

ผลของวัสดุผสมร่วมสามชนิดในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ ในสถานะคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

กฤษฎดา เสือเอี่ยม¹ และ ญัฐ มากุล^{2*}

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เลขที่ 9 ถนนแจ้งวัฒนะ แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมวัสดุผสมร่วมสามชนิด (Ternary combinations of cementitious materials (TCM)) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบ และฝุ่นหินปูน การออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้กำหนดจากค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.28 โดยน้ำหนัก ปริมาณวัสดุผงรวมเท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุผงเท่ากับร้อยละ 0 และ 20 โดยน้ำหนัก ใช้สารลดน้ำชนิดพิเศษเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต ทำการทดสอบสมบัติของคอนกรีตในสถานะคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วอย่างเป็นระบบซึ่งประกอบด้วย หน่วยน้ำหนัก การไหลแผ่ ระยะเวลาในการไหลแผ่ที่ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 ซม. ความสามารถในการไหลผ่านและความต้านทานการแยกตัว โดยชุดทดสอบ J-ring, V-funnel และ L-Box การทดสอบความร้อนที่เพิ่มขึ้น ความเร็วของการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิค และกำลังอัด ผลการทดสอบพบว่า การใช้วัสดุผสมร่วมกันสามชนิดเป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตชนิดไหลตัวได้สามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ควบคุม

คำสำคัญ : วัสดุผสมร่วมสามชนิด / คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ / เถ้าแกลบ/ ฝุ่นหินปูน

* Corresponding author : shinomomo7@hotmail.com

¹ นักศึกษาปริญญาเอก, สาขาการจัดการเทคโนโลยี โครงการพนักำลังการเปิดสอนหลักสูตรปริญญาเอก

² ผู้วิจัยหลัก, อาจารย์, สาขาเทคโนโลยีการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

Use of Ternary Blends Cementitious Materials to Enhance Fresh and Hardened Properties of Self-compacting Concretes

Gritsada Sua-Iam¹ and Natt Makul²

Phranakhon Rajabhat University, 9 Changwattana Road, Bangkok Bangkok 10220

Abstract

This research studied the properties of self-compacting concrete (SCC) containing ternary combinations of cementitious materials (TCM), i.e., Type 1 Portland cement (OPC), rice husk ash (RHA), and limestone powder (LP). The SCC mixtures were prepared using a constant water/TCM ratio of 0.28 by weight, a TCM content of 450 kg/m³ and an OPC replacement percentage of 0 or 20 %wt. Superplasticizer was also used in the mixtures for enhancing the workability of SCC. The fresh and hardened properties were systemically investigated including unit weight, slump flow diameter, slump flow time at 50 cm diameter, J-ring flow, V-funnel flow time, L-box, Temperature rise, ultrasonic pulse velocity and compressive strength. The results revealed that the use of TCM mixes in self-compacting concrete can significantly improve the properties of SCC when compared to the conventional SCC.

Keywords : Limestone powder / Rice husk ash / Self-compacting concrete / Ternary of blends cementitious materials

* Corresponding author : shinomomo7@hotmail.com

¹ Doctoral Candidate, The Doctor of Philosophy Program in Technology Management, The Project for Consortium on Doctoral Programs of Rajabhat University.

² Lecturer, Department of Construction Technology, Faculty of Industrial Technology.

1. บทนำ

คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ (Self-compacting concrete, Self-consolidating concrete (SCC)) เป็นนวัตกรรมหนึ่งของคอนกรีตเทคโนโลยี ซึ่งเริ่มเป็นที่นิยมและได้รับการยอมรับเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ในปัจจุบัน คอนกรีตชนิดนี้มีความสามารถในการไหลแผ่และอัดแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเอง โดยไม่ต้องการการจี้เขย่าคอนกรีต และไม่เกิดการแยกตัว (Segregation) หรือการเยิ้ม (Bleeding) เป็นการลดทั้งการใช้แรงงานคนและการใช้พลังงานจากเครื่องจี้เขย่าคอนกรีตเพื่อให้เกิดการแน่นตัวเหมือนแต่ก่อน [1] คอนกรีตชนิดไหลตัวได้มีแนวคิดในการพัฒนาเริ่มแรกมาจากประเทศญี่ปุ่นเมื่อ ปี ค.ศ.1988 โดยวิศวกรชาวญี่ปุ่นเพื่อแก้ไขปัญหาคุณภาพของงานก่อสร้างที่เกิดจากการขาดทักษะของแรงงานในสมัยนั้นจนส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีต และความคงทนของโครงสร้างในระยะยาว จากนั้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยหลักการของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้นั้นต้องสามารถไหลและอัดแน่นเข้าแบบและระหว่างเหล็กเสริมได้ด้วยตัวเองโดยไม่เกิดการแยกตัว ทั้งนี้คุณสมบัติสำคัญของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ขึ้นอยู่กับ การจำกัดปริมาณของมวลรวม อัตราส่วนของน้ำกับวัสดุผงในระดับต่ำ และต้องใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ในปริมาณมาก [2]

การเพิ่มความสามารถในการไหลของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้โดยไม่ก่อให้เกิดการแยกตัวและเยิ้มในระหว่างการหล่อคอนกรีตสามารถทำได้โดยการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในระดับสูง การใช้สัดส่วนปริมาณมวลรวมละเอียดมากกว่ามวลรวมหยาบ และการใช้ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มในอัตราส่วนสูง [3] จากข้อกำหนดดังกล่าวส่งผลกระทบโดยตรงทางด้านราคาของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่สูงกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากการใช้ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่ม และปูนซีเมนต์ที่สูง โดยเฉพาะการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูงมากขึ้นนี้ส่งผลต่อราคาอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นองค์ประกอบของคอนกรีตที่มีราคาแพงที่สุด ส่งผลให้มีปริมาณการใช้คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ยังไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ดังนั้นแนวคิดในการลดการใช้ปริมาณ

ปูนซีเมนต์ถือได้ว่าเป็นการแก้ปัญหาด้านราคาได้ตรงประเด็นทางเลือกที่สำคัญในการลดการใช้ปูนซีเมนต์คือการนำวัสดุผงซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้ อาทิเช่น ฝุ่นหินปูน ใต้อลอย ใต้อกลบ หรือวัสดุผงอื่นๆ นำมาใช้แทนที่ในส่วนของปูนซีเมนต์โดยสามารถนำมาผสมรวมได้ทั้งก่อนและระหว่างการผสมคอนกรีต [4-6] จากผลของการนำวัสดุผงซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการผลิตมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ย่อมส่งผลให้ราคาของคอนกรีตดังกล่าวลดลงตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผลผลิตพลอยได้เหล่านั้นมาจากของเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมหรืออุตสาหกรรมซึ่งมีศักยภาพด้านปริมาณที่มากเพียงพอหากนำมาใช้ร่วมในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีต จากการศึกษาของ Uysal และ Yilmaz [4] พบว่าการนำ ฝุ่นหินปูน ซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้มาแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ สามารถปรับปรุงพฤติกรรมกรไหลของคอนกรีตและความหนืดที่เพิ่มขึ้นส่งผลไม่ให้เกิดการแยกตัวได้อีกด้วย ในทางกลับกัน Sua-iam และ Makul [6] พบว่าข้อจำกัดของการนำใต้อกลบมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในสัดส่วนที่สูงเพิ่มขึ้นกำลังอัดของคอนกรีตกลับลดลง อย่างไรก็ตามข้อจำกัดบางประเด็นของการใช้วัสดุผงชนิดหนึ่ง สามารถปรับปรุงได้โดยการใช้ข้อดีของวัสดุผงชนิดอื่นเข้ามาผสมรวม [7] ดังเช่น การใช้วัสดุประสานสามชนิดรวมกัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใต้อลอย และใต้อปาล์ม น้ำมันพบว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงและต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี [8]

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาศักยภาพในการนำของเหลือวัสดุเหลือทิ้งในภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนที่มีผลต่อสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในสภาวะคอนกรีตสด และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จากการรวมวัสดุผงสองชนิด และสามชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของคอนกรีตในสภาวะต่างๆ การศึกษาความเป็นไปได้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยใต้อกลบ และฝุ่นหินปูน เพื่อนำข้อดีของวัสดุชนิดหนึ่งมาลดข้อด้อยและข้อจำกัดของวัสดุอีกชนิดหนึ่ง รวมถึงช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับใต้อกลบ และฝุ่นหินปูน ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมได้อย่างมีศักยภาพทั้งในเชิงประสิทธิผล และเชิงเศรษฐศาสตร์

