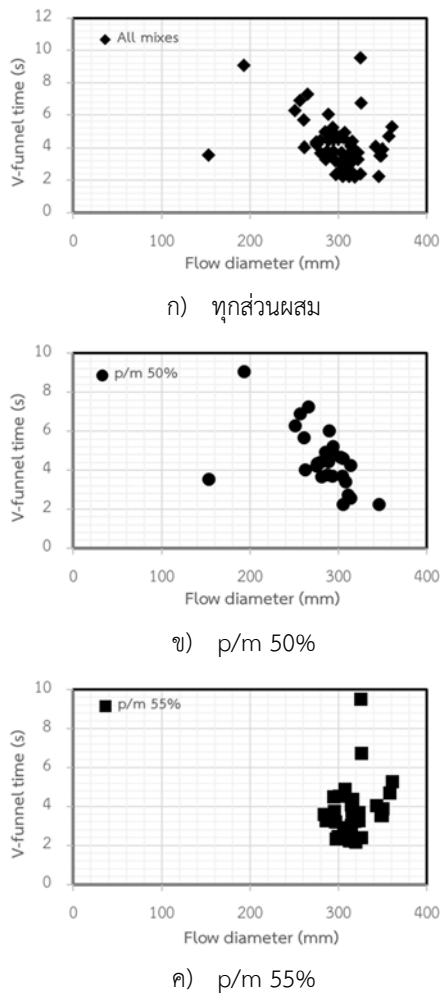
ข) p/m 50%



ค) p/m 55%

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการไหลและความหนืดของมอร์ตาร์วัดค่า ณ 5 นาทีหลังผสม

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลกับความหนืดของมอร์ตาร์เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาทีหลังผสม พบว่าแนวโน้มคล้ายกับผลทดสอบที่เวลา 5 นาที โดยสมบัติการไหลจะแปรผันตรงกับความหนืดสำหรับมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ร้อยละ 50 ดังแสดงในรูปที่ 12 ข) และความสัมพันธ์จะไม่แปรผันตรงเมื่อมอร์ตาร์มีอัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ร้อยละ 55 ดังแสดงในรูปที่ 12 ค)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการไหลและความหนืดของ
มอร์ตาร์วัดค่า ณ 30 นาทีหลังผสม

3.4 การเปลี่ยนแปลงสมบัติการไหลของมอร์ตาร์ที่เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

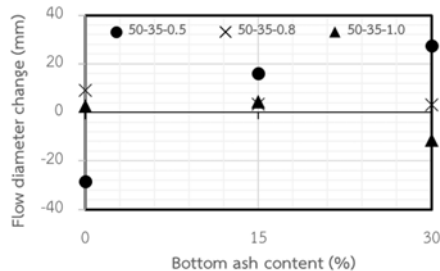
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของมอร์ตาร์เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาทีถูกทดสอบเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมบัติการไหลเนื่องจากการใช้งานจริงต้องมีการขนส่งไปยังพื้นที่ใช้งาน ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและปริมาณแทนที่เถ้าสำหรับมอร์ตาร์ที่มี p/m ร้อยละ 50 แสดงในภาพที่ 13 จากผลการวิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงสมบัติการไหลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยโดยเมื่อพิจารณามอร์ตาร์ที่มี W/C ร้อยละ 35 (รูปที่ 13 ก) หลังจากเวลาผ่านไป 30 นาที ค่าการไหลมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าสำหรับมอร์ตาร์ที่มี p/m ร้อยละ 0.5 และมีค่าลดลงเมื่อใช้สารลดน้ำร้อยละ 0.8 และ 1.0 ค่าการไหลที่เพิ่มขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากการคายน้ำของเถ้าสำหรับ [18] ภายหลังในกรณีที่ปริมาณสารลดน้ำน้อย โดยมีการเปลี่ยนอยู่

