

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

ในบทนี้นำเสนอผลการทดสอบและวิจารณ์ของการใช้ถ่านจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงหลัก ซึ่งประกอบด้วย สมบัติทางด้านซีเมนต์ของถ่าน สมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมถ่านชั้นที่ 1 และสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมถ่านชั้นที่ 2 โดยมุ่งเป้าไปที่การเพิ่มขีดความสามารถในการใช้ประโยชน์ของถ่านดังกล่าวด้วย ผงฝุ่นซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากอีกอุตสาหกรรมหนึ่ง

4.1 สถานการณ์โรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงถ่านในปัจจุบัน

ในปัจจุบันได้มีการนำถ่านมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตความร้อนและกระแสไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก โดยจากข้อมูลการรายงานของกระทรวงพลังงานจนถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2554 มีโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงหลักและได้ทำการขายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จำนวน 14 โรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 มีกำลังการผลิตโดยรวมอยู่ที่ 80 เมกะวัตต์ ในขณะที่ยังอยู่ในกระบวนการขออนุมัติเพื่อผลิตไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ระบบอีกมากกว่า 30 โรงงาน มีกำลังการผลิตรวมมากกว่า 200 เมกะวัตต์ ซึ่งมีน้อยอย่างยิ่งต่อปริมาณถ่านที่เหลือทิ้ง

ตารางที่ 4.1 โรงไฟฟ้าพลังงานกลบ

ลำดับ ที่	โรงงานไฟฟ้าพลังงาน กลบ	ประเภทกิจการ	สถานที่	ขนาดโรงไฟฟ้า (MW)
1	บ.พีอาร์จี พีซผล จำกัด	โรงสีข้าว	อ.เมือง จ.ปทุมธานี	9.0
2	บ.ไบโอ-แมส พาวเวอร์ จำกัด	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.วัดสิงห์ จ.ชัยนาท	6.0
3	บ.ร้อยเอ็ด กรีน จำกัด	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.เมือง จ.ร้อยเอ็ด	9.9
4	บ.เอ.ที. ไบโอพาวเวอร์ จำกัด	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.บางมูลนาก จ. พิจิตร	22.5
5	บ.มั่งเจริญกรีน พาวเวอร์จำกัด	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.เมือง จ.สุรินทร์	9.9
6	บ.บัวสมหมาย จำกัด (โครงการ 1)	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.เมือง จ.ร้อยเอ็ด	6.0
7	บ.อุทุมทองไบโอแมส จำกัด	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.อุทุมทอง จ.สุพรรณบุรี	7.0
8	บ.บัวใหญ่ ไบโอ พาวเวอร์ จำกัด	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.บัวใหญ่ จ. นครราชสีมา	7.3
9	บ.เดชา ไบโอกรีน จำกัด	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.บางปลาม้า จ. สุพรรณบุรี	7.5
10	บ.สุรินทร์ ไบโอ พาวเวอร์ จำกัด	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.เมือง จ.สุรินทร์	9.0
11	บ.โรงสีข้าวอุดรศิริไพศาล จำกัด	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.เมือง จ.อุดรธานี	9.8
12	บ.ไฟฟ้าชนบท จำกัด	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.ท่าม่วง จ.ลพบุรี	18.0
13	บ.บัวสมหมาย จำกัด (โครงการ 2)	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด	9.8
14	บ.บัวสมหมาย จำกัด (โครงการ 3)	โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อน	อ.เมือง จ.ร้อยเอ็ด	9.0

4.2 สมบัติของตัวอย่างเถ้าแกลบจากจังหวัดชัยนาท

4.2.1 องค์ประกอบเคมี

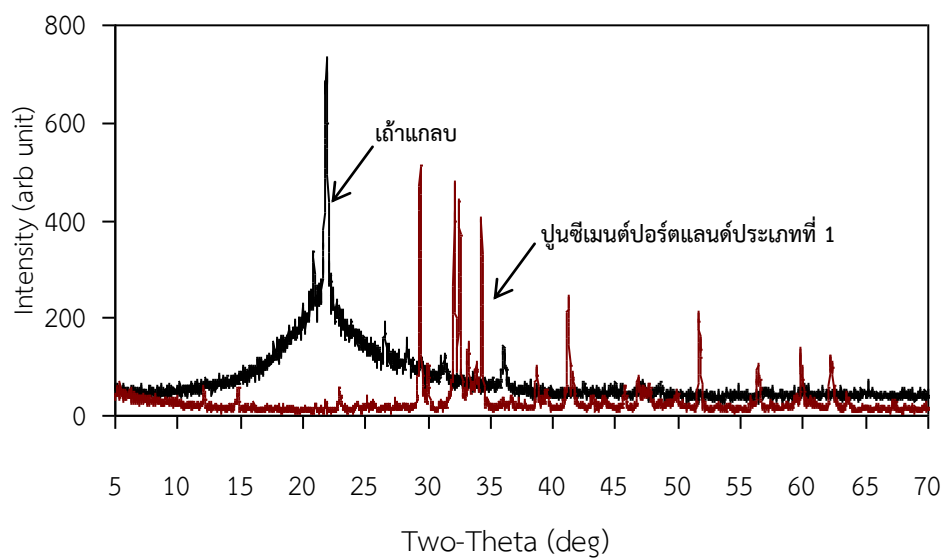
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ในขณะที่เถ้าแกลบที่ได้จากโรงผลิตไฟฟ้าที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงหลักมีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก อยู่ในสถานะผลึกของคริสโตบาไลต์ (Christobalite)

องค์ประกอบเคมีของเถ้าแกลบมีความแตกต่างกันตามพื้นที่ พันธุ์ข้าว และ ปุ๋ยที่ใช้ แกลบที่ผ่านการเผาจากกระบวนการผลิตไฟฟ้า โดยการเผาวิธีฟลูอิดไธเซด (Fluidized Bed) เตาเผาแบบใช้อากาศหมุนภายในเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น เนื่องจากมีอุณหภูมิสม่ำเสมอในระบบควบคุมโดยประมาณ 850 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบที่ได้มีปริมาณซิลิกาที่สูง

จากการประเมินศักยภาพทางด้านซีเมนต์ของเถ้าแกลบโดยใช้องค์ประกอบเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618 สามารถสรุปได้คือ ปริมาณองค์ประกอบเคมีอันได้แก่ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มีค่าร้อยละ 93.58 ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) มีค่าร้อยละ 0.09 ปริมาณความชื้นมีค่าร้อยละ 2.3, ปริมาณอัลคาไลในรูปของโซเดียมออกไซด์เทียบเท่า (Alkalis as $(\text{Na}_2\text{O})_{\text{eq}}$) มีค่าร้อยละ 1.21 และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition, LOI) มีค่าร้อยละ 1.19 ซึ่งจัดอยู่ในประเภท N ได้

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

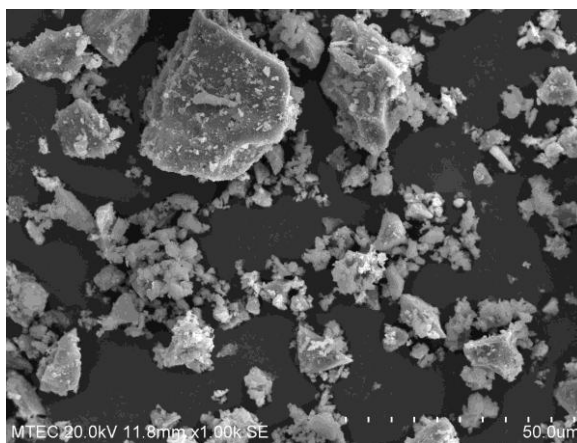
องค์ประกอบเคมี (ร้อยละโดยมวล)	ปูนซีเมนต์	เถ้าแกลบ
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	16.39	93.00
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	3.85	0.35
ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.48	0.23
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.64	0.41
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	68.48	1.31
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.06	0.15
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.52	1.61
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	4.00	0.09
ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5)	0.07	0.73
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้	0.03	1.90



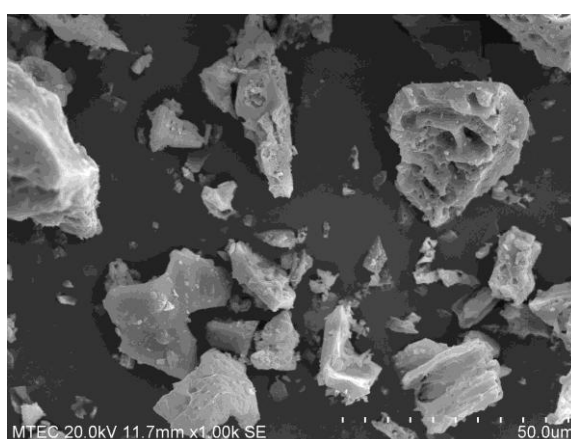
รูปที่ 4.1 ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction

4.2.2 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบ

จากภาพถ่ายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Microscopic Electron ดังรูปที่ 4.2 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าแกลบจากอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้ามีขนาดเล็กแต่ไม่คงที่ขึ้นกับกระบวนการเผา โดยทั่วไปมีความเป็นผลึกหาคำมาใช้ในการซีเมนต์ต้องทำการบดให้มีความละเอียดเท่ากับขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและความว่องไวในการทำปฏิกิริยา



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) เถ้าแกลบ

รูปที่ 4.2 ลักษณะของอนุภาค

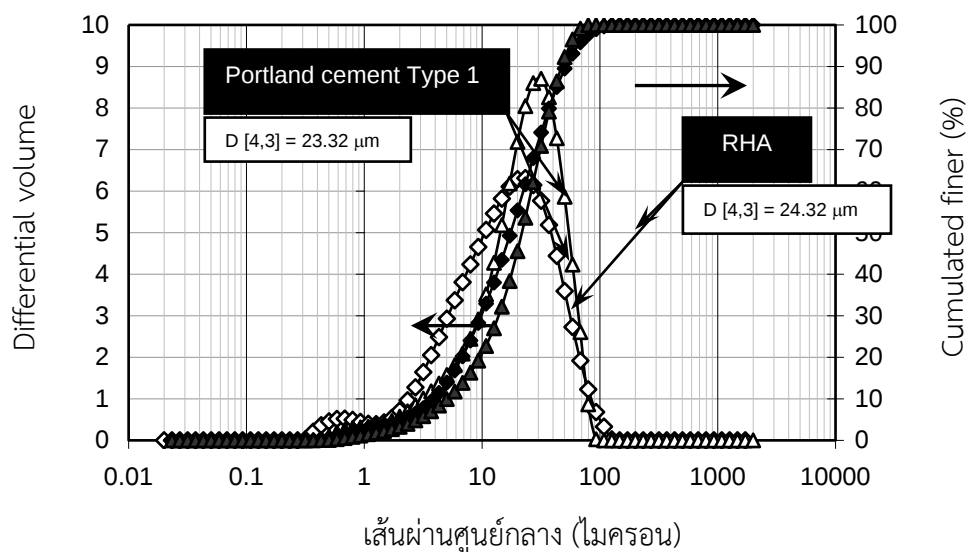
4.2.3 การกระจายขนาดผลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบ

การกระจายขนาดผลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเฉลี่ยอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ($D[4,3]$) = 23.32 ไมครอน ในขณะที่เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าจะทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพโดยการบดด้วยเครื่อง Ceramic Ball Mill ในปริมาตร $\frac{3}{4}$ ของโถบด พร้อมลูกบดผลขนาดในปริมาตร $\frac{1}{4}$ ที่เหลือของโถบด ทำการบดระยะเวลา 4 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.3 จากผลของการบด เถ้าแกลบ ทดสอบการกระจายของขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ของเถ้าแกลบเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าค่าเฉลี่ยอนุภาคของเถ้าแกลบ ($D[4,3]$) = 24.32 ไมครอน ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 เครื่องบดเถ้าแกลบแบบ Ceramic Ball Mill ที่สาขาวิชาเซรามิกส์

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร



รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบ

4.3 การนำเถ้าแกลบมาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีต

เพื่อเป็นการสนองต่อนโยบายของสถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร ในการที่ยกระดับงานวิจัยให้สามารถใช้งานได้จริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงขนาดด้วยการบดมาใช้งานคอนกรีตสมรรถนะสูงซึ่งก็คือ คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ (Self-compacting Concrete) โดยอนาคตคอนกรีตประเภทนี้จะถูกนำมาใช้ในประเทศในปริมาณที่สูงมากเนื่องจากสามารถสนองความต้องการทางด้านการขาดแคลนแรงงานในวงการการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตและใช้พลังงานของการก่อสร้างอันเนื่องมาจากการเทและการอัดแน่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี 1988 โดยวิศวกรชาวญี่ปุ่นเพื่อแก้ปัญหาคุณภาพของงานจากแรงงานก่อสร้างที่ขาดความเชี่ยวชาญ และทักษะในการทำงาน ในขณะเดียวกันยังช่วยลดต้นทุนในการทำงานและปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัสดุ

ทดแทนในปูนซีเมนต์อีกด้วย ในเบื้องต้นคอนกรีตชนิดใหม่ที่พัฒนาขึ้นมาได้นี้ถูกเรียกว่า High Performance Concrete โดยมีจุดมุ่งหมายของการพัฒนานี้ เพื่อแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพและความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตที่จะเกิดขึ้นในอนาคต อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการปฏิบัติงานคอนกรีตที่ไม่เหมาะสมของแรงงานที่ไม่มีคุณภาพ และแนวโน้มการขาดแคลนแรงงานที่มีคุณภาพในอนาคตของประเทศญี่ปุ่น โดยนักวิจัยญี่ปุ่นขณะนั้นได้ให้นิยามหรือคำจำกัดความของคำว่า High Performance Concrete ของคอนกรีตต้นแบบที่พัฒนาขึ้นว่าจำเป็นต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- ขณะยังเป็นคอนกรีตสด โดยต้องมีความสามารถในการไหลเข้าแบบได้เองมีความสม่ำเสมอโดยไม่แยกตัว
- คอนกรีตในช่วงอายุต้นๆ ต้องไม่มีปัญหาเรื่องรุกรุนและการแตกร้าวเมื่อแกะแบบ
- คอนกรีตเมื่อแข็งตัวดีแล้ว ต้องมีความทนทานสูง

ในขณะเดียวกันนั้น นักวิจัยทางฝั่งอเมริกาได้ให้คำจำกัดความของคำว่า High Performance Concrete ไว้ก่อนแล้ว โดยให้หมายถึงคอนกรีตที่มีความคงทนสูงเนื่องมาจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำ ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดการสับสนในการใช้งาน ทางญี่ปุ่นจึงเรียกคอนกรีตชนิดพิเศษของตนนี้ว่า Self-Compacting High Performance Concrete ต่อมาเนื่องด้วยกรรมวิธีต่างๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสามารถในการไหลเข้าแบบได้เอง (Self-compactability) ของคอนกรีตได้ถูกพัฒนามากขึ้นทำให้คอนกรีตไม่จำเป็นที่จะต้องใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำเสมอไปและนั่นย่อมส่งผลโดยตรงต่อความคงทน (Durability) ของตัวคอนกรีตเองด้วยประกอบกับลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์อันโดดเด่นในขณะที่ยังเป็นคอนกรีตสดที่สามารถไหลได้เองคล้ายกับน้ำ จึงทำให้ผู้คนเรียกรวมคอนกรีตที่มีลักษณะไหลได้เองไม่ว่าจะต้องใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงหรือต่ำก็ตามว่า Self-Compacting Concrete (SCC) หรือที่ทางอเมริกาเรียกว่า Self-Consolidating Concrete (SCC)

Self-Compacting Concrete (SCC) หมายถึง คอนกรีตที่มีความสามารถในการไหลเข้าไปยังทุกมุมของแบบได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองโดยไม่ต้องการการจี้เขย่าใดๆ และไม่เกิดการแยกตัวของส่วนผสมในคอนกรีตโดยเฉพาะอย่างยิ่งมวลรวม ซึ่งเพื่อให้คอนกรีตสามารถทำเช่นนั้นได้คอนกรีตจำเป็นที่จะต้องมีความสามารถหลัก 3 อย่าง คือ

- ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง (Deformation)
- ความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (Passing Ability)
- ความต้านทานการแยกตัวของมวลรวมสูง (Segregation Resistance)

ในปัจจุบันเราสามารถจำแนกประเภทของ SCC ออกได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของส่วนผสมของคอนกรีต ดังนี้

1. ประเภท Powder based

SCC ประเภทนี้จะใช้ปริมาณวัสดุประสาน ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์, วัสดุพอลิโพรไพลีน และวัสดุ filler ชนิดต่างๆ ในปริมาณที่มากกว่าคอนกรีตทั่วไป และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในปริมาณที่ต่ำเพื่อเพิ่มความหนืด (Viscosity) และความต้านทานการแยกตัวของมวลรวม (Segregation Resistance) ให้แก่คอนกรีต และด้วยการใช้ปริมาณวัสดุประสานที่มีจำนวนมากในคอนกรีตนี้เองทำให้จำเป็นต้องใช้สารเคมีลดน้ำ Superplasticizer ในปริมาณที่มากตามไปด้วยเพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง (Deformation) SCC ประเภทนี้ถูกมองว่าน่าจะมีความคงทน (Durability) สูงที่สุด เพราะสามารถให้กำลังอัดได้สูง(ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและปริมาณที่ใช้ด้วย) และมีความพรุนต่ำซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำนั่นเอง SCC ประเภทนี้จะมีราคาที่สูงกว่าราคาของคอนกรีตทั่วไปเนื่องจากการใช้วัสดุประสานและสารเคมีลดน้ำ Superplasticizer ในปริมาณที่มาก ข้อควรระวังของ SCC ประเภทนี้คือ ความสามารถในการไหล (Self-compactability) ค่อนข้าง

ที่จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและขนาดผลของมวลรวมละเอียด SCC
ต้นแบบที่ญี่ปุ่นได้พัฒนาขึ้นมานั้นจัดอยู่ในประเภทนี้ และปัจจุบันก็ยังคงเป็นที่นิยมในญี่ปุ่นในประเทศ
ไทยเองก็นิยมใช้ SCC ประเภทนี้

2. ประเภท Viscosity agent based

สารเคมีผสมเพิ่มประเภท Viscosity agent ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความหนืด (Viscosity) ให้แก่
คอนกรีต ทำให้คอนกรีตไม่จำเป็นต้องใช้ปริมาณวัสดุประสานในปริมาณที่มาก ส่วนผสมของ SCC
ประเภทนี้มีความใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติที่ใช้กันทั่วไป ซึ่งทำให้ความคงทนของ SCC ประเภทนี้ไม่มี
ความแตกต่างไปจากคอนกรีตทั่วไปมากนัก ราคาของ SCC ประเภทนี้ก็สูงกว่าคอนกรีตทั่วไป
ไม่มาก SCC ประเภทนี้เป็นที่นิยมในสหรัฐอเมริกาและกลุ่มประเทศในทวีปยุโรป

3. ประเภท Combination type

SCC ประเภทนี้เป็นลูกผสมที่เกิดจากคอนเซ็ปต์ของ SCC ทั้งสองประเภทที่กล่าวมาแล้ว
ข้างต้นมารวมกัน คือมีทั้งการใช้วัสดุประสาน และ Viscosity Agent จุดประสงค์เพื่อช่วยลดความไว
ของ SCC ต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและขนาดผลของมวลรวมละเอียด นอกจากนี้ยังช่วยใน
เรื่องของสมดุลระหว่างราคาและความคงทนของคอนกรีตที่ต้องการอีกด้วย

จากนั้นได้มีการศึกษาการพัฒนาของคอนกรีตชนิดไหลอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการใช้วัสดุ
ปอซโซลานจากธรรมชาติเข้ามาผสมรวม ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) ฝุ่นหิน (Limestone Powder)
และเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) อย่างไรก็ตามในส่วน of เถ้าลอยมีการศึกษาเยอะมาก เนื่องจากอนุภาค
ที่กลมช่วยพาให้อนุภาคของเพสต์ช่วยห่อหุ้มทรายให้ไหลตัวไปด้วยกันได้ดี ในขณะที่เถ้าแกลบยังมี
การศึกษาน้อยมากเนื่องจากมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน แต่จากการศึกษาพบว่าเถ้าแกลบสามารถพัฒนาใช้ในการ
การคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

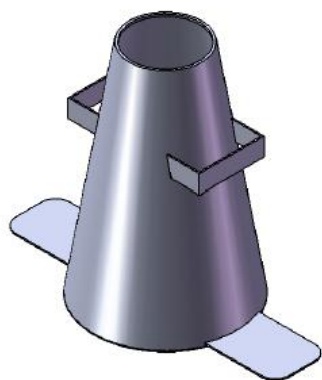
4.4 สมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้ากลบชั้นที่ 1

จากการทดลองใช้เถ้ากลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในงานคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุผง และกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.28 และ 0.33 ดังแสดงอัตราส่วนของคอนกรีตที่ใช้ในตารางที่ 4.3

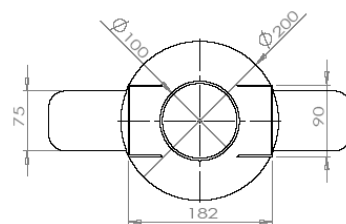
ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้

สัญลักษณ์	เถ้ากลบ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	อัตราส่วน น้ำวัสดุผง	สัดส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					สารเคมีผสมเพิ่ม (ร้อยละ)
			ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1	เถ้ากลบ	ทราย	หิน	น้ำ	
R0W/C0.28	0	0.28	550	0	963	832	154	1.60
R10W/C0.28	10	0.28	495	55	963	832	154	1.60
R20W/C0.28	20	0.28	440	110	963	832	154	1.60
R40W/C0.28	40	0.28	330	220	963	832	154	1.60
R0W/C0.33	0	0.33	550	0	963	832	182	1.60
R10W/C0.33	10	0.33	495	55	963	832	182	1.60
R20W/C0.33	20	0.33	440	110	963	832	182	1.60
R40W/C0.33	40	0.33	330	220	963	832	182	1.60