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [9]
2. แก้วแกลบ จากโรงไฟฟ้าในจังหวัดชัยนาทนำมาทำการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพโดยการบดด้วยเครื่องบดซึ่งใช้ลูกบดเป็นเซรามิกซ์ (Ceramic ball mill) เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง
3. ฟูนหินปูน จากจังหวัดสระบุรี
4. น้ำที่ผสม ใช้น้ำประปาที่มีความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 7.0
5. มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำที่มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [10]
6. มวลรวมหยาบ ใช้หินปูนขนาดใหญ่สุด 20 มิลลิเมตร มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [10]
7. สารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้คือสารลดน้ำพิเศษประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 [11] อยู่ในกลุ่มโพลีคาร์บอกซีเลท (Polycarboxylate-based super-plasticizer)

2.2 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบ

การออกแบบสัดส่วนของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในการศึกษาครั้งนี้ สำหรับคอนกรีตควบคุมกำหนดปริมาณวัสดุผงโดยรวม (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) คงที่ ปริมาณ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนการผสมรวมวัสดุผงสองชนิดเข้าด้วยกัน (ปูนซีเมนต์+แก้วแกลบ และปูนซีเมนต์+ฟูนหินปูน) โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุผงที่ผสมรวมในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และการผสมรวมวัสดุผงสามชนิดเข้าด้วยกัน (ปูนซีเมนต์+แก้วแกลบ+ฟูนหินปูน) โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุผงที่ผสมรวมในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแต่ละชนิดวัสดุผง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงโดยรวม 0.28 ในขณะที่อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (S/A) กำหนดคงที่ 0.53 เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตตามข้อกำหนดของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้จึงมีการผสมสารเคมีผสมเพิ่ม [2] ในอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุผง เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้วัสดุผงแต่ละชนิด แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้

สัญลักษณ์ ^[1]	สัดส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)						สารเคมีผสมเพิ่ม (ร้อยละ)
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1	แก้วแกลบ	ฟูนหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ	
CONTROL	450	-	-	922	804	126	2.0
R20	360	90	-	922	804	126	2.0
LS20	360	-	90	922	804	126	2.0
R10LS10	360	45	45	922	804	126	2.0

หมายเหตุ ^[1] สัญลักษณ์ CONTROL คือ คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ควบคุม, Rx, LSy และ RxLSy คือคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมแก้วแกลบ (R) หรือ ฟูนหินปูน (LS), x คืออัตราการแทนที่ของแก้วแกลบโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และ y คืออัตราการแทนที่ของฟูนหินปูนโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (Unit weight) ตามมาตรฐาน ASTM C138 [12] โดยการชั่งน้ำหนักคอนกรีตในภาชนะที่มีปริมาตรแน่นอน ทั้งนี้ขนาดของภาชนะขึ้นกับขนาดของมวลรวมหยาบ โดยการคำนวณหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดจากน้ำหนักของ

คอนกรีตหารด้วยปริมาตร

2.3.2 การทดสอบความสามารถในการทำงานได้ (Workability) ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้เกณฑ์ในการพิจารณาคุณสมบัติประกอบไปด้วย ความสามารถในการเติมแทรก ความสามารถในการไหลผ่าน และความสามารถต้านทานการแยกตัว ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้

คุณสมบัติ	วิธีการทดสอบ	หน่วย	เกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับ [14, 15]	
			ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยที่สุด
ความสามารถในการเติมแทรก (Filling Ability)	1. Slum flow [13]	มม.	650	800
	2. Slump flow at T_{50cm} [13]	วินาที	2	5
ความสามารถในการไหลผ่าน (Passing Ability)	3. J-Ring [14]	มม.	0	50
	4. L-Box [15]	h_2/h_1	0.8	1.0
ความต้านทานการแยกตัว (Segregation Resistance)	5. V-funnel at $T_{5minutes}$ [15]	วินาที	6	15

1) ความสามารถในการเติมแทรก (Filling ability) ประกอบด้วยการทดสอบการไหลแผ่ (Slump flow) และเวลาของการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C1611 [13] โดยใช้ Abram's cone ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) วางบนแผ่นเหล็กขนาด 90 x 90 ซม. เติมคอนกรีตจนเต็มโดยไม่ต้องทำการกระทุ้งให้แน่น จากนั้นทำการยกขึ้นในแนวตั้งโดยปล่อยให้คอนกรีตไหลแผ่โดยอิสระ พร้อมกับเริ่มจับเวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นการไหลจนถึงการไหลแผ่ระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตรทำการบันทึกผล จากนั้นยังปล่อยให้คอนกรีตไหลแผ่ต่อไปจนหยุดไหล ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 2 ทิศทางเพื่อหาค่าเฉลี่ยระยะในการไหลแผ่สูงสุดของคอนกรีต

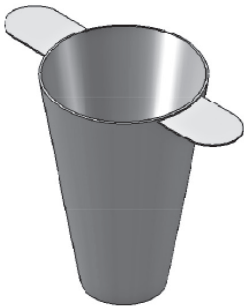
2) ความสามารถในการไหลผ่าน (Passing ability) ประกอบด้วยการทดสอบ J-Ring เป็นการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ประกอบขึ้นเป็นรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. และซี่เหล็กกีดขวางการไหล

สูง 10 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C1621 [14] ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) ทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบการไหลแผ่ ต่างกันเพียงการทดสอบนี้เป็นการปล่อยให้คอนกรีตไหลผ่านสิ่งกีดขวางจนหยุดไหล ทำการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางใน 2 ทิศทางเพื่อหาค่าเฉลี่ยระยะในการไหลแผ่ของสูงสุดของคอนกรีต จากนั้นทำการประเมินเกณฑ์ความสามารถในการไหลว่ามี การติดขัด (Blocking) จนไม่สามารถไหลต่อไปได้ในระดับใด โดยนำค่าระยะการไหลผ่านสิ่งกีดขวางสูงสุดเทียบกับระยะการไหลสูงสุดโดยไม่ผ่านสิ่งกีดขวาง โดยภาพรวมวิธีการทดสอบ J-Ring พิจารณาเฉพาะการไหลในแนวราบ ในขณะที่อีกหนึ่งวิธีเป็นการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวตั้งซึ่งแตกต่างจากวิธีการแรกโดยการไหลผ่านกล่องรูปทรงแอล (L-Box) ตามมาตรฐาน ENFARC [15] เป็นการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่มีมิติการไหลผ่านทั้งแนวตั้งและแนวนอน โดยการเติมคอนกรีตในแนวตั้งจนได้ระดับ จากนั้นเปิดลิ้นบังคับการเปิด-ปิดเพื่อให้คอนกรีต

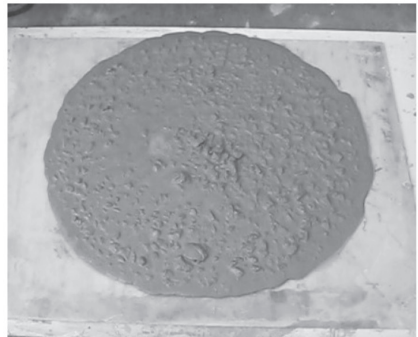
ไหลผ่านซีลลิกจนหยุดไหล ดังแสดงในรูปที่ 1(ค) เพื่อหาอัตราส่วนในแนวตั้งของการไหลที่ระยะสุดท้ายเทียบกับระยะเริ่มต้น เพื่อพิจารณาอัตราส่วนการติดขัด (Blocking ratio) การไหลของคอนกรีต

3. ความต้านทานการแยกตัว (Segregation resistance) เป็นการทดสอบการไหลในแนวตั้งด้วยกล่องแบบรูปทรงวี (V-Funnel) ที่เวลา 5 นาที ตามมาตรฐาน

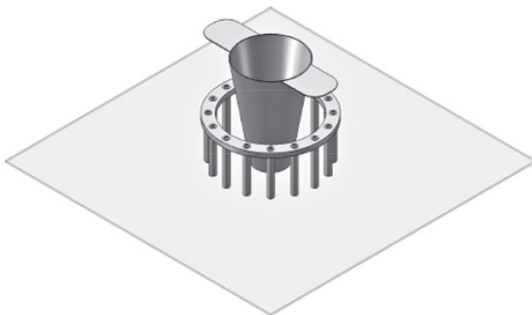
EFNARC [15] ดังแสดงในรูปที่ 1 (ง) โดยทำการปิดช่องด้านล่างจากนั้นเติมคอนกรีตจนเต็มโดยไม่ต้องทำการอัดแน่น ปล่อยให้คอนกรีตทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงทำการเปิดช่องด้านล่างเพื่อปล่อยคอนกรีตให้ไหลออกอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก พร้อมกับการจับเวลาในการไหลตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นจนคอนกรีตไหลออกจากกล่องรูปทรงวีจนหมด



Abram's cone

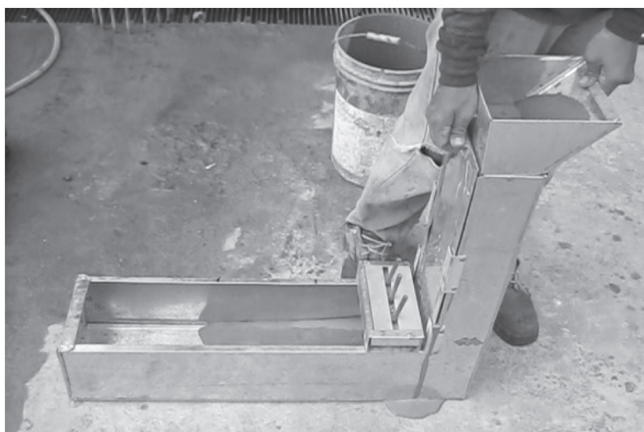
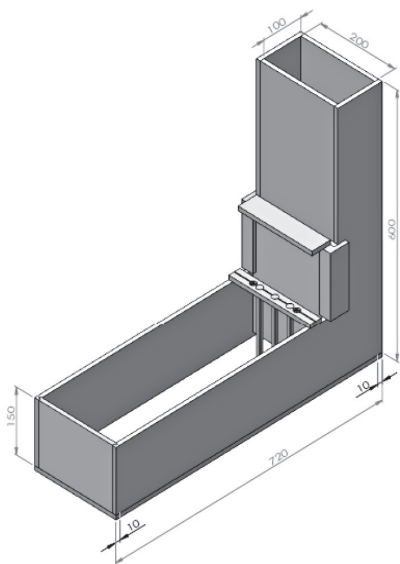


(ก) Slum flow and T_{50cm} flow test.

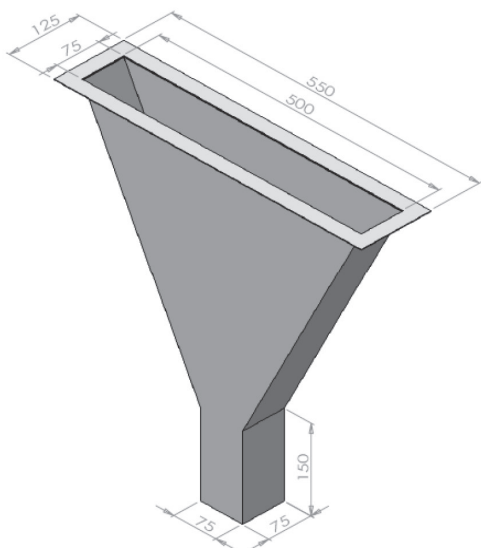


(ข) J-Ring test.

รูปที่ 1 การทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้



(ค) L-Box test.

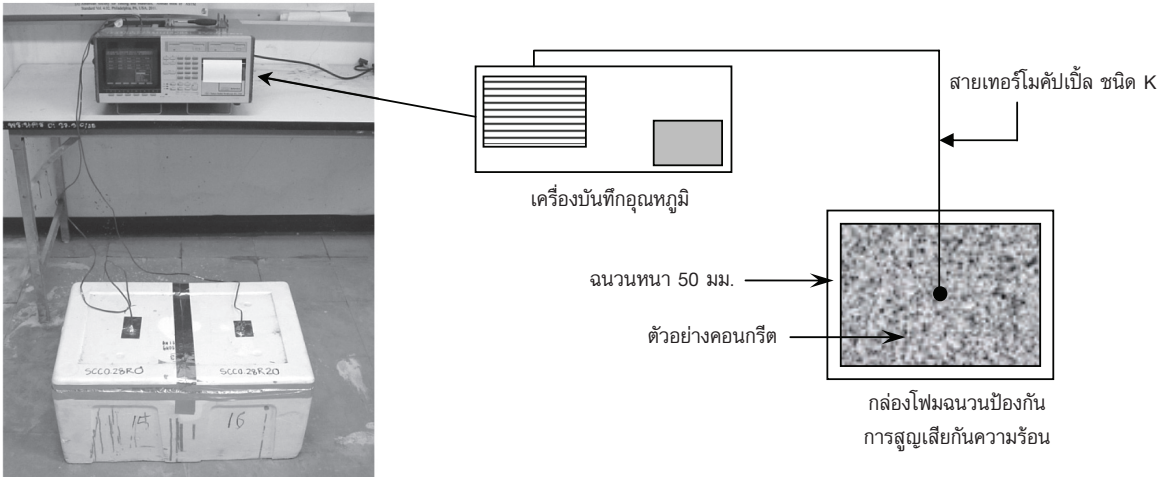


(ง) V-Funnel test.

รูปที่ 1 (ต่อ) การทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้

2.3.3 การทดสอบความร้อนภายในที่เพิ่มขึ้น (Temperature rise) ของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ผสมเรียบร้อยถูกเทในกล่องโฟมโพลีสไตรีนขนาด 300 × 300 × 300 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างตัวอย่างและสภาพแวดล้อม จากนั้นทำการปิดฝาและยานาเวอร์ยต่อทั้งหมด ทำการต่อสายเทอร์โมคัปเปิล

(Thermocouple) ชนิด K ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกสอดเข้าไปยังตำแหน่งตรงกลางของแท่งตัวอย่างภายในกล่อง ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิอัตโนมัติ (Computing data logger) ดังแสดงแผนผังการติดตั้งเครื่องมือในรูปที่ 2 ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทุกช่วงระยะเวลา 15 นาที เป็นเวลา 5 วัน



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องบันทึกอุณหภูมิกับตัวอย่างคอนกรีต

2.3.4 การทดสอบการสูญเสียความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต (Slump loss) เป็นการทดสอบต่อเนื่องจากการทดสอบการไหลแผ่ เพื่อทดสอบการสูญเสียความสามารถในการไหลแผ่ที่ระยะเวลา 60, 90 และ 120 นาที เป็นความสามารถในการรักษาสภาวะของคอนกรีตสดให้มีความสามารถในการทำงานได้ในระหว่างการลำเลียง และช่วงระยะเวลาในการเทคอนกรีต

ประเมินความเป็นเนื้อเดียวของคอนกรีต คุณภาพที่ดีของคอนกรีตจะส่งผลต่อความเร็วในการส่งผ่านของคลื่นอัลตราโซนิก และการทดสอบกำลังอัด (compressive strength) ตามมาตรฐาน ASTM C39 [17] เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต่างๆ

2.3.5 การทดสอบสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Hardened properties) โดยหล่อคอนกรีตตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร × สูง 30 เซนติเมตร จำนวนชุดละ 3 ตัวอย่าง ทำการบ่มคอนกรีตในบ่อน้ำเพื่อทำการทดสอบในช่วงอายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ประกอบด้วยการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic pulse velocity) ตามมาตรฐาน ASTM C597 [16] เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อ

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์

3.1 สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ และผงหินปูน

3.1.1 องค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าแกลบ และฝุ่นหินปูน แสดงในตารางที่ 2 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และฝุ่นหินปูนมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 68.48 และ 46.77 ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าแกลบมีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 93.00

สำหรับสมบัติทางกายภาพพบว่าฝุ่นหินปูนมีค่าร้อยละของการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition, LOI) และพื้นที่ผิวมากที่สุด ในขณะที่มีขนาด

เฉลี่ยอนุภาคเล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 3

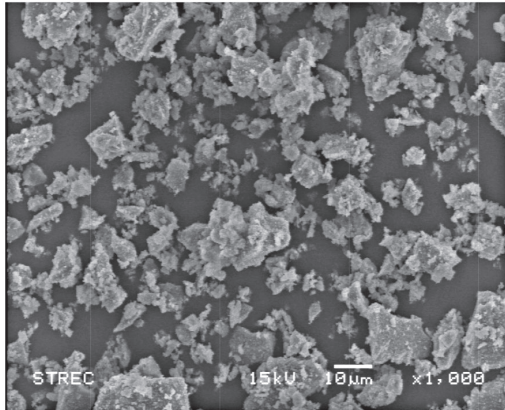
ตารางที่ 3 องค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบ และฝุ่นหินปูน

สมบัติพื้นฐานของวัสดุ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบ	ฝุ่นหินปูน
องค์ประกอบเคมี (ร้อยละโดยมวล)			
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	16.39	93.00	8.97
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	3.85	0.35	1.02
ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.48	0.23	0.37
แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	0.08	0.14	-
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.64	0.41	2.38
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	68.48	1.31	46.77
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.06	0.15	0.02
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.52	1.61	0.13
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	4.00	0.09	0.33
ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P ₂ O ₅)	0.07	0.73	-
สมบัติทางกายภาพ			
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้	1.70	1.90	39.54
ขนาดเฉลี่ยอนุภาค			
D[4.3] (ไมโครเมตร, μm)	23.32	24.32	15.63
ความถ่วงจำเพาะ	3.2	2.2	2.76
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรตอกิโลกรัม)	610	840	1300

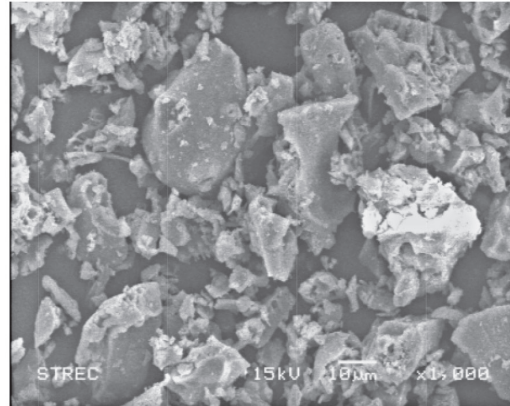
3.1.2 ลักษณะของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบ และฝุ่นหินปูน

ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าแกลบ และฝุ่นหินปูนแสดงในรูปที่ 3 อนุภาคปูนซีเมนต์

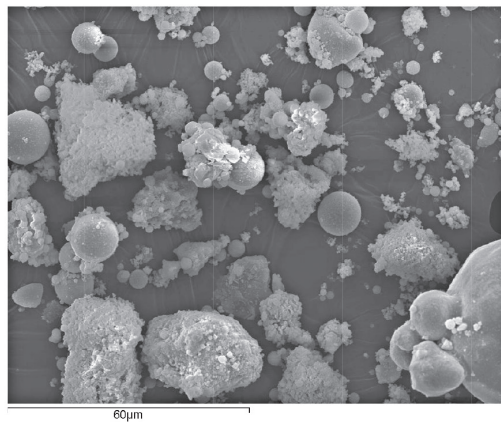
ปอร์ตแลนด์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมมีทั้งผิวเรียบและบาง ส่วนผิวขรุขระ ส่วนอนุภาคเถ้าแกลบมีลักษณะไม่แน่นอน ในขณะที่อนุภาคของผงหินปูนมีหลายลักษณะทั้งเป็นเหลี่ยมมุมและทรงกลม



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) เถ้าแกลบ

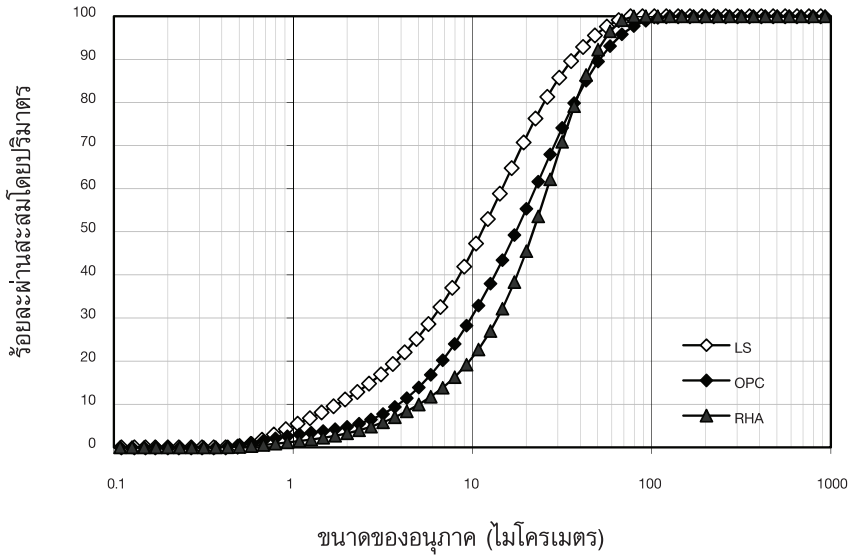


(ค) ฝุ่นหินปูน

รูปที่ 3 ภาพขยายขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (x 1000 เท่า)

3.1.3 การกระจายขนาดคละของวัสดุประสาน
จากรูปที่ 4 พบว่า ร้อยละผ่านสะสมของผงฝุ่นหินมีค่ามากที่สุด รองลงมาได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบ ดังนั้นฝุ่นหินปูนจึงสามารถแทรกตัว (Filling) เข้าระหว่างช่องว่างภายในอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบได้



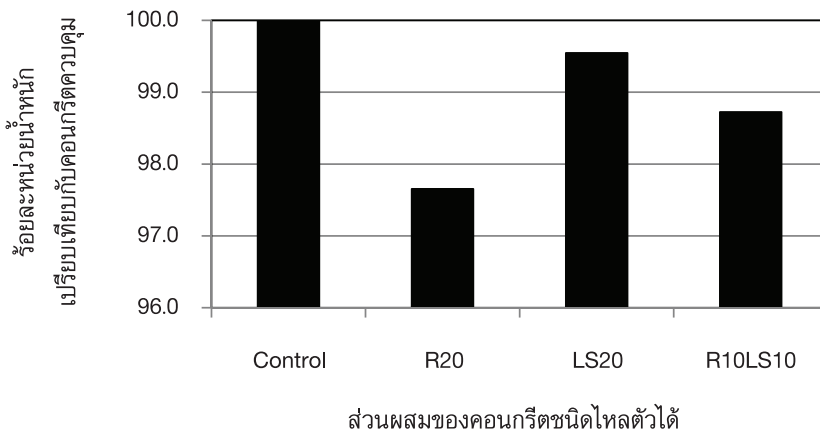
รูปที่ 4 ขนาดเฉลี่ยอนุภาคของเถ้าแกลบ ปูนซีเมนต์ และฝุ่นหินปูน

3.2 สมบัติของคอนกรีตสด

3.2.1 หน่วยน้ำหนัก

หน่วยน้ำหนักในสภาวะคอนกรีตสดของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ชนิดควบคุม ชนิดผสมรวมวัสดุผงสองชนิด (ปูนซีเมนต์+เถ้าแกลบ และ ปูนซีเมนต์+ฝุ่นหินปูน) และสามชนิด (ปูนซีเมนต์+เถ้าแกลบ+ฝุ่นหินปูน) เมื่อเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักกับคอนกรีตควบคุม พบว่าผล

การแทนที่ด้วยวัสดุผงทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของวัสดุผงแต่ละชนิดที่ต่างกัน โดยคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าแกลบมีความหนาแน่นน้อยที่สุด เนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าฝุ่นหินปูน และปูนซีเมนต์

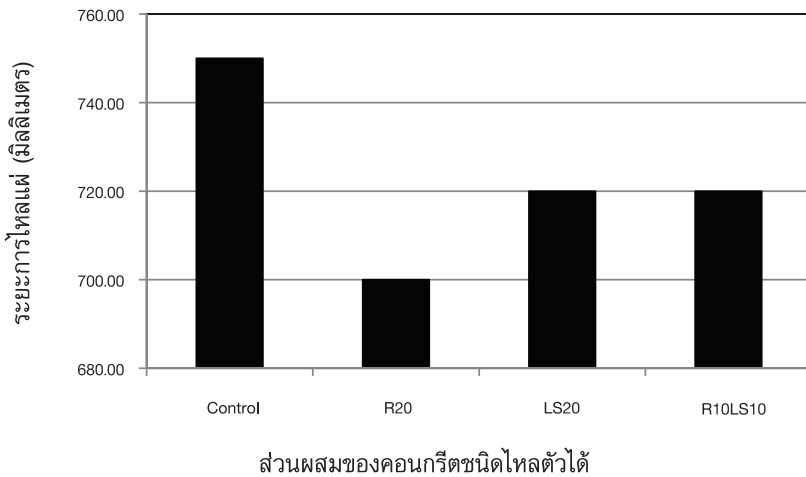


รูปที่ 5 หน่วยน้ำหนักในสภาวะของคอนกรีตสด

3.2.2 ระยะเวลาไหลแผ่ (Slump flow)

ระยะเวลาไหลแผ่จากการศึกษาแสดงในรูปที่ 6 พบว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ทุกอัตราส่วนผสมมีระยะเวลาไหลแผ่อยู่ในช่วง 700-750 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ EFNARC [15] มีค่าอยู่ในช่วง 650-800 มม. แสดงถึงคอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้อยู่ในระดับที่ดี คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ชนิดผสมรวมวัสดุผงจะมีระยะเวลาในการไหลแผ่ที่น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม โดยคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกบลบมีระยะเวลาไหลแผ่น้อยที่สุด เนื่องจากอิทธิพลของรูปทรงไม่แน่นอน ขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าซึ่งส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น คอนกรีตมีความหนืดเพิ่มขึ้นระยะ

การไหลแผ่ลดลง ในขณะที่คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมฝุ่นหินปูนมีระยะเวลาไหลแผ่มากกว่าเถ้าแกบลบ เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมน้อยลง และรูปทรงกลมช่วยให้การไหลแผ่ดีขึ้น ทั้งนี้เมื่อนำวัสดุผงทั้งสองชนิดมาผสมรวมกันพบว่าผลของฝุ่นหินปูนช่วยให้ระยะเวลาไหลแผ่ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกบลบดีขึ้น เนื่องจากสัดส่วนการใช้เถ้าแกบลบ และฝุ่นหินปูนที่ลดลงทำให้ความหนืดของคอนกรีตลดลงตามไปด้วย และรูปทรงกลมของฝุ่นหินปูนที่มีในส่วนผสม ส่งผลให้มีระยะเวลาไหลแผ่ของคอนกรีตดีขึ้นเท่ากับการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนอย่างเดียวในปริมาณที่สูงกว่า

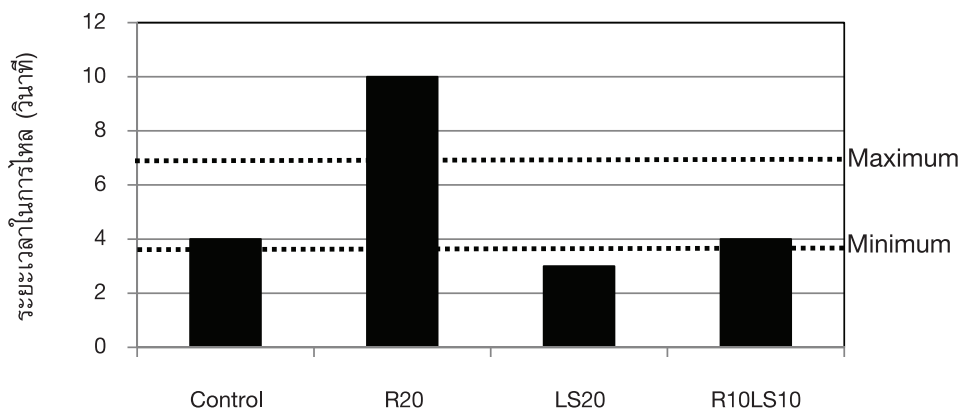


รูปที่ 6 ระยะเวลาไหลแผ่

3.2.3 เวลาในการไหลแผ่ถึงระยะ 50 ซม. (T_{50cm} Slump flow time)

เวลาในการไหลแผ่ถึงระยะ 50 ซม. แสดงในรูปที่ 7 พบว่า คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ใช้ระยะเวลาในการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ซม. อยู่ในช่วง 3-10 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ EFNARC [15] กำหนดอยู่ในช่วง 3-7 วินาที แสดงถึงคอนกรีตมีความสามารถในการเทได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ

ได้ ยกเว้นคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ชนิดผสมเถ้าแกบลบซึ่งมีเวลาในการไหลแผ่สูงมากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ในขณะที่คอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนใช้เวลาในการไหลแผ่น้อยที่สุด แต่ยังคงอยู่ในช่วงเกณฑ์ที่กำหนด สอดคล้องกับการทดสอบระยะเวลาไหลแผ่ เนื่องจากอิทธิพลของพื้นที่ผิว และลักษณะรูปทรงของเถ้าแกบลบ เปรียบเทียบกับฝุ่นหินปูนที่มีลักษณะแตกต่างกันส่งผลให้ความสามารถในการไหลแตกต่างกัน



ส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้

รูปที่ 7 เวลาในการไหลแผ่ถึงระยะ 50 ซม.

3.2.4 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางโดยการทดสอบ

J-Ring

การทดสอบความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางโดย J-Ring เป็นการทดสอบร่วมกับการทดสอบการไหลเนื่องจากผลต่างของระยะในการไหลแผ่แบบอิสระ กับการไหลแผ่แบบผ่านสิ่งกีดขวางถูกนำมาคำนวณเพื่อประเมินความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (Blocking assessment) ตามมาตรฐาน ASTM C1621 [14] กำหนดผลต่างของการไหลทั้ง 2 แบบอยู่ในช่วง 0-25 มม. ถือได้ว่าไม่เกิดการกีดขวางของการ

ไหล (No visible blocking) ผลต่างในช่วง 26-50 มม. ถือได้ว่าเกิดการกีดขวางของการไหลในระดับเล็กน้อย (Minimal to noticeable blocking) ส่วนผลต่างมากกว่า 50 มม. ถือได้ว่าเกิดการกีดขวางของการไหลในระดับสูง (Noticeable to extreme blocking) จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ทุกอัตราส่วนผสมมีผลต่างของการไหลทั้งสองแบบเท่ากับ 20 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนด ถือได้ว่าไม่มีการกีดขวางจากการไหล หรืออีกนัยหนึ่งคือสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้โดยไม่เกิดการติดขัด

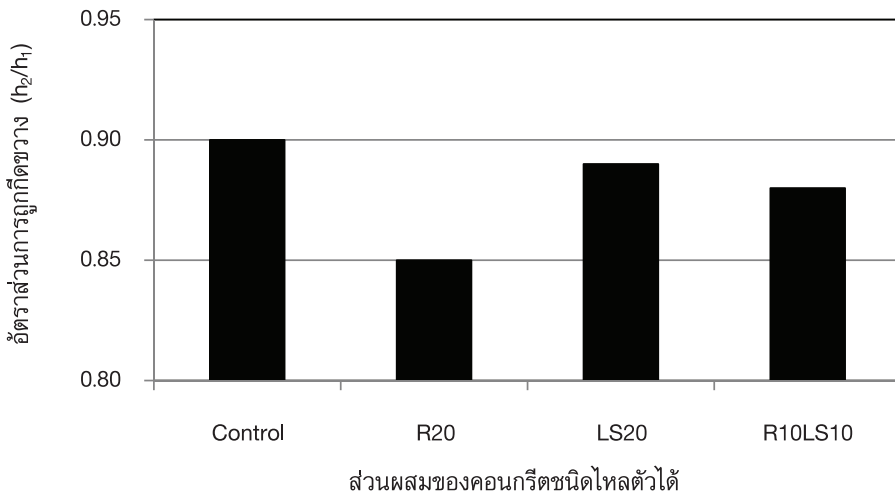
ตารางที่ 4 การประเมินความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางตามมาตรฐาน ASTM C1621 [14]

สัญลักษณ์	ระยะไหลแผ่ [มม.]	ระยะการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง [มม.]	ผลต่างของการไหลทั้ง 2 แบบ [มม.]	การประเมินการถูกกีดขวางจากการไหล
Control	750	730	20	ไม่กีดขวาง
R20	700	680	20	ไม่กีดขวาง
LS20	720	700	20	ไม่กีดขวาง
R10LS10	720	700	20	ไม่กีดขวาง

3.2.5 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางโดยกล่องรูปทรงแอล (L-box)

