ผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน
Effect of Using Rice husk ash to Replace Portland Cement on Compressive strength of Concrete Under Pressure mold

สุชีพ ศรีชู[1] และ จตุพล ตั้งปกาศิต[2*]
nong_cheep@hotmail.com[1], jatuphon_t@rmutt.ac.th[2*]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน โดยออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตมาตรฐาน ซึ่งเท่ากับ 240 กก./ตร.ซม. ใช้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลของ บริษัท เอ.ที.ไบโอพาวเวอร์ จำกัด จ.พิจิตร มี 2 ขนาด คือ เถ้าแกลบไม่บดและเถ้าแกลบบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ผลการทดสอบพบว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบความดันโดยการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) และคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) สำหรับการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน การแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10

คำสำคัญ : เถ้าแกลบ, กำลังอัด, การหล่อแบบอัดความดัน

Abstract

The objective of this research is to study the effect of the use of rice husk ash (RHA) as a partial replacement of cement on the compressive strength for concrete under pressure mold. By using 28-day compressive, of which equals to 240 ksc. Using RHA from biomass power plant - A.T. Biopower Co.,Ltd. in Phichit province. Two types of RHA, ground (GRH) and unground (URH) are used to replace Portland cement at 10% and 20% by weight of binder. The compressive strengths

* Corresponding auther
[1] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[2] อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

of concrete are tested at 7, 28, 60 and 90 days, and they all show that the replacement of GRH in Portland cement type I give higher strength of concrete than URH and CON-P. For the development for compressive strength of concrete under pressure mold, the replacement of GRH at 20% by weight in Portland cement can produce higher compressive strength than the replacement of GRH at 10%.

Keywords : Rice husk ash, Compressive strength, pressure mold.

1.บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำแนวคิดเรื่องคอนกรีตสีเขียว (Green Concrete) มาใช้กันมากขึ้น ซึ่งแบ่งได้เป็นคอนกรีตผสมของเสียหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม คอนกรีตที่ผสมจากมวลรวมที่ถูกใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ และคอนกรีตผสมวัสดุเฉื่อยที่สามารถนำมาใช้เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีต [1] การนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต โดยการนำมาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่ใช้ทำคอนกรีต โดยที่คอนกรีตยังคงคุณสมบัติไม่ต่างจากเดิมหรือมีคุณสมบัติดีกว่าเดิม [2] ทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลงและยังเป็นการช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

เถ้าแกลบก็เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยมีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นซิลิกา (silica) สูง เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ โดยสามารถให้กำลังอัดเท่ากับการใช้ปูนซีเมนต์ปกติ ที่ปริมาณการใช้ไม่เกินร้อยละ 20 [3, 4]

นอกจากการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์เพื่อลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังมีการศึกษาวิจัยในด้านการพัฒนาคอนกรีตให้มีคุณภาพดีขึ้นโดยสามารถลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลง ซึ่งก็เป็นแนวทางในการลดปัญหาทางด้านมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย โดยมีการศึกษาการหล่อคอนกรีตภายใต้แบบอัดความดันสามารถพัฒนาให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นโดยไม่ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น หมายความว่า ถ้าใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่าเดิม การใช้แบบหล่ออัดความดันจะสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้ [5] จะเห็นได้ว่า ถ้ามีการหล่อคอนกรีตแบบอัดความดันและการใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ร่วมกันจะส่งผลให้คอนกรีตสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้มาก ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปได้มีการพัฒนาระบบการผลิตมาอย่างต่อเนื่อง โดยอุตสาหกรรมการผลิตเสาเข็มกลมแรงเหวี่ยงอัดแรง (Spun pile) ซึ่งรูปแบบการผลิตใช้กรรมวิธีการปั่นคอนกรีตในแบบหล่อที่หมุนด้วยความเร็วสูง ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงกว่าคอนกรีตที่หล่อด้วยวิธีธรรมดา [6] จากแนวคิดดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีจุดมุ่งหมายที่จะเพิ่มทางเลือกในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการพัฒนาวิธีการหล่อคอนกรีตโดยใช้แบบหล่ออัดความดันและการใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนในการผลิตและลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมเพราะสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้มาก โดยจะทำการศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบจาก

โรงไฟฟ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดันที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

3.การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 เถ้าแกลบ ใช้เถ้าแกลบที่ได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแกลบของบริษัท เอ.ที ไบโอพาวเวอร์จำกัด จังหวัดพิจิตร มี 2 ขนาด คือเถ้าแกลบไม่บด และเถ้าแกลบบดละเอียด มีขนาดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 86 และ 7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

3.1.3 ทราย ใช้ทรายแม่น้ำ ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

3.1.4 สารลดน้ำพิเศษ

3.1.5 หิน ใช้หินที่มีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มม.

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 แบบหล่ออัดความดัน ขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 10x10x11 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) โดยการใส่คอนกรีตให้มีความสูงเท่ากับ 11 ซม. เมื่อปิดฝาและดำเนินการขันน็อตที่บนฝาจะทำให้ฝาแบบหล่ออัดคอนกรีตเหลือความสูง 10 ซม.

3.2.2 แบบหล่อคอนกรีตธรรมดา มีขนาด 10x10x10 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข)

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมีกำลังอัดเท่ากับ 240 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน ในตารางที่ 1 โดยวิธีของ ACI [7]

3.3.2 หล่อตัวอย่างคอนกรีตด้วยแบบหล่อธรรมดาและ แบบอัดความดันคงที่โดยการขันน็อตที่บนฝาจะทำให้ฝาแบบหล่ออัดคอนกรีตที่มีปริมาณของความสูงเดิม 11 ซม. ให้เหลือความสูง 10 ซม. จากนั้นจะทำการถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 24 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มด้วยน้ำ

3.3.3 ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเมื่ออายุของคอนกรีต 7, 28, 60 และ 90 วัน

(ก)

(ข)

รูปที่ 1 (ก) แบบหล่ออัดความดัน (ข) แบบหล่อพลาสติกแข็ง

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Sample	Mix Proportion (by weight)						
	C (kg)	RH (kg)	S (kg)	R (kg)	W (kg)	SP* (kg)	Slump (cm.)
CON-N	316	-	739	1,090	211.42	-	10.30
CON-P	316	-	739	1,090	211.42	-	10.30
URH10-SP-N	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09	11.70
URH20-SP-N	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20	7.50
URH10-SP-P	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09	11.70
URH20-SP-P	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20	7.50
GRH10-SP-N	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09	12.10
GRH20-SP-N	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20	8.90
GRH10-SP-P	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09	12.10
GRH20-SP-P	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20	8.90

หมายเหตุ : *ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมสำหรับตัวอย่างที่ใช้สารลดน้ำพิเศษจะคิดน้ำที่ผสมอยู่ในสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 50 โดยปริมาณการใส่สารลดน้ำพิเศษใช้ค่า Slump เท่ากับ 10±2.5 ซม. เป็นเกณฑ์ควบคุม

สำหรับสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย CON หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน, URH และ GRH หมายถึง เถ้าแกลบไม่บดและเถ้าแกลบบดละเอียด, SP หมายถึง สารลดน้ำพิเศษ, N และ P หมายถึง ตัวอย่างแบบหล่อธรรมดาและการหล่อแบบอัดความดัน ส่วนตัวเลข 10 และ 20 แสดงถึงร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ URH10-SP-P หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) แทนที่ในปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 โดยเติมสารลดน้ำพิเศษ (SP) เพื่อปรับค่ายุบตัว โดยการหล่อตัวอย่างแบบอัดความดัน, CON-N หมายถึง คอนกรีตมาตรฐานที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดา, CON-P หมายถึง คอนกรีตมาตรฐานที่หล่อด้วยแบบอัดความดัน

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าแกลบ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่าเถ้าแกลบ มีปริมาณ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 90.62 ในขณะที่มีองค์ประกอบอื่นในปริมาณน้อย และการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า การปรับปรุงคุณภาพวัสดุปอซโซลานโดยการบดไม่มีผลทำให้องค์ประกอบเคมีเปลี่ยนแปลง [8] และเถ้าแกลบบดละเอียดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบอนุภาคขนาดใหญ่ มีองค์ประกอบทางเคมีไม่แตกต่างกัน [9]

ในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบ พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) เท่ากับ 1.99 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในขณะที่ความละเอียดโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 พบว่า เถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 86 และ 7 ตามลำดับ จะเห็นว่า เถ้าแกลบไม่บดมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ และเถ้าแกลบบดมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าแกลบ
SiO_2	20.40	90.62
Al_2O_3	5.40	0.25
Fe_2O_3	3.10	0.20
CaO	63.71	0.85
MgO	1.04	0.35
K_2O	0.54	2.17
SO_3	2.90	0.13
Na_2O	0.08	0.04
LOI	2.83	5.39

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

คุณสมบัติทางกายภาพ	**ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์**	**เถ้าแกลบ**	
		ไม่บด	**บดละเอียด**
ความถ่วงจำเพาะ	3.18	1.99	1.99
ร้อยละค้างบนตะแกรงเบอร์ 325	13.5	86	7

4.2 ผลกระทบเนื่องจากความหนาแน่น

ตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตกำลังอัด 240 กก./ตร.ซม. พบว่า คอนกรีตมาตรฐานที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดา (CON-N) จะมีค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต เท่ากับ 2,377 กก./ลบ.ม. แต่เมื่อทำการหล่อแบบอัดความดัน (CON-P) จะมีค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต เท่ากับ 2,484 กก./ลบ.ม. จะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน เท่ากับ 107 กก./ลบ.ม. หรือ เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.50 คอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ของตัวอย่างคอนกรีต (URH10-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน (URH10-SP-P) เท่ากับ 111 กก./ลบ.ม. หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.71 และตัวอย่างคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 (URH20-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน (URH20-SP-P) เท่ากับ 169 กก./ลบ.ม. หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.20 คอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ของตัวอย่างคอนกรีต (GRH10-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน (GRH10-SP-P) เท่ากับ 166 กก./ลบ.ม. หรือ เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.05 และตัวอย่างคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 (GRH20-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน (GRH20-SP-P) เท่ากับ 146 กก./ลบ.ม. หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.16 จะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตกำลังอัด 240 กก./ตร.ซม. ของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน (CON), ตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) และ

เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 และ 20 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการหล่อแบบอัดความดันมีผลทำให้มวลรวม อยู่ชิดกันมากขึ้นช่องว่างระหว่าง มวลรวมน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย ที่ผ่านมา [5, 10] พบว่าเมื่อมวลรวม อยู่ชิดกันมาก ๆ ความหนาแน่นก็ย่อมเพิ่มสูงขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบเทียบกับความแน่นของตัวอย่างคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน จะเห็นว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปริมาณร้อยละ 20 จะมีค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบ GRH ร้อยละ 10 เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ GRH มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ การแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความหนาแน่นต่ำลง ส่วนคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปริมาณร้อยละ 20 จะมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าตัวอย่างของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบ URH ร้อยละ 10 เนื่องจากคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ URH มีค่า Slump น้อย การหล่อคอนกรีตให้แน่นด้วยแบบหล่อธรรมดาทำได้ค่อนข้างยาก การแทนที่เถ้าแกลบ URH ในปริมาณมากขึ้นความหนาแน่นจึงน้อยลง ส่งผลให้ค่าผลต่างของความหนาแน่นของคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดากับการหล่อแบบอัดความดันมีค่าสูงขึ้นจากการแทนที่เถ้าแกลบ URH เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

ตัวอย่างของคอนกรีต	หน่วยน้ำหนักเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ผลต่าง (กก./ลบ.ม.)	เพิ่มขึ้น (%)
CON-N	2,377	107	4.50
CON-P	2,484		
URH10-SP-N	2,358	111	4.71
URH10-SP-P	2,469		
URH20-SP-N	2,348	169	7.20
URH20-SP-P	2,517		
GRH10-SP-N	2,356	166	7.05
GRH10-SP-P	2,522		
GRH20-SP-N	2,369	146	6.16
GRH20-SP-P	2,515		

4.3 ค่ากำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 5 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละของคอนกรีต พบว่า คอนกรีต CON-N มีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 264 และ 356 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต CON-P มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 371 และ 526 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 141 และ 148 ของคอนกรีต CON-N ตามลำดับ แสดงว่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-P มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าคอนกรีต CON-N

ตารางที่ 5 กำลังอัดและร้อยละของตัวอย่างคอนกรีต

ตัวอย่างของคอนกรีต	กำลังอัด (กก./ตร.ซม. – (%))							
	7 วัน		28 วัน		60 วัน		90 วัน	
CON-N	264	***(100)***	290	***(100)***	329	***(100)***	356	***(100)***
CON-P	371	***(141)***	413	***(142)***	465	***(141)***	526	***(148)***
URH10-SP-N	264	***(100)***	287	***(99)***	329	***(100)***	360	***(101)***
URH10-SP-P	366	***(139)***	431	***(149)***	460	***(140)***	521	***(146)***
URH20-SP-N	258	***(98)***	286	***(99)***	327	***(99)***	352	***(99)***
URH20-SP-P	360	***(136)***	411	***(142)***	464	***(141)***	521	***(146)***
GRH10-SP-N	269	***(102)***	328	***(113)***	341	***(104)***	363	***(102)***
GRH10-SP-P	376	***(142)***	461	***(159)***	490	***(149)***	534	***(150)***
GRH20-SP-N	271	***(103)***	336	***(116)***	346	***(105)***	368	***(103)***
GRH20-SP-P	380	***(144)***	470	***(162)***	491	***(149)***	545	***(153)***

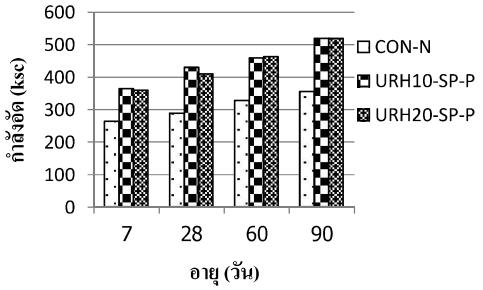
หมายเหตุ : การเทียบร้อยละของกำลังอัดเทียบจากกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-N

ส่วนคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-N และ URH20-SP-N มีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 264, 258 และ 360, 352 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 98 และ 101, 99 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ และคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์อัตรา ร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-N และ GRH20-SP-N มีกำลังอัด ที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 269, 271 และ 363, 368 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 102, 103 และ 102, 103 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ จะเห็นว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-N มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับ CON-N เนื่องจากการควบคุมค่า Slump ของการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบโดยใส่สารลดน้ำพิเศษ เพื่อควบคุมอัตราส่วน W/C ให้เท่าเดิม และจากอัตราการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่น้อยไม่เกินร้อยละ 10 จึงส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดเพียงเล็กน้อยจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงจากการแทนที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อยมีความเป็นผลึกสูงไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีแทนที่ในปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อยจะทำให้กำลังอัดลดลงเล็กน้อย [11] และการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีต แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าลดลง [12] ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH20-SP-N กับตัวอย่างคอนกรีต CON-N พบว่า ค่ากำลังอัดของ URH20-SP-N ทุกอายุการทดสอบมีทิศทางต่ำกว่าตัวอย่าง CON-N จะเห็นได้ว่า การแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่ากำลังอัด

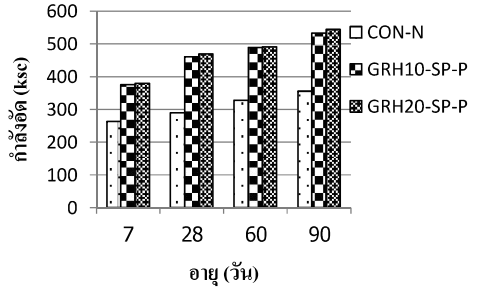
ลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมากขึ้นจากการแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 ทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงมาก ส่วนของกำลังอัดที่ได้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นยังไม่มากพอที่จะสามารถชดเชยกำลังอัดในส่วนที่หายไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่า มอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดจะมีกำลังอัดลดลงเมื่ออัตราการแทนที่มากขึ้น [8] และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเมื่อเพิ่มอัตราส่วนร้อยละที่มากขึ้นกำลังอัดจะมีค่าลดลง [12]

เมื่อทำการหล่อคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P, URH20-SP-P ที่อายุ 7 วัน และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 366, 360 และ 521, 521 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 139, 136 และ 146, 146 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ และค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P, GRH20-SP-P ที่อายุ 7 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 376, 380 และ 534, 545 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 142, 144 และ 150, 153 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ แสดงว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P, URH20-SP-P, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบชนิดเดียวกันในอัตราการแทนที่เท่ากันของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-N, URH20-SP-N, GRH10-SP-N, GRH20-SP-N ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับตัวอย่างคอนกรีต CON-P

ผลกำลังอัดคอนกรีตข้างต้น แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-P, URH10-SP-P, URH20-SP-P, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P ภายใต้การหล่อแบบอัดความดันมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดาเพราะเมื่อคอนกรีตอยู่ภายใต้ความดัน มีผลทำให้ช่องว่างในคอนกรีตลดลงจึงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของซีเมนต์เพสต์ในการยึดมวลรวมให้แน่นมากขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัย ที่ผ่านมา [5, 10] พบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตอยู่ภายใต้การหล่อที่มีแรงดันบีบอัดเพราะทำให้ช่องว่างในคอนกรีตลดลงจึงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของซีเมนต์เพสต์ในการยึดมวลรวมให้แน่นมากขึ้น



รูปที่ 2 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต CON กับคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบ (URH)



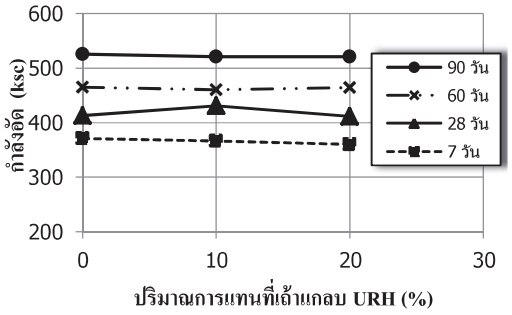
รูปที่ 3 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต CON กับคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบ (GRH)

จากรูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดากับตัวอย่างคอนกรีต

ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ทุกอัตราการแทนที่และทุกอายุของการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตโดยมีค่าสูงกว่ากำลังอัดมาตรฐาน ซึ่งกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-N, URH10-SP-P, URH20-SP-P ที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 264, 366, 360 และ 356, 521, 521 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 139, 136 และ 100, 146, 146 ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดากับตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ภายใต้การหล่อแบบอัดความดันดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ทุกอัตราการแทนที่และทุกอายุการทดสอบมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน โดยกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-N, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P ที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 264, 376, 380 และ 356, 534, 545 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 142, 144 และ 100, 150, 153 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ URH และ GRH ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณร้อยละ 10 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 ภายใต้การหล่อแบบอัดความดันจะมีค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐานแบบหล่อธรรมดา จากผลที่ได้เห็นได้ว่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นมีค่าสูงโดยเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 40 ซึ่งมีแนวโน้มสามารถพัฒนาให้คอนกรีตใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ได้เพิ่มขึ้นภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน ซึ่งเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงและลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมโดยที่กำลังอัดของคอนกรีตยังคงมีค่าเท่าเดิม สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [5] พบว่า การหล่อคอนกรีตภายใต้แรงดันจะสามารถลดปูนซีเมนต์ลงได้เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัด เท่ากับ 400 กก./ตร.ซม. ใช้แบบหล่อธรรมดาจะมีค่ากำลังอัดเท่ากับคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดเท่ากับ 300 กก./ตร.ซม. ใช้แบบหล่ออัดความดัน ผลที่ได้สามารถพัฒนาให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นโดยไม่ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่ม

4.4 ผลกระทบร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดันพบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำการหล่อแบบอัดความดัน



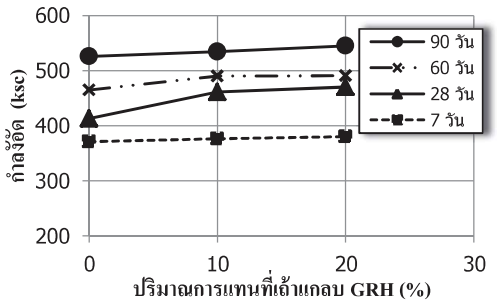
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

ของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P และ URH20-SP-P มีค่าใกล้เคียง

กับตัวอย่าง CON-P ถึงแม้ว่าเถ้าแกลบไม่บดมีอนุภาคขนาดใหญ่และมีความพรุนสูงมาก [3] จากการแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ทำให้กำลังอัดลดลงจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่หายไป แต่กำลังอัดที่ได้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นและการหล่อแบบอัดความดันสามารถชดเชยกำลังอัดได้เพียงพอทำให้มีค่าไม่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P กับ URH20-SP-P พบว่า ในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน กำลังอัดของ URH10-SP-P มีค่าสูงกว่า URH20-SP-P อยู่เล็กน้อยเนื่องจากการแทนที่ในปริมาณน้อย จะไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดมากนักและยังมีกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นจึงเป็นผลทำให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อย แต่ที่อายุ 60 วันขึ้นไป กำลังอัดของ URH10-SP-P และ URH20-SP-P มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ภายใต้การหล่อแบบอัดความดันในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน เป็นผลได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเป็นหลัก ในส่วนของปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นยังไม่มากเนื่องจากเถ้าแกลบไม่บดมีอนุภาคใหญ่ การแทนที่เถ้าแกลบเพิ่มขึ้นทำให้ปูนซีเมนต์ลดลงค่ากำลังอัดจึงต่ำลงและเมื่อคอนกรีตมีอายุ 60 วันขึ้นไป กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ได้ การแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 20 จึงสามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 10 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [2] การพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีการพัฒนาช้าแต่เมื่อมีอายุมากขึ้นจะพัฒนากำลังมากขึ้นและยังขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุปอซโซลานด้วย คือวัสดุละเอียดจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากกว่าวัสดุที่หยาบกว่า

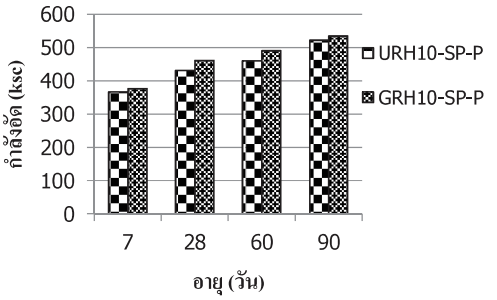
จากรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำการหล่อแบบอัดความดันของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P และ GRH20-SP-P มีค่าสูงกว่า CON-P เนื่องจากความละเอียดของเถ้าแกลบมีผลทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและอนุภาคที่มีความละเอียดสูงทำให้สามารถแทรกอุดช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ได้ดีส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดสูงขึ้น

และเมื่อพิจารณาปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-Pกับ GRH20-SP-P พบว่า ค่ากำลังอัดของ GRH20-SP-P มีค่าสูงกว่า GRH10-SP-P ทุกอายุการทดสอบ แสดงว่า การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในปริมาณที่ร้อยละ 20 มีกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นสูงกว่า โดยสามารถชดเชยกำลังอัดที่หายไปจากการลดลงของปูนซีเมนต์ได้จึงทำให้มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 10 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3] พบว่า การใช้เถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อกำลังอัด ซึ่งกำลังอัดมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักให้กำลังค่อนข้างสูง แต่การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ



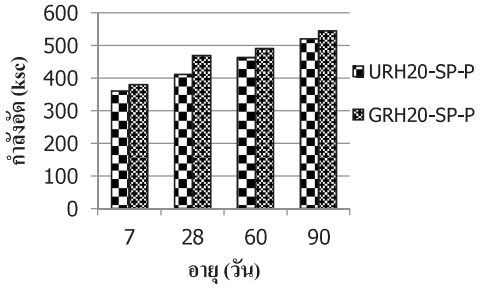
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

4.5 ผลกระทบของความละเอียดของเถ้าแกลบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน



รูปที่ 6 เปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10

จากรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน ของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH10-SP-P) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH10-SP-P) ในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P มีค่าสูงกว่า URH10-SP-P ทุกอายุการทดสอบ เนื่องจากเถ้าแกลบที่บดละเอียดสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและสามารถอุดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่า



รูปที่ 7 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบ ร้อยละ 20

และจากรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20 ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน ของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH20-SP-P) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH20-SP-P) ในปูนซีเมนต์ อัตราร้อยละ 20 พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต GRH20-SP-P มีค่าสูงกว่า URH20-SP-P ทุกอายุการทดสอบซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่ทำการหล่อแบบอัดความดัน ตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่าคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) เนื่องจากความละเอียดของเถ้าแกลบทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและอนุภาคที่มีความละเอียดสูงทำให้สามารถแทรกอุดช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ ส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า เถ้าแกลบละเอียดมีการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสูง ที่ส่วนผสมเดียวกัน คอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดมีกำลังอัดที่อายุตั้งแต่ 28 วันขึ้นไปสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา [9] และกำลังของมอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าถ่านหิน โดยมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินละเอียดที่สุดให้

กำลังอัดสูงสุด ส่วนมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินขนาดหยาบที่สุดจะให้ค่ากำลังอัดต่ำสุด [13]

5. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองจากงานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบอัดความดันการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) และคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) โดยการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10
2. การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบอัดความดันการแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P)

6. กิตติประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณประจำปี 2560 และ บริษัท เอ.ที.ไบโอพาวเวอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุในการทำงานวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] เดชขจร เจริญรัตนาภิรมย์, “GREENCONCRETE คอนกรีตสีเขียวเพื่อสิ่งแวดล้อม,” วารสารคอนกรีต TCA e-magazine ฉบับที่ 16 ประจำเดือน สิงหาคม 2548.

[2] จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2548. “การศึกษาค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากไฮเดรชันการอัดตัวอนุภาคและปฏิกิริยา ปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน,” วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 28 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2548, หน้า 465 ถึง 475.

[3] ปริญญา จินดาประเสริฐ, และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2555. ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (ส.ค.ท.).พิมพ์ครั้งที่ 7.

[4] V. Sata, J. Tangpagasit, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt., 2012, “Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland” Cement & Concrete Composites, Vol.34, No.1, pp.94-100.

[5] สุกฤษ มณีรัตน์, ชำนาญกิจ ศิริยานนท์, พิเชษฐ์ สร้อยสำโรง, สมคิด กูลสุวรรณ, นพรัตน์ วิลารักษ์ และ จตุพล ตั้งปกาศิต, “กำลังอัดของคอนกรีตภายใต้แบบหล่อแบบอัดความดัน,” การประชุมวิชาการคอนกรีต ประจำปี ครั้งที่ 10. วันที่ 20-22 ตุลาคม 2557 ณ โรงแรมดุสิต ไอส์แลนด์ รีสอร์ท จังหวัด เชียงราย บทความที่ MAT 63.

[6] บริษัท ณรงค์ไมโครสปัน จำกัด. เสาเข็ม Spun Micropile. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : www.narongmicrospun.com

[7] American concrete Institute. ACI 211. 1-91 : Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass concrete and ACI 201. 2R-92 : Guild to Durable concrete, ACI Manual of concrete Practice, Part1, Michigan, 2000.

[8] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แววคุ้ม, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2546. “วัสดุปอซโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน,” วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 26 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2546, หน้า 459 ถึง 473.

[9] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวัชรากร วงศ์คำจันทร์, 2544. “พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด,” วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2544, หน้า 327 ถึง 341.

[10] สมิตร ส่งพิริยะกิจ, ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข, กันตพงศ์ ผิวเหลือง, ถิรวัจน์ ผกผ่า และ รัฐพล เจียวิริยะบุญมา, 2549. “กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อก่อตัวภายใต้แรงดัน สูง,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, วันที่ 20-22 เมษายน 2549 ณ โรงแรมเมอร์ลินบีช จังหวัดภูเก็ต. บทความที่ MAT 58.

[11] จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2550. “การศึกษาผลกระทบของการอัดตัวของอนุภาคต่อค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียด,” วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 30 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2550, หน้า 141 ถึง 151.

[12] สุวัฒน์ รามจันทร์, วชิกรณ์ เสนาวัง, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2558. “ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัด การซึมของน้ำ และการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, วันที่ 8-10 กรกฎาคม 2558 ณ จังหวัดชลบุรี, หน้า 1 ถึง 6.

[13] จตุพล ตั้งปกาศิต, “การศึกษาค่าดัชนีกำลังและผลของขนาดเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ. 2541.