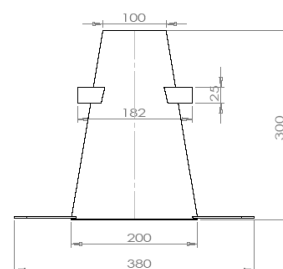
โดยการออกแบบคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในแต่ละอัตราส่วนนั้นจะทำการทดสอบคอนกรีตสดประกอบไปด้วยหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ตามมาตรฐาน ASTM C29, ทดสอบความสามารถในการไหลโดยใช้กรวย Abram (รูปที่ 4.5) ตามมาตรฐาน ASTM C143 รวมถึงทดสอบ V-funnel (รูปที่ 4.6) จากนั้นทำการทดสอบคอนกรีตในสภาพแข็งตัวโดยการรับกำลังอัด (Compressive Strength) และการหาค่าความต่อเนื่องของคอนกรีต (Ultrasonic Pulse Velocity) ที่อายุ 1, 3, 7, 28, 56 และ 91 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 และ ASTM C597 ตามลำดับ



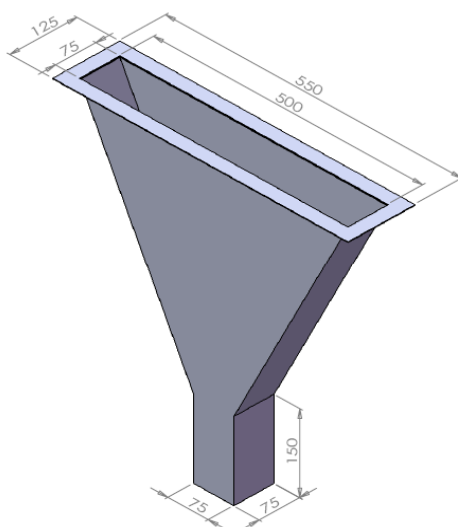
Abram's cone



Dimension in mm



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการไหลตัวได้โดยใช้กรวย Abram

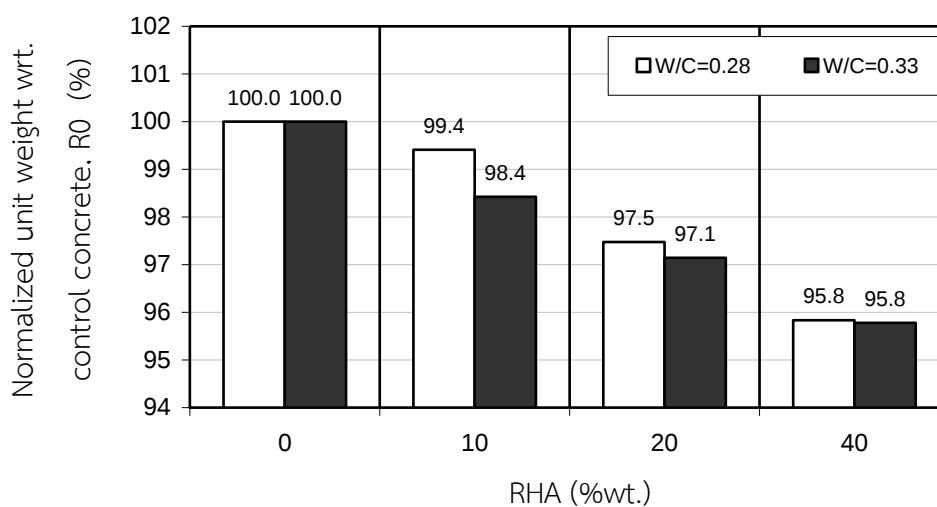


รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการไหลโดยใช้ V-funnel

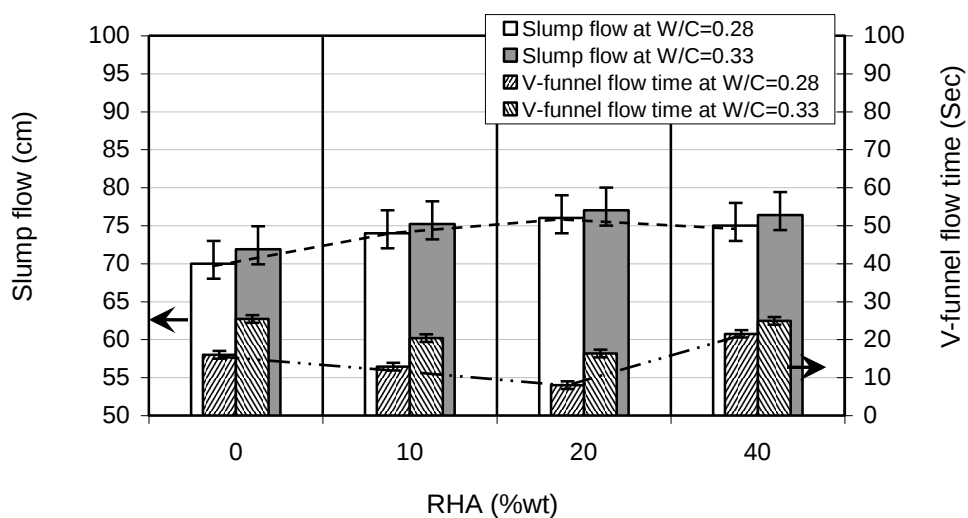
4.4.1 ผลการทดสอบ

4.4.1.1 ความสามารถในการไหลได้

จากผลการทดสอบพบว่า หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตจะลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของเถ้ากลบเนื่องจากเถ้ากลบมีความหนาแน่นที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในขณะที่การไหลตัวพบว่า การไหลแผ่ของคอนกรีตควบคุมที่ 70 ซม และ 71.9 ซม ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน w/c เท่ากับ 0.28 และ 0.33 ตามลำดับ พบว่า การไหลแผ่มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของเถ้ากลบ ในขณะที่ระยะเวลาในการไหลของ V-funnel มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงจากคอนกรีตควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4.7



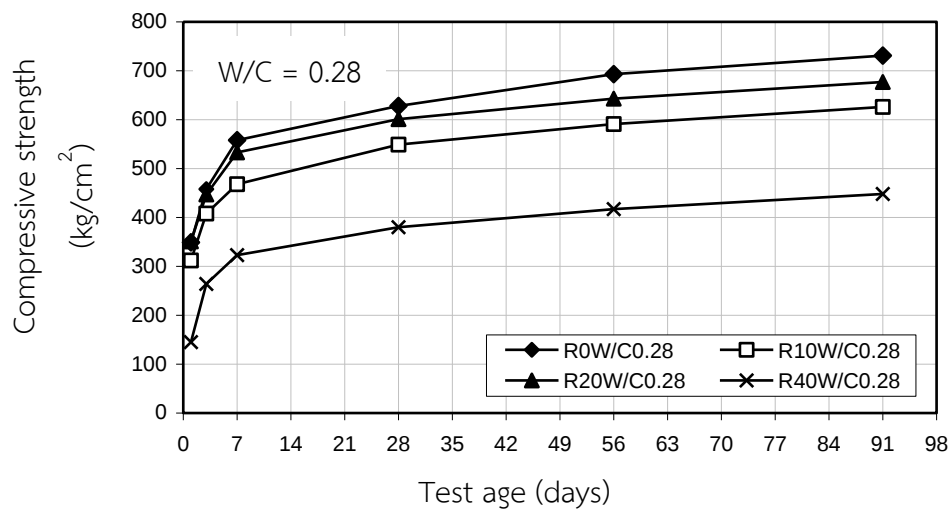
รูปที่ 4.7 หน่วยน้ำหนักเทียบเท่าของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้เปรียบเทียบกับคอนกรีตล้วน



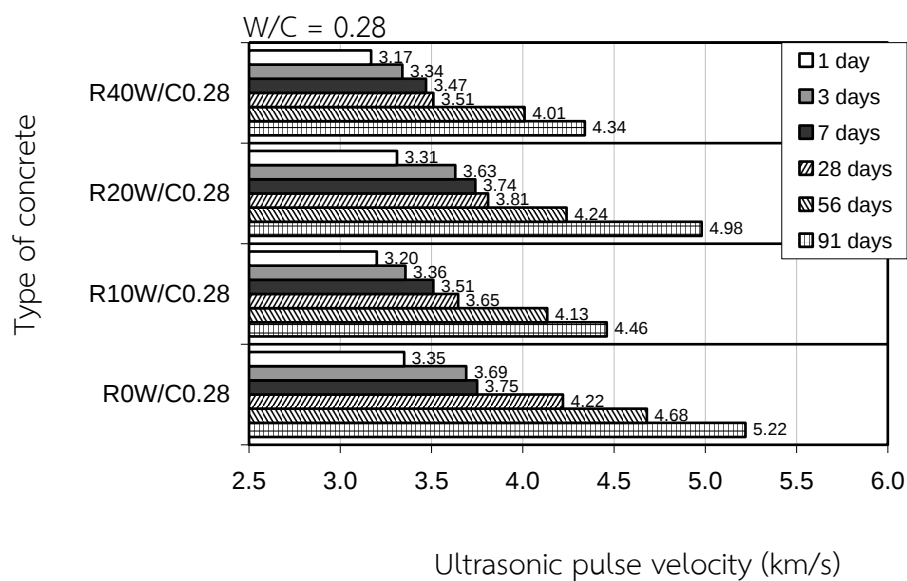
รูปที่ 4.8 ความสามารถในการไหลของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้

4.4.4.2 กำลังอัด

กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน W/C ลดลง ในขณะเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของการแทนที่เถ้าแกลบส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงด้วย จากการทดลองพบว่าการแทนที่เถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักจะได้กำลังอัดของคอนกรีตสูงสุด ในขณะที่การทดสอบความต่อเนื่องของคอนกรีตการแทนที่เถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักจะได้ความริ้วสูงสุดเมื่อเทียบกับการแทนที่ในอัตราส่วนอื่นดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การพัฒนากำลังของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้



รูปที่ 4.10 ค่าความเร็วของคลื่นที่ผ่านคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ด้วยเทคนิคการวัดด้วย

Ultrasonic Pulse Velocity

4.4.4.3 สรุปผลการทดสอบขั้นที่ 1

- คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าซึ่งมีขนาดเฉลี่ยอนุภาค 24.32 ไมครอน มีหน่วยน้ำหนักลดลงเมื่อการแทนที่เถ้าแกลบเพิ่มขึ้น.
- ที่การแทนที่ของเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการไหลดีที่สุด จากการทดสอบการไหลแผ่นสูงสุด และระยะเวลาในการทดสอบ V-funnel Flow Time น้อยที่สุด.
- กำลังอัดของคอนกรีตทุกช่วงอายุที่การแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าสูงสุด สอดคล้องกับการทดสอบ Ultrasonic Pulse Velocity

