

สมรรถนะของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบต่อการกัดกร่อนด้วยกรดไนตริกและอะซิติก

Performance of Mortar Cement Containing Black Rice Husk Ash upon Nitric and Acetic Acids Corrosion

บุรฉัตร ฉัตรวิริยะ^[1] และ ณรงค์ศักดิ์ มากุล^[2]

Burachat Chatveera^[1] and Narongsak Makul^[2]

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คลองหลวง ปทุมธานี 12121

โทรศัพท์ : (+662) 564-3001-9 ต่อ 3105 โทรสาร: (+662) 564-3010

Email: ^[1]cburacha@engr.tu.ac.th and ^[2]shinomomo7@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอสมรรถนะของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบภายใต้การกระทำเนื่องจากกรด โดยเถ้าแกลบที่ใช้ได้จากรังผลิตรถไฟฟ้าซึ่งใช้เถ้าแกลบเป็นเชื้อเพลิงมาผ่านการบดด้วยเครื่องบดชนิดต้นตุนต่ำ คุณสมบัติที่ทำการศึกษาคือ การสูญเสียกำลังอัดและน้ำหนัก และการหดตัวและ/หรือขยายตัวภายใต้การกัดกร่อนเนื่องจากกรดไนตริก (HNO_3) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) จากผลการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าแกลบตามมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับการบดเถ้าแกลบคือ 4 ชั่วโมง ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะในมวลละเอียดแบบเบลนเท่ากับ $5,370 \text{ cm}^2/\text{g}$. ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ อัตราส่วนการแทนที่โดยน้ำหนักของเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์และ/หรือเถ้าแกลบ) เท่ากับ 0.55, 0.60 และ 0.65 จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดและน้ำหนักที่สูญเสียไปของมอร์ตาร์ภายใต้การกระทำเนื่องจากกรดไนตริกมากกว่ามอร์ตาร์ซึ่งถูกกระทำจากกรดอะซิติก สำหรับมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีอัตราการขยายตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ปกติ ส่วนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มากกว่ามีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่กำหนดความทนทานของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ

Abstract

This paper presents the performance of mortar cement containing black rice husk ash (BRHA) under acid attack. The BRHA received from electrical generating power plant using rice husk as fuel was ground by using the comparatively low cost grinding machine. The strength loss, weight loss, and shrinkage and/or expansion under nitric (HNO_3) and acetic (CH_3COOH) acids corrosion were

investigated. The test results of BRHA properties in accordance with the ASTM C 618 standard found that the optimal grinding time was 4 hours as the Blaine fineness equals to $5,370 \text{ cm}^2/\text{g}$. The studied variables were the replacement percentages of BRHA by weight of Portland cement type I (0, 10, 20, 30, 40, and 50%) and water-to-binder (cement and BRHA) ratios (0.55, 0.60, and 0.65). From the test results, when the percentage replacements of BRHA in cement increased, it was observed that the strength loss and weight loss of mortar containing BRHA under nitric acid attack were higher than those of the BRHA and normal mortars against acetic acid attack. By replacing the 20% BRHA in Portland cement, strength loss and weight loss were the lowest in BRHA mortar. For both 10% and 20% BRHA replacements, the rate of expansion of BRHA mortar decreased when compared with the normal mortar. For the mortars with other percentage replacements of BRHA, the rate of expansion increased. Furthermore, the effective water-to-binder ratios of normal and BRHA mortars were the primary factor for determining the durability of mortar mixed with BRHA.

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการนำเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาไหม้มาทดแทนปริมาณของปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ พบว่าเถ้าแกลบที่ผ่านกระบวนการบดมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 80 และมีคุณสมบัติอื่นที่สามารถจัดได้ว่าเป็นวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [1] และเมื่อพิจารณาเรื่องของราคา เถ้าแกลบมีราคาถูกจึงควรมีการส่งเสริมให้มีการวิจัยเพื่อพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานในธุรกิจอุตสาหกรรมมากขึ้น

เนื่องจากสภาวะแวดล้อมปัจจุบันที่เต็มไปด้วยมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ และโรงงานต่างๆ ซึ่งในการเผาไหม้ดังกล่าวทำให้เกิดก๊าซที่มีองค์ประกอบของก๊าซไนโตรเจน เมื่อก๊าซดังกล่าว