ในช่วง ± 30 มม. (50-35-0.5) แต่การคายน้ำส่งผลต่อการไหลของมอร์ตาร์ไม่มากเมื่อใช้สารลดน้ำพิเศษปริมาณมากเนื่องจากมอร์ตาร์มีการไหลที่ติดอยู่แล้วการคายน้ำบางส่วนจึงส่งผลไม่มากต่อการไหลโดยรวม พิจารณามอร์ตาร์ที่มีค่า W/C ร้อยละ 40 ในรูปที่ 13 ข) พบว่าการเปลี่ยนแปลงการไหลแตกต่างกันมากในมอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าสำหรับเถ้าโดยเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น 40 มม., เพิ่มขึ้น 5 มม. และลดลง 50 มม. สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้สารลดน้ำร้อยละ 0.5, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ หลังจากผ่านไป 30 นาที ซึ่งปริมาณสารลดน้ำส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงการไหล แต่มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าสำหรับเถ้ากลับไม่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลมากในทุกส่วนผสมโดยมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -10 ถึง +5 มม. และช่วงการเปลี่ยนแปลงจะแคบลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าสำหรับเถ้าเป็นร้อยละ 30 อย่างไรก็ตามพบว่าการไหลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อมอร์ตาร์มี W/C ร้อยละ 45 ทั้งส่วนผสมที่มีและไม่มีเถ้าสำหรับเถ้าซึ่งอาจเป็นผลจากที่มอร์ตาร์มีปริมาณน้ำอิสระสูงทำให้แม้ว่าจะมีการสูญเสียในน้ำในช่วง 30 นาทีแต่ก็ไม่กระทบต่อการไหลดังแสดงในรูปที่ 13 ค)

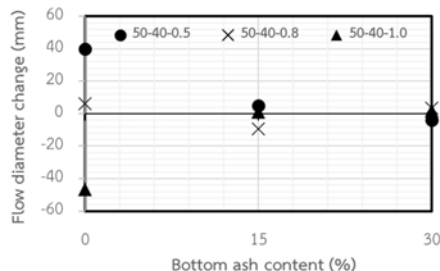
รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและปริมาณแทนที่เถ้าสำหรับมอร์ตาร์ที่มี p/m ร้อยละ 55 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการไหลของมอร์ตาร์ที่มี W/C ร้อยละ 35 คล้ายมอร์ตาร์ที่มี p/m ร้อยละ 50 โดยหลังจากเวลาผ่านไป 30 นาที ค่าการไหลมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าสำหรับเถ้าและใช้สารลดน้ำร้อยละ 0.5 การไหลมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารลดน้ำร้อยละ 0.8 และการไหลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อใช้สารลดน้ำร้อยละ 1.0 ค่าการไหลที่เพิ่มขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากการคายน้ำของเถ้าสำหรับเถ้าภายหลัง [18] แต่การคายน้ำส่งผลต่อการไหลของมอร์ตาร์ไม่มากเมื่อใช้สารลดน้ำปริมาณมาก สำหรับมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C ร้อยละ 40 และ 45 ดังแสดงในรูปที่ 14 ข) และ ค) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการไหลมีลักษณะคล้ายกันคือกรณีที่มอร์ตาร์มีปริมาณสารลดน้ำต่ำ (ร้อยละ 0.5) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลเปลี่ยนแปลงมากเมื่อไม่มีเถ้าสำหรับเถ้าโดยมีค่ามากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาทีเท่ากับ 47 และ 32 มม. เมื่อมีค่า W/C ร้อยละ 40 และ 45 ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีค่าลดลงต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าสำหรับเถ้าร้อยละ 30 โดยมีค่าการไหลเพิ่มขึ้น 10 มม. และลดลง 10 มม. เมื่อมีค่า W/C ร้อยละ 40 และ 45 ตามลำดับ จากนั้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงการไหลมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันคือการคายน้ำของเถ้าสำหรับเถ้าส่งผลต่อการไหลไม่มากในมอร์ตาร์ที่

มีปริมาณน้ำหรือสารลดน้ำสูงเนื่องจากมีสมบัติการไหลที่ดีอยู่แล้ว โดยค่าการไหลจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ± 20 มม. สำหรับมอร์ตาร์ที่มีค่า SP/C ร้อยละ 0.8-1.0, W/C ร้อยละ 40-45 และปริมาณแฉกที่เท่ากับร้อยละ 15-30

