

พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด

บุรฉัตร ฉัตรวีระ¹ และ วัชรกร วงศ์คำจันทร์²

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูง (เถ้าแกลบละเอียด) ในพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา คุณสมบัติทางกลที่ทำการพิจารณา ได้แก่ ค่าการยุบตัว หน่วยน้ำหนักในสภาพสด กำลังรับแรงอัด โมดูลัสของความยืดหยุ่น และอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชัน อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ อยู่ระหว่างร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุผง อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7

ผลการทดสอบพบว่าเถ้าแกลบละเอียดมีการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกสูง และสามารถใช้เป็นวัสดุซีเมนต์ในคอนกรีตได้ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่สูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบขนาดอนุภาค 44 ไมโครเมตร สำหรับส่วนผสมเดียวกันพบว่า หน่วยน้ำหนักในสภาพสดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันขึ้นไปของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ w/b เท่ากับ 0.5 และ 0.6 สำหรับอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเท่ากับร้อยละ 20 โมดูลัสของความยืดหยุ่นสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดพบว่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาเล็กน้อย อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดพบว่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาในทุกส่วนผสม

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

² นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

Mechanical Behavior of Fine RHA Concrete

Burachat Chatveera¹ and Watcharagon Wongkamjan²

Thammasat University Rangsit Campus, Klong Luang, Pathum Thani 12121

Abstract

This research was aimed to investigate the effect of high fineness rice husk ash (Fine RHA) on mechanical behavior of fine RHA concrete as compared to ordinary Portland cement concrete (OPC). The properties to be investigated included slump, unit weight, compressive strength, modulus of elasticity and temperature of hydration. The fine RHA replacements were varied from 0%, 20% and 40% by weight of binder. The ratios of the volume of paste to volume of minimum voids content of total aggregates (γ) were 1.2, 1.4 and 1.6. The water to binder ratios were 0.5, 0.6 and 0.7.

The results indicated that fine RHA has a highly pozzolanic reactivity and can be used as a supplementary cementitious material in concrete. Slump of fine RHA concrete was lower than OPC concrete, but higher than that of RHA044 (RHA with average diameter 44 μm) concrete. For the same mixture, the unit weight of fine RHA concrete decreased when RHA replacements were increased. It was also found that the compressive strength after 28 days of fine RHA concrete was higher than OPC at w/b equal to 0.5 and 0.6 especially for fine RHA replacement equal to 20%. The modulus of elasticity of fine RHA concrete was slightly lower than OPC concrete. The temperature of hydration of fine RHA concrete was lower than that of OPC concrete in every mixtures.

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering.

² Graduate Student, Department of Civil Engineering.

1. บทนำ

คอนกรีตผสมเถ้าแกลบได้มีการวิจัยเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีตตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 แต่ในระยะแรกเป็นการนำมาใช้โดยไม่ได้คำนึงถึงอุณหภูมิในการเผาไหม้ ทำให้เถ้าที่ได้มีลักษณะเป็นผลึก (Crystalline) ซึ่งมีความเหนียวต่อปฏิกิริยา จนกระทั่งได้แสดงให้เห็นผลของตัวแปรจากกระบวนการทางความร้อน (Pyroprocessing Parameters) ที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reactivity) ของเถ้าแกลบ หลังจากนั้นการนำเถ้าแกลบมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานิกจึงแพร่หลายมากยิ่งขึ้น [1] แต่ยังมีปัญหาเนื่องจากความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา การวิจัยนี้จึงพิจารณาวิธีการในการเพิ่มความสามารถในการเทได้โดยการเพิ่มความละเอียดให้กับเถ้าแกลบ และศึกษาถึงผลกระทบเนื่องจากความละเอียดของเถ้าแกลบที่มีต่อพฤติกรรมทางกลของคอนกรีต

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าแกลบละเอียด และคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดได้แก่ หน่วยน้ำหนักในสภาพสด ค่าการยุบตัว กำลังรับแรงอัด และโมดูลัสของความยืดหยุ่น และอุณหภูมิของคอนกรีต โดยทำการทดสอบและเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา

3. การทดสอบ

1. วัสดุ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการทดสอบ

เถ้าแกลบ เป็นเถ้าแกลบสีเทาขาว ที่เหลือจากการเผาอิฐ ของโรงอิฐก้านดิเรกฐปะเตมีย์ จ.อยุธยา โดยเถ้าแกลบที่ใช้ในการทดสอบได้จากด้านข้างของเตาเผาโดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 700 องศาเซลเซียส การบดเถ้าแกลบบดโดยใช้เครื่องบดที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) เครื่องบดมีรูปทรงเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 61 ซม. กว้าง 88 ซม. ใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม., 12 มม. และ 15 มม. [2] จำนวน 45, 45 และ 35 เส้น ตามลำดับเป็นตัวกลางบด เครื่องหมุนด้วยความเร็วรอบ 52 รอบต่อนาที โดยใช้น้ำหนักของเถ้าแกลบ 20 กิโลกรัมสำหรับแต่ละครั้งในการบด ใช้เวลาในการบด 75 นาที และ 180 นาที โดยที่เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์จะนำมาใช้ในการทดสอบ

ทราย ทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายแม่น้ำที่มีขนาดละเอียดมาตรฐาน ASTM C33 ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.54 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.93 โดยน้ำหนัก

หิน เป็นหินปูนสำหรับงานก่อสร้างตามท้องตลาด มีขนาดโตสุด 25 มม. ขนาดละเอียดมาตรฐาน ASTM C33 ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.71 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.86 โดยน้ำหนัก

หน้า ใช้น้ำประปาในอาคารปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

2. วิธีการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติของเถ้าแกลบ

ประกอบด้วย การกระจายของขนาดอนุภาค คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี และภาพขยาย

การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด

ประกอบด้วย ค่าการยุบตัวทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143 หน่วยน้ำหนักในสภาพสด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C138 กำลังรับแรงอัดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 โมดูลัสของความยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469 และอุณหภูมิของคอนกรีต

โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด และโมดูลัสของความยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ใช้อย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ส่วนอุณหภูมิของคอนกรีตทดสอบโดยใช้แบบหล่อที่หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนหนา 5 เซนติเมตร ขนาดแบบ 30x43x25 เซนติเมตร บรรจุในกล่องไม้อัด หนา 8 มม. แล้วทำการบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Digital Data Logger)

3. ส่วนผสมของคอนกรีตทดสอบ

มวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมีอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (s/a) เท่ากับ 0.5 ที่ร้อยละปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมต่ำสุดเท่ากับ 24.56 โดยมีอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water to Binder Ratio, w/b) เท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 โดยมีส่วนผสมโดยน้ำหนักในปริมาตรคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในตารางที่ 1

หมายเหตุ : อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดของมวลรวมที่อัดแน่น (The Ratio of the Volume of Paste to Volume of Minimum Voids of the Compacted Aggregates, γ) เป็นตัวแปรเพื่อการพิจารณาปริมาตรเพสต์ที่มีอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวม โดยที่

$$\gamma = \frac{V_p}{V_{\text{void}}}$$

เมื่อ V_p = ปริมาตรเพสต์ในคอนกรีต (ลิตร/ลบ.ม.)

และ V_{void} = ปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (ลิตร/ลบ.ม.) [3]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร

Mixture	γ	w/b	Cement (kg)	RHA (kg)	Water (kg)	Sand (kg)	Rock (kg)
OPC	1.2	0.5	347	0	173	896	956
OPC	1.2	0.6	309	0	185	896	956
OPC	1.2	0.7	279	0	195	896	956
OPC	1.4	0.5	406	0	203	833	889
OPC	1.4	0.6	362	0	217	833	889
OPC	1.4	0.7	327	0	229	833	889
OPC	1.6	0.5	466	0	233	771	823
OPC	1.6	0.6	416	0	249	771	823
OPC	1.6	0.7	375	0	262	771	823
FRC(20)	1.2	0.5	268	67	168	896	956
FRC(20)	1.2	0.6	240	60	180	896	956
FRC(20)	1.2	0.7	217	54	190	896	956
FRC(20)	1.4	0.5	314	79	196	833	889
FRC(20)	1.4	0.6	281	70	211	833	889
FRC(20)	1.4	0.7	254	64	223	833	889
FRC(20)	1.6	0.5	360	90	225	771	823
FRC(20)	1.6	0.6	323	81	242	771	823
FRC(20)	1.6	0.7	292	73	255	771	823
FRC(40)	1.2	0.5	195	130	162	896	956
FRC(40)	1.2	0.6	175	116	175	896	956
FRC(40)	1.2	0.7	159	106	185	896	956
FRC(40)	1.4	0.5	228	152	190	833	889
FRC(40)	1.4	0.6	205	137	205	833	889
FRC(40)	1.4	0.7	186	124	217	833	889
FRC(40)	1.6	0.5	262	174	218	771	823
FRC(40)	1.6	0.6	235	157	235	771	823
FRC(40)	1.6	0.7	213	142	249	771	823

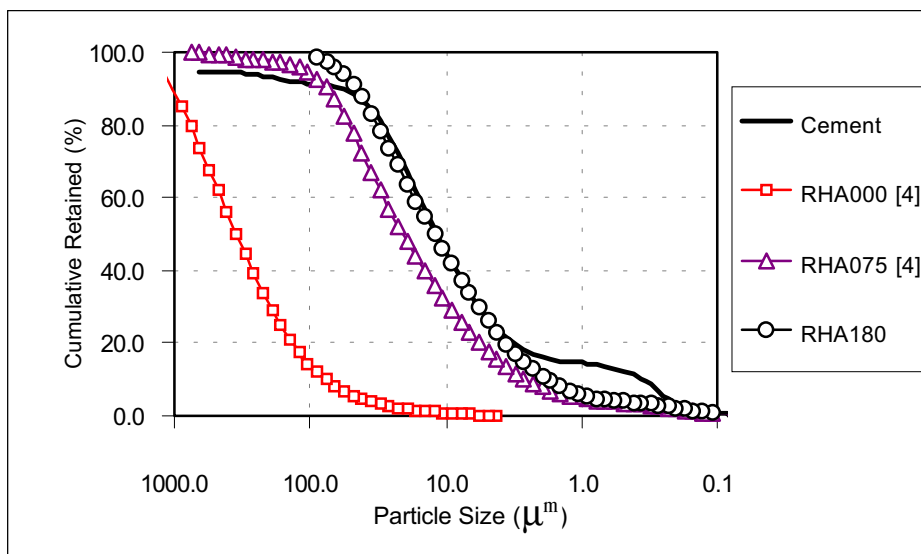
หมายเหตุ : FRC(x) = คอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดที่อัตราทดแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบละ ร้อยละ x