RECEIVED 14 March, 2006

ACCEPTED 13 September, 2006

รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดเป็นสารประกอบกรดไนตริกขึ้นซึ่งมีผลกระทบต่อความทนทานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ในขณะที่กรดอะซิติกเป็นกรดอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายทั้งชนิดที่ใช้และไม่ใช้ออกซิเจน [2] ซึ่งมีผลกระทบต่อความทนทานและปัญหาการกัดกร่อนของอาคารโรงงานที่ใช้ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาคุณสมบัติทางความทนทานของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำเมื่อต้องเผชิญกับการกัดกร่อนของกรดไนตริกและอะซิติกในรูปดัชนีของการสูญเสียกำลังอัด การยืดหดตัว การสูญเสียน้ำหนักโดยเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุผงเพียงอย่างเดียว

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. เถ้าแกลบดำที่ใช้ มาจากโรงไฟฟ้าปทุมไรซ์มิล แอนด์ แกรนารี จำกัด (มหาชน) จังหวัดปทุมธานี โดยเถ้าแกลบที่ใช้ในการศึกษา คือ เถ้าแกลบที่ผ่านการบดเป็นเวลา 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง [3,4] ตามลำดับ
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
3. ทราย ทรายแม่น้ำ มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33 [5] และมีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.63

2.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

1. อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบดำเท่ากับร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก
2. สัดส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.55, 0.60 และ 0.65
3. กรดไนตริกและอะซิติกซึ่งเป็นกรดอินทรีย์และกรดอินทรีย์ตามลำดับ โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือคิดในรูปค่าความเป็นกรดค่า (pH) ของสารละลายเท่ากับ 0.89 และ 2.87 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าความเป็นกรดที่กำหนดไว้สูงกว่าความเป็นจริงในธรรมชาติ อาทิเช่น ฝนกรดที่มีค่า pH ประมาณ 4.5 [6] เนื่องจากค่า pH ที่สูงจะช่วยเร่งการกัดกร่อนของกรด

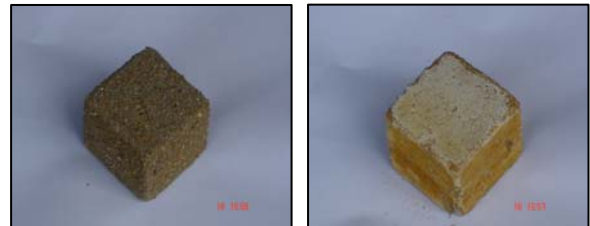
2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การสูญเสียกำลังอัดจากการกัดกร่อนของกรด

การทดสอบกำลังอัดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 39 [7] โดยใช้แบบหล่อมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. โดยการนำตัวอย่างทำการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างทดสอบไปบ่มในสารละลายกรดไนตริกและอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลา 0, 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

2.3.2 น้ำหนักที่เกิดการสูญเสียในระหว่างการกัดกร่อนโดยกรด

โดยการนำมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. ทำการบ่มในน้ำจนครบ 28 วัน แล้วจึงนำไปบ่มในสารละลายกรดไนตริกและอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบที่เวลา 0, 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยนำมอร์ตาร์มาชั่งหาน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น ดังแสดงตัวอย่างมอร์ตาร์ซึ่งมีเถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65 หลังการแช่กรดในรูปที่ 1



(ก) กรดไนตริก

(ข) กรดอะซิติก

รูปที่ 1 ตัวอย่างมอร์ตาร์ซึ่งมีเถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65 หลังการแช่กรด (ก) กรดไนตริก (ข) กรดอะซิติก

2.3.3 การเปลี่ยนแปลงความยาวในระหว่างการกัดกร่อนโดยกรด

การทดสอบการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นตามมาตรฐาน ASTM C 596 [8] โดยใช้เครื่องมือวัดการยืดหดตัววัดการขยายตัวและหดตัวของแท่งมอร์ตาร์ขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังถอดแบบเมื่อมอร์ตาร์มีอายุครบ 23½ ± ½ ชั่วโมง แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปวัดความยาวเริ่มต้น จากนั้นนำแท่งตัวอย่างไปแช่ในสารละลายกรดไนตริกและอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเริ่มวัดการหดและ/หรือขยายตัวแบบแห้งที่เวลา 0, 3, 4, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยการทดสอบจะมีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60 ± 5 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบนี้จะสามารถหาความยาวที่เปลี่ยนไปได้ ดังสมการที่ (1)

$$\Delta L = \left(\frac{L_i - L_o}{L_G} \right) \times 100\% \quad (1)$$

โดย ΔL = อัตราส่วนเปลี่ยนแปลงความยาว (ร้อยละ)

L_i = ความยาวที่ระยะเวลาบ่ม (มม.)