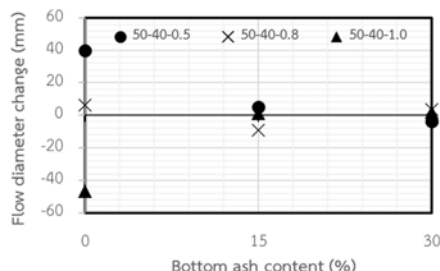
สามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติการไหลของมอร์ตาร์เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยการไหลของมอร์ตาร์มีค่ามากขึ้นตามปริมาณแฉกที่มากขึ้นเมื่อมอร์ตาร์มีการไหลเริ่มต้นน้อย (SP/C ร้อยละ 0.5) เนื่องจากการคายน้ำของแฉกเพิ่มสมบัติการไหลอย่างชัดเจน แต่สำหรับมอร์ตาร์ที่มีการไหลดีอยู่แล้ว (SP/C ร้อยละ 0.8-1.0 และ W/C ร้อยละ 40-45) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากปริมาณน้ำที่คายออกมาจากแฉกส่งผลต่อปริมาณน้ำอิสระรวมไม่มากนักจึงทำให้การไหลเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก



ก) p/m 50%, W/C 35%



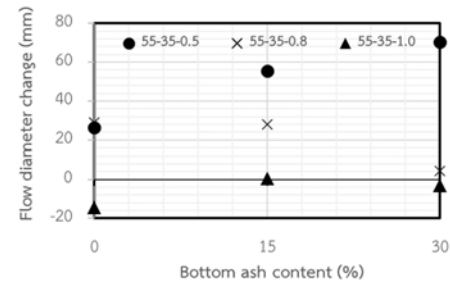
ข) p/m 50%, W/C 40%



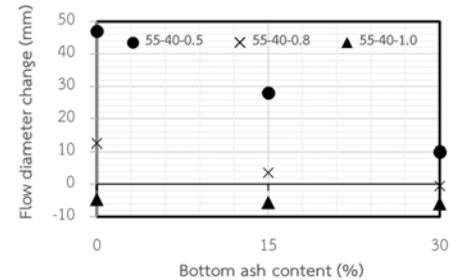
ค) p/m 50%, W/C 45%

*การแสดงข้อมูลในภาพเรียงลำดับจาก p/m - W/C - SP/C เช่น 50-35-0.8 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 50 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 35 และปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0.8

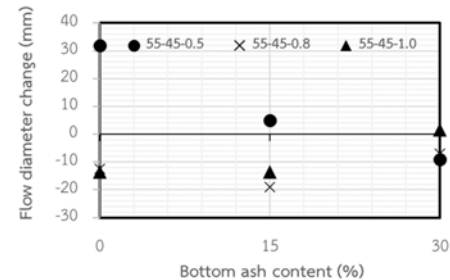
รูปที่ 13 เส้นผ่านศูนย์กลางของการไหลที่เปลี่ยนแปลงหลังจาก 30 นาทีของส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 50



ก) p/m 55%, W/C 35%



ข) p/m 55%, W/C 40%



ค) p/m 55%, W/C 45%

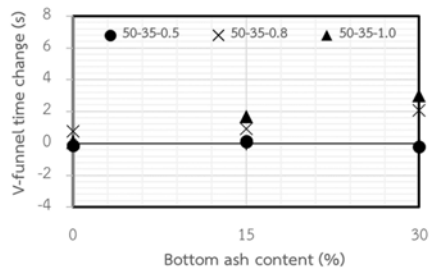
*การแสดงข้อมูลในภาพเรียงลำดับจาก p/m - W/C - SP/C เช่น 50-35-0.8 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 50 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 35 และปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0.8

รูปที่ 14 เส้นผ่านศูนย์กลางของการไหลที่เปลี่ยนแปลงหลังจาก 30 นาทีของส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 55

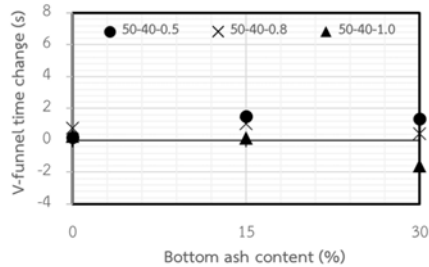
3.5 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของมอร์ตาร์เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