4. ผลการทดสอบและการวิจารณ์

1. คุณสมบัติของเถ้าแกลบ

การกระจายของขนาดอนุภาค

การกระจายของขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบและปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าปูนซีเมนต์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 31 ไมโครเมตร ส่วนเถ้าแกลบไม่บด บด 75 นาที และเถ้าแกลบบด 180 นาที มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 539, 44 และ 23 ไมโครเมตร ตามลำดับ นั่นคือเถ้าแกลบที่ใช้ในการทดสอบมีความละเอียดเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบด และเถ้าแกลบบด 180 นาที มีความละเอียดมากที่สุด และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่ำกว่าปูนซีเมนต์



หมายเหตุ : RHA000 = เถ้าแกลบไม่บด, RHA075 = เถ้าแกลบบดเป็นเวลา 75 นาที และ RHA180 = เถ้าแกลบบดเป็นเวลา 180 นาที

รูปที่ 1 การกระจายของขนาดอนุภาคเถ้าแกลบและปูนซีเมนต์เมื่อพิจารณาร้อยละค้ำงสะสม

สำหรับการวิจัยนี้พิจารณาถึงพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดที่มีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเถ้าแกลบบด 180 นาที มีความละเอียดในระดับที่ต้องการ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในด้านดัชนีกำลังและความต้องการน้ำ เถ้าแกลบบดเป็นเวลา 180 นาที มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด จึงเลือกใช้เถ้าแกลบบดเป็นเวลา 180 นาที เป็นเถ้าแกลบที่ใช้ในการวิจัย และให้คำจำกัดความว่า เถ้าแกลบละเอียด หรือ Fine RHA (Fine Rice Husk Ash) ส่วนเถ้าแกลบไม่บด และเถ้าแกลบบด 75 นาทีที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 539 และ 44 ไมโครเมตร ให้คำจำกัดความว่า เถ้าแกลบขนาดอนุภาค 539 ไมโครเมตร หรือ RHA539 และเถ้าแกลบขนาดอนุภาค 44 ไมโครเมตร หรือ RHA044 ตามลำดับ

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเถ้าแกลบละเอียดมีพื้นที่ผิวและดัชนีกำลังสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบขนาดอนุภาค 539 ไมโครเมตร และเถ้าแกลบขนาดอนุภาค 44 ไมโครเมตร ในขณะที่ความต้องการน้ำของเถ้าแกลบละเอียดมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบชนิดอื่นๆ ส่วนองค์ประกอบทางเคมีเถ้าแกลบทุกชนิดมีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

Physical Properties	Cement Type I	RHA539	RHA044 [4]	Fine RHA
Moisture Content (%)	0.19	0.95	1.74	0.80
Surface Area (cm ² /g)	3,248	-	6,635	10,850
Retain When Wet Sieved on 45 μm (%)	5.75	-	19.00	4.16
Specific Gravity	3.11	2.00	2.13	2.16
Strength Activity Index				
7 days (%)	100	32	79	89
28 days (%)	100	39	86	96
Water Requirement (%)	100	151	112	105
Loss on Ignition (%)	0.96	2.52	4.81	3.03
Chemical Composition (%)	Cement Type I	RHA539	RHA044 [4]	Fine RHA
Silicon Dioxide (SiO ₂)	20.84	94.56	96.84	95.35
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	5.22	1.40	1.63	0.93
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃)	3.2	0.31	0.53	0.83
Calcium Oxide (CaO)	66.28	0.51	0.57	0.50
Magnesium Oxide (MgO)	1.24	0.49	0.49	0.45
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.22	1.58	2.21	1.50
Sulfur Trioxide (SO ₃)	2.41	0.40	0.14	0.28

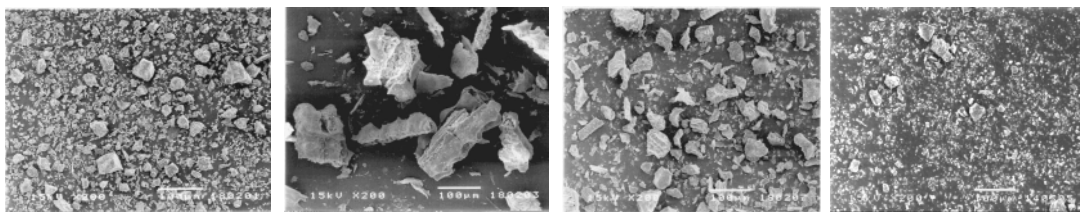
หมายเหตุ : - หมายถึง ตัวอย่างหยาบมากจนไม่สามารถหาค่าได้

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน ASTM C618 Class N ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับวัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติ โดยมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ พบว่าเถ้าแกลบขนาดอนุภาค 539 ไมโครเมตร มีคุณสมบัติไม่ได้ตามมาตรฐานหลายประการคือ