L_o = ความยาวเริ่มต้น (มม.)

L_G = Nominal Gauge Length มีค่าเท่ากับ 250 มม.

หมายเหตุ ในระหว่างที่ตัวอย่างแช่อยู่ในกรดของการทดสอบกำลังอัด การสูญเสียน้ำหนักและการทดสอบยืดหดตัวของแท่งมอร์ตาร์มีความเข้มข้นของสารละลายจะน้อยลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มมากขึ้นจึงจำเป็นต้องมี

การปรับความเข้มข้นของสารละลายอยู่เสมอ โดยการวัดค่าความเป็นกรดค่าของสารละลายกรดและปรับให้มีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้น



รูปที่ 2 ตัวอย่างมอร์ตาร์หลังการแช่กรดซึ่งมีเถ้าเคลือบแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65

สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ กก./ม. ³	เถ้าเคลือบ กก./ม. ³	ทราย กก./ม. ³	น้ำ กก./ม. ³
0BRHA0.55	518	0	1425	285
10BRHA0.55	466	52	1425	285
20BRHA0.55	414	104	1425	285
30BRHA0.55	363	155	1425	285
40BRHA0.55	311	207	1425	285
50BRHA0.55	259	259	1425	285
0BRHA0.60	505	0	1389	303
10BRHA0.60	454	51	1389	303
20BRHA0.60	404	101	1389	303
30BRHA0.60	353	152	1389	303
40BRHA0.60	303	202	1389	303
50BRHA0.60	252	253	1389	303
0BRHA0.65	493	0	1354	320
10BRHA0.65	444	49	1354	320
20BRHA0.65	394	99	1354	320
30BRHA0.65	345	148	1354	320
40BRHA0.65	296	197	1354	320
50BRHA0.65	246	247	1354	320

หมายเหตุ สัญลักษณ์ xBRHAy คือ มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนที่ของเถ้าเคลือบเท่ากับร้อยละ x ในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ y และกำหนดอัตราส่วนทรายต่อวัสดุผงเท่ากับ 2.75 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

3.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าเคลือบดำ

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าเคลือบดำแสดงในตารางที่ 2 พบว่าซิลิกอน

ไดออกไซด์ (SiO₂) มีค่ามากกว่าร้อยละ 80 ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีร้อยละ 20.84 ในขณะที่ปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ในเถ้าเคลือบดำมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณไอรอนออกไซด์นั้น เถ้าเคลือบมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1.0 ถึง 2.5

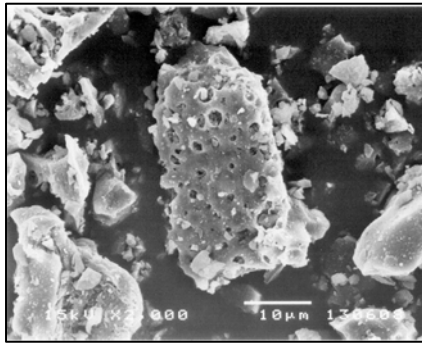
ในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพเพื่อพิจารณาหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการบดเถ้าเคลือบ ซึ่งพิจารณาในส่วนของคุณสมบัติที่สำคัญโดยการเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน พบว่าคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าเคลือบดำที่ระยะเวลาการบด 1, 2 และ 3 ชั่วโมงมีค่าต่ำกว่าเถ้าเคลือบที่เวลา 4, 5 และ 6 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 2

จากภาพถ่ายขยายลักษณะผิวของเถ้าเคลือบ พบว่าเถ้าเคลือบดำมีผิวขรุขระดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1^[3] และเถ้าเคลือบดำ