รูปที่ 15 แสดงค่าความหนืดของมอร์ตาร์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที สำหรับมอร์ตาร์ที่มี p/m ร้อยละ 50 พบว่า V-funnel time มีค่าเพิ่มขึ้น (ความหนืดมากขึ้น) เมื่อเพิ่มปริมาณแฉกในมอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำต่ำและปริมาณสารลดน้ำสูง (W/C ร้อยละ 35 และ SP/C ร้อยละ 0.8-1.0) โดยความหนืดมีค่ามากขึ้นประมาณ 2-3 วินาทีเมื่อแฉกที่เท่ากับร้อยละ

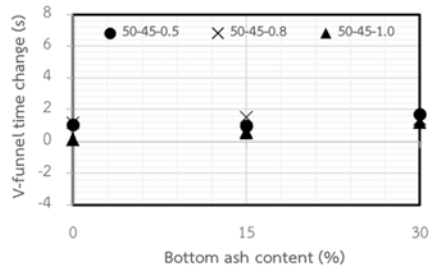
30 แต่จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อมีสารลดน้ำต่ำ (SP/C ร้อยละ 0.5) เมื่อพิจารณา mortars ที่มีปริมาณน้ำสูง (W/C ร้อยละ 40-45) ดังแสดงในรูปที่ 15 ข) และ ค) พบว่าความหนืดเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาหรือสารลดน้ำโดยความหนืดมีค่ามากขึ้นในช่วง 0-2 วินาที ยกเว้น mortars ที่มี W/C ร้อยละ 40 ร่วมกับปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 1.0 ความหนืดกลับมีค่าลดลงประมาณ 2 วินาทีเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 30



ก) p/m 50%, W/C 35%



ข) p/m 50%, W/C 40%



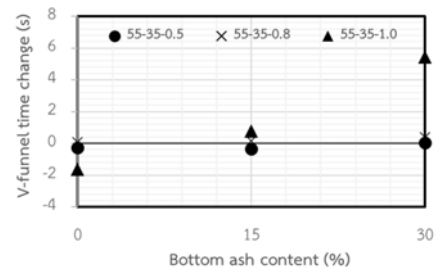
ค) p/m 50%, W/C 45%

*การแสดงข้อมูลในภาพเรียงลำดับจาก p/m – W/C – SP/C เช่น 50-35-0.8 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อ mortars เท่ากับร้อยละ 50 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 35 และปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0.8

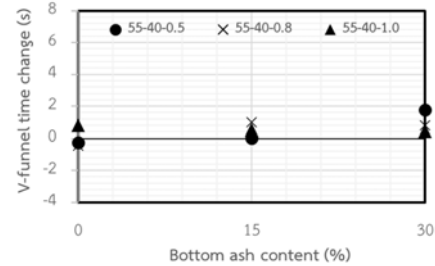
รูปที่ 15 เวลาในการไหลผ่านกรวยทดสอบที่เปลี่ยนแปลงหลังจาก 30 นาทีของส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 50

ความหนืดของ mortars ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที สำหรับ mortars ที่มี p/m ร้อยละ 55 แสดงในภาพที่ 16 แนวโน้มโดยรวมของส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และ 45 นั้นใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 16 ข) และ ค) คือ

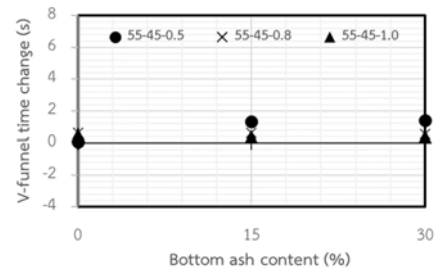
mortars มีความหนืดมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที (V-funnel time เพิ่มขึ้น) V-funnel time เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0-2 วินาที สังเกตได้ว่าความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อไม่มีเถ้าก้นเตา ค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ± 1 วินาที อาจมีสาเหตุมาจากรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวที่ขรุขระของเถ้าก้นเตาทำให้ระยะเวลาในการไหลผ่านกรวยรูปตัววีมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามพบว่าใน mortars ที่มี W/C ร้อยละ 35 ดังแสดงในภาพที่ 16 ก) มีแนวโน้มต่างออกไปโดยเมื่อใช้ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 0.5-0.8 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดอย่างมีนัยสำคัญแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตา แต่ความหนืดเพิ่มขึ้นมากเมื่อใช้ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 1.0 ใน mortars ที่แทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 โดยค่า V-funnel time เพิ่มขึ้นประมาณ 5.4 วินาที



ก) p/m 55%, W/C 35%



ข) p/m 55%, W/C 40%



ค) p/m 55%, W/C 45%

*การแสดงข้อมูลในภาพเรียงลำดับจาก p/m – W/C – SP/C เช่น 50-35-0.8 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อ mortars เท่ากับร้อยละ 50 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 35 และปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0.8

รูปที่ 16 เวลาในการไหลผ่านกรวยทดสอบที่เปลี่ยนแปลงหลังจาก 30 นาทีของส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 55

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยที่ได้จากการทดสอบสมบัติที่สภาวะสดของมอร์ตาร์ซึ่งแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเถ้าก้นเตาสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้:

1. สมบัติการไหลของมอร์ตาร์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแม้เพิ่มปริมาณแทนที่เถ้าก้นเตาจนถึงร้อยละ 30 แม้ว่าเถ้าก้นเตาจะมีผิวหยาบซึ่งสามารถขัดเซยได้โดยการทำให้เถ้าก้นเตาอยู่ในสภาวะเปียกผิวแห้งก่อนการใช้งานโดยมีสมบัติการไหลเหมาะสมสำหรับ Self-Compacting Concrete ทุกประการ

2. ความหนืดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือคงที่เมื่อมีปริมาณแทนที่เถ้าก้นเตามากขึ้นสำหรับมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ร้อยละ 50 และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยหรือคงที่สำหรับมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ร้อยละ 55 เนื่องจากซีเมนต์เพสต์มีส่วนช่วยในการเพิ่มความหนืดของมอร์ตาร์ สามารถนำเถ้าก้นเตาไปใช้สำหรับ Self-Compacting Concrete ได้โดยไม่ส่งผลต่อความหนืดของมอร์ตาร์อย่างมีนัยยะสำคัญ

3. สมบัติการไหลแปรผันตรงกับความหนืดเมื่อมีซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 50 แต่ความสัมพันธ์ไม่ชัดเจนเมื่อมีซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 55 เนื่องจากมอร์ตาร์มีการไหลที่ดีแม้ว่าจะมีความหนืดมาก ปัจจัยดังกล่าวจึงไม่แปรผันตรงซึ่งกันและกัน

4. การเปลี่ยนแปลงสมบัติการไหลของมอร์ตาร์เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยซึ่งการไหลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณแทนที่เถ้าก้นเตาโดยเฉพาะอย่างยิ่งมอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำและสารลดน้ำสูง เนื่องจากเถ้าก้นเตาคายน้ำภายหลังขัดเซยกับปริมาณน้ำที่สูญเสียไปตามระยะเวลา ทำให้สามารถออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์หรือคอนกรีตเติมเต็มแบบด้วยตนเองที่รักษาสมบัติการไหลที่ดีได้

5. ความหนืดของมอร์ตาร์โดยรวมมีค่ามากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที เนื่องจากการสูญเสียไปตามระยะเวลาโดยจะมีอัตราการเพิ่มความหนืดมากขึ้นตามปริมาณแทนที่เถ้าก้นเตาโดยความหนืดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0-2 วินาที

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท BASF (Thai) จำกัด ที่ได้สนับสนุนสารเคมีที่จำเป็นสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณบริษัท BLC Power ที่ได้สนับสนุนวัสดุเถ้าก้นเตา

