

อัตราส่วนผสมที่มีผลกระทบต่อสมบัติการไหล ความหนืด และแรงเสียดทานภายในของมอร์ตาร์ไหลได้

ชนพล ญาณวีรศักดิ์¹ บุราณัตถ์ กิตติกรจรัส¹ เพ็ญญา ภาควัตร² จูติพงษ์ ปล้องพันธ์²
และ อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ^{3*}

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ต.ทุ่งสุขลา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20230

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

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง

² นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 13 พฤศจิกายน 2563

แก้ไข : 14 มิถุนายน 2564

ตอบรับ : 9 กรกฎาคม 2564

DOI : 10.14456/kmuttrd.2021.4

คำสำคัญ :

สมบัติการไหล / ความหนืด /

แรงเสียดทานภายใน /

มอร์ตาร์ไหลได้ / คอนกรีตไหลได้

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติการไหล ความหนืด และแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ไหลได้ที่ผลิตจากวัสดุภายในประเทศเพื่อประเมินสมบัติที่สภาวะสดเบื้องต้นสำหรับใช้ในการผลิตคอนกรีตไหลได้ จากผลการวิจัย พบว่า สามารถปรับปรุงสมบัติการไหลและลดความหนืดของมอร์ตาร์โดยการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งปริมาณที่ใช้เพิ่มขึ้นกับอัตราส่วนผสมอื่นประกอบไปด้วยอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m) และ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.6-2.9 มอร์ตาร์ที่มี W/C สูง และ s/m ต่ำต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่มี W/C ต่ำกว่า หรือมี s/m สูงกว่า การใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษมากเกินไปส่งผลต่อการไหลของมอร์ตาร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอร์ตาร์ที่มี W/C ต่ำ (ร้อยละ 30) แรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมอร์ตาร์มีอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์สูง เนื่องจากมอร์ตาร์ที่มี s/m สูงมีแรงเสียดทานภายในมาก การเพิ่มปริมาณน้ำสามารถลดแรงเสียดทานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยลดลงจาก 0.54 เป็น 0.32 จากการเพิ่มค่า W/C จากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 45 ในทางตรงกันข้าม มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ต่ำ (s/m ร้อยละ 45) ซึ่งมีแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ต่ำ การเพิ่มปริมาณน้ำไม่ส่งผลต่อแรงเสียดทานภายในมากนัก โดยมีค่าแรงเสียดทานภายในประมาณ 0.2 อัตราส่วนที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ที่สามารถนำไปผลิตคอนกรีตไหลได้ที่มีคุณภาพดี คือ อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ในช่วงร้อยละ 45-50 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วงร้อยละ 30-45

Flowability, Viscosity and Internal Friction of Self-Compacting Mortar as Affected by Its Mix Proportions

Thanapol Yanweerasak¹, Burachat Kittikornjarus¹, Pennapa Pakwat²,
Thitipong Plongpan² and Anuwat Attachaiyawuth^{3*}

Kasetsart University Sriracha Campus, Thungsukla, Sriracha, Chonburi 20230

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

¹ Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Group.

² Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Group.

Article Info

Article History:

Received: November 13, 2020

Revised: June 14, 2021

Accepted: July 9, 2021

DOI : 10.14456/kmuttrd.2021.4

Keywords:

Flowability / Viscosity /

Internal Friction /

Self-compacting Mortar /

Self-compacting Concrete

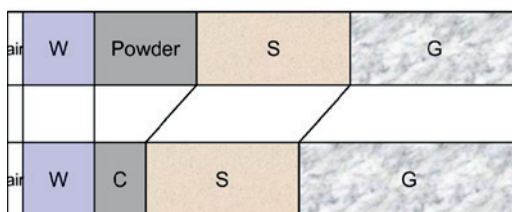
Abstract

The present research studied flowability, viscosity and internal friction of mortars prepared using local materials in Thailand in order to evaluate fresh properties of the mortars that can be used for the production of self-compacting concrete. The results showed that flowability increased and viscosity decreased by increasing the dosage of a superplasticizer. The utilized dosage depended on the mix proportions, which consist of sand to mortar ratio (s/m) and water to cement ratio (W/C). The suitable dosage was noted to be in the range of 0.6-2.9%. Mortars with high W/C and low s/m required lower dosage of superplasticizer comparing to those with lower W/C or higher s/m. Over dosage of superplasticizer adversely affected flowability of mortar, especially in the case of mortar with low W/C (W/C 30%). Internal friction of mortars significantly decreased with increased water content in mixtures, especially in the case of mortars with higher s/m; this is because such mortars contained higher internal friction, so increasing water could effectively reduce the internal friction. The friction reduced from 0.54 to 0.32 by increasing W/C from 40% to 45%. On the other hand, mortar with low s/m (s/m 45%) exhibited lower internal friction, so increasing the water content did not significantly affect internal friction, which remained at approximately 0.2. Mortar mixtures that can be applied to produce self-compacting concrete should contain sand to mortar ratio in the range of 45-50% and water to cement ratio in the range of 30-45%.

1. บทนำ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาเทคโนโลยีคอนกรีตได้รับการพัฒนาอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเชิงวัสดุศาสตร์ โดยวัสดุประสมค์ที่หลากหลาย เช่น เพื่อลดการใช้วัสดุธรรมชาติ โดยนำเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่เป็นวัสดุปอซโซลานมาใช้เป็นวัสดุประสานพบว่าทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูง [1-3] เช่นเดียวกับกับการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น ด้านทานการกัดกร่อนจากคลอไรด์หรือซัลเฟต (โซเดียมซัลเฟต) ได้เป็นอย่างดี และมีผู้วิจัยนำเสนอผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน [4-8] นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มความทนทานของโครงสร้างคอนกรีต คอนกรีตพิเศษที่มีความสามารถในการไหลเข้าแบบได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองโดยไม่ต้องอาศัยการจี้เขย่าจากคนงานถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ ค.ศ. 1988 โดยโอกามูระ และคณะ [9] คอนกรีตชนิดนี้มีชื่อว่า Self-compacting concrete (SCC) หรือคอนกรีตไหลได้ ซึ่งถูกออกแบบมาให้มีความสามารถในการไหลที่ดีมาก โดยสามารถไหลเข้าแบบได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง สามารถลดจำนวนคนงานในการเทคอนกรีตแต่ละครั้งได้ ที่สำคัญยังช่วยลดความผิดพลาดจากคนงานที่อาจจี้เขย่าคอนกรีตได้ไม่ดี ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตไม่สมบูรณ์และมีความทนทานลดลง โครงสร้างคอนกรีตที่ทำจากคอนกรีตพิเศษนี้มีกำลังอัดสูงและความทนทานสูง อย่างไรก็ตามการผลิต SCC จำเป็นต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 2 เท่า เนื่องจากสมบัติการไหลของ SCC เกิดจากแรงผลักระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับสารลดน้ำพิเศษ จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ให้มากพอที่ทำให้เกิดแรงผลักจนคอนกรีตสามารถไหลได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง [10] อัตราส่วนผสมของ