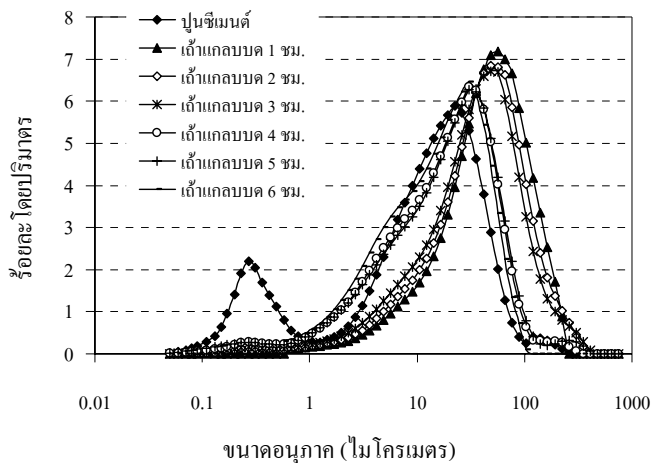
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	[3]	เถ้าเคลือบดำที่ผ่านการบดเป็นเวลา (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
1) ซิลิกอนไดออกไซด์	20.84	90.61	91.84	91.02	90.63	93.10	90.62
2) อะลูมิเนียมออกไซด์	5.22	0.5	0.50	0.53	0.52	0.52	0.50
3) ไอรอนออกไซด์	3.20	1.40	1.40	1.55	2.00	1.35	2.42
4) แคลเซียมออกไซด์	66.28	0.82	0.82	0.93	0.85	0.80	0.77
5) แมกนีเซียมออกไซด์	1.24	0.50	0.50	0.47	0.37	0.40	0.32
6) โพแทสเซียมออกไซด์	0.22	1.92	1.92	2.30	1.95	2.00	1.86
7) โซเดียมออกไซด์	0.10	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02
8) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	2.41	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
9) โพแทสเซียมออกไซด์	0.25	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09
10) แคลเซียมออกไซด์	0.99	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06	0.06
อิสระ							
คุณสมบัติทางกายภาพ	[3]	1	2	3	4	5	6
1) LOI (%)	0.96	0.82	0.65	0.58	0.84	0.64	0.62
2) Moisture Content (%)	0.19	1.09	1.23	1.02	1.13	0.98	0.98
3) Surface Area (cm ² /g)	3248	2734	2958	4809	5372	5548	5685
4) Specific Gravity	3.014	2.13	2.18	2.30	2.30	2.35	2.38
5) Fineness (Particle Size, % Retained)							
- ≥ 75 μm	0.50	15.63	11.32	7.88	0.95	0.56	0.34
- 75 μm	5.25	23.00	20.76	20.47	6.06	6.34	3.51
- 45 μm	3.60	7.89	7.04	7.18	5.50	4.63	3.82
- ≤ 36 μm	90.62	53.48	60.88	64.47	87.49	88.47	92.33
6) Fineness (Retained on 45 Micron (No. 325)	5.75	38.63	32.08	28.35	7.01	6.90	3.85
7) Strength Activity Index							
7 day (% of control)	100	71	77	77	79	87	91
28 day (% of control)	100	63	73	73	77	88	91
8) Water Requirement	100	112	110	110	103	103	103
9) Bulk Density (kg / l)	1.03	0.66	0.67	0.68	0.70	0.71	0.72

หมายเหตุ ^[3] คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 3 ภาพถ่ายขยายอนุภาคเถ้ากลบที่ผ่านการบดเวลา 4 ชั่วโมง
(ขนาดกำลังขยายที่ 2,000 เท่า)

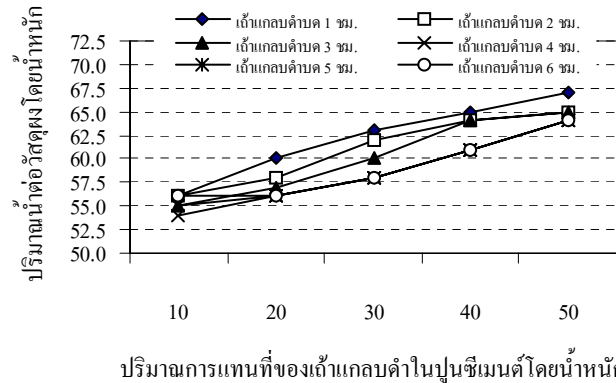
เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายอนุภาคของเถ้ากลบดำบดที่ระยะเวลาต่างกัน พบว่าระยะเวลาในการบดที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ขนาดของอนุภาคของเถ้ากลบเล็กลง โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้ากลบดำที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง เท่ากับ 70 ไมโครเมตร และที่ถูกบดเป็นเวลา 4, 5 และ 6 ชั่วโมง มีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์มาก แต่บางส่วนของปูนซีเมนต์จะมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 ไมโครเมตร ปูนซีเมนต์จึงมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยละเอียดกว่าเถ้ากลบดำที่ระยะเวลา 4, 5 และ 6 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การกระจายขนาดของเถ้ากลบดำที่ผ่านการบดเป็นเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 6 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