การทดสอบความสามารถในการเติมเต็มและไหลผ่านสิ่งกีดขวางโดยกล่องรูปทรงแอล ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ทุกอัตราส่วนผสมมีอัตราส่วน H_2/H_1 อยู่ในช่วง 0.85-0.90 เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ EFNARC [15] กำหนดอยู่ในช่วง 0.80-

1.00 วินาที แสดงถึงความสามารถของคอนกรีตทุกส่วนผสมในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางโดยกล่องรูปทรงแอล มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สอดคล้องกับการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบ J-Ring ดังนั้นการผสมรวมวัสดุผงในคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการถูกกีดขวาง (Blocking ratio) ถึงแม้ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น

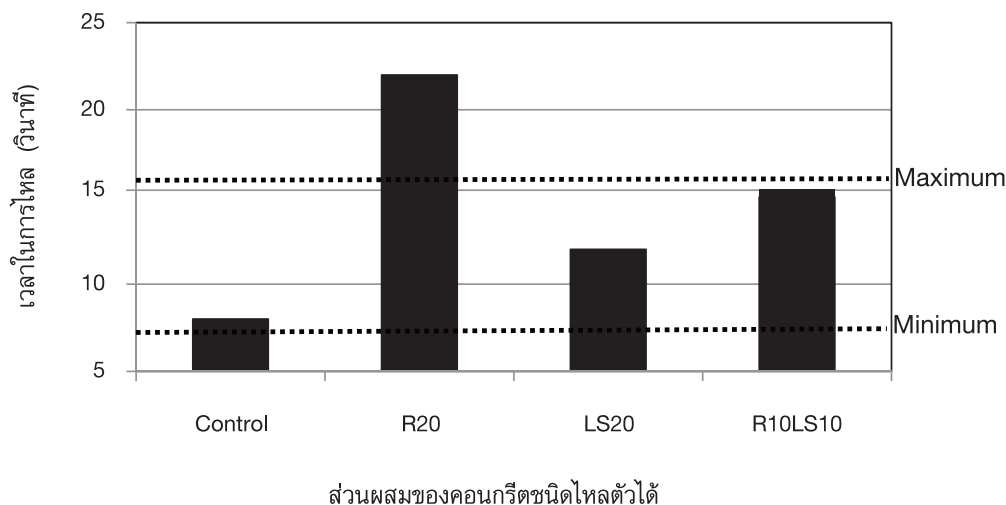


รูปที่ 8 อัตราส่วนการไหลผ่านสิ่งกีดขวางกล่องรูปทรงแอล

3.2.6 การไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี (V-funnel) ที่เวลา 5 นาที

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแยกตัวด้วยกล่องแบนรูปทรงวี ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ทุกอัตราส่วนผสมมีระยะเวลาไหลผ่านกล่องรูปทรงวีเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาทีจากการเติมคอนกรีตลงในกล่อง อยู่ในช่วง 6-24 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ EFNARC [15] กำหนดอยู่ในช่วง 6-15 วินาที แสดงถึงความสามารถของคอนกรีตในการต้านทานการแยกตัว ยกเว้นคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ชนิดผสมเถ้าแกลบซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ระยะ

เวลาการไหลที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น และแสดงถึงความเครียดภายในที่สูงขึ้น คอนกรีตผสมเถ้าแกลบซึ่งลักษณะอนุภาคมีความพรุนและขนาดเฉลี่ยอนุภาคที่ใหญ่กว่า ส่งผลให้มีความต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้นในขณะที่การออกแบบส่วนผสมกำหนดปริมาณน้ำคงที่ ทำให้คอนกรีตมีความหนืดมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่น ส่วนคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนส่งผลให้มีความหนืดเพิ่มมากขึ้น แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กสามารถเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้นส่งผลให้แรงต้านทานในการไหลลดลง



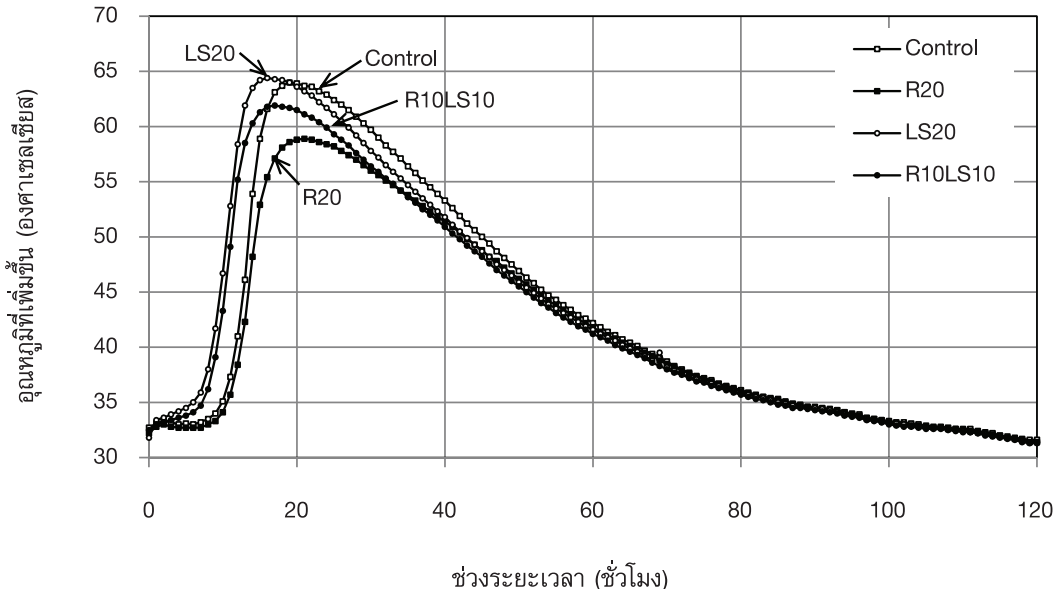
รูปที่ 9 เวลาในการไหลผ่านกล่องรูปทรงรี ณ.เวลา 5 นาที

3.2.7 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 10 แสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ พบว่าคอนกรีตผสมผงฝุ่นหินมีลักษณะเฉพาะของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมากกว่าคอนกรีตควบคุม ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ และคอนกรีตผสมรวมเถ้าแกลบกับผงฝุ่นหินมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม สำหรับอุณหภูมิ/ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นสูงสุด และอัตราการร้อนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงดังตารางที่ 5 พบว่าอุณหภูมิภายในของคอนกรีตผสมผงฝุ่นหินเพิ่มขึ้นถึง 64.4 °C และใช้ระยะเวลาที่อุณหภูมิถึงจุดสูงสุด 16 ชั่วโมงจากการเริ่มผสมคอนกรีตซึ่งมีอุณหภูมิสูงและทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม ในขณะที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อยจึงไม่สามารถเปลี่ยน

รูปแบบของค้ประกอบทางเคมีของคอนกรีตได้ แต่ด้วยขนาดเฉลี่ยอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ สามารถเข้าผสมและแทรกกระจายระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ได้ดี ช่วยลดปริมาณน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ลง ทำให้มีสัดส่วนของน้ำที่เหมาะสมในส่วนผสมของคอนกรีต ช่วยทำให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำในส่วนผสมได้อย่างทั่วถึงและรวดเร็วยิ่งขึ้น [18]

ในขณะที่อุณหภูมิภายในของคอนกรีตผสมผงเถ้าแกลบมีค่าเพิ่มขึ้น 58.9 °C และใช้ระยะเวลาที่อุณหภูมิถึงจุดสูงสุด 21 ชั่วโมงจากการเริ่มผสมคอนกรีตซึ่งมีอุณหภูมิต่ำและทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ช้ากว่า ในขณะที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นลดต่ำลง



รูปที่ 10 แนวโน้มของอุณหภูมิภายในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