คอนกรีตไหลได้เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาแสดงดังรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าจำเป็นต้องจำกัดปริมาณมวลรวมหยาบให้ไม่มากเกินไปจนส่งผลให้คอนกรีตไม่สามารถไหลได้ดี โดยปริมาณมวลรวมหยาบที่แนะนำอยู่ในช่วงร้อยละ 28-33 โดยปริมาตรคอนกรีต [11] เนื่องจากเมื่อคอนกรีตไหลผ่านเหล็กเสริมในโครงสร้างระหว่างการหล่อคอนกรีต มอร์ตาร์จะถูกบีบอัดเนื่องจากการขยับตัวของมวลรวมหยาบ ซึ่งเปรียบเสมือนการทดสอบการรับแรงเฉือนของมอร์ตาร์เมื่อมีแรงตั้งฉากกระทำแสดงดังแสดงในรูปที่ 2 [10] ถ้าแรงตั้งฉากมากจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากทำให้คอนกรีตไหลได้ไม่ดี ซึ่งแรงตั้งฉากนี้จะมีค่ามากเมื่อคอนกรีตมีปริมาณมวลรวมหยาบมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจำกัดปริมาณมวลรวมหยาบให้อยู่ในช่วงร้อยละ 28-33 อย่างไรก็ตาม การออกแบบส่วนผสมมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาโดยมีการประยุกต์ใช้วัสดุทดแทนอื่นๆ เช่น วัสดุปอซโซลาน หรือการใช้วัสดุประสานที่มากกว่า 2 ชนิดมาผลิตเป็นคอนกรีตไหลได้ [12-18] คอนกรีตไหลได้ยังคงถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องในหลายมิติ เช่น การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตไหลได้โดยการเพิ่มปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กที่มีสมบัติในการช่วยเพิ่มสมบัติการไหล [19-25] การศึกษาสมบัติการไหลของคอนกรีตไหลได้จึงมีความสำคัญในการกำหนดอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งในการทดสอบแต่ละครั้งจำเป็นต้องใช้แรงงานและวัสดุจำนวนมาก จึงได้มีผู้คิดค้นวิธีการประเมินสมบัติการไหลของคอนกรีตโดยการทดสอบแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ [26] ร่วมกับการใช้มวลรวมหยาบจำลองเพื่อประเมินสมบัติการไหลของมอร์ตาร์นั้นๆ ก่อนที่จะนำไปผลิตเป็นคอนกรีตไหลได้



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

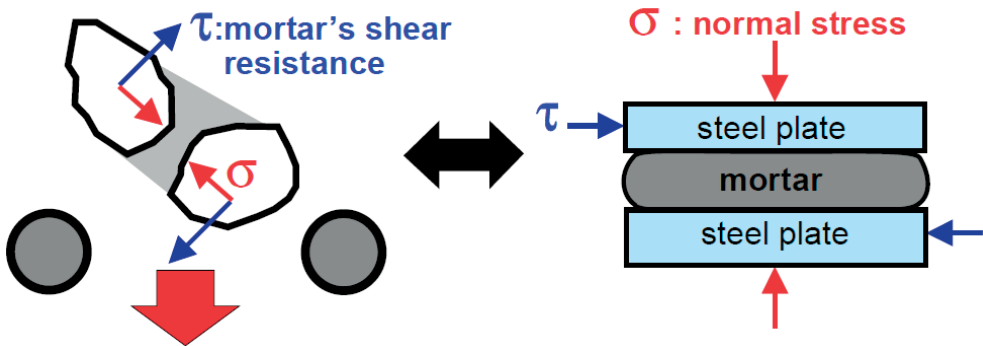
รูปที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตไหลได้และคอนกรีตธรรมดา [9]

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาสมบัติการไหลของมอร์ตาร์และแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ที่ผลิตจากวัสดุภายในประเทศที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมก่อสร้างในปัจจุบัน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานและหลักการพิจารณามอร์ตาร์ที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปผลิตเป็นคอนกรีตไหลได้ที่มีคุณภาพตรงตามวัตถุประสงค์ของวิศวกรผู้ออกแบบต่อไป งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติที่สภาวะสดและแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์เพื่อเป็นประโยชน์ในการประเมินสมบัติที่สภาวะสดของคอนกรีตไหลได้ เนื่องจากในการออกแบบส่วนผสมจริงทั้งในเชิงอุตสาหกรรมหรือการวิจัยนั้นจำเป็นต้องใช้วัสดุและแรงงานในการผสมค่อนข้างมาก หากสามารถประเมินสมบัติที่สภาวะสดของคอนกรีตไหลได้จากการทดสอบมอร์ตาร์จะสามารถลดปริมาณวัสดุที่ต้องใช้รวมถึงจำนวนผู้ทดสอบลงได้

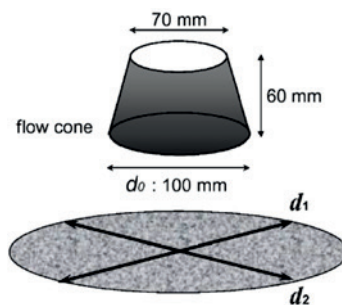
โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนคือการทดสอบการเสียรูปของมอร์ตาร์ (Deformability test) โดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่น [26] แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของมอร์ตาร์สามารถนำไปประเมินเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของคอนกรีตได้ดังรูปที่ 4 [27] การทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์โดยกรวยทดสอบมาตรฐานรูปตัววีสำหรับมอร์ตาร์ (V-funnel) [26] แสดงดังรูปที่ 5 และการทดสอบหาแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์โดยกรวยมาตรฐานร่วมกับมวลรวมหยาบจำลอง [26] แรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์จากการทดสอบดังกล่าวสามารถนำไปประเมินความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางของคอนกรีตไหลได้แสดงดังรูปที่ 6 [9] วัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตและอุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วไป และสามารถหาได้ในประเทศไทย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

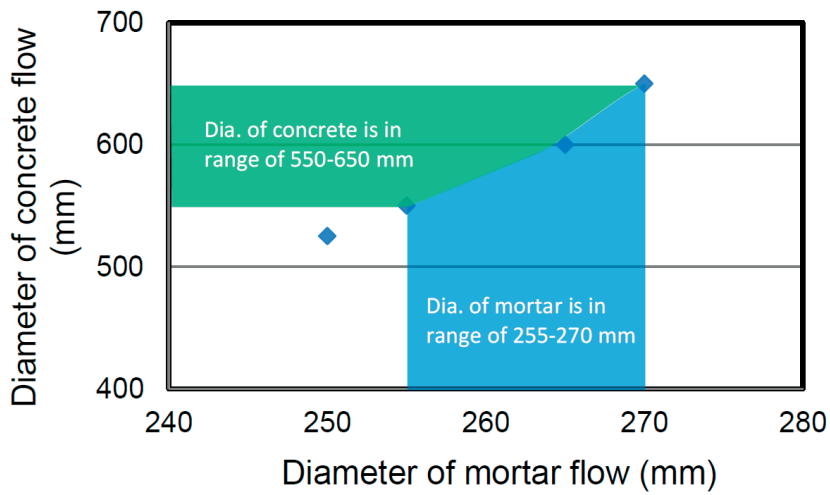
งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ที่สภาวะสด



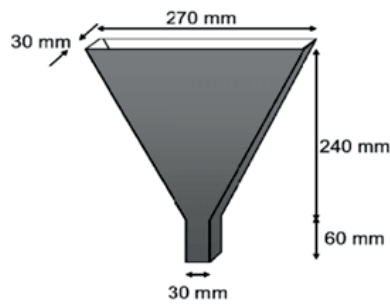
รูปที่ 2 แรงเสียดทานเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดจากแรงตั้งฉาก [10]



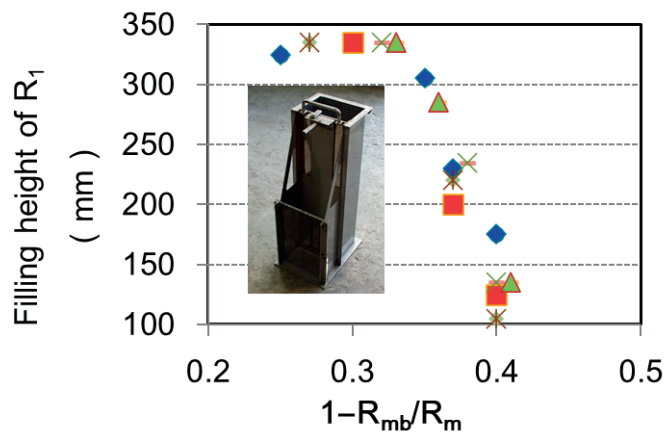
รูปที่ 3 การทดสอบการเสียรูปของมอร์ตาร์ [19]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของมอร์ตาร์และคอนกรีต [20]



รูปที่ 5 กรวยทดสอบมาตรฐานสำหรับการทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์ [19]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์และความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางของคอนกรีต [9]

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

มอร์ตาร์มีส่วนผสมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก.เล่ม 15-2555 [28] น้ำประปาทั่วไป ทราายแม่ น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และสารลดน้ำพิเศษประเภท F ชนิด polycarboxylic ether (PCE) สำหรับการ

ทดสอบหาแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์นั้นใช้มวลรวมหยาบจำลองซึ่งเป็นลูกแก้วลักษณะทรงกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุ	สมบัติ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำ	ตามมาตรฐาน มอก. เล่ม 15-2555, ASTM C150 -07 น้ำประปาทั่วไป
มวลรวมละเอียด	ทราายแม่ น้ำความถ่วงจำเพาะ 2.6, ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4, โมดูลัสความละเอียด 2.73
มวลรวมหยาบจำลอง	ลูกแก้วทรงกลมใสผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม., ความถ่วงจำเพาะ 2.55
สารลดน้ำพิเศษประเภท F	ชนิด polycarboxylic ether (PCE) ความถ่วงจำเพาะ 1.08

2.2 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์ไหลได้

อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์ไหลได้อ้างอิงจากข้อเสนอแนะของ Japan Society of Civil Engineers [11] โดยมอร์ตาร์ต้องมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ในช่วงร้อยละ 28-33 โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนทราายต่อมอร์ตาร์ (s/m) ในช่วงร้อยละ 45-50 โดยปริมาตร อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเห็นว่าจำเป็นต้องศึกษา

ให้กว้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบได้อย่างชัดเจน จึงได้กำหนดอัตราส่วน W/C ในช่วงร้อยละ 30-45 โดยน้ำหนัก และ s/m ในช่วงร้อยละ 45-55% โดยปริมาตร ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้นั้นจะใช้ในปริมาณที่ทำให้มอร์ตาร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่อยู่ในช่วง 250-280 มม. อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ไหลได้

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C, ร้อยละ)	อัตราส่วนทราายต่อมอร์ตาร์ (s/m, ร้อยละ)	สารลดน้ำพิเศษต่อปูนซีเมนต์ (SP/C, ร้อยละ)
30		2.20
		2.70
		2.90
35		1.00
		1.40
		1.60

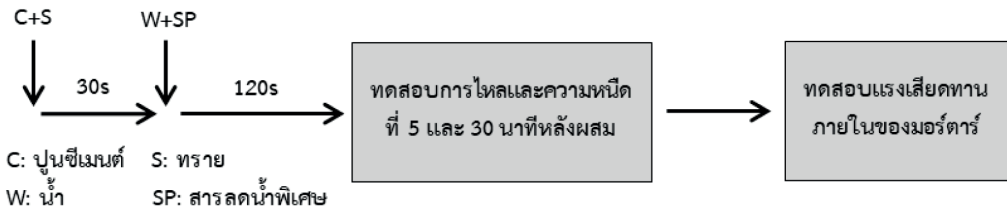
ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ไหลได้ (ต่อ)

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C, ร้อยละ)	อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m, ร้อยละ)	สารลดน้ำพิเศษต่อปูนซีเมนต์ (SP/C, ร้อยละ)	
40		0.60	
		0.70	
		0.80	
45		0.75	
		0.80	
		0.90	
30		50	3.00
35			1.30
			1.50
	1.70		
40	1.05		
	1.10		
	1.20		
45	0.80		
	0.90		
	1.00		
40	55	2.50	
		2.70	
		2.90	
45		1.50	
		1.70	
		2.00	

2.3 ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์

ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์เริ่มจากใส่วัสดุแห้งได้แก่ ปูนซีเมนต์และทรายลงในเครื่องผสมมอร์ตาร์ขนาด 2 ลิตร เดินเครื่องผสมเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำน้ำที่ผสมกับสารลดน้ำพิเศษเทลงในเครื่องผสมและเดินเครื่องเป็นเวลา 120 วินาที ใช้ผ้าขนหนูเช็ดน้ำบิดหมาดๆ คลุมภาชนะผสมเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ทิ้งไว้จนถึงนาฬิกาที่ 5 หลังจากเริ่มผสมจึงนำไปทดสอบสมบัติการไหลเริ่มต้นและความหนืดเริ่มต้น

ตามลำดับ จากนั้นคลุมด้วยผ้าขนหนูอีกครั้งจนถึงนาฬิกาที่ 30 นำเข้าเครื่องผสมและเดินเครื่องผสมเป็นเวลา 5 วินาทีแล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติการไหล, ความหนืดและแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ตามลำดับ การทดสอบสมบัติที่สภาวะสดของมอร์ตาร์นาฬิกาที่ 30 นั้นเป็นการศึกษาความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์เมื่อถูกขนส่งจากโรงงานผลิตไปพื้นที่ใช้งานในระยะเวลาประมาณ 30 นาที ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์แสดงในรูปที่ 7