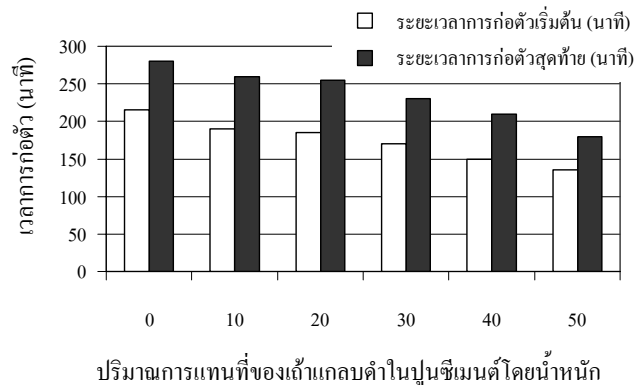
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ของเถ้ากลบดำในปูนซีเมนต์กับปริมาณน้ำต่อวัสดุผงโดยน้ำหนักที่ทำการไหลผ่านเท่ากับร้อยละ 110 ± 5 พบว่าเวลาในการบดเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความต้องการน้ำต่อวัสดุผงลดลง เนื่องจากเวลาการบดที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคมีความพรุนลดลง โดยเถ้ากลบดำบดที่ระยะเวลา 4, 5 และ

6 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกันทุกอัตราส่วนการแทนที่ในปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ปริมาณความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากลบดำ

สำหรับเวลาที่ใช้ในการก่อตัวกับปริมาณการแทนที่ของเถ้ากลบดำในปูนซีเมนต์ พบว่าเมื่อร้อยละการแทนที่ของเถ้ากลบดำเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาในการก่อตัวของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำลดลงซึ่งอธิบายได้ว่า เถ้ากลบเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีลักษณะพรุน จึงสามารถดูดซับน้ำได้มาก ดังนั้นปริมาณเถ้ากลบที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ปริมาณน้ำที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6



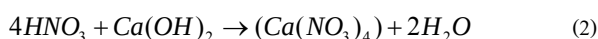
รูปที่ 6 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ปกติและผสมเถ้ากลบดำ

ผลการทดสอบที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าเถ้ากลบดำบดที่ระยะเวลา 4, 5 และ 6 ชั่วโมง มีคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนด นอกจากนั้นค่าความแตกต่างของค่าความละเอียดของอนุภาคเถ้ากลบดำลดลงเมื่อระยะเวลาการบดเพิ่มขึ้นและมีค่าเกือบคงที่ภายหลังผ่านการบดที่ 4 ชั่วโมง นอกจากนั้นหากเปรียบเทียบในเรื่องของค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการบดที่ 4 ชั่วโมง จะประหยัดและอยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้งานได้

3.2 กำลังที่เกิดการสูญเสียในระหว่างการกักกร่อนโดยกรด

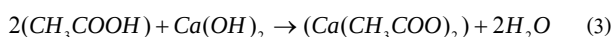
3.2.1 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากกรดไนตริก

รูปที่ 7 แสดงแนวโน้มของการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการกักกร่อนของกรดไนตริกทั้งมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำ ซึ่งพบว่ามอร์ตาร์ที่ทำการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์ปกติ ในขณะที่มอร์ตาร์ซึ่งมีส่วนร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบเท่ากับ 40 และ 50 มีแนวโน้มของการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ปกติ ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผล 2 ประการกล่าวคือ การแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสม [9] ซึ่งมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดี [2] ทำให้มอร์ตาร์มีความทึบน้ำหรือความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (ความสามารถรับกำลังอัดเพิ่มขึ้น) และผลอีกส่วนหนึ่งมาจากการทำปฏิกิริยาของกรดไนตริกดังแสดงในสมการที่ (2) จะเห็นว่าเมