

กำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

Strength of Rice Husk Ash Blended Cement Concrete

สาริณันต์ ดำรงศีล¹ บุรฉัตร ฉัตรวีระ² วินัย อวยพรประเสริฐ¹

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ปทุมธานี 12000

โทร. 997-2222-30 ต่อ 3256 โทรสาร 997-2222-30 ต่อ 3257

E-Mail: winai @ rangsit.ac.th

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12121

โทร. 564-6304-12 ต่อ 3105 โทรสาร 564-6303 และ 564-6317

E-Mail: cburacha @ engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการเสนอกำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่อายุ 28 วัน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมผลิตคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป โดยศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ ได้แก่ กำลังอัด กำลังดึง ความหนาแน่น และค่ายุบตัว นอกจากนี้ยังศึกษาการนำเถ้าแกลบที่เหลือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอิฐมอญมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุผง กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบมากที่สุดเมื่อใช้ปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุผง นอกจากนี้ เถ้าแกลบที่เหลือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอิฐมอญมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานประเภท N ตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผลิตคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตจะมีผลทำให้ความหนาแน่นและค่ายุบตัวของคอนกรีตลดลง เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

ABSTRACT

The objective of this research is to present the strength of rice husk ash blended cement concrete at the age of 28 days in order to select mix proportion of rice husk ash concrete (RHA concrete). The study includes mechanical and physical properties of RHA concrete, i.e. compressive strength, tensile strength, density and slump. In addition, the feasibility of using rice husk ash (RHA) from bricks burning industry as pozzolan materials is also studied. The

quantities of RHA to replace ordinary Portland cement (OPC) are 10, 20, 30, 40 and 50 % by weight of cementitious material. The maximum compressive and tensile strengths of RHA concrete are obtained when OPC was replaced by 20% RHA replacement by weight of cementitious material. RHA used in this study can be categorized as Type N pozzolan materials in accordance with the ASTM C 618-94a standards. However, the density and slump of RHA concrete are decreased compared with the OPC concrete.

1. บทนำ

ประเทศไทยสามารถผลิตข้าวได้เฉลี่ย 20 ล้านตันต่อปี [1] จึงมีปริมาณเปลือกข้าวหรือที่เรียกกันว่าแกลบซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากกระบวนการสีข้าวประมาณ 4 ล้านตันต่อปี โดยแกลบถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่น เชื้อเพลิงในโรงสีข้าว และเชื้อเพลิงในการทำอิฐมอญ เป็นต้น แต่ก็ยังคงมีแกลบที่เหลืออยู่อีกเป็นจำนวนมาก

ในด้านการนำแกลบมาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง งานวิจัยของ พิชัย นิมิตรยงสกุล [2] ได้แสดงให้เห็นถึงกระบวนการผลิตเถ้าแกลบที่สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อผลิตคอนกรีต และงานวิจัยโดย บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิมิตรยงสกุล [3] ซึ่งนำเถ้าแกลบที่เหลือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงสีข้าวแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผลิตคอนกรีต สรุปว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบยังมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ดี และมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดได้ดีอีกด้วย เนื่องจากเถ้าแกลบมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นส่วนประกอบทางเคมีอยู่มาก สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) ซึ่งทำหน้าที่เป็น

ตัวเชื่อมประสานมวลรวมในคอนกรีต โดยปกติ คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เหลืออยู่ประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 โดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ [4] ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือการเสนอกำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป และศึกษาถึงความเป็นไปได้ของเถ้าแกลบที่เหลือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอิฐมอญ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อผลิตคอนกรีต

3. โปรแกรมการทดสอบ

งานวิจัยนี้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การทดสอบคุณสมบัติของเถ้าแกลบ เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของเถ้าแกลบที่เหลือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอิฐมอญแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อผลิตคอนกรีต โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกับประเภทของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a

2. การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

4. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง ของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย

เถ้าแกลบ เป็นเถ้าแกลบที่เหลือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอิฐมอญ โดยเลือกเก็บเฉพาะเถ้าที่มีสีขาวและนำมาบดละเอียดก่อนผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุผง

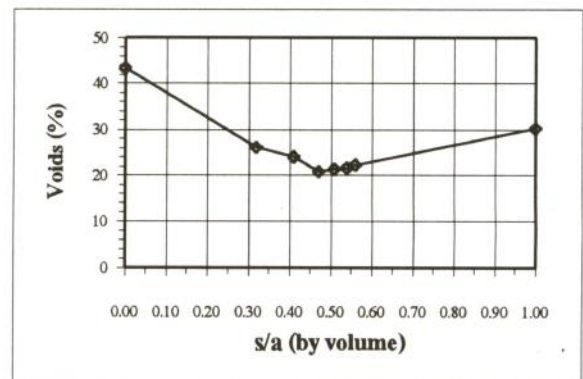
ทราย ใช้ทรายแม่น้ำมีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33 - 93 โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะสภาพอิ่มตัวแห้งเท่ากับ 2.48 และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.90

หิน เป็นหินปูนที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป มีขนาดโตะที่สุดไม่เกิน 12 มิลลิเมตร มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33 - 93 โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะสภาพอิ่มตัวแห้งเท่ากับ 2.73 และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.52

น้ำร้อยละ 0.52

น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ใช้น้ำประปา

ทรายและหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีปริมาณช่องว่างต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 20.40 ที่อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (s/a) เท่ากับ 0.45 จากการทดสอบหาปริมาณช่องว่างของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C 29M-91a ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละช่องว่างของมวลรวมกับอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด

5. วิธีการทดสอบ

5.1 การทดสอบคุณสมบัติของเถ้าแกลบ

การทดสอบประกอบด้วยการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบ ได้แก่ การทดสอบความละเอียดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงแบบเปียกบนตะแกรงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C 430 การทดสอบปริมาณความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM C 311 การทดสอบความต้องการน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C 311 และการทดสอบดัชนีกำลังตามมาตรฐาน ASTM C 109

5.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

การทดสอบประกอบด้วยการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตในสภาพสด ตามมาตรฐาน BS 1881 PART 107 การทดสอบค่ายุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 143 การทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 และการทดสอบกำลังดึงตามมาตรฐาน ASTM C 496 โดยที่ การทดสอบกำลังอัดและกำลังดึง ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร และทดสอบที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ

6. ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทำตัวอย่างทดสอบ

ส่วนผสมของคอนกรีตในงานวิจัยนี้ ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และ/หรือวัสดุผงที่เท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และใช้ s/a เท่ากับ 0.45 ตลอดการทดสอบ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง(W/C+RHA) ในส่วนผสม เท่ากับ 0.60 , 0.65 , 0.70 , 0.75 และ 0.80 เป็นตัวแปรในการทดสอบ ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทำตัวอย่างทดสอบแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีต

W/C+RHA	Weight (for 1 m ³ of concrete)			
	Cementitious Material (kg)	Water (kg)	Sand (kg)	Coarse Agg. (kg)
0.60	350	210.00	757.64	1,019.35
0.65	350	227.50	738.11	993.07
0.70	350	245.00	718.58	966.80
0.75	350	262.50	699.05	940.52
0.80	350	280.00	679.52	914.24

7. ผลการทดสอบและการวิจารณ์ผล

7.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าแกลบ

ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2 และผลการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าแกลบเปรียบเทียบกับประเภทของปอซโซลานมาตรฐาน ASTM C 618-94a แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3 สรุปได้ว่าเถ้าแกลบที่เหลือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอิฐมอญจัดเป็นปอซโซลานประเภท N ซึ่งเป็นปอซโซลานธรรมชาติ ที่มีความต้องการน้ำมากกว่าปอซโซลานประเภทอื่น ๆ

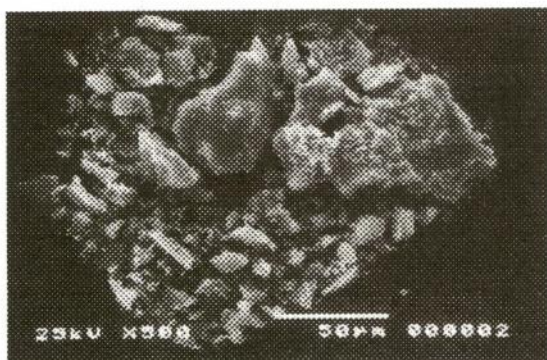
ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Chemical Composition (%)	RHA	OPC
Silicon Dioxide (SiO ₂)	89.89	20.55
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	1.03	5.90
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃)	0.76	3.00
Calcium Oxide (CaO)	0.98	64.42
Magnesium Oxide (MgO)	0.28	1.37
Potassium Oxide (K ₂ O)	2.09	0.31
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.05	0.05
Sulfur Trioxide (SO ₃)	0.84	2.14
Phosphorus Pentoxide (P ₂ O ₅)	0.49	0.05
Titanium Oxide (TiO ₂)	0.04	0.31
Loss on Ignition (LOI)	3.33	1.78