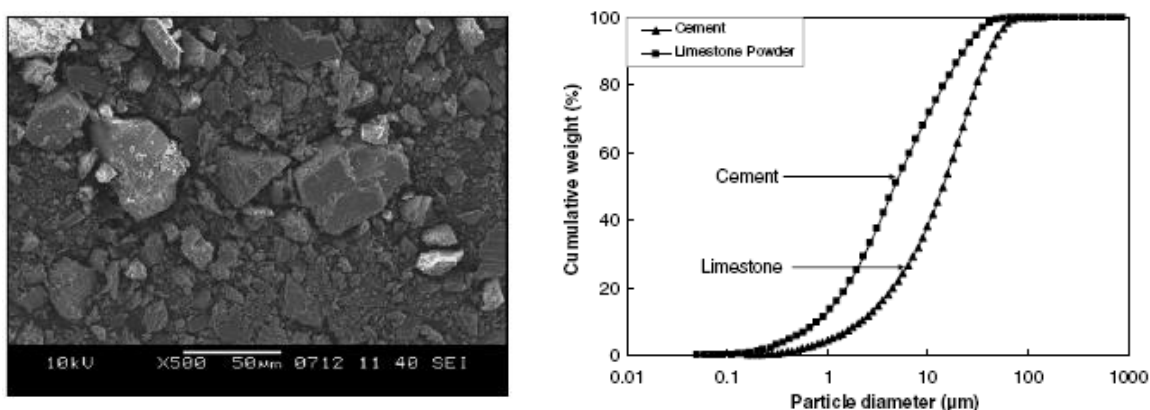
4.5 การศึกษาคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบขั้นที่ 2: การเพิ่มขีดความสามารถในการใช้ประโยชน์ของเถ้าแกลบด้วยผงฝุ่นหิน

ด้วยข้อจำกัดของเถ้าแกลบซึ่งใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้เพียงร้อยละ 20 ตามข้อสรุปของขั้นที่ 1 ดังนั้นในขั้นตอนที่ 2 นี้ จึงได้เพิ่มผงฝุ่นหิน (Limestone Powder) ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการย่อยหินของโรงโม่หินจากจังหวัดสระบุรีเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้

ฝุ่นหินปูนเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหินเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ วัตถุประสงค์หลักของการใช้วัสดุดังกล่าวเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์อันเป็นลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และได้มีความพยายามในการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ให้มากยิ่งขึ้น ปัจจุบันตามมาตรฐาน ASTM C150 (American Society for Testing and Material, 2011) ได้อนุญาตให้ใช้ฝุ่นหินปูนในส่วนผสมโดยน้ำหนักได้ไม่เกินร้อยละ 5 ส่วนมาตรฐาน EN 197-1 (European Committee for Standardization, 2000) การผลิต Portland

Limestone Cement ใช้ฝุ่นหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ถึงร้อยละ 6-35 ฝุ่นหินปูนถือว่าเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert) เนื่องจากไม่สามารถเปลี่ยนรูปแบบองค์ประกอบเคมีได้ตลอดอายุการใช้งานของคอนกรีต แต่ก็ยอมรับว่ามีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เล็กน้อยจากการฟอร์มตัวโมโนคาร์โบออลูมิเนต ($C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$) (Lewis et al., 2003)

คุณลักษณะทางกายภาพของฝุ่นหินปูนมีรูปร่างไม่แน่นอน พื้นผิวเรียบ ที่สำคัญขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ช่วยทำหน้าที่อัดแน่น (Packing) และช่วยลดช่องว่างขนาดเล็กระหว่างอนุภาคของวัสดุผงทำให้ลดการใช้น้ำในส่วนผสมลง (Yahia et al., 2005) ดังรูปที่ 4.11



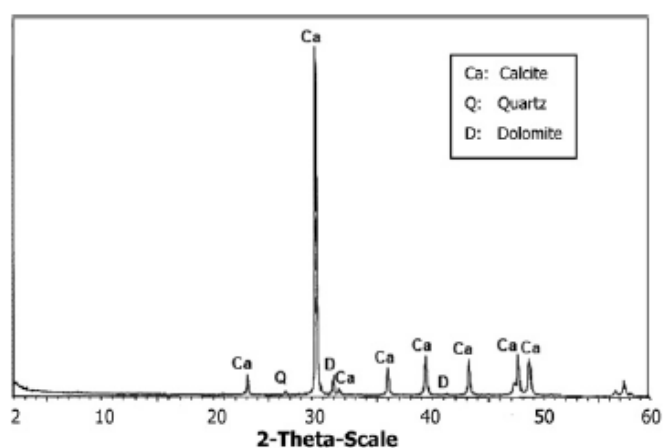
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายขยายอนุภาคฝุ่นหินปูนที่กำลังขยาย 500 เท่า (Felekoglu, 2007) และ

การกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นหินปูนเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 1 (Ye et al., 2007)

ฝุ่นหินปูนอยู่ในรูปโครงสร้างผลึกแคลไซต์ (Calcite) ดังรูปที่ 4.12 ส่วนองค์ประกอบเคมีส่วนใหญ่ของฝุ่นหินปูนมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากเป็นผลพลอยได้

จากกระบวนการย่อยหินไม่ได้มาจากการบวนการเผาทำให้มีการสูญเสียจากการเผาไหม้ (LOI) มีค่าสูงมาก ดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมของฝุ่นหินปูนที่ได้ทดสอบด้วยเทคนิค X-ray diffraction (Ghrici et al., 2007)

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบเคมีของฝุ่นหินปูน

องค์ประกอบเคมี (ร้อยละ)	Ghrici, M., et al.	Lee, S.T., et al.	Georgiadis, et al.	Weerd, K.D. et al.	Rizwan, S.A. et al.
SiO ₂	0.55	0.51	1.8	12.9	7.07
Al ₂ O ₃	0.40	0.22	0.45	2.7	2.53
Fe ₂ O ₃	0.17	0.09	0.08	2.0	0.88
CaO	53.47	54.4	54.8	42.3	48.57
MgO	1.02	0.62	0.68	2.8	1.13
SO ₃	1.50	-	0.05	-	0.28
LOI	43.14	43.44	40.5	37.7	38.72

อิทธิพลของฝุ่นหินปูนที่มีต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่สำคัญ คือ ขนาดอนุภาคที่ละเอียดของ ฝุ่นหินปูนช่วยทำหน้าที่เติมแทรก (Filling Effect) สามารถแทรกและกระจายได้ระหว่างอนุภาคของ ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตและสามารถช่วยลดปริมาณน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาค ปูนซีเมนต์ลงทำให้มีสัดส่วนของน้ำที่เหมาะสม ทั้งนี้ความสามารถแยกกระจายอนุภาคปูนซีเมนต์ออก จากกันและปริมาณน้ำที่เหมาะสมนี้ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำในส่วนผสมได้อย่าง ทัวถึงและรวดเร็วยิ่งขึ้นทำให้มีเสถียรภาพเชิงปริมาตรภายในเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โพรงลดลงและกำลังอัด เพิ่มขึ้น นอกเหนือจากการทำหน้าที่เติมแทรกแล้วฝุ่นหินปูนยังสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้อีกด้วย เนื่องจากสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในฝุ่นหินปูนสามารถทำปฏิกิริยากับ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Weerdt et al., 2011; Rizwan and Bier, 2012) ฝุ่นหินปูนถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีตชนิดไหลตัวได้มากที่สุด (Domone, 2006) เนื่องจากฝุ่นหินปูนช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ชนิดไหลตัวได้อย่างมีนัยสำคัญ (Sahmaran et al., 2006) ทั้งนี้คุณสมบัติของฝุ่นหินปูนที่มีผลต่อความสามารถในการไหลตัวของ คอนกรีตขึ้นอยู่กับความละเอียด การกระจายขนาดอนุภาค ธรรมชาติและสิ่งเจือปน ซึ่งได้แก่ ดิน (Diederich et al., 2012) อย่างไรก็ตามชนิดและปริมาณของดินส่งผลกระทบน้อยกว่าเมื่อ เปรียบเทียบกับผลของความละเอียดของอนุภาคฝุ่นหินปูนเอง (Courard et al., 2011) เห็นได้ว่าฝุ่น หินปูนที่มีขนาดใหญ่ส่งผลให้ความสามารถในการไหลตัวได้ลดลง การหดตัวเองโดยอัตโนมัติเพิ่มขึ้น การระเหยตัวและการหดตัวในช่วงพลาสติกลดลง ในขณะที่กำลังอัดยังคงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ คอนกรีตควบคุม ทั้งนี้หากเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อคงความสามารถในการไหลผลที่ได้กลับตรงกันข้าม อาทิเช่น การระเหยตัวและการหดตัวในช่วงพลาสติกเพิ่มขึ้น ส่วนกำลังอัดลดลงเนื่องจากผลของ ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น (Esping, 2008) ปัจจัยที่สำคัญของฝุ่นหินปูนนอกจากมีขนาดที่เล็กแล้วยังต้องมี การกระจายระหว่างอนุภาคที่ดี ส่งผลต่อความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปได้ (Deformability)

ของซีเมนต์เพสต์อย่างมีนัยสำคัญ Bosiljkov และคณะ (Bosiljkov et al., 2003) พบว่าการแทนที่ขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าของฝุ่นหินปูนด้วยขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ส่งผลให้สัดส่วนน้ำต่อวัสดุผงลดลงจาก 0.48 เหลือ 0.45 ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงขึ้นเนื่องจากผลจากขนาดเฉลี่ยอนุภาคของฝุ่นหินปูนที่มีขนาดเล็กช่วยเข้าไปเติมแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ทำให้ช่องว่างภายในโครงสร้างคอนกรีตเล็กลง ส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตลดลง คอนกรีตแน่นตัวเพิ่มขึ้น และการ ซึมผ่านได้ของน้ำลดลง (Valcuende et al., 2012) นอกจากนั้นขนาดที่เล็กของฝุ่นหินปูนยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้การพัฒนาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น (Craeye et al., 2010) การก่อตัวระยะต้นและระยะสุดท้ายเร็วขึ้น การหดตัวของคอนกรีตในภาพรวมสูงกว่าคอนกรีตปกติร้อยละ 9.2 (Valcuende et al., 2012)

นอกจากนี้การแทนที่ฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการสารลดน้ำอย่างแรงในส่วนผสมลดลงเนื่องจากความละเอียดของอนุภาค (Valcuende et al., 2012) ส่งผลให้ราคาคอนกรีตลดลง พิจารณาปริมาณปูนซีเมนต์ผงที่เหมาะสมประมาณ 300-310 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ให้กำลังอัดประมาณ 30 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน หากเพิ่มสัดส่วนผสมให้เหมาะสมสามารถเพิ่มกำลังอัดได้สูงมากถึง 45-50 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายที่ลดลงต่อหน่วยกำลังอัดสามารถลดลงได้ถึง 1.6-6.4 บาทต่อเมกะปาสคาลต่อลูกบาศก์เมตร (Felekoglu, 2007) ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญของการใช้ฝุ่นหินปูนในคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (Yahia et al., 2005) เนื่องจากหากปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง อยู่ในระดับไม่เหมาะสม ผงหินปูนจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น รวมถึงปริมาณฝุ่นหินปูนที่ใช้ในสัดส่วนมากเกิดไปทำให้ความหนืดเพิ่มตามไปด้วยทำให้ความสามารถในการไหลลดลง แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงและปริมาณวัสดุผง (Yahia et al., 2005)

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง	ปริมาณวัสดุผง (ร้อยละ)	คิดเป็นปริมาตรในมอร์ตาร์ (ร้อยละ)
0.35	23	29
0.40	25	35
0.45	23	38

ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมฝุ่นหินปูนสูงกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 60-80 ที่อายุ 7 วัน และร้อยละ 30-40 ที่อายุ 28 วัน (Zhu and Gibbs, 2005) เห็นได้ชัดว่าฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุเติมแทรกที่มีการใช้ทั่วไปในงานคอนกรีตชนิดไหลตัวได้เนื่องจากผลของการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในช่วงต้น (28 วัน) มีนัยสำคัญ (Domone, 2007) Mňahončáková และคณะ (Mňahončáková et al., 2008) พบว่าคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นได้เร็วกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอย แต่หลังจากคอนกรีตอายุ 90 วันกำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการนำพาของเหลว (Liquid Water Transport) และความร้อน (Heat Transport) ที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนทำได้เร็วกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอย ส่วนผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นต่อคุณสมบัติของฝุ่นหินปูนในคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ พิจารณาคุณสมบัติการต้านทานความร้อนเมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์สัดส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ทำการเผาที่อุณหภูมิ 200, 400, 600 และ 800 ที่คอนกรีตอายุ 56 วัน พบว่าคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนสูญเสียน้ำหนักจากการเผาเพิ่มขึ้น กำลังอัดลดลง และรอยแตกกว้างที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนการแทนที่และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ในช่วงอุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียสไม่พบรอยแตกกว้าง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เริ่มมีรอยแตกกว้างขนาดเล็ก (Hairline Cracks) และรอยแตกกว้างเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาจนถึง 800 องศาเซลเซียส (Uysal, 2012)

4.5.1 ผลการทดสอบ

4.5.1.1 องค์ประกอบเคมีของผงหินปูน

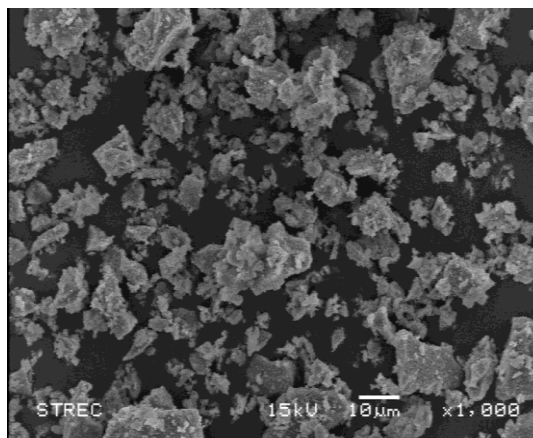
จากการเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าผงหินปูนมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน

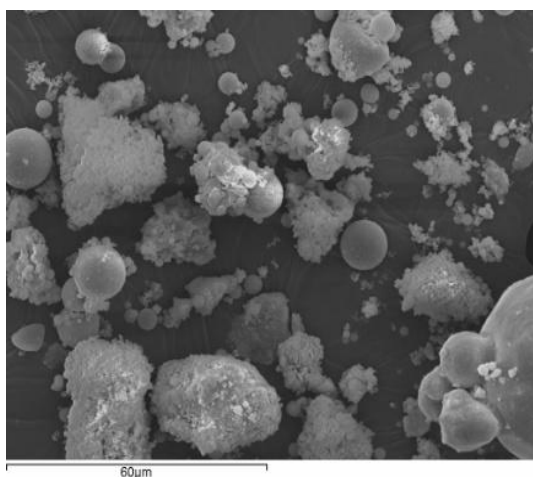
องค์ประกอบเคมี (ร้อยละโดยมวล)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ผงหินปูน
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	16.39	8.97
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	3.85	1.02
ไอรอนไตรออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.48	0.37
แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	0.08	-
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.64	2.38
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	68.48	46.77
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.06	0.02
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.52	0.13
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	4.00	0.33
ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P ₂ O ₅)	0.07	-
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้	1.70	39.54

4.5.1.2 สมบัติทางกายภาพของผงหินปูน

ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงหินปูนแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่ามีอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมมีทั้งผิวเรียบและบางส่วนผิวขรุขระ ในขณะที่อนุภาคของผงหินปูนมีหลายลักษณะทั้งเป็นเหลี่ยมมุมและทรงกลม



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

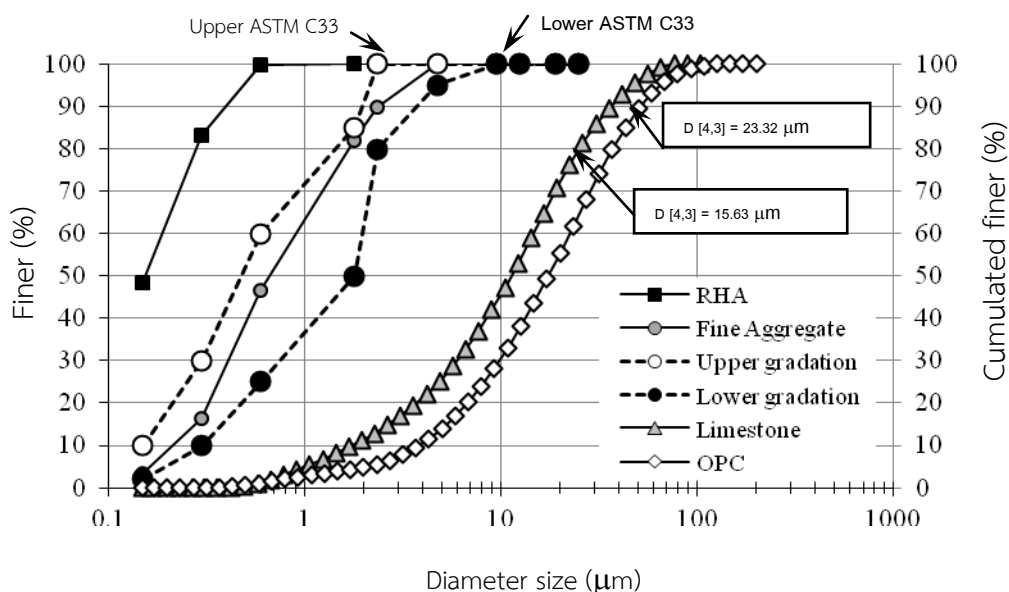


(ข) ผงหินปูน

รูปที่ 4.13 ภาพขยายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน

4.5.1.3 การกระจายขนาดผลของวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.14 พบว่า ร้อยละผ่านสะสมของผงฝุ่นหินมีค่ามากที่สุด รองลงมาได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบ ดังนั้นผงหินปูนจึงสามารถแทรกตัว (Filling) เข้าระหว่างช่องว่างภายในอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบได้



รูปที่ 4.14 การกระจายขนาดคละของปูนซีเมนต์และผงหินปูน

4.5.1.4 ผลของวัสดุผสมร่วมสามชนิดในการเพิ่มสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ใน

สภาวะคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

การศึกษาสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้เมื่อรวมวัสดุผสมร่วมสามชนิดเข้าด้วยกัน (Ternary combinations of cementitious materials (TCM)) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เถ้ากลบ และผงหินปูน การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้โดยกำหนด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.28 โดยน้ำหนัก ปริมาณวัสดุผงโดยรวมกำหนดคงที่เท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุผงร้อยละ 0 และ 20 โดยน้ำหนัก ทำการ ทดสอบสมบัติของคอนกรีตในสภาวะคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วอย่างเป็นระบบ ประกอบ ไปด้วย หน่วยน้ำหนัก การไหลแผ่ ระยะเวลาในการไหลแผ่ที่ 50 เซนติเมตร ความสามารถในการไหล ผ่านและแยกตัวโดยชุดทดสอบ J-ring, L-Box และ V-funnel การทดสอบความร้อนภายในที่เพิ่มขึ้น การสูญเสียความสามารถในการเทได้ ความสมบูรณ์ของคอนกรีตโดยการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิก

และการทดสอบกำลังอัด ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตชนิดไหลตัวได้จากการผสมวัสดุผงสามชนิดเข้าด้วยกันสามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ชนิดควบคุม

สำหรับสัดส่วนของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในการศึกษาครั้งนี้ กำหนดปริมาณวัสดุผงโดยรวม (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) คงที่ปริมาณ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับคอนกรีตควบคุม ส่วนที่เหลือทำการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยผสมรวมวัสดุผงสองชนิด (ปูนซีเมนต์+เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์+ผงหินปูน) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และสามชนิด (ปูนซีเมนต์+เถ้าแกลบ+ผงหินปูน) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแต่ละชนิดวัสดุผง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงโดยรวม 0.28 ในขณะที่อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (S/A) กำหนดคงที่ 0.53 เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต สารเคมีผสมเพิ่มถูกผสมเข้าไปในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุผง แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สัดส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้

สัญลักษณ์ ^[1]	สัดส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)						สารเคมีผสมเพิ่ม (ร้อยละ)
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1	เถ้าแกลบ	ผงหินปูน	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

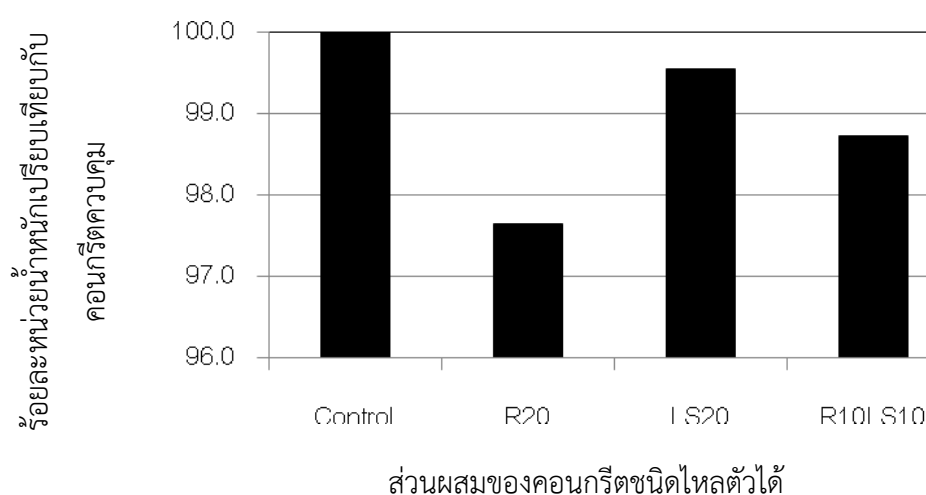
หมายเหตุ [1] สัญลักษณ์ CONTROL คือ คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ควบคุม

Rx, LSy และ RxLSy คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้ากลบ (R) หรือ ผงฝุ่นหิน (LS), x อัตราการแทนที่ของเถ้ากลบโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และ y อัตราการแทนที่ของผงฝุ่นหินโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