ความละเอียดไม่เพียงพอ (ร้อยละข้างบนตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตรเกินร้อยละ 34) ดัชนีกำลังต่ำกว่ามาตรฐาน (กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ไม่ถึงร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม) และมีความต้องการน้ำสูงกว่าข้อกำหนด (เกินร้อยละ 115) ในขณะที่ถ้าเกลบละเอียดและถ้าเกลบขนาดอนุภาค 44 ไมโครเมตร สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ตามมาตรฐาน ASTM C618 Class N ในทุกคุณสมบัติ โดยเฉพาะถ้าเกลบละเอียดที่มีดัชนีกำลังสูงที่อายุ 28 วันถึงร้อยละ 96 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม

ภาพขยายทางกายภาพ

จากภาพขยายทางกายภาพของปูนซีเมนต์และถ้าเกลบ โดยใช้เครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) แสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 พบว่าถ้าเกลบมีลักษณะผิวขรุขระเป็นเหลี่ยมมุม และอนุภาคถ้าเกลบมีรูพรองภายใน ในขณะที่อนุภาคปูนซีเมนต์มีความขรุขระน้อยและไม่มีรูพรองด้วยเหตุนี้ทำให้ถ้าเกลบสามารถกักเก็บน้ำ โดยการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) เข้าไปในอนุภาคและการดูดซับน้ำ (Water Adsorption) เนื่องจากแรงดึงที่ผิวของอนุภาค [5] เข้าไปในอนุภาคมากกว่าปูนซีเมนต์ทำให้ความต้องการน้ำของถ้าเกลบสูงกว่าเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างถ้าเกลบขนาดอนุภาค 539 ไมโครเมตร (ไม่บด) ถ้าเกลบขนาดอนุภาค 44 ไมโครเมตร (บด 75 นาที) และถ้าเกลบละเอียด (บด 180 นาที) พบว่าถ้าเกลบที่บดนานกว่า มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าทำให้การทำปฏิกิริยาดีขึ้น ดัชนีกำลังจึงสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การบดถ้าเกลบด้วยระยะเวลานานขึ้นทำให้รูพรองในอนุภาคลดลง จากภาพขยายขนาด 7,500 เท่า พบว่ารูพรองภายในถ้าเกลบละเอียดถูกทำลายเกือบทั้งหมด ความต้องการน้ำของถ้าเกลบจึงลดลง (ความต้องการน้ำลดลงจากร้อยละ 151 เหลือร้อยละ 112 และร้อยละ 105 เมื่อเพิ่มเวลาในการบดจากไม่บด เป็นบด 75 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ)



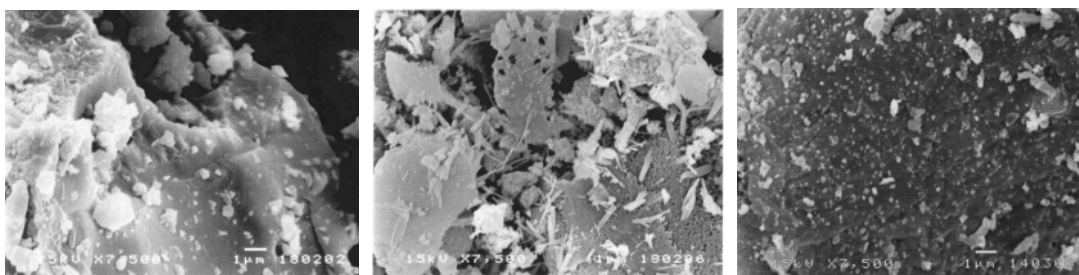
ก. Cement Type I [3]

ข. RHA539 [4]

ค. RHA044 [4]

ง. Fine RHA

รูปที่ 2 ภาพขยายขนาด 200 เท่า



ก. Cement Type I [4]

ข. RHA044 [4]

ค. Fine RHA

รูปที่ 3 ภาพขยายขนาด 7,500 เท่า

2. การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

ค่าการยุบตัว

พบว่าทุกอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) และทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยที่อัตราส่วนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 20 มีค่าการยุบตัวสูงกว่าที่อัตราส่วนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 40 ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบมีรูปร่างภายในอนุภาคทำให้เถ้าแกลบดูดซับน้ำไว้ที่ผิวเนื่องจากแรงดึงดูด นอกจากนี้บางส่วนยังถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคเถ้าแกลบ ทำให้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตลดลงส่งผลต่อปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) ที่มีอยู่ในเพสต์ ซึ่งปริมาณน้ำอิสระมีผลต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตโดยตรง เนื่องจากช่วยลดแรงเสียดทาน ลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของคอนกรีตสด และหล่อลื่นให้คอนกรีตยุบตัวได้ดีขึ้น เมื่อร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบสูงขึ้น ปริมาณน้ำอิสระจึงลดลงตามไปด้วย ส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบน้อยลง นอกจากนี้พื้นที่ผิวของเถ้าแกลบมีลักษณะเป็นเหลี่ยมและขรุขระ ในขณะที่ปูนซีเมนต์มีลักษณะเรียบมน ส่งผลให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ทำให้ค่าการยุบตัวต่ำ อย่างไรก็ตาม ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม ตั้งแต่ 1.4 ขึ้นไป ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดยังอยู่ในช่วงที่สามารถทำงานได้ (อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมเท่ากับ 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ค่าการยุบตัวได้ของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดที่อัตราส่วนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 7.0 เซนติเมตร)