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 618-94a

Chemical Property	Mineral Admixture Class			RHA
	N	F	C	
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , min., %	70.0	70.0	50.0	91.84
SO ₃ , max., %	4.0	5.0	5.0	0.84
Alkalis as Na ₂ O, max., %	1.5	1.5	1.5	0.05
Moisture Content, max., %	3.0	3.0	3.0	1.28
Loss on Ignition, max., %	10.0	6.0	6.0	3.33
Physical Property	Mineral Admixture Class			RHA
	N	F	C	
Amount retained when				
Wet sieved No. 325 , max., %	34	34	34	19
Water requirement, max., %	115	105	105	113
Strength activity index				
at 7 days , min., %	75	75	75	80
at 28 days , min., %	75	75	75	81
Specific Gravity	--			2.15
Blaine Fineness (cm ² /gm)	--			8,240

ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ถ่ายภาพขยายด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) มีกำลังขยาย 500 เท่า พบว่าเถ้าแกลบมีขนาดและรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมที่ไม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบ

ตารางที่ 4 ความหนาแน่นของคอนกรีตในสภาพสด

*Type of Concrete	Density (kg/m ³)				
	W/C+RHA				
	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
C - OPC	2,407	2,386	2,357	2,343	2,321
C - 10 RHA	2,357	2,343	2,321	2,307	2,293
C - 20 RHA	2,343	2,329	2,307	2,293	2,264
C - 30 RHA	2,314	2,300	2,279	2,257	2,229
C - 40 RHA	-	2,257	2,236	2,221	2,200
C - 50 RHA	-	-	2,214	2,192	2,164

หมายเหตุ *

C - OPC คือคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

C - 10 RHA, C - 20 RHA, C - 30 RHA, C - 40 RHA และ C - 50 RHA คือคอนกรีตผสมเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีต

Type of Concrete	Age (days)	Compressive Strength (ksc)					Comp. Strength (%)
		W/C+RHA					
		0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	
C – OPC	3	205.38	158.94	119.20	104.78	98.06	100
C - 10 RHA	3	168.30	139.88	108.73	88.96	80.72	86.58
C - 20 RHA		145.02	114.21	98.83	80.70	68.60	76.43
C – 30 RHA		137.72	95.13	86.37	63.59	60.92	66.15
C - 40 RHA		-	83.80	73.35	54.84	42.62	52.49
C - 50 RHA		-	-	43.48	38.28	30.91	34.84
C – OPC	7	285.07	241.68	190.36	144.67	128.17	100
C - 10 RHA	7	231.45	177.10	145.79	120.44	110.43	81.37
C - 20 RHA		228.32	175.92	143.65	119.40	91.02	77.66
C - 30 RHA		201.15	150.14	134.34	106.49	84.77	70.56
C - 40 RHA		-	128.58	113.13	91.62	70.45	58.26
C - 50 RHA		-	-	80.89	69.35	56.70	44.89
C – OPC	28	421.26	341.88	292.75	251.30	216.23	100
C - 10 RHA	28	321.55	243.18	222.34	183.58	158.81	73.73
C - 20 RHA		374.91	277.40	250.63	218.48	186.96	86.34
C - 30 RHA		323.21	250.63	234.65	202.02	167.12	78.55
C - 40 RHA		-	221.70	195.78	173.32	144.11	66.91
C - 50 RHA		-	-	163.10	151.15	127.84	58.33

ตารางที่ 6 ค่ายุบตัวของคอนกรีต

Type of Concrete	Slump (cm)				
	W/C+RHA				
	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
C - OPC	9.0	18.0	23.0	*	*
C - 10 RHA	8.0	17.0	21.5	*	*
C - 20 RHA	6.0	11.0	18.5	22.0	*
C - 30 RHA	2.5	5.5	12.5	17.5	21.5
C - 40 RHA	-	2.0	6.5	12.0	19.0
C - 50 RHA	-	-	4.0	8.0	15.0