4.5.1.5 สมบัติของคอนกรีตสด

(ก) หน่วยน้ำหนัก

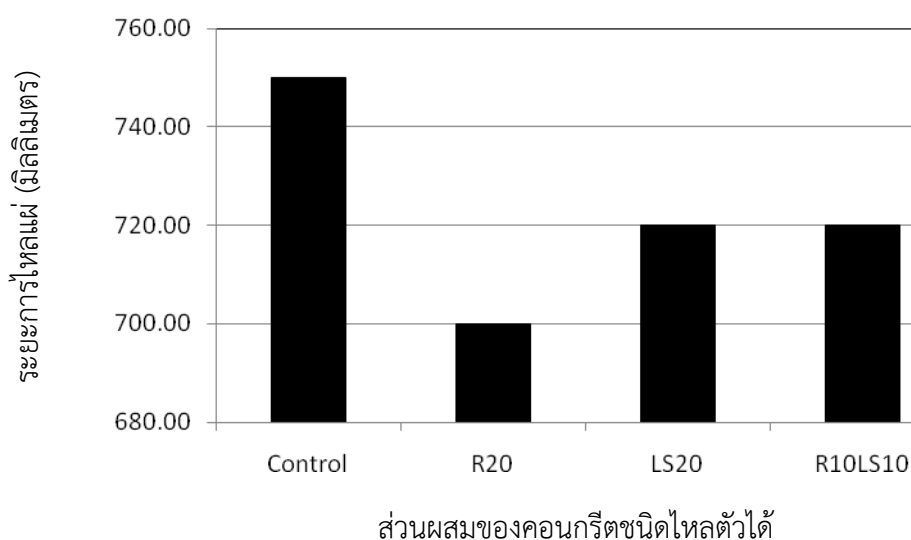
หน่วยน้ำหนักในสภาวะคอนกรีตสดของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ชนิดควบคุม ชนิดผสมรวมวัสดุผสมสองชนิด (ปูนซีเมนต์+เถ้ากลบ และ ปูนซีเมนต์+ผงหินปูน) และสามชนิด (ปูนซีเมนต์+เถ้ากลบ+ ผงหินปูน) เมื่อเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักกับคอนกรีตควบคุม พบว่าผลการแทนที่ด้วยวัสดุผสมทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจากอิทธิพลของความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน โดยคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้ากลบมีความหนาแน่นน้อยที่สุดเนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าผงฝุ่นหิน และปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.15 หน่วยน้ำหนักในสภาวะของคอนกรีตสด

(ข) ระยะเวลาไหลแผ่ (Slump Flow)

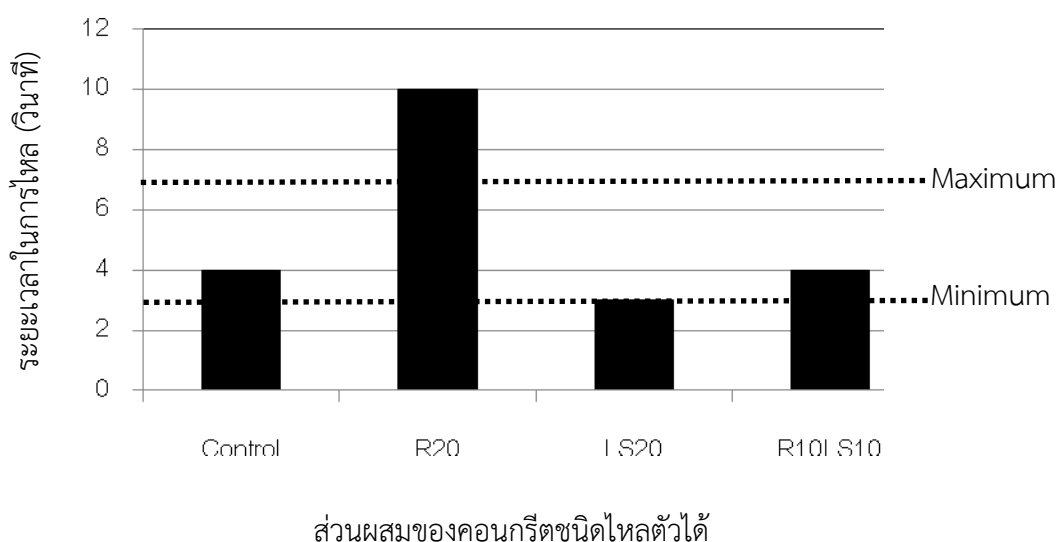
ระยะเวลาไหลแผ่จากการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ทุกอัตราส่วนผสมมีระยะเวลาไหลแผ่อยู่ในช่วง 700-750 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ ENFARC (European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concretes Systems (EFNARC), 2005) มีค่าอยู่ในช่วง 650-800 มิลลิเมตร แสดงถึงคอนกรีตมีความสามารถในการเทได้อยู่ในระดับที่ดี คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ชนิดผสมรวมวัสดุผงจะมีระยะเวลาในการไหลแผ่ที่น้อยกว่าคอนกรีตควบคุมเนื่องจากอิทธิพลของพื้นที่ผิว และลักษณะรูปทรงของเถ้าแกลบและผงฟูหิน ซึ่งส่งผลให้มีความต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น ในขณะที่การทดลองครั้งนี้กำหนดปริมาณน้ำคงที่สำหรับทุกส่วนผสม จากผลดังกล่าวทำให้คอนกรีตที่ผสมรวมวัสดุผงที่มีความต้องการน้ำในส่วนผสมมากกว่า ส่งผลให้ระยะเวลาในการไหลแผ่ลดลงเนื่องจากมีความหนืดมากขึ้น ในขณะเดียวกันผงฟูหินซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าเถ้าแกลบกับมีระยะเวลาไหลแผ่ที่ดี เนื่องจากผลของลักษณะรูปทรงที่เรียบและทรงกลมของผงฟูหินส่งผลให้ระยะเวลาในการไหลแผ่ดีกว่าเถ้าแกลบ



รูปที่ 4.16 ระยะเวลาไหลแผ่

(ค) เวลาในการไหลแผ่ถึงระยะ 50 เซนติเมตร ($T_{50\text{cm}}$ Slump Flow Time)

เวลาในการไหลแผ่ถึงระยะ 50 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 4.17 พบว่า คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ใช้ระยะเวลาในการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร อยู่ในช่วง 3-10 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ ENFARC (European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concretes Systems (EFNARC), 2005) กำหนดอยู่ในช่วง 3-7 วินาที แสดงถึงคอนกรีตมีความสามารถในการเทได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ยกเว้นคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ชนิดผสมเถ้าแกลบซึ่งมีเวลาในการไหลแผ่สูงมากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ในขณะที่คอนกรีตผสมผงฟูหินใช้เวลาในการไหลลดลงแสดงถึงความสามารถในการเทได้ในระดับที่ดี สอดคล้องกับการทดสอบระยะการไหลแผ่ เนื่องจากอิทธิพลของพื้นที่ผิว และลักษณะรูปทรงของเถ้าแกลบ และผงฟูหินที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ความสามารถในการไหลมีความแตกต่างกัน



รูปที่ 4.17 เวลาในการไหลแผ่ถึงระยะ 50 เซนติเมตร

(ง) การไหลผ่านสิ่งกีดขวางโดยการทดสอบ J-Ring

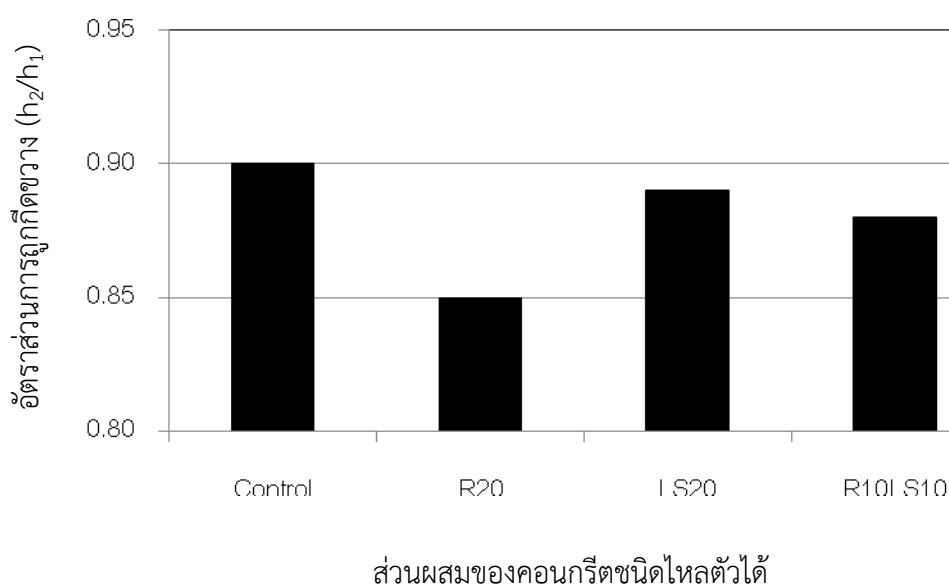
การทดสอบความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางโดย J-Ring ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เป็นการทดสอบร่วมกับการทดสอบการไหลเนื่องจากผลต่างของระยะในการไหลผ่านแบบอิสระกับการไหลผ่านแบบผ่านสิ่งกีดขวางถูกนำมาคำนวณเพื่อประเมินความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (Blocking assessment) ตามมาตรฐาน ASTM C1621 (American Society for Testing and Material, 2011) กำหนดผลต่างของการไหลทั้ง 2 แบบอยู่ในช่วง 0-25 มิลลิเมตร ถือได้ว่าไม่เกิดการกีดขวางของการไหล (No Visible Blocking) ผลต่างในช่วง 26-50 มิลลิเมตร ถือได้ว่าเกิดการกีดขวางของการไหลในระดับเล็กน้อย (Minimal to Noticeable Blocking) ส่วนผลต่างมากกว่า 50 มิลลิเมตร ถือได้ว่าเกิดการกีดขวางของการไหลในระดับสูง (Noticeable to Extreme Blocking) จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ทุกอัตราส่วนผสมมีผลต่างของการไหลทั้งสองแบบเท่ากับ 20 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดถือได้ว่าไม่มีการกีดขวางจากการไหล หรืออีกนัยหนึ่งคือ สามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้โดยไม่เกิดการติดขัด

ตารางที่ 4.8 การประเมินความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางตามมาตรฐาน ASTM C1621 (American Society for Testing and Material, 2011)

สัญลักษณ์	ระยะไหลผ่าน [มิลลิเมตร]	ระยะการไหลผ่าน สิ่งกีดขวาง [มิลลิเมตร]	ผลต่างของการ ไหลทั้ง 2 แบบ [มิลลิเมตร]	การประเมินการถูกกีด ขวางจากการไหล
Control	750	730	20	ไม่กีดขวาง
R20	700	680	20	ไม่กีดขวาง
LS20	720	700	20	ไม่กีดขวาง
R10LS10	720	700	20	ไม่กีดขวาง

(จ) การไหลผ่านสิ่งกีดขวางโดยกล่องรูปทรงแอล (L-box)