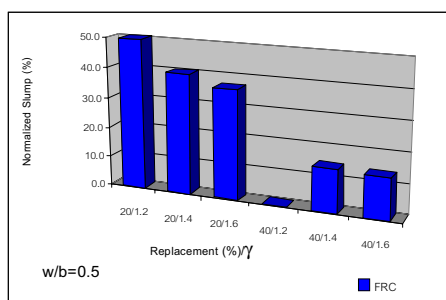
เมื่ออัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) เพิ่มมากขึ้น ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบและคอนกรีตธรรมดาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากมีปริมาตรเพสต์เพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตมีแรงเสียดทานระหว่างส่วนผสมในคอนกรีตน้อยลง และช่วยหล่อลื่นให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ ทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวสูงขึ้น ส่วนกรณีของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้นค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบและคอนกรีตธรรมดามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำในส่วนผสม และปริมาณน้ำอิสระ ผลการทดสอบหาค่าการยุบตัวแสดงในตารางที่ 3

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการศึกษาของ อนุวรรต โคว์วารินทร์ [6] พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดมีค่าการยุบตัวเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (Normalized Slump) สูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบขนาดอนุภาค 44 ไมโครเมตร ในทุกสัดส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 4

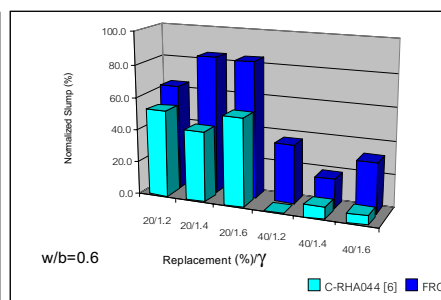
ตารางที่ 3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกบลละเอียดและคอนกรีตธรรมดา

γ	w/b	Slump (cm)		
		OPC	FRC(20)	FRC(40)
1.2	0.5	3.0	1.5	0.0
1.2	0.6	7.0	4.5	2.5
1.2	0.7	9.0	6.5	5.0
1.4	0.5	17.5	7.0	2.5
1.4	0.6	22.0	18.5	4.0
1.4	0.7	23.0	20.5	8.5
1.6	0.5	22.0	8.0	3.0
1.6	0.6	24.0	20.0	7.5
1.6	0.7	25.0	22.0	10.0

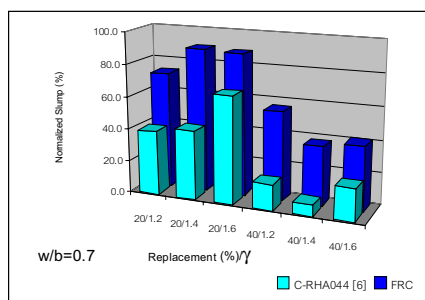
หมายเหตุ : OPC = คอนกรีตธรรมดา
 FRC(x) = คอนกรีตผสมเถ้าแกบลละเอียด ที่อัตราทดแทนที่
 ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกบลละเอียดร้อยละ x



ก



ข



ค

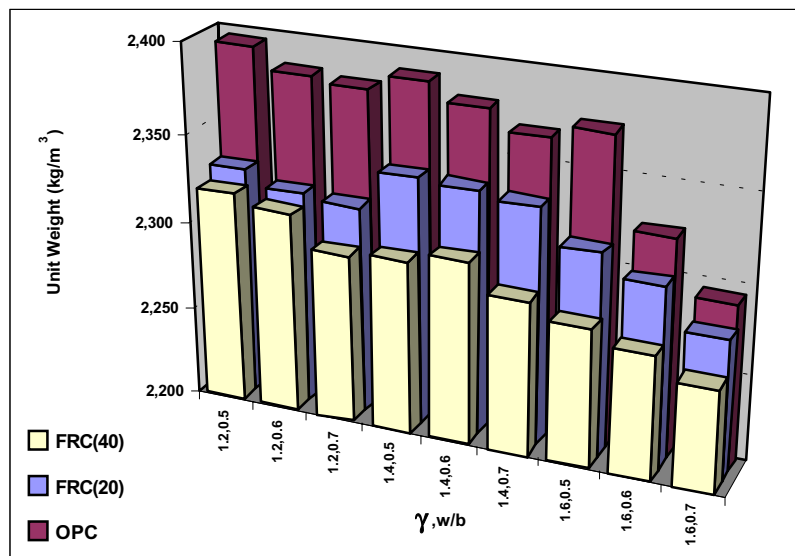
หมายเหตุ : FRC = คอนกรีตผสมเถ้าแกบลละเอียด
 C-RHA044 = คอนกรีตผสมเถ้าแกบลขนาดอนุภาค 44 ไมโครเมตร

รูปที่ 4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกบลเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด

หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดและคอนกรีตธรรมดาได้รับอิทธิพลจากที่สัดส่วนผสมที่แตกต่างกัน คือ ผลกระทบจากการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบละเอียด ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยที่คอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 มีความหนาแน่นสูงกว่าที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 40 ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบละเอียดมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบละเอียดเพิ่มมากขึ้นทำให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักลดลง

ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) พบว่าเมื่อมีค่ามากขึ้น คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักในสภาพสดลดลงทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เนื่องจากเมื่อปริมาณเพสต์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณมวลรวมลดลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเพสต์มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวม ทำให้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมมาก จึงมีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมต่ำ ส่วนผลกระทบเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสำหรับทุกสัดส่วนผสมพบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าเพิ่มขึ้น หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสดมีแนวโน้มลดลง ทั้งในกรณีคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดและคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากน้ำมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าวัสดุประสาน เมื่อมีปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น จึงทำให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักลดลง ผลการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 5

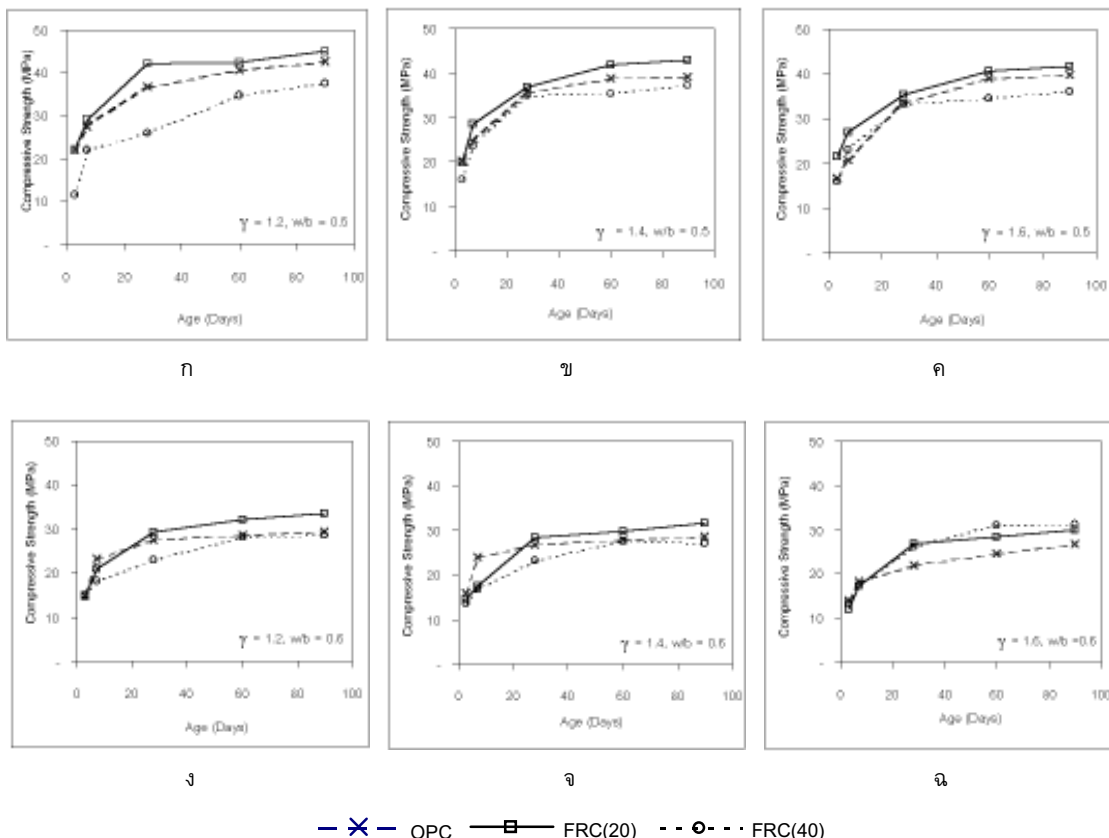


หมายเหตุ : OPC = คอนกรีตธรรมดา
 FRC(x) = คอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด ที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ x %

รูปที่ 5 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดในสภาพสด

กำลังรับแรงอัด

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้ากลบละเอียด และคอนกรีตธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 สำหรับทุกอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 ที่อัตราส่วน ปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมเท่ากับ 1.2 และ 1.4 เมื่อมีอัตราการแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบร้อยละ 20 กำลังรับแรงอัดที่อายุตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป พบว่าคอนกรีตผสม เถ้ากลบละเอียดมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ส่วนคอนกรีตผสมเถ้ากลบละเอียด ที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบร้อยละ 40 มีแนวโน้มการพัฒนากำลังต่ำกว่าคอนกรีต ธรรมดา ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบร้อยละ 20 มีปริมาณซิลิโคน ไดออกไซด์ (SiO₂) ในวัสดุผงที่ทำปฏิกิริยากับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH₂)) ที่เกิดจาก การทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (จากการคำนวณมวลสารสัมพันธ์) ได้พอดี [7] ปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานิกสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีต ธรรมดา ส่วนคอนกรีตผสมเถ้ากลบละเอียดที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบร้อยละ 40 มี ปริมาณซิลิโคนไดออกไซด์มากเกินไป ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH₂)) ที่เกิดจากการทำ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้เหลือ เถ้ากลบละเอียดที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาอยู่ภายในคอนกรีต กำลังรับแรงอัดจึงต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา

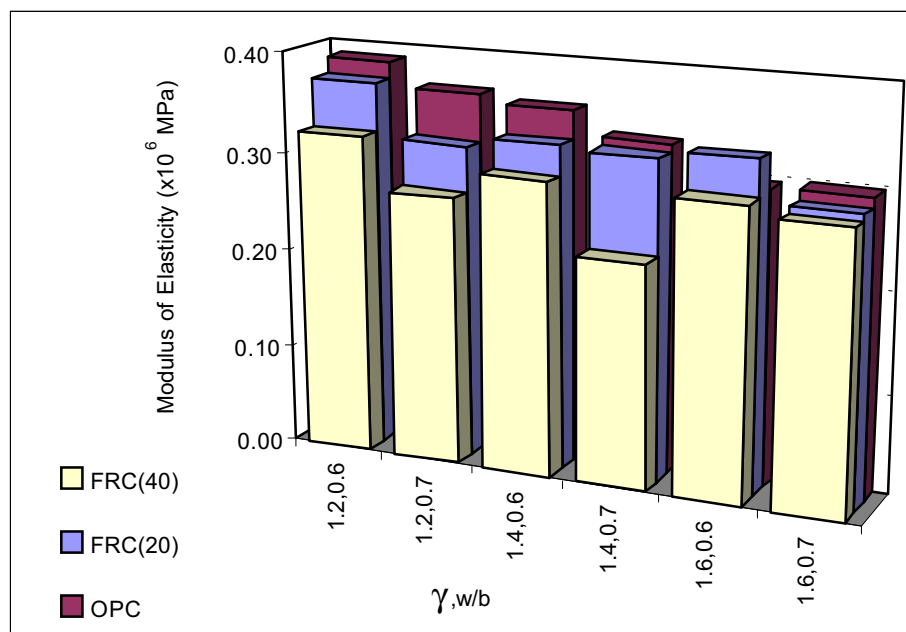


รูปที่ 6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้ากลบละเอียดและคอนกรีตธรรมดา

ส่วนอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) เท่ากับ 1.6 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.6 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันขึ้นไปสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 40 ที่อายุ 28 วันขึ้นไปมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 เนื่องจากที่ส่วนผสมดังกล่าว คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 มีค่าการยุบตัวสูง (ที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/b เท่ากับ 0.6 ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตธรรมดาเท่ากับ 24.0 ซม. ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 เท่ากับ 20.0 ซม. ที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 40 เท่ากับ 7.5 ซม.) ทำให้เมื่อทำการเขย่าด้วยเครื่องจี้คอนกรีต จึงเกิดการแยกตัว (Segregation) ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 40 มีค่าการยุบตัวต่ำจึงไม่เกิดการแยกตัว

โมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ผลการทดสอบหาโมดูลัสของความยืดหยุ่นดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตได้รับผลกระทบจากสัดส่วนผสมที่แตกต่างกัน คือ เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) และอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่มีพฤติกรรมการยืดหยุ่นที่แท้จริง เมื่อได้รับค่าหน่วยแรง (stress) เพิ่มขึ้นเกินความสามารถที่เพสต์และมวลรวมรับได้ทำให้เกิดรอยแตกร้าวในคอนกรีต ถ้าเพิ่มค่าหน่วยแรงขึ้นไปอีกการกระจายของรอยแตกร้าวในคอนกรีตก็จะเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งความเครียด (strain) ด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมวลรวมมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ เมื่อคอนกรีตมีปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมเพิ่มขึ้น คอนกรีตจะมีปริมาณมวลรวมลดลงและมีซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นจึงน้อยลงตามไปด้วย