หมายเหตุ * ค่ายุบตัวมากกว่า 23.0 เซนติเมตร

7.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตในสภาพสด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากัน พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบมีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน เนื่อง

จากเถ้าแกลบมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นการใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้นในการผลิตคอนกรีต จะทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง ดังจะเห็นได้จากการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตในสภาพสดในตารางที่ 4

ผลการทดสอบค่ายุบตัว พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบมีค่ายุบตัวน้อยกว่าคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากัน การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่ายุบตัวของคอนกรีตลดลง เนื่องจากมีขนาดอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุมและมีความต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยจะเห็นได้จากผลการทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีตในตารางที่ 6

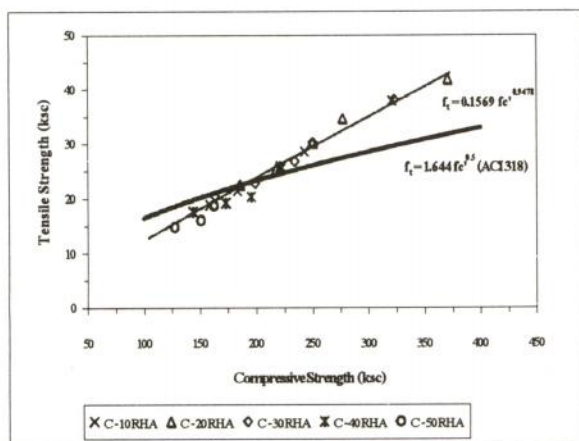
ผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังดึง พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ ที่อายุ 3 และ 7 วัน จะมีกำลังอัดและกำลังดึงลดลงเมื่อใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น และที่อายุ 28 วัน กำลังอัดและกำลังดึงจะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดเหมาะสมที่สุด ที่ปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุผง ต่อจากนั้นกำลังอัดและกำลังดึงก็จะลดลง คอนกรีตผสมเถ้าแกลบมีกำลังอัดและกำลังดึงต่ำกว่าคอนกรีตที่ทำจาก

ตารางที่ 7 กำลังดึงของคอนกรีต

Type of Concrete	Age (days)	Tensile Strength (ksc)					Tensile Strength (%)
		W/C+RHA					
		0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	
C – OPC	3	25.95	21.75	17.02	15.68	13.50	100
C - 10 RHA	3	22.20	19.48	16.62	14.16	12.90	91.60
C - 20 RHA		18.20	16.04	14.59	12.88	11.20	79.73
C - 30 RHA		15.56	14.09	13.32	10.70	9.87	71.52
C - 40 RHA		-	11.55	9.16	8.15	6.71	51.76
C - 50 RHA		-	-	6.11	4.74	3.53	33.43
C – OPC	7	32.54	30.49	25.81	22.18	20.12	100
C - 10 RHA	7	28.84	25.56	23.33	17.90	16.18	85.40
C - 20 RHA		27.43	24.96	21.34	17.38	15.26	80.07
C - 30 RHA		24.55	21.98	19.53	16.80	14.42	73.67
C - 40 RHA		-	18.18	15.50	13.51	11.73	59.60
C - 50 RHA		-	-	10.35	9.44	8.35	41.33
C – OPC	28	46.07	39.11	34.34	29.01	24.89	100
C - 10 RHA	28	37.85	28.50	25.38	21.42	18.79	77.51
C - 20 RHA		41.75	34.55	30.08	25.31	22.36	89.10
C - 30 RHA		38.04	30.21	26.74	22.75	20.39	79.90
C - 40 RHA		-	25.84	20.30	19.13	17.61	68.34
C - 50 RHA		-	-	18.69	16.06	14.79	56.40

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน โดยที่ผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนแสดงในตารางที่ 5 และ 7 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ ที่มีปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุผง จะมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับมาตรฐาน ACI 318 [5] แต่คอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่มีปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุผง จะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ACI ดังจะเห็นได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังดึงในรูปที่ 3 ซึ่งสรุปได้ว่า คอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่มีกำลังอัดประมาณ 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังดึงสูงกว่ามาตรฐาน ACI



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังดึงของคอนกรีต

8. กำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

สารประกอบหลักที่สำคัญ 4 ชนิด ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) สารประกอบหลักดังกล่าวเกิดจากการรวมตัวของสารประกอบประเภทออกไซด์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นออกไซด์หลัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยปกติจะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ประมาณร้อยละ 60 ถึง 67 โดยน้ำหนัก [6] เมื่อผสมปอชโซลานหรือเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ได้วัสดุผงที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ลดลง เนื่องจากปอชโซลานหรือเถ้าแกลบ มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากงานวิจัยของ SRICHOO [7] ได้ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40, 50, และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุผง ทำให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผงมีปริมาณลดลงตามลำดับ ผลการทดสอบที่แสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผง สรุปได้ว่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผงที่เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผงหาได้จากสมการดังนี้

$$S = (W_c \cdot CaO_c + W_{FA} \cdot CaO_{FA}) / 100 \quad (1)$$

ที่ S = ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ทั้งหมดในวัสดุผง มีหน่วยเป็น กก./ม.³

W_c = ปริมาณของปูนซีเมนต์ มีหน่วยเป็น กก./ม.³

W_{FA} = ปริมาณของเถ้าลอย มีหน่วยเป็น กก./ม.³

CaO_c = ปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ในปูนซีเมนต์

และ CaO_{FA} = ปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอย

งานวิจัยนี้ใช้ปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุผง ในการทำคอนกรีตทดสอบเมื่อใช้สมการที่ (1) คำนวณหาปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผง (S) พบว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผงจะลดลงตามลำดับ ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผง

RHA (%)	Calcium Oxide (% , CaO)		Cementitious Material (kg/m ³)		S (kg/m ³)
	OPC	RHA	OPC	RHA	
10	64.42	0.98	315	35	203.26
20	64.42	0.98	280	70	181.06
30	64.42	0.98	245	105	158.86
40	64.42	0.98	210	140	136.65
50	64.42	0.98	175	175	114.45

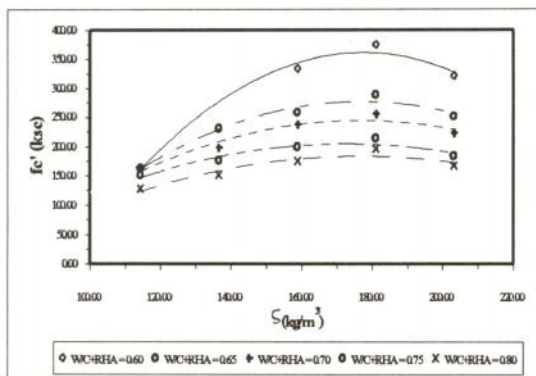
การหาความสัมพันธ์ของกำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบในงานวิจัยนี้ มีข้อกำหนด ดังต่อไปนี้คือ

1. คอนกรีตใช้ปริมาณปูนซีเมนต์อยู่ระหว่าง 175 ถึง 315 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ/หรือวัสดุผงมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ระหว่าง 114 ถึง 203 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2. ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงอยู่ในช่วง 0.60 ถึง 0.80

3. เสนอค่าลึงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่อายุ 28 วัน

เมื่อนำผลการทดสอบค่าลึงอัด (f_c') ของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ ที่อายุ 28 วัน กับปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผง (ζ) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์แสดงในรูปที่ 4 พบว่าค่าลึงอัดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น จนถึงจุดเหมาะที่สุดที่ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผงเท่ากับ 181 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือวัสดุผงมีปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุผง ต่อจากนั้นค่าลึงอัดจะลดลง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลึงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผง

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f_c' กับ ζ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่างๆ ในรูปที่ 4 พบว่ารูปแบบที่เหมาะสมกับความสัมพันธ์จากการปรับเส้นโค้งให้เข้ากับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบอยู่ในรูปของฟังก์ชันแบบพหุนามกำลังสอง (Quadratic Polynomial) ดังนี้ คือ

$$f_c'(\zeta) = a_2 \zeta^2 + a_1 \zeta + a_0 \quad (2)$$

ค่า a_2 , a_1 และ a_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ค่าลึงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ใช้ในส่วนผสม โดยสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$a_2 = -0.9457 (W/C+RHA)^2 + 1.4766 (W/C+RHA) - 0.5909 \quad (3)$$

$$a_1 = 349.03 (W/C+RHA)^2 - 543.68 (W/C+RHA) + 216.79 \quad (4)$$

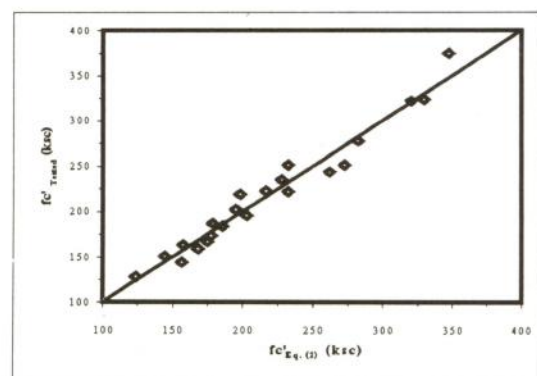
$$a_0 = -29139 (W/C+RHA)^2 + 44914 (W/C+RHA) - 17562 \quad (5)$$

โดยที่ ค่า a_2 , a_1 และ a_0 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/C+RHA) เท่ากับ 0.60 ถึง 0.80 สรุปในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์ค่าลึงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

W/C+RHA	a_2	a_1	a_0
0.60	-0.045392	16.23280	-1,103.64
0.65	-0.030668	10.86317	-679.12
0.70	-0.020673	7.23870	-400.31
0.75	-0.015406	5.35937	-267.18
0.80	-0.014868	5.22520	-279.76

เมื่อใช้สมการที่ (2) คำนวณค่าลึงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ พบว่าค่าลึงอัดที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f_c' กับ ζ มีค่าคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับค่าลึงอัดที่ได้จากการทดสอบประมาณร้อยละ ± 5.46 ดังแสดงในรูปการกระจายตัวของค่าลึงอัดที่ได้จากการทดสอบกับค่าลึงอัดที่ได้จากสมการที่ (2) ในรูปที่ 5 และแสดงรายละเอียดค่าคลาดเคลื่อนในตารางที่ 10



รูปที่ 5 การกระจายตัวของค่าลึงอัดที่ได้จากการทดสอบ กับค่าลึงอัดที่ได้จากสมการที่ (2)

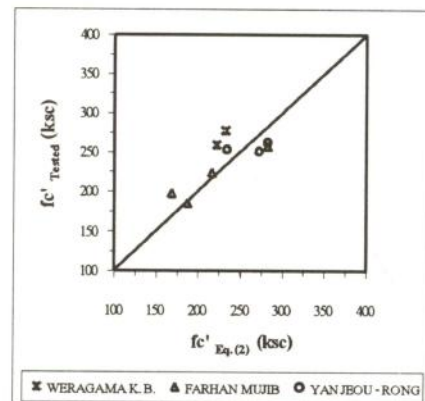
ผลการทดสอบค่าลึงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตได้แก่ WERAGAMA [8], MUJIB [9] และ RONG [10] เปรียบเทียบกับค่าลึงอัดที่ได้จากสมการที่ (2) พบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ ± 11.86 ดังแสดงในรูปการกระจายตัวของค่าลึงอัดที่ได้จากการทดสอบกับค่าลึงอัดที่ได้จากสมการที่ (2) ในรูปที่ 6 และแสดงรายละเอียดค่าคลาดเคลื่อนในตารางที่ 11

ตารางที่ 10 ค่าคลาดเคลื่อนของกำลังอัดที่ได้จากสมการที่ (2)
เมื่อเทียบกับกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบ

Type of Concrete	W/C+RHA	fc' (ksc)		% of Error
		Tested	Eq. (2)	
C 10 RHA	0.60	321.55	320.48	+ 0.33
	0.65	243.18	261.87	- 7.68
	0.70	222.34	216.93	+ 2.43
	0.75	183.58	185.65	- 1.12
	0.80	158.81	168.04	- 5.81
C 20 RHA	0.60	374.91	347.40	+ 7.33
	0.65	277.40	282.37	- 1.79
	0.70	250.63	232.61	+ 7.18
	0.75	218.48	198.12	+ 9.31
	0.80	186.96	178.90	+ 4.31
C 30 RHA	0.60	323.21	329.56	- 1.96
	0.65	250.63	272.64	- 8.78
	0.70	234.65	227.91	+ 2.87
	0.75	202.02	195.40	+ 3.27
	0.80	167.12	175.10	+ 4.77
C 40 RHA	0.65	221.70	232.65	- 4.94
	0.70	195.78	202.82	- 3.59
	0.75	173.32	177.48	- 2.40
	0.80	144.11	156.63	- 8.68
C 50 RHA	0.70	163.10	157.37	+ 3.51
	0.75	151.15	144.40	+ 4.46
	0.80	127.54	123.51	+ 3.15
The standard error of estimation				± 5.46