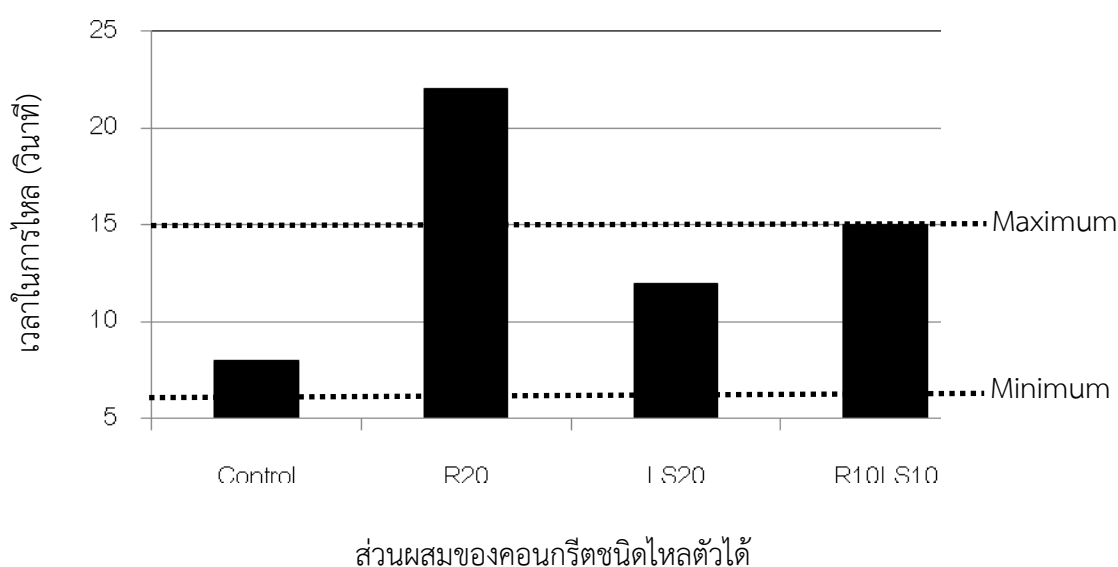
การทดสอบความสามารถในการเติมเต็มและไหลผ่านสิ่งกีดขวางโดยกล่องรูปทรงแอล ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ทุกอัตราส่วนผสมมีอัตราส่วน H_2/H_1 อยู่ในช่วง 0.85-0.90 เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ ENFARC (American Society for Testing and Material, 2011) กำหนดอยู่ในช่วง 0.80-1.00 วินาที แสดงถึงความสามารถของคอนกรีตทุกส่วนผสมในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางโดยกล่องรูปทรงแอล มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สอดคล้องกับการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบ J-Ring ดังนั้นการผสมรวมวัสดุผงในคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการถูกกีดขวาง (Blocking Ratio) ถึงแม้ความหนืดมีค่าลดลง



รูปที่ 4.18 อัตราส่วนการไหลผ่านสิ่งกีดขวางกล่องรูปทรงแอล

(ฉ) การไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี (V-funnel) ที่เวลา 5 นาที

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแยกตัวด้วยกล่องแบนรูปทรงวี ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ทุกอัตราส่วนผสมมีระยะเวลาการไหลผ่านกล่องรูปทรงวีเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาทีจากการเติมคอนกรีตลงในกล่อง อยู่ในช่วง 6-24 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ ENFARC [15] กำหนดอยู่ในช่วง 6-15 วินาที แสดงถึงความสามารถของคอนกรีตในการต้านทานการแยกตัว ยกเว้นคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ชนิดผสมเถ้ากลบซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ระยะเวลาการไหลที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับกับความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น และแสดงถึงความเครียดภายในที่สูงขึ้น คอนกรีตผสมเถ้ากลบซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงและพื้นที่ผิวสูง ส่งผลให้มีความต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้นในขณะทำการออกแบบส่วนผสมกำหนดปริมาณน้ำคงที่ ทำให้คอนกรีตมีความหนืดมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่น ส่วนคอนกรีตผสมผงฝุ่นหินส่งผลให้มีความหนืดเพิ่มมากขึ้น แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กสามารถเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้นส่งผลให้แรงต้านทานในการไหลลดลง

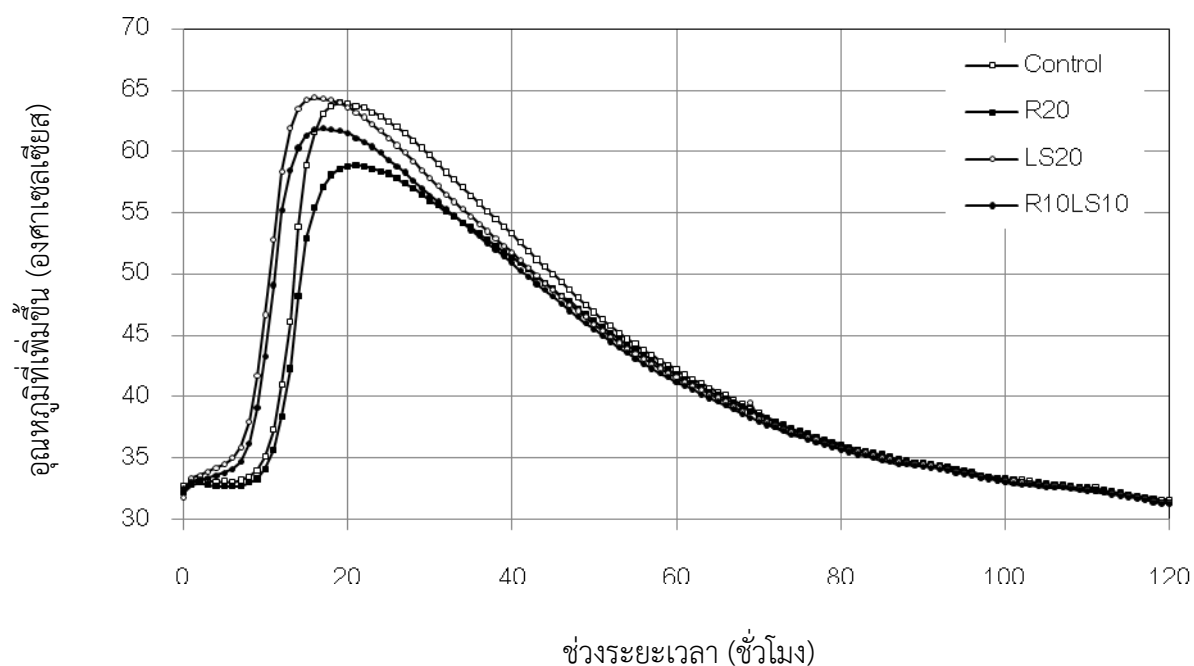


รูปที่ 4.19 เวลาในการไหลผ่านกล่องรูปทรงวีที่เวลา 5 นาที

(ข) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.20 แสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในคอนกรีตชนิดไหลตัวได้พบว่าคอนกรีตผสมผงฝุ่นหินมีลักษณะเฉพาะของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมากกว่าคอนกรีตควบคุม ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้ากลบ และคอนกรีตผสมรวมเถ้ากลบกับผงฝุ่นหินมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม สำหรับอุณหภูมิ/ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นสูงสุด และอัตราความร้อนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่าอุณหภูมิภายในของคอนกรีตผสมผงฝุ่นหินเพิ่มขึ้นถึง 64.4°C และใช้ระยะเวลาที่อุณหภูมิถึงจุดสูงสุด 16 ชั่วโมงจากการเริ่มผสมคอนกรีตซึ่งมีอุณหภูมิสูงและทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม ในขณะที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากผงฝุ่นหินเป็นวัสดุเฉื่อยจึงไม่สามารถเปลี่ยนรูปแบบองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตได้ แต่ด้วยขนาดเฉลี่ยอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ สามารถเข้าผสมและแทรกกระจายระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ได้ดี ช่วยลดปริมาณน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ลงทำให้มีสัดส่วนของน้ำที่เหมาะสมในส่วนผสมของคอนกรีต ช่วยทำให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำในส่วนผสมได้อย่างทั่วถึงและรวดเร็วยิ่งขึ้น

ในขณะที่อุณหภูมิภายในของคอนกรีตผสมผงเถ้ากลบมีค่าเพิ่มขึ้น 58.9°C และใช้ระยะเวลาที่อุณหภูมิถึงจุดสูงสุด 21 ชั่วโมง จากการเริ่มผสมคอนกรีตซึ่งมีอุณหภูมิต่ำและทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ช้ากว่า ในขณะที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นลดต่ำลง



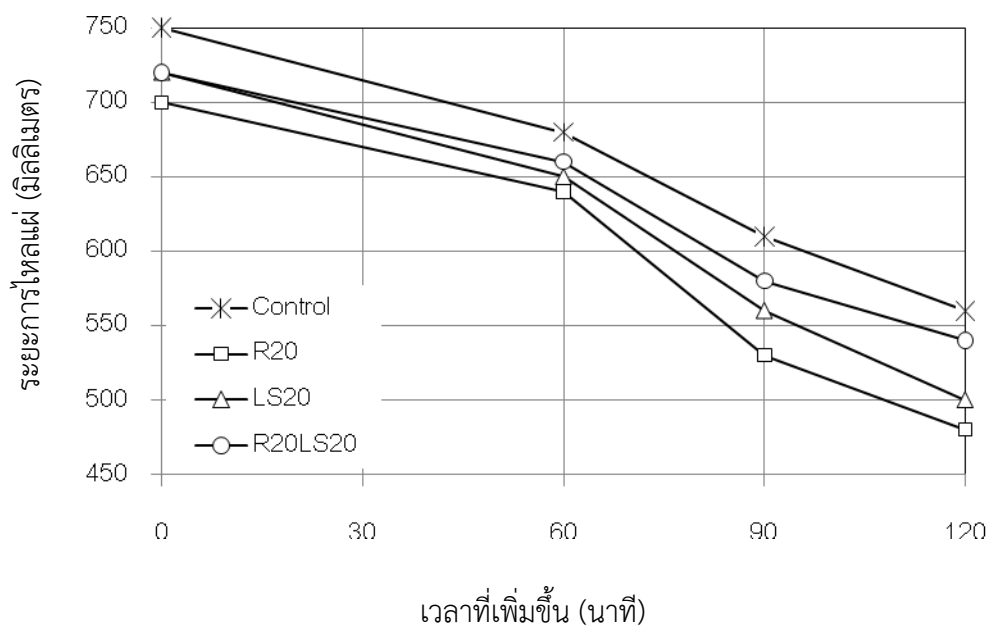
รูปที่ 4.20 แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในคอนกรีต

ตารางที่ 4.9 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

(ข) การสูญเสียความสามารถในเทได้ (Slump loss)

จากรูปที่ 4.21 พบว่าอัตราการลดลงของการไหลแผ่จากระยะเริ่มต้นผสมจนถึงเวลา 120 นาทีหลังจากการผสม คอนกรีตควบคุม คอนกรีตผสมเถ้ากลบ คอนกรีตผสมผงฟูหินควบคุม และคอนกรีตผสมรวมเถ้ากลบและผงฟูหินลดลง 190, 220, 220 และ 180 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.21 การสูญเสียความสามารถในการเทได้