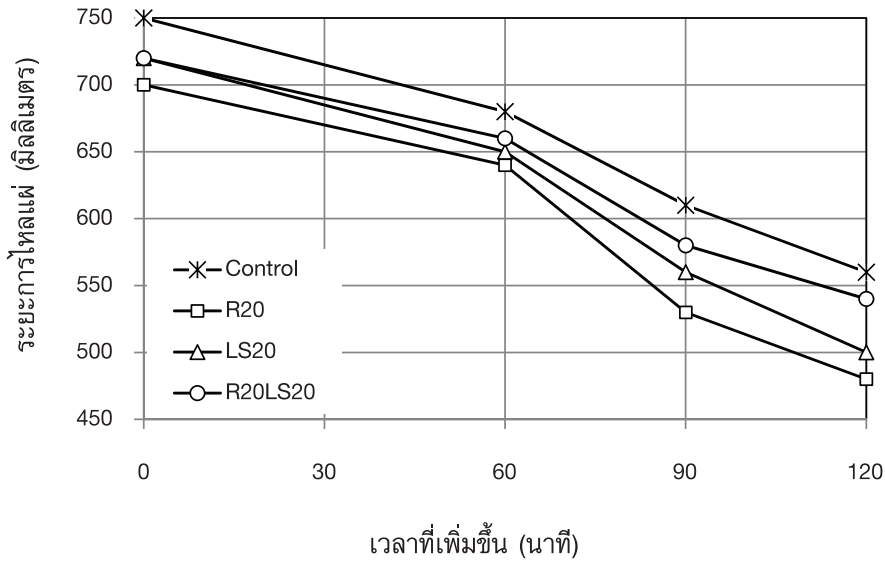
ตารางที่ 5 อุณหภูมิและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นสูงสุด และอัตราการร้อนที่เพิ่มขึ้น

สัญลักษณ์	อุณหภูมิสูงสุด [°C]	เวลาที่อุณหภูมิถึงจุดสูงสุด [h]	อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ [°C/h]
Control	64	19	7.8
R20	58.9	21	5.9
LS20	64.4	16	6.1
R10LS10	61.9	17	6.1

3.2.8 การสูญเสียความสามารถในเทได้ (Slump loss)

จากรูปที่ 11 พบว่าอัตราการลดลงของการไหลแผ่จากระยะเริ่มต้นผสมจนถึงเวลา 120 นาทีหลังจากการผสม คอนกรีตควบคุม คอนกรีตผสมเถ้าแกלב คอนกรีตผสมฝุ่นหินปูน และคอนกรีตผสมรวมเถ้าแกלב และฝุ่นหินปูนลดลง 190, 220, 220 และ 180 มม. เนื่องจากความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ลดลงเมื่อระยะเวลาและอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจาก

ความต้องการปริมาณน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกันตามชนิดของวัสดุผงโดยเฉพาะเถ้าแกלב ส่งผลให้ความสามารถในการไหลแผ่ลดลง และอีกประเด็นคือปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งเกิดขึ้นได้รวดเร็วในสภาวะที่อุณหภูมิสูง และผลของความเหนียวชั้น (Cohesiveness) ที่เพิ่มขึ้นจากการผสมฝุ่นหินปูน ทำให้ความสามารถในการเทได้ลดลงตามเวลาหลังจากการผสมคอนกรีต



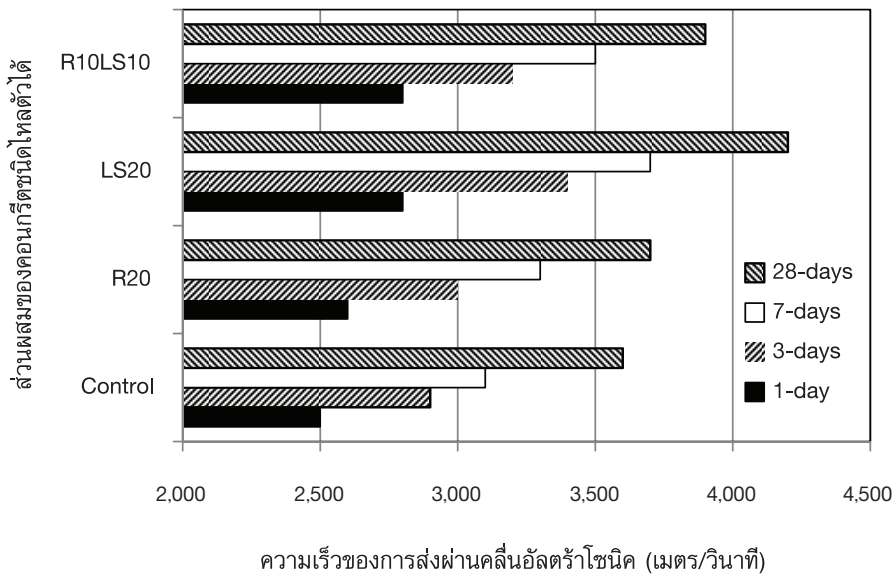
รูปที่ 11 การสูญเสียความสามารถในการเตได้

3.3 สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว

3.3.1 ความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิก

การทดสอบความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกของตัวอย่างคอนกรีตถือเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายเป็นการประเมินคุณภาพของคอนกรีตเนื่องจากการส่งผ่านคลื่นในคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงระยะเวลาในการเดินทางของคลื่นจะรวดเร็ว แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการส่งผ่านคลื่นพบว่ามีความเพิ่มขึ้นตามช่วงอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 12 ค่าเฉลี่ยความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกของ

ตัวอย่างคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน มีความเร็วอยู่ในช่วง 2500 - 4200 เมตรต่อวินาที เนื่องจากจากผลของระดับความหนาแน่นที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของคอนกรีต ความเร็วที่สูงขึ้นแสดงถึงคุณภาพของคอนกรีตที่ดีกว่าความเร็วที่ลดลง ความเร็วของคอนกรีตผสมฟูนหินปูนมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตชนิดอื่นๆ เป็นผลมาจากขนาดเฉลี่ยอนุภาคที่เล็กของฟูนหินได้เข้าไปแทรกกระหว่างอนุภาคส่งผลให้ช่องว่างและความพรุนของคอนกรีตลดลง ส่งผลให้ความเร็วในการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกเพิ่มมากขึ้น



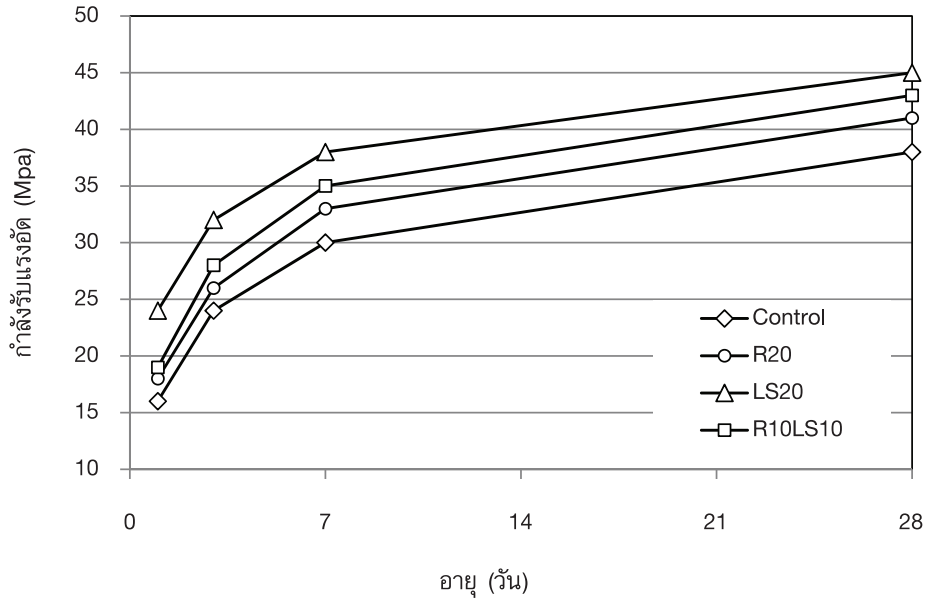
รูปที่ 12 การวัดความเร็วของการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิค

3.3.2 กำลั้งอัด

ค่ากำลั้งอัดของคอนกรีตชนิดโหลตัวได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามช่วงระยะเวลาการทดสอบที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าค่ากำลั้งอัดที่ช่วงอายุ 1 วันอยู่ในช่วงระหว่าง 16 ถึง 24 เมกะปาสคาล ค่ากำลั้งอัดที่ช่วงอายุ 3 วันอยู่ในช่วงระหว่าง 24 ถึง 32 เมกะปาสคาล ค่ากำลั้งอัดที่ช่วงอายุ 7 วันอยู่ในช่วงระหว่าง 30 ถึง 38 เมกะปาสคาล และค่ากำลั้งอัดที่ช่วงอายุ 28 วันอยู่ในช่วงระหว่าง 38 ถึง 45 เมกะปาสคาล ทั้งนี้คอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนมีค่ากำลั้งอัดสูงที่สุด ในขณะที่คอนกรีตควบคุมมีค่ากำลั้งอัดน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทุกส่วนผสม