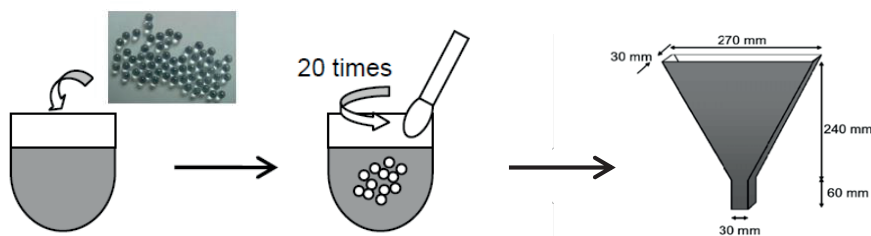
รูปที่ 7 ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์

2.4 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติการไหลของมอร์ตาร์

สมบัติการไหลของมอร์ตาร์สามารถทดสอบได้โดยโคเนมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 3 การทดสอบนี้เรียกว่าการทดสอบการเสียรูปของมอร์ตาร์ (Deformability Test) [26] โดยมอร์ตาร์จะถูกเทลงในโคเนขนาดมาตรฐาน ทั้งไว้เป็นเวลา 1 นาทีเพื่อให้ส่วนผสมหยุดนิ่งจากนั้นโคเนจะถูกดึงขึ้นในแนวตั้งเส้นผ่านศูนย์กลางของการไหลแผ่นจะถูกวัด 2 แนวตั้งฉากกันแล้วนำมาเฉลี่ยเนื่องจากบางครั้งการไหลแผ่นมีลักษณะเป็นวงรีอาจเพราะสาเหตุใดก็ตาม โดยช่วงการไหลแผ่นที่เหมาะสมสำหรับนำไปผสมกับมวลรวมหยาบเพื่อผลิตคอนกรีตไหลได้นั้นจะอยู่ในช่วง 255-275 มม. [27] สามารถนำไปผสมมวลรวมหยาบประมาณร้อยละ 30 โดยปริมาตรจะทำให้คอนกรีตมีเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลอยู่ในช่วง 550-650 มม. ซึ่งขนาดมวลรวมหยาบจะแบ่งเป็น 2 ขนาด คือขนาดประมาณ 5-12.5 มม. และขนาด 12.5-20 ร้อยละ 60 และ 40 ของมวลรวมหยาบตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งคอนกรีตจะมีการไหลที่ดีและไม่แยกตัว [27] อย่างไรก็ตามผลการทดสอบนี้ถูกทดสอบที่ประเทศญี่ปุ่นทำให้สมบัติของวัสดุแตกต่างจากงานวิจัยนี้ งานวิจัยนี้ศึกษาช่วงการไหลของมอร์ตาร์เท่ากับ 250-280 มม.

2.5 ขั้นตอนการทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์

ความหนืดของมอร์ตาร์สามารถทดสอบโดยกรวย



รูปที่ 8 ขั้นตอนการผสมมวลรวมหยาบจำลองเพื่อทดสอบแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ [12]

มาตรฐานรูปตัววี (V-funnel) ที่มีขนาดดังแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งมีระยะวัดจากปากล่างของกรวยมาตรฐานถึงพื้นประมาณ 60 ซม. เพียงพอให้สามารถวางภาชนะรองรับเมื่อปล่อยมอร์ตาร์ได้ ขั้นตอนทดสอบเริ่มต้นจากเทมอร์ตาร์ลงในกรวยจนเต็มจากนั้นปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลจนกระทั่งผู้ทดสอบมองเห็นแสงลอดจากปลายกรวย ระยะเวลาที่มอร์ตาร์ไหลตั้งแต่เริ่มจนเมื่อผู้ทดสอบเห็นแสงคือเวลาที่บ่งบอกความหนืดของมอร์ตาร์ ซึ่งมอร์ตาร์ที่ใช้เวลาน้อยหมายความว่ามอร์ตาร์นั้นมีความหนืดต่ำ ความหนืดของมอร์ตาร์สามารถประเมินได้จากสมการ $R_m = 10/t_m$ [26]

2.6 ขั้นตอนการทดสอบแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์

หลังจากทดสอบสมบัติมอร์ตาร์ที่สภาวะสดเมื่ออายุที่ 30 แล้ว มวลรวมหยาบจำลองจะถูกใส่ลงในมอร์ตาร์โดยปริมาตรร้อยละ 20 ของปริมาตรมอร์ตาร์ จากนั้นคนให้เข้ากันแล้วนำไปเทลงในกรวยมาตรฐาน ทดสอบระยะเวลาในการไหลผ่านกรวยทดสอบอีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 8 วัดค่าและบันทึกเป็นค่า R_{mb} คำนวณได้จาก $R_{mb} = 10/t_{mb}$ เมื่อ t_{mb} คือระยะเวลาที่มอร์ตาร์ผสมมวลรวมหยาบจำลองไหลผ่านกรวยมาตรฐาน แรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์คำนวณได้จาก $1-(R_{mb}/R_m)$ โดยมอร์ตาร์ที่มีสมบัติการไหลที่ดีจะมีค่าแรงเสียดทานภายในต่ำกว่า 0.4

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากระเบียบวิธีวิจัยในหัวข้อที่ 2 ผลการทดสอบสมบัติที่ สภาวะสดของมอร์ตาร์เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาทีและ 30 นาที หลังจากเริ่มผสมแสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ

สามารถอภิปรายผลการทดสอบสมบัติการไหล, ความหนืดของ มอร์ตาร์และแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์เมื่อใช้ปริมาณสาร ลดน้ำพิเศษที่แตกต่างกันได้ดังนี้

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ไหลได้

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C, ร้อยละ)	อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m, ร้อยละ)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (มม.)	ความหนืดของ มอร์ตาร์ (R_m)	
30	45	295.0	1.00	
		232.0	0.81	
		219.5	0.52	
35		277.0	1.08	
		302.5	1.51	
		307.5	1.57	
40		300.0	1.78	
		292.5	1.87	
		277.0	2.00	
45		285.5	2.99	
		301.0	3.18	
		307.5	2.85	
30	50	125.5	0.32	
35		239.0	1.12	
		249.5	0.93	
		242.0	1.05	
40		263.0	2.25	
		271.5	2.22	
		253.0	2.53	
45		252.0	2.26	
		273.0	3.13	
		267.5	2.92	
40		55	240.0	0.99
			252.0	1.29
	252.5		1.37	
45	243.0		1.04	
	242.0		1.00	
	272.0		1.13	

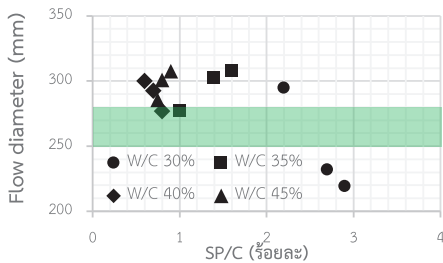
ตารางที่ 4 สมบัติการไหลและความหนืดของมอร์ตาร์ไหลได้เมื่อ 30 นาทีหลังผสม

อัตราส่วนน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (W/C, ร้อยละ)	อัตราส่วนทรายต่อ มอร์ตาร์ (s/m, ร้อยละ)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางเฉลี่ย (มม.)	ความหนืด ของมอร์ตาร์ (R_m)	แรงเสียดทาน ภายในมอร์ตาร์ ($1-R_{mb}/R_m$)	
30	45	290.0	1.00	0.26	
		266.0	0.81	0.33	
		258.5	0.52	0.13	
35		253.0	1.08	0.14	
		303.5	1.51	0.07	
		307.5	1.57	0.16	
40		239.5	1.78	0.17	
		212.5	1.87	0.38	
		272.5	2.00	0.14	
45		280.5	2.99	0.23	
		269.0	3.18	0.19	
		288.0	2.85	0.15	
30		50	217.5	0.32	0.40
35			250.0	1.12	0.36
			255.5	0.93	0.44
	277.0		1.05	0.39	
40	271.5		2.25	0.20	
	278.0		2.22	0.34	
	287.5		2.53	0.36	
45	236.0		2.26	0.18	
	270.0		3.13	0.16	
	284.0		2.92	0.09	
40	55		251.0	0.99	0.42
			247.0	1.29	0.57
			245.0	1.37	0.63
45			216.0	1.04	0.29
			224.5	1.00	0.46
		243.0	1.13	0.25	

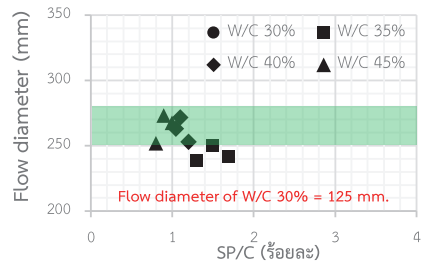
3.1 ผลของสมบัติการไหลเริ่มต้นต่อปริมาณสารลดน้ำพิเศษ

มอร์ตาร์หรือคอนกรีตไหลได้จำเป็นต้องอาศัยสารลดน้ำพิเศษเพื่อเพิ่มแรงผลักดันระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ สมบัติการไหลของมอร์ตาร์ที่ทดสอบโดยการทดสอบการเสียรูป (Deformability test) ซึ่งวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่นของมอร์ตาร์ เมื่อมีปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ต่างกันแสดงดังรูปที่ 9 โดยผลการทดสอบมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน s/m ร้อยละ 45, 50 และ 55 แสดงดังรูปที่ 9 ก), ข) และ ค) ตามลำดับ พบว่ามอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำสูงมีความต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำต่ำเพื่อให้มีสมบัติการไหลที่เหมาะสม (เส้นผ่านศูนย์กลางการไหล 250-280 มม. แสดงดังพื้นที่แรเงาบนแผนภูมิ) เนื่องจากมอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำสูงจะมีปริมาณน้ำอิสระในมอร์ตาร์มาก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการช่วยให้มอร์ตาร์มีการไหลที่ดีขึ้นจึงต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษน้อยกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของมอร์ตาร์เปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพียงเล็กน้อย (อัตราเพิ่มร้อยละ 0.1-0.3) ในกรณีที่มีมอร์ตาร์มี W/C ร้อยละ

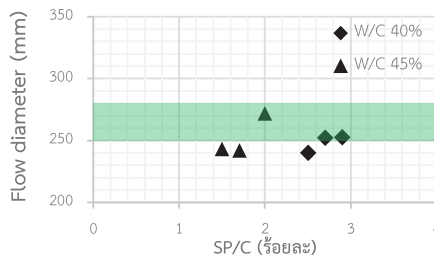
40-45 เนื่องจากมอร์ตาร์มีปริมาณน้ำอิสระมากอยู่แล้ว การไหลจึงเปลี่ยนแปลงมากด้วยการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพียงเล็กน้อย ยกเว้นมอร์ตาร์ที่มี s/m ร้อยละ 55 ซึ่งมีปริมาณทรายสูงก็คิดว่าการไหลจึงทำให้ต้องใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษสูงกว่าส่วนผสมอื่นเพื่อเพิ่มสมบัติการไหล ดังรูปที่ 9 ค) อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษมากเกินไปอาจส่งผลให้มอร์ตาร์มีการไหลที่แย่ลงดังที่พบในมอร์ตาร์ที่มี W/C ร้อยละ 30 และ s/m ร้อยละ 45 เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญจาก 285 มม. เป็น 220 มม. เมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษจากร้อยละ 2.2 เป็น ร้อยละ 2.9 ผลการทดลองดังกล่าวตรงข้ามกับพฤติกรรมของสารลดน้ำพิเศษซึ่งพบในกรณีที่มีมอร์ตาร์มีปริมาณน้ำน้อยมาก และมีการใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษมากกว่าร้อยละ 2.0 ซึ่งมากกว่าค่าที่แนะนำจากผู้ผลิตสารลดน้ำพิเศษอาจทำปฏิกิริยาบางอย่างส่งผลให้มอร์ตาร์มีความหนืดมากขึ้นส่งผลต่อสมบัติการไหล ดังนั้นการเลือกใช้สารเคมีสำหรับมอร์ตาร์หรือคอนกรีตจำเป็นต้องศึกษาให้ชัดเจนรวมถึงการได้รับข้อมูลและข้อจำกัดครบถ้วนจากผู้ผลิตเพื่อให้มอร์ตาร์มีสมบัติตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ



ก) s/m ร้อยละ 45



ข) s/m ร้อยละ 50



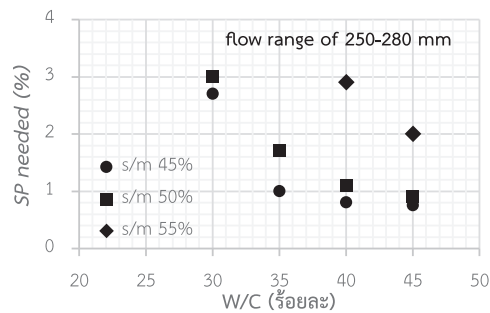
ค) s/m ร้อยละ 55

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำพิเศษต่อเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของมอร์ตาร์

3.2 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมสำหรับการไหลที่ดี

จากการอภิปรายในหัวข้อ 3.1 สามารถสรุปปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมสำหรับมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนผสมแตกต่างกันได้ดังรูปที่ 10 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่มอร์ตาร์ต้องการมีค่ามากขึ้นเมื่อมอร์ตาร์มีปริมาณทรายเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานจากปริมาณอนุภาคของแข็งที่มากขึ้น โดยต้องเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษในมอร์ตาร์ที่มี W/C ร้อยละ 40 จาก ร้อยละ 1.1 เป็น 2.9 เมื่อเพิ่ม s/m จากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 55 ขณะที่มอร์ตาร์ที่มี

W/C ร้อยละ 45 ต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.9 เป็น 2.0 เมื่อเพิ่ม s/m จากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 55 เห็นได้อย่างชัดเจนมากกว่าแม้จะเพิ่มปริมาณทรายที่เท่ากัน แต่อัตราการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษนั้นลดลงเมื่อมอร์ตาร์มี W/C มากขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระในมอร์ตาร์ช่วยให้มอร์ตาร์มีสมบัติการไหลเบื้องต้นที่ดีอยู่แล้ว อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถเพิ่มปริมาณ s/m เท่ากับร้อยละ 55 ในมอร์ตาร์ที่มี W/C ร้อยละ 30-35 เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระไม่เพียงพอแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษเท่าใดก็ตาม

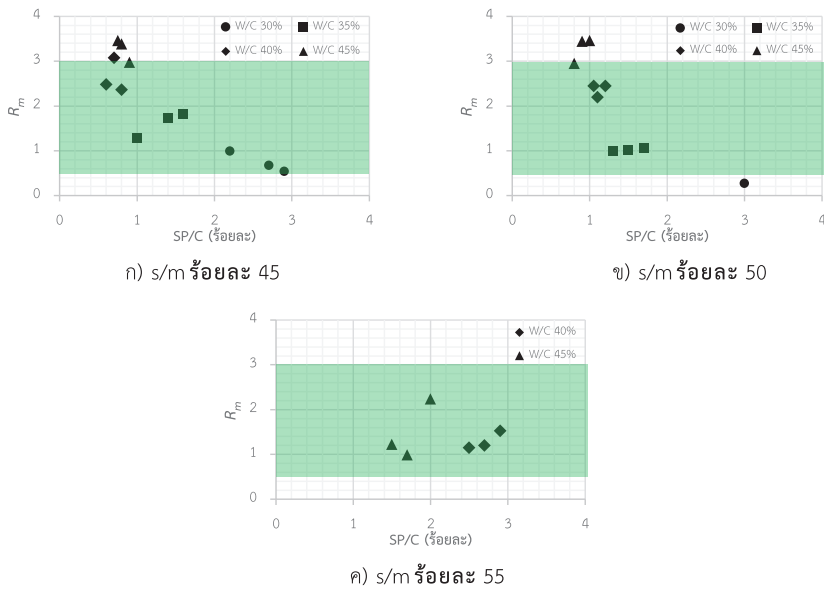


รูปที่ 10 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมต่อสมบัติการไหลที่ดีของมอร์ตาร์

3.3 ผลของความหนืดต่อปริมาณสารลดน้ำพิเศษ

ความหนืดของมอร์ตาร์ที่ทดสอบโดยการวัดระยะเวลาที่ใช้ในการไหลผ่านกรวยรูปตัววี (V-funnel) เมื่อมีปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 11 ความหนืดของมอร์ตาร์สามารถคำนวณได้จาก $R_m = 10/t_m$ โดย t_m คือระยะเวลาที่มอร์ตาร์ไหลผ่านกรวยทดสอบมาตรฐาน [9] ซึ่งค่า R_m สูงหมายความว่ามอร์ตาร์ไหลได้เร็วแปลว่ามีความหนืดต่ำ ผลการทดสอบสอดคล้องกับสมบัติการไหลโดยความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพียงเล็กน้อย สำหรับมอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำสูง (W/C ร้อยละ 40-45) ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันคือปริมาณน้ำสูงช่วยให้มอร์ตาร์มีการไหลที่ตรงถึงมีความหนืดน้อยลงทำให้การเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพียงเล็กน้อยส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนความหนืดอย่างมาก ยกเว้นกรณีที่มีมอร์ตาร์มี s/m 55% ปริมาณทรายสูงส่งผลให้เกิด

ความเสียดทานมากขึ้นระหว่างการไหลผ่านกรวยทดสอบจึงต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพื่อลดความหนืดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่มี s/m ร้อยละ 45-50 นอกจากนี้ยังพบว่าความหนืดมีค่ามากขึ้น (R_m ลดลง) แม้เพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษจากร้อยละ 2.2 เป็น 2.9 สำหรับมอร์ตาร์ที่มี s/m ร้อยละ 45 และ W/C ร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ 11 ก) ปริมาณสารลดน้ำพิเศษมากเกินไปส่งผลต่อมอร์ตาร์ทั้งสมบัติการไหลและความหนืด ความหนืดที่เหมาะสมต่อมอร์ตาร์อยู่ในช่วง $R_m = 0.5-3$ [9] ซึ่งเป็นค่าของมอร์ตาร์ที่เหมาะสมในการนำไปผสมกับมวลรวมหยาบเพื่อผลิตคอนกรีตไหลได้ที่ดีต่อไป จากรูปที่ 9 วิศวกรสามารถประเมินความหนืดของมอร์ตาร์ไหลและปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ต้องใช้ นอกจากนี้ยังสามารถประมาณต้นทุนของคอนกรีตไหลได้อีกประการหนึ่ง

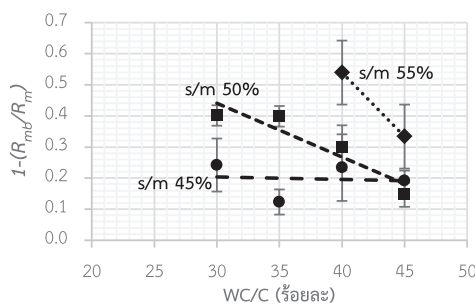


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำพิเศษต่อความหนืดของมอร์ตาร์

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและแรงเสียดทานภายในในมอร์ตาร์เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

รูปที่ 12 แสดงอัตราการลดลงของแรงเสียดทานภายในเมื่อมอร์ตาร์มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นจากการเพิ่ม W/C ค่าแรงเสียดทานที่นำมาแสดงบนแผนภูมิคือค่าเฉลี่ยของค่า $1-(R_{mb}/R_m)$ 3 ค่าจากการใช้ปริมาณสารลดน้ำ 3 ค่า สามารถสังเกตได้ชัดเจนว่าค่า $1-(R_{mb}/R_m)$ ลดลงอย่างมากเมื่อมอร์ตาร์มี s/m ร้อยละ 55 เนื่องจากปริมาณทรายสูงทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์สูงไปด้วย ดังนั้นการเพิ่มปริมาณน้ำจากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 45 จึงส่งผลให้แรงเสียดทานในมอร์ตาร์ลดลงอย่างมาก ตรงข้ามกับมอร์ตาร์ที่มี s/m ร้อยละ

45 แม้ว่าจะเพิ่มค่า W/C จากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 45 แรงเสียดทานภายในไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญ กลไกการลดแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์เนื่องจากสารลดน้ำพิเศษชนิด Polycarboxylic ether (PCE) เกิดจากสารลดน้ำพิเศษชนิดนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์แล้วจะมีลักษณะเป็นขนเกิดที่ผิวและหุ้มอนุภาคปูนซีเมนต์ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้อนุภาคปูนซีเมนต์เกิดการกระจายตัว [29] ส่งผลให้แรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์มีค่าลดลงและมอร์ตาร์สามารถไหลได้ด้วยตัวเอง อัตราการลดลงของแรงเสียดทานดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณมวลรวมละเอียดในส่วนผสม แสดงดังรูปที่ 12

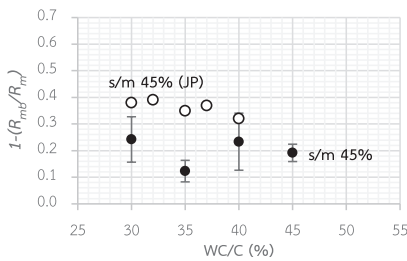


รูปที่ 12 ผลของปริมาณน้ำต่อแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์

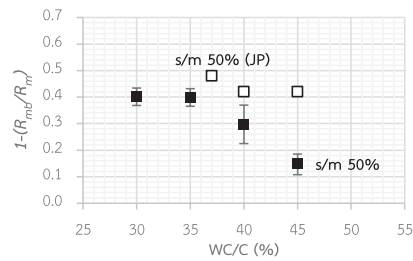
3.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์กับงานวิจัยต่างประเทศ

รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์กับงานวิจัยต่างประเทศ [19] โดยการเปรียบเทียบระหว่างชุดตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มี s/m ร้อยละ 45, 50 และ 55 แสดงดังรูปที่ 13 ก), 13 ข) และ 13 ค) ตามลำดับ พบว่าแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมละเอียดของประเทศญี่ปุ่นมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำในประเทศไทยในทุกชุดตัวอย่าง หากพิจารณาค่าแรงเสียดทานไม่เกิน 0.4 เพื่อนำไปผลิตเป็นคอนกรีตไหลได้

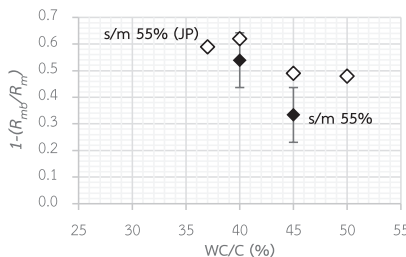
การใช้ทรายของประเทศญี่ปุ่นจะถูกจำกัดให้ใช้ไม่เกินร้อยละ 45 สำหรับการใส่ทรายแม่น้ำของประเทศไทยสามารถเพิ่มปริมาณทรายได้เป็นร้อยละ 50 โดยจะมีค่าแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ไม่เกิน 0.4 แรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายญี่ปุ่นมีค่าสูงกว่าการใช้ทรายแม่น้ำเนื่องจากทรายญี่ปุ่นเกิดจากการนำหินปูนมาบดละเอียดให้มีขนาดไม่เกิน 4.25 มม. รูปร่างของทรายจึงมีความแหลมคมจากการแตกหักของหินปูนเนื่องจากการบด ส่งผลให้มอร์ตาร์มีแรงเสียดทานภายในมากกว่าทรายแม่น้ำซึ่งแม้ว่าจะมีรูปร่างไม่แน่นอนแต่ไม่มีความแหลมคมเท่ากับหินปูนบดละเอียด



ก) s/m ร้อยละ 45



ข) s/m ร้อยละ 50



ค) s/m ร้อยละ 55

รูปที่ 13 เปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำต่อแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์กับงานวิจัยต่างประเทศ

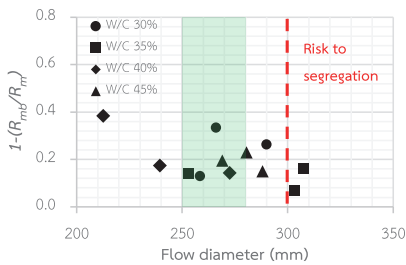
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์และสมบัติการไหลเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

แรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ถูกแทนด้วย 1-(R_{mb}/R_m) ซึ่งสามารถประเมินได้โดยการทดสอบความหนืดผ่านกรวยมาตรฐานร่วมกับการใช้มวลรวมหยาบจำลองตั้งที่อภิปรายใน

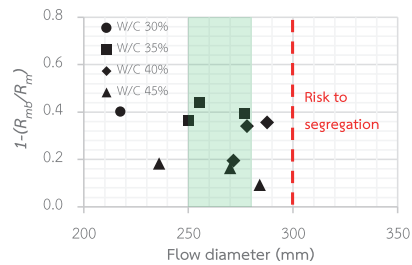
หัวข้อที่ 2.6 มอร์ตาร์ที่มีกรไหลที่ดีและเหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตคอนกรีตไหลได้นั้นควรจะมียค่า 1-(R_{mb}/R_m) ไม่มากกว่า 0.4 [9] โดยพิจารณาร่วมกับเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลในช่วง 250-280 มม. และค่า R_m 0.5-3.0 [9] รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง 1-(R_{mb}/R_m) และเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของมอร์ตาร์ทั้งหมดที่ทำการทดสอบ โดยภาพรวมพบว่าแรง

เสียดทานภายในมอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อมอร์ตาร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลเพิ่มขึ้น และมอร์ตาร์ที่มีปริมาณต่ำจะมีแรงเสียดทานภายในมากกว่ามอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำสูงแม้ว่าจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลใกล้เคียงกันโดยพบในทุกชุด s/m มอร์ตาร์ที่มี s/m 45% ทุกตัวอย่างมีค่า $1-(R_{mb}/R_m)$ ต่ำกว่า 0.4 แต่สำหรับมอร์ตาร์ที่มี s/m ร้อยละ 50 นั้น ค่า W/C ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 40-45 เนื่องจากปริมาณน้ำต่ำกว่านั้นส่งผลให้ค่าแรงเสียดทานภายในใกล้เคียงค่า 0.4 มาก เมื่อ

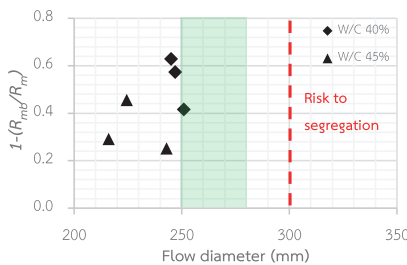
นำไปผลิตคอนกรีตไหลได้อาจทำให้ได้สมบัติคอนกรีตที่ไม่มีคุณภาพหากไม่มีการควบคุมคุณภาพที่ดี ในขณะที่มอร์ตาร์ที่มี s/m ร้อยละ 55 ไม่สามารถนำไปผลิตคอนกรีตไหลได้ที่มีคุณภาพดีได้เนื่องจากมีแรงเสียดทานภายในมากกว่า 0.4 แม้ว่าในบางส่วนผสมจะมีค่าต่ำกว่า 0.4 แต่เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลมีค่าน้อยกว่า 250 มม. อาจทำให้คอนกรีตไหลเข้าแบบได้ไม่ดีส่งผลต่อกำลังของโครงสร้างได้



ก) s/m ร้อยละ 45



ข) s/m ร้อยละ 50



ค) s/m ร้อยละ 55

รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์และเส้นผ่านศูนย์กลางการไหล

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังนี้

1. สามารถเพิ่มสมบัติการไหลของมอร์ตาร์ได้โดยการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษซึ่งปริมาณที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณทรายและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามก็ตีสมบัติการไหลอาจแยกลงหากใช้ในปริมาณที่มากเกินไป

2. มอร์ตาร์ไหลได้ที่สามารถนำไปผลิตคอนกรีตไหลได้จะมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ในช่วงร้อยละ 30-45 ประกอบกับอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m) ร้อยละ 45-55 แต่ในกรณี s/m ร้อยละ 55 นั้นจำเป็นต้องใช้ W/C ในช่วงร้อยละ 40-45 เนื่องจากปริมาณทรายมีค่าสูง ต้องใช้ปริมาณน้ำมากเพื่อเพิ่มสมบัติการไหล
3. ความหนืดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสาร

ลดน้ำพิเศษในส่วนผสม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงมาก
ในกรณีที่มีอัตราที่มีค่า W/C สูง (ร้อยละ 40-45) แต่
ในกรณีที่มีอัตราที่มีค่า W/C ต่ำ (ร้อยละ 30) ความ
หนืดมีค่าสูงขึ้นหากเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษ
มากกว่าร้อยละ 2.0

4. แรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ
เมื่อมอร์ตาร์มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้น (W/C สูงขึ้น)
ในกรณีที่มีอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์สูง (s/m ร้อยละ
50-55) แต่แรงเสียดทานภายในมอร์ตาร์ไม่เปลี่ยนแปลง
มากนักในกรณีที่มีอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์
ต่ำ (s/m ร้อยละ 45)
5. มอร์ตาร์ที่สามารถนำไปผลิตคอนกรีตไหลได้ต้องมี
สมบัติการไหลที่ดีประกอบกับค่าแรงเสียดทานภายใน
ที่ไม่เกิน 0.4 ซึ่งอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมมีค่า s/m
อยู่ในช่วงร้อยละ 45-50 และ W/C อยู่ในช่วงร้อยละ
30-45

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท BASF (Thai) จำกัด ที่ได้สนับสนุน
สารลดน้ำพิเศษที่จำเป็นสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้
และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่สนับสนุนทุนวิจัยแบบ
บูรณาการประจำปีงบประมาณ 2563 ไว้ ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

1. Abdulmatin, A., Rattanachu, P., Khongpermgoso, P., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2020, "A Study of Pozzolanic Reaction of Two Bottom Ashes Obtained from Lignite and Bituminous Coal Combustion," *KMUTT Research and Development Journal*, 43 (1), pp. 49-65. (In Thai)
2. Khongpermgoso, P., Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2016, "Development of Compressive Strength of Concrete from A Binder of Bottom Ash and Calcium Carbide Residue," *Journal of Thailand Concrete Association*, 4 (1), pp. 11-19. (In Thai)

3. 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), pp. 14-24. (In Thai)
4. Kaewmanee, K., Tangtermsirikul, S. and Komsan, M., 2015, "Basic Properties and Durability of Concrete with Fly Ash and CaCO₃ Powder," *Journal of Thailand Concrete Association*, 3 (2), pp. 8-16.
5. 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), pp. 1-13. (In Thai)
6. 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), pp. 165-175. (In Thai)
7. Khongpermgoso, P., Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2016, "Development of Compressive strength of Concrete from A Binder of Bottom Ash and Calcium Carbide Residue," *Journal of Thailand Concrete Association*, 4 (1), pp. 11-19. (In Thai)
8. 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), pp. 242-247.
9. Okamura, H. and Ouchi, M., 2003, "Self-Compacting Concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1 (15), pp. 5-15.
10. Nagamoto, N. and Ozawa, K., 1997, "Mixture Proportions of Self-Compacting High-Performance Concrete," *Proceedings of the International Conference on High Performance Concrete: Design and Materials*

and Recent Advances in Concrete Technology," 2-5 December, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 623-636

11. Japan Society of Civil Engineers, 1999, Recommendation for Self-Compacting Concrete.

12. Nepomuceno, M., Oliveira, L. and Lopez, S.M.R., 2012, " Methodology for Mix Design of the Mortar Phase of Self-compacting Concrete using Different Mineral Additions in Binary Blends of Powders," *Construction and Building Materials*, 26, pp. 317-326.

13. Habibi, A. and Ghomashi, J., 2018, " Development of an Optimum Mix Design Method for Self-compacting Concrete based on Experimental Results," *Construction and Building Materials*, 168, pp. 113-123.

14. Alexandra, C., Bogdan, H., Camelia, N. and Zoltan, K., 2018, " Mix Design of Self-Compacting Concrete with Limestone Filler Versus Fly Ash Addition," *Procedia Manufacturing*, 22, pp. 301-308.

15. Aissa, Y., Goual, I and Benabed, B., 2020, " Mix-design and Properties of Self-compacting Concrete Made with Calcareous Tuff," *Journal of Building Engineering*, 27, pp. 1-9.

16. Zhang, J., An, X. and Li, P., 2020, " Research on a Mix Design Method of Self-compacting Concrete based on a Paste Rheological Threshold Theory and a Powder Equivalence Model," *Construction and Building Materials*, 233 , pp. 1-12.

17. Li, P., Zhang, T., An, X. and Zhang, J., 2020, " An Enhanced Mix Design Method of Self-compacting Concrete with Fly Ash Content based on Paste Rheological Threshold Theory and Material Packing Characteristics," *Construction and Building Materials*, 234 , pp. 1-11.

18. Li, P., Ran, J., Nie, D. and Zhang, W., 2021, "Improvement of Mix Design Method based on Paste Rheological Threshold Theory for Self-compacting Concrete Using Different Mineral Additions in Ternary Blends of Powders," *Construction and Building*

Materials, 276, pp. 1-13.

19. 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.

20. Puthipad, N., Ouchi, M., Rath, S. and Attachaiyawuth, A., 2016, "Enhancement in Self-compactability and Stability in Volume of Entrained Air in Self-compacting Concrete with High Volume Fly Ash," *Construction and Building Material*, 128, pp. 349-360.

21. Rath, S. Puthipad, N. Attachaiyawuth, A. and Ouchi, M., 2017, "Critical Size of Entrained Air to Stability of Air Volume in Mortar of Self-compacting Concrete at Fresh Stage," *Journal of Advanced Concrete Technology*, 15 (1), pp. 29-37.

22. 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.

23. Puthipad, N., Ouchi, M., Rath, S. and Attachaiyawuth, A., 2017, "Enhanced Entrainment of Fine Air Bubbles in Self-compacting Concrete with High Volume of Fly Ash Using Defoaming Agent for Improved Entrained Air Stability and Higher Aggregate Content," *Construction and Building Materials*, 144, pp. 1-12.

24. 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, pp. 531-537.

25. Puthipad, N., Ouchi, M. and Attachaiyawuth, A., 2018, "Effects of Fly Ash, Mixing Procedure and Type of Air-entraining Agent on Coalescence of Entrained Air Bubbles in Mortar of Self-compacting Concrete at Fresh State," *Construction and Building*

Materials, 180, pp. 437-444.

26. 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.

27. Attachaiyawuth, A., 2015, Simple Evaluation

of Flowability of Self-Compacting Concrete by Mortar Test, *TCA E-Magazine*. (In Thai)

28. Thailand Industrial Standard, 2012, Specifications for Portland Cement Type 1. (In Thai)

29. Kubens, S., 2010, *Interaction of Cement and Admixtures and Its Influence on Rheological Properties*, Cuvillier Verlag, Göttingen, Germany, p. 192.