ที่ใช้ในการทดสอบ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชาที่สนับสนุนทุนวิจัยแบบบูรณาการประจำปีงบประมาณ 2563 ไว้ ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Abdulmatin, P. Rattanachu, P. Khongpermgoon, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakku, "A Study of Pozzolanic Reaction of Two Bottom Ashes Obtained from Lignite and Bituminous Coal Combustion," KMUTT Research and Development Journal, pp. 49-65, 2020.
- [2] P. Khongpermgoon, A. Abdulmatin, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakku, "Development of Compressive strength of Concrete from A Binder of Bottom Ash and Calcium Carbide Residue," Journal of Thailand Concrete Association, vol. 4, no. 1, pp. 11-19, 2016.
- [3] B. Meanyut, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakku, "High-Strength Concrete Containing High Volume of Ground Bottom Ash," Journal of Thailand Concrete Association, vol. 7, no. 2, pp. 14-24, 2019.
- [4] K. Kaewmanee, S. Tangtermsirikul and M. Komsan, "Basic Properties and Durability of Concrete with Fly Ash and CaCO₃ Powder," Journal of Thailand Concrete Association, vol. 3, no. 2, pp. 8-16, 2015.
- [5] N. Makaratat, P. Norrarat, C. Jaturapitakku and S. Songpiriyakij, "Influence of High Volume Ternary Blend from Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag on Concrete Properties," Journal of Thailand Concrete Association, vol. 7, no. 2, pp. 1-13, 2019.
- [6] A. Srisen, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakku, "Properties of Concrete Using Fly Ash and Calcium Carbide Residue as a Cementitious Material," KMUTT Research and Development Journal, vol. 37, no. 2, pp. 165-175, 2014.
- [7] P. Khongpermgoon, A. Abdulmatin, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakku, "Development of Compressive strength of Concrete from A Binder of

Bottom Ash and Calcium Carbide Residue," Journal of Thailand Concrete Association , vol. 4, no. 1, pp. 11-19, 2016.

[8] N. Kawaguchi, K. Kohno and M. Mita, "Influences of Superplasticizer, Mixing Time, Mixing Temperature and Cement Content on High-Volume Fly Ash Concrete," Materials Science Research International, vol. 2, no. 4, pp. 242-247, 1996.

[9] S. Tongaroonsri, S. Hamavibool, P. Choktaweekarn and S. Tangtermsirikul, "Effect of Bottom Ash on Autogenous Shrinkage of Binary Binder Mortar," Journal of Thailand Concrete Association, vol. 3, no. 1, pp. 1-8, 2015.

[10] W. Krudam, W. Arckarapunyathorn and R. Sahamitmongkol, "Effect of High Volume Replacement of Fine Aggregate with Bottom Ash on Flow, Setting Time, Compressive Strength and Shrinkage of Mortar," Journal of Thailand Concrete Association, vol. 4, no. 2, pp. 1-13, 2016.

[11] M. Kongsuk, S. Hamavibool and S. T. S. Tongaroonsri, "Effect of Fly Ash, Limestone Powder and Bottom Ash on Shrinkage Cracking Behavior of Concrete," Journal of Thailand Concrete Association, vol. 4, no. 1, pp. 30-39, 2016.

[12] ASTM., "Standard Specification for Lightweight Aggregate for Internal Curing of Concrete" ASTM C1761, 2015.

[13] H. Okamura and M. Ouchi, "Self-Compacting Concrete," Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 1, no. 15, pp. 5-15, 2003.

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

[15] N. Nagamoto and K. Ozawa, "Mixture Proportions of Self-Compacting High-Performance Concrete," ACI International, vol. 172, pp. 623-636, 1997.

[16] M. Ouchi, Y. Edamatsu, K. Ozawa and H. Okamura, "A Simple Evaluation Method for

Interaction between Coarse aggregate and Mortar's Particles in Self-Compacting Concrete," Transaction of The Japan Concrete Institute, vol. 21, pp. 1-6, 1999.

[17] A. Attachaiyawuth, "Simple Evaluation of Flowability of Self-Compacting Concrete by Mortar Test," TCA E-Magazine, 6 November 2015.

[18] P. Markpiban and R. Sahamitmongkol, "Effect of Synthetic Lightweight Aggregate on Early Age Shrinkage of Mortar," Journal of Thailand Concrete Association, vol. 7, no. 2, pp. 26-36, 2019.