ค่ากำลั้งอัดของคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนที่มีค่าสูงที่สุดเนื่องจากขนาดเฉลี่ยอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ของ

ฝุ่นหินปูนสามารถเข้าไปเติมในช่องว่างขนาดเล็ก (microvoids) ซึ่งเป็นผลของการแทรก (filler effect) ทำให้มีโครงสร้างมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น [19] รวมถึงคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนส่งผลให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำในส่วนผสมเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้คอนกรีตแข็งตัวและมีกำลั้งอัดในช่วงเริ่มต้นเร็วขึ้น ขณะที่ค่ากำลั้งอัดที่ 28 วันยังคงสูงขึ้นเช่นกัน ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าแกลบพบว่า มีค่ากำลั้งอัดน้อยกว่าคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนแต่มากกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากขนาดเฉลี่ยอนุภาคของเถ้าแกลบซึ่งมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้สามารถเข้าไปเติมแทรกในช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ได้ดีขึ้น และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคทำให้การกระจายขนาดของโพรงภายในคอนกรีตมีขนาดลดลง ทำให้คอนกรีตมีกำลั้งอัดสูงขึ้น [20]

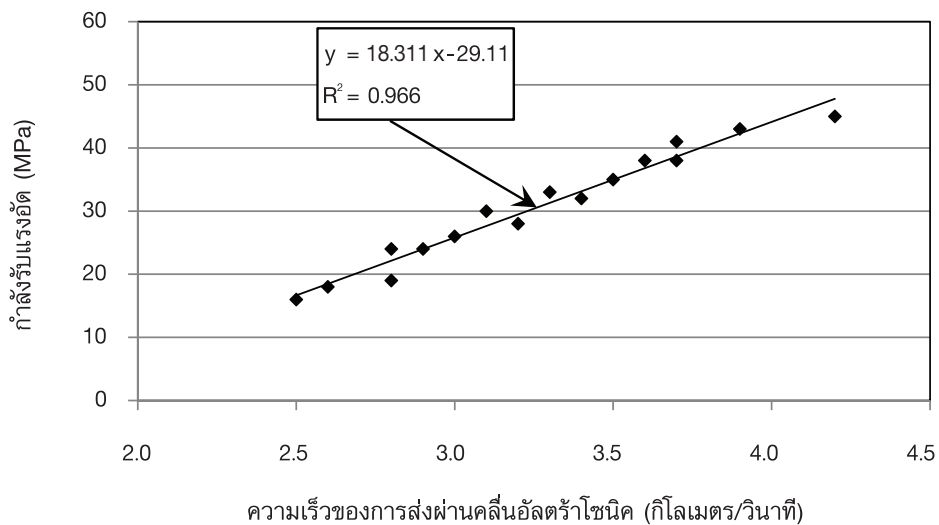


รูปที่ 13 การพัฒนากำลังอัดในตามช่วงอายุ

3.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิค

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 14 พบว่า ค่ากำลัง

อัดที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทดสอบความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิคเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันสอดคล้องกับการศึกษาของ Uysal และ Yilmaz [4] จากการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิคในทุกส่วนผสมอยู่ในระดับที่ดี ($R^2 = 0.996$)



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนา กำลังอัดและความเร็วของการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิค

4. สรุปผล

1. หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้มีค่าลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตด้วยวัสดุผง

2. สมบัติของคอนกรีตสดขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุผงที่ใช้ พบว่าคอนกรีตผสมปูนหินปูนมีความสามารถในการเทได้ในระดับที่ดีกว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ และใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมอันเนื่องมาจากลักษณะส่วนใหญ่ของวัสดุผงที่เป็นทรงกลม และมีผิวเรียบ ในขณะที่การผสมรวมปูนหินปูนกับเถ้าแกลบในส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้พบว่าความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเพียงอย่างเดียว

3. การทดสอบสมบัติของในสภาวะสดของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้พบว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมอยู่ภายในช่วงเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบที่กำหนด ยกเว้นคอนกรีตชนิดไหลตัวได้มีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการไหลแผ่ถึงระยะ 50 เซนติเมตร และระยะเวลาในการไหลผ่านกล่องรูปทรงวีที่เวลา 5 นาที ในขณะที่ระยะเวลาในการไหลแผ่ลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นหลังจากการผสม

4. คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมปูนหินปูนมีอุณหภูมิภายในสูงสุด ใช้เวลาที่อุณหภูมิถึงจุดสูงสุดน้อยที่สุดในขณะที่คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบมีอุณหภูมิภายในต่ำสุด ใช้เวลาที่อุณหภูมิถึงจุดสูงสุดมากที่สุด และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้อยที่สุด

5. คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบมีค่ากำลังอัดทุกช่วงอายุต่ำกว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมปูนหินปูน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อผสมรวมปูนหินปูนในคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบพบว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้มีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบเพียงชนิดเดียว

6. จากการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ในการพัฒนาคอนกรีตชนิดไหลตัวได้โดยการนำวัสดุผง (เถ้าแกลบ และปูนหินปูน) มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ทั้งนี้ต้องกำหนดอัตราส่วนการแทนที่ให้เหมาะสมกับองค์ประกอบหลัก ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ มวลรวม และสารเคมีผสมเพิ่ม

5. เอกสารอ้างอิง

1. Tarun, R.N., Rakesh, K., Bruce, W.R., and Fethullah, C., 2012, "Development of high strength, economical self-consolidating concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 30, pp. 463-469.
2. Okamura, H., and Ouchi, M., 2003, "Self-compacting concrete", *Journal of Advance Concrete Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 5-15.
3. Khayat, K.H., 1999, "Workability, Testing and performance of self-consolidating concrete", *ACI Materials journal*, Vol. 96, No. 3, pp. 346-354.
4. Uysal, M., and Yilmaz, K., 2011, "Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, No. 7, pp. 771-776.
5. Liu, M., 2010, "Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 7, pp. 1245-1252.
6. Sua-iam, G., and Makul, N., 2012, "The use of residual rice husk ash from thermal power plant as cement replacement material in producing self-compacting concrete", *Advanced Materials Research*, Vol. 415-417, pp. 1490-1495.
7. Gesoğlu, M., Güneyisi, E., and Özbay, E., 2009, "Properties of self-compacting concrete made with binary, ternary and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag and silica fume", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 5, pp. 1847-1854.
8. Rukzon, S., and Chindaprasirt, P., 2008, "Strength and chloride penetration of mortar with mixture proportioning in ternary cementitious system", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 859-869. (In Thai)

9. American Society for Testing and Material, 2011, "ASTMC150/C150M Standard specification for portland cement", *Annual Book of ASTM Standard* Vol. 4.01, Philadelphia, PA, USA.
10. American Society for Testing and Material, 2011, "ASTMC33/C33M-11 Standard specification for concrete aggregate", *Annual Book of ASTM Standard* Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.
11. American Society for Testing and Material, 2011, "ASTMC494/C494M-11 Standard specification for chemical admixtures for concrete", *Annual Book of ASTM Standard* Vol. 4.01, Philadelphia, PA, USA.
12. American Society for Testing and Materials, 2011, "ASTM C138/C138M-10 Standard Test Method for Density ("Unit Weight"), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete", *Annual Book of ASTM Standard* Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.
13. American Society for Testing and Material, 2011, "ASTM C1611/C1611M Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete", *Annual Book of ASTM Standard* Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.
14. American Society for Testing and Material, 2011, "ASTM C1621/C1621M Standard test method for passing ability of self-consolidating concrete by J-Ring", *Annual Book of ASTM Standard* Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.
15. EFNARC, 2002, *Specification and guidelines for self-compacting concrete*, Surrey, UK.
16. American Society for Testing and Material, 2011, "ASTM C597/C597M Standard test method for pulse velocity through concrete", *Annual Book of ASTM Standard* Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.
17. American Society for Testing and Material, 2011, "ASTM C39/C39M Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *Annual Book of ASTM Standard* Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.
18. Bentz, D.P., 2006, "Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, No. 2, pp. 124–129.
19. Heikal, M., El-Didamony, H., and Morsy, M.S., 2000, "Limestone-filled pozzolanic cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 1827–1834.
20. Safiuddin, Md., West, J.S., and Soudki, K.A., 2010, "Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, No. 9, pp. 708–717.