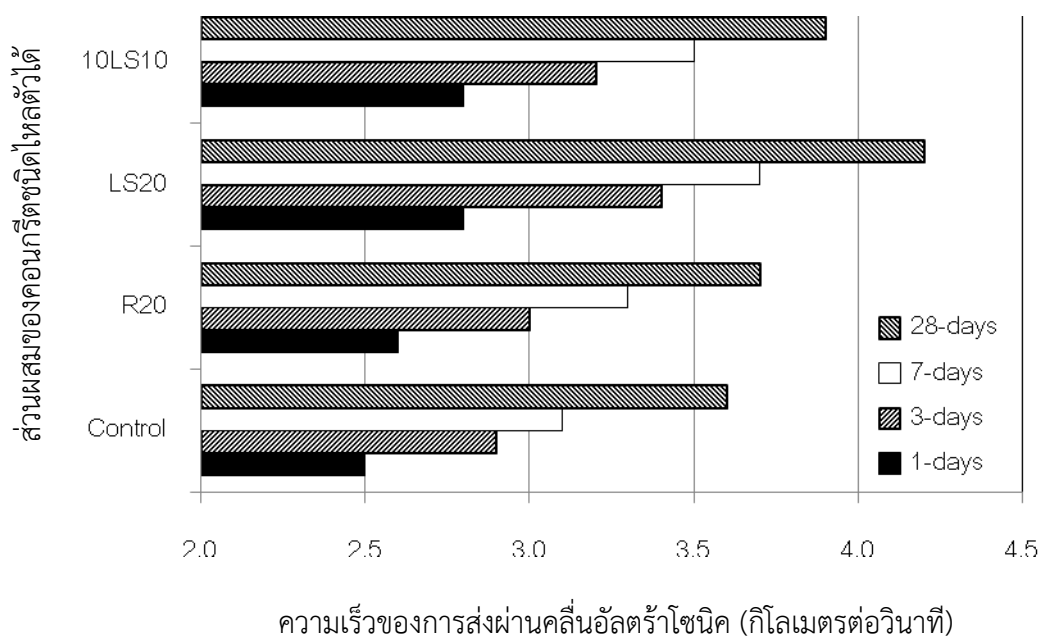
เนื่องจากความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ลดลงเมื่อระยะเวลาและอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากความต้องการปริมาณน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกันตามชนิดของวัสดุผงโดยเฉพาะเถ้าแกลบ ส่งผลความสามารถในการไหลแผ่ลดลง และอีกประเด็นคือปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งเกิดขึ้นได้รวดเร็วในสภาวะที่อุณหภูมิสูง และผลของความเหนียวชั้น (Cohesiveness) ที่เพิ่มขึ้นจากการผสมผงฝุ่นหิน ทำให้ความสามารถในการเทได้ลดลงตามเวลาหลังจากการผสมคอนกรีต

4.5.1.6 สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว

(ก) ความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิก

การทดสอบความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกของตัวอย่างคอนกรีตถือเป็น การทดสอบแบบไม่ทำลายเป็นการประเมินคุณภาพของคอนกรีตเนื่องจากการส่งผ่านคลื่นในคอนกรีต

ที่มีความหนาแน่นสูงระยะเวลาในการเดินทางของคลื่นจะรวดเร็ว แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการส่งผ่านคลื่นพบว่ามีความเพิ่มมากขึ้นตามช่วงอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ค่าเฉลี่ยความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกของตัวอย่างคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน มีความเร็วอยู่ในช่วง 2.5 - 4.2 กิโลเมตรต่อวินาที เนื่องมาจากผลของระดับความหนาแน่นที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของคอนกรีต ความเร็วที่สูงขึ้นแสดงถึงคุณภาพของคอนกรีตที่ดีกว่าความเร็วที่ลดลง ความเร็วของคอนกรีตผสมผงฝุ่นหินมีค่าที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตชนิดอื่นๆ เป็นผลมาจากขนาดเฉลี่ยอนุภาคที่เล็กลงของผงฝุ่นหินได้เข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคส่งผลให้ช่องว่างและความพรุนของคอนกรีตลดลง ส่งผลให้ความเร็วในการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกเพิ่มมากขึ้น

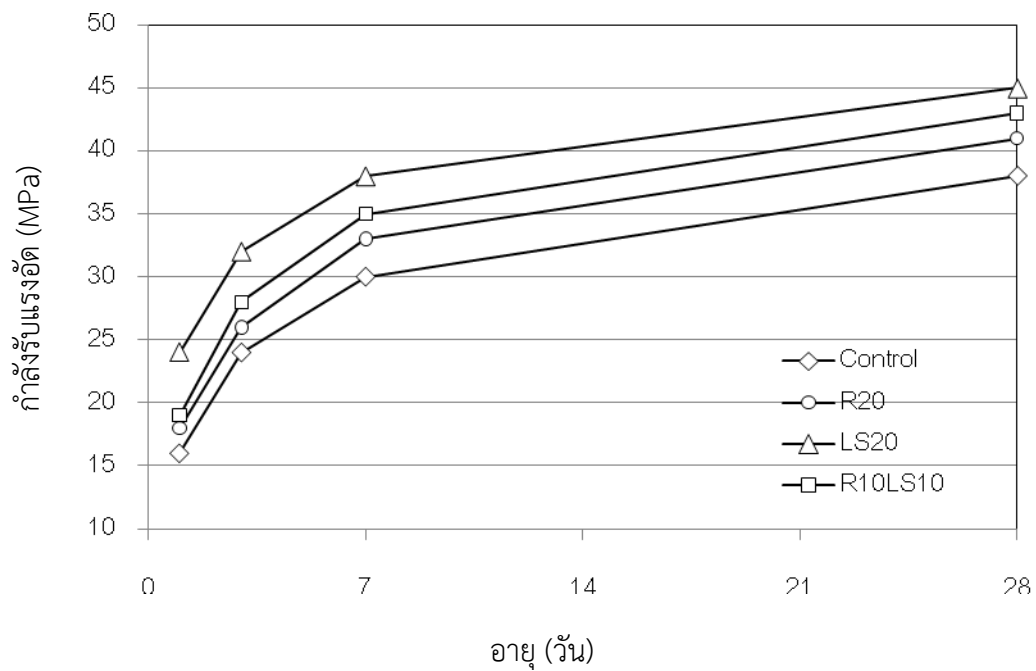


รูปที่ 4.22 การวัดความเร็วของการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิก

(ข) กำลังอัด

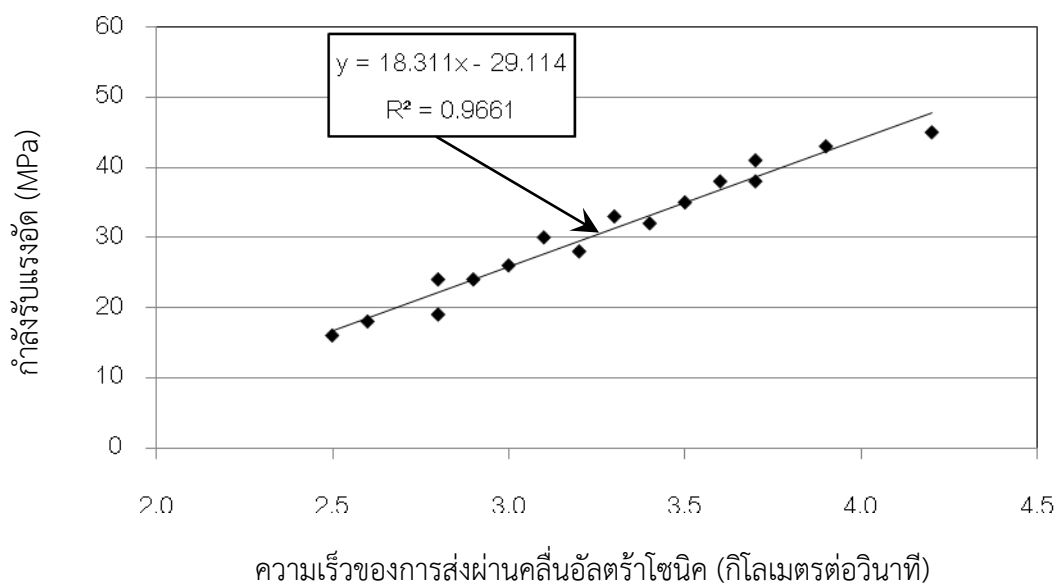
ค่ากำลังอัดของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามช่วงระยะเวลาการทดสอบที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าค่ากำลังอัดที่ช่วงอายุ 1 วันอยู่ในช่วงระหว่าง 16 ถึง 24 เมกะปาสคาล ค่ากำลังอัดที่ช่วงอายุ 3 วันอยู่ในช่วงระหว่าง 24 ถึง 32 เมกะปาสคาล ค่ากำลังอัดที่ช่วงอายุ 7 วันอยู่ในช่วงระหว่าง 30 ถึง 38 เมกะปาสคาล และค่ากำลังอัดที่ช่วงอายุ 28 วันอยู่ในช่วงระหว่าง 38 ถึง 45 เมกะปาสคาล ทั้งนี้คอนกรีตผสมผงฝุ่นหินมีค่ากำลังอัดสูงสุด ในขณะที่คอนกรีตควบคุมมีค่ากำลังอัดน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทุกส่วนผสม

ค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมผงฝุ่นหินที่มีค่าสูงสุดเนื่องจากขนาดเฉลี่ยอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ของผงฝุ่นหินสามารถเข้าไปเติมในช่องว่างขนาดเล็ก (Micro-voids) ซึ่งเป็นผลของการเติมเต็ม (Filler Effect) ทำให้มีโครงสร้างมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (Skarendahl and Petersson, 2000) รวมถึงคอนกรีตผสมผงฝุ่นหินส่งผลให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำในส่วนผสมเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้คอนกรีตแข็งตัวและมีกำลังอัดในช่วงเริ่มต้นเร็วขึ้น ขณะที่ค่ากำลังอัดที่ 28 วันยังคงสูงขึ้นเช่นกันด้วย ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าแกลบพบว่ามีค่ากำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตผสมผงฝุ่นหินแต่มากกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากขนาดเฉลี่ยอนุภาคของเถ้าแกลบมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ ทำให้สามารถเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างระหว่างอนุภาคและจากปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับซิลิกา (SiO_2) ในเถ้าแกลบได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างแน่นและรับกำลังอัดได้สูงขึ้น (Sonebi and Bartos, 2002)



รูปที่ 4.23 การพัฒนากำลังอัดในตามช่วงอายุ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 4.24 พบว่า ค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทดสอบความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันสอดคล้องกับการศึกษาของ Uysal และ Yilmaz จากการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกในทุกส่วนผสมอยู่ในระดับที่ดี ($R^2 = 0.996$)



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังอัดและความเร็วของการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิก

4.5.1.7 สรุปผลขั้นที่ 2

- หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้มีค่าลดลง เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตด้วยวัสดุผง
- ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตชนิดไหลตัวขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุผงที่ใช้ พบว่าคอนกรีตผสมผงฝุ่นหินมีความสามารถในการเทได้ในระดับที่ดีกว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ และใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมอันเนื่องมาจากคุณลักษณะของวัสดุผงที่มีพื้นผิวเรียบและส่วนใหญ่ซึ่งเป็นทรงกลม ในขณะที่การผสมรวมผงฝุ่นหินกับเถ้าแกลบในส่วนผสมของคอนกรีตพบว่าความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเพียงอย่างเดียว

- การทดสอบสมบัติของคอนกรีตในสภาวะสดของคอนกรีตชนิดไหลตัวพบว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานการทดสอบ ยกเว้นเวลาในการไหลถึงระยะ 50 เซนติเมตร และระยะเวลาในการไหลผ่านกล่องรูปทรงวีที่ระยะ 5 นาฬิกา สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าแกลบไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบ ในขณะที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นหลังจากการผสม
- คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมผงฝุ่นหินมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเร็วที่สุด ในขณะที่คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าที่สุดเนื่องจากผลของคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุผง
- คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบมีค่ากำลังอัดทุกช่วงอายุต่ำกว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมผงฝุ่นหิน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อผสมรวมวัสดุผงทั้งสามเข้าด้วยกันพบว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้มีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบ
- จากการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ในการพัฒนาคอนกรีตชนิดไหลตัวได้แบบราคาถูก โดยการนำวัสดุผง (เถ้าแกลบ และผงฝุ่นหิน) มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ทั้งนี้ต้องกำหนดอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมกับองค์ประกอบหลัก ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์มวลรวม และสารเคมีผสมเพิ่ม