ตารางที่ 11 ค่าคลาดเคลื่อนของกำลังอัดที่ได้จากสมการที่ (2)
เมื่อเทียบกับกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมานในอดีต

WERAGAMA [8]					
Mix No.	Weight (kg/m ³)		fc' (ksc)		% of Error
	OPC	RHA	Tested	Eq. (2)	
1	201	136	258.30	222.18	+13.98
2	207	140	277.60	232.52	+16.24
MUJIB [9]					
Mix No.	Weight (kg/m ³)		fc' (ksc)		% of Error
	OPC	RHA	Tested	Eq. (2)	
1	267	144	256.31	282.80	-10.33
2	222	182	223.06	216.67	+2.86
3	222	182	185.01	187.45	-1.32
4	226	185	197.70	168.95	+14.54
RONG [10]					
Mix No.	Weight (kg/m ³)		fc' (ksc)		% of Error
	OPC	RHA	Tested	Eq. (2)	
1	283	50	261.50	282.65	-8.08
2	250	83	250.50	272.59	-8.82
3	117	117	253.00	234.38	+7.36
The standard error of estimation					± 11.86



รูปที่ 6 การกระจายตัวของกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมามีในอดีตกับกำลังอัดที่ได้จากสมการที่ (2)

9. สรุป

กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดเหมาะสม (ปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุผง) ต่อจากนั้นกำลังอัดและกำลังดึงก็จะลดลง โดยที่คอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่มีปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ระหว่างร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนักของวัสดุผง และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงระหว่าง 0.60 ถึง 0.80 จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประมาณ 160 ถึง 370 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ เถ้าแกลบที่เหลือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอิฐมวลเบา มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานประเภท N ตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผลิตคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตจะมีผลทำให้ความหนาแน่นและการยุบตัวของคอนกรีตลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

10. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ บริษัทสยามวิจัยและพัฒนา (กรุงเทพฯ) จำกัด ที่กรุณาวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ และขอขอบคุณโรงอิฐรูปะเดมิย์ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเถ้าแกลบที่ใช้ในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์สารสนเทศการเกษตร “สถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย ปีเพาะปลูก 2538/39” สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [2] P. NIMITYONGSKUL, N.W.J.A. De SILVA and P. KARASUDHI, “Current Stage of Research on Reactivity of RHA Cement”, Proc. Fifth. Sym. Concrete Technology, Mexico, 1981, pp. 185 – 216.
- [3] บุรฉัตร จักรวีระ และพิชัย นิมิตรยงสกุล “ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ เถ้าลอย และสารลดน้ำพิเศษ” วารสารเทคโนโลยีสุรนารี ฉบับที่ 2 ปีที่ 1 กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2537 หน้า 109 – 122.
- [4] S. MINDESS and J.F. YOUNG, “Concrete”, Prentice – Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 1981.
- [5] ACI 318, “Building Code Requirement for Reinforced Concrete”, American Concrete Institute.
- [6] ชัชวาลย์ เสริมบุญตร “คอนกรีตเทคโนโลยี” คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด.
- [7] A.T. SRICHOO, “Development of Low Heat Concrete Using Fly Ash and Pumicite”, M.Eng. Thesis No. ST-97-21, A.I.T., Bangkok.
- [8] WERAGAMA, K. B. WICKRAMA “A Reliable Mix Design Method for Rice Husk Ash Concrete”, M.Eng. Thesis No. ST-84-34, A.I.T., Bangkok.
- [9] F. MUJIB, “An Alternative Mix Design Method for Rice Husk Ash Concrete”, M.Eng. Thesis No. ST-87-38, A.I.T., Bangkok.
- [10] Y.J. RONG, “Temperature Control in Mass Concrete Using Pozzolanic Materials”, M.Eng. Thesis No. ST-87-36, A.I.T., Bangkok.