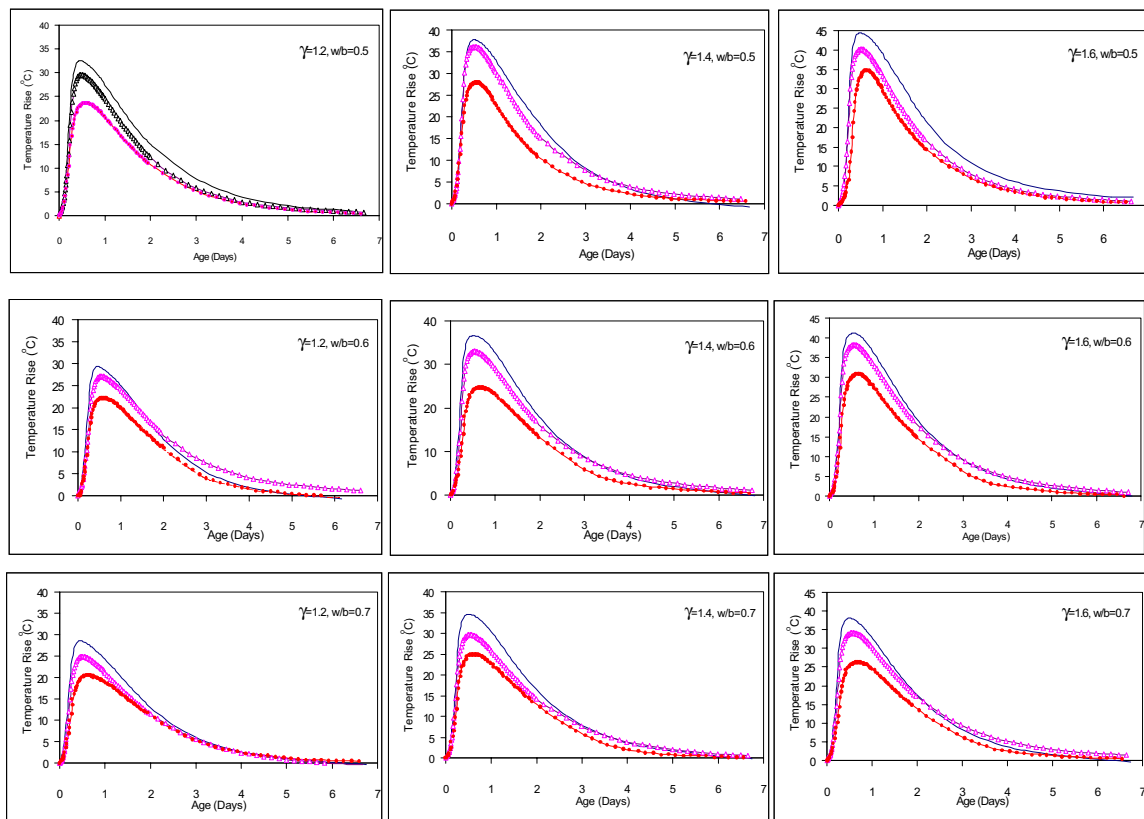
รูปที่ 7 โมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีต

ส่วนในกรณีของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) นั้นเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของเพสต์ ดังนั้นเมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นซีเมนต์เพสต์ที่กำลังรับแรงอัดน้อยลงทำให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตต่ำลงด้วย

การทดสอบอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ผลการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 8 พบว่าอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดและคอนกรีตธรรมดาได้รับอิทธิพลจากที่สัดส่วนผสมที่แตกต่างกัน คือ สำหรับคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด เมื่ออัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาณช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) มากขึ้น คอนกรีตมีอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น เนื่องจากผลของปริมาณปูนซีเมนต์ที่มีมากขึ้น

ผลกระทบจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบละเอียด พบว่าเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบละเอียดอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยที่คอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 มีอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน สูงกว่าที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 40 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง จึงมีอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ



รูปที่ 8 อุณหภูมิของคอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ และคอนกรีตธรรมดา

ในกรณีของอิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่มีต่อคุณสมบัติของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน พบว่าเมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้นคุณสมบัติของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง เนื่องจากที่อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมและอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบเท่ากัน เมื่อมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น ทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง จึงเกิดคุณสมบัติของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำกว่า

5. สรุปผล

1. เถ้าแกลบละเอียดมีคุณสมบัติใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีตได้ตามมาตรฐาน ASTM C618 และมีคุณสมบัติทางกลดีกว่าเถ้าแกลบขนาดอนุภาค 44 ไมโครเมตร และเถ้าแกลบขนาดอนุภาค 539 ไมโครเมตร
2. ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่สูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบขนาดอนุภาค 44 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมเท่ากัน โดยที่อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมตั้งแต่ 1.4 ขึ้นไปค่าการยุบตัวได้ของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดอยู่ในช่วงที่สามารถนำไปใช้งานได้ จึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ โดยการเพิ่มความละเอียดของเถ้าแกลบสามารถทำได้
3. คอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดมีหน่วยน้ำหนักในสภาพสดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมเท่ากัน
4. ที่ส่วนผสมเดียวกัน คอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดมีกำลังรับแรงอัดที่อายุตั้งแต่ 28 วันขึ้นไปสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา
5. คอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ส่วนผสมเดียวกัน
6. ที่ส่วนผสมเดียวกันคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดมีคุณสมบัติของปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และความร้อนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบละเอียดจะทำให้ช่วยลดปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิในคอนกรีตได้

เอกสารอ้างอิง

1. Zhang, M. and Malhotra, V., "High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material," *ACI Material Journal*, Vol. 93, No. 6, pp. 629-636.

2. Islam, S., 1981, *Grinding Methods and Its Effect on Reactivity of Rice Husk Ash*. Master's Thesis No.ST-81-7, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, pp. 30-31.
3. สมนึก ตั้งเต็มสิริกกุล, 2542, "การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย," *วิศวกรรมสาร วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย*, หน้า 4-5.
4. ปรีนทร์ ธนพรวัฒนา, 2543, *ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบ*, *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, หน้า 29-32, 93-94.
5. Pongporncharoen, S., 1997, *Prediction of Workability of Fresh Concrete Containing Fly Ash*, Master's Thesis No.ST-97-4, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, p. 20.
6. อนุวรรตน์ โค้ววารินทร์, 2542, *การพัฒนาคอนกรีตความร้อนต่ำโดยใช้เถ้าแกลบ*, *วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต*, หน้า 25-31.
7. สาโรจน์ ดำรงค์สีล, 2542, *แบบจำลองในการทำนายกำลังรับแรงรับน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ*, *วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต*, หน้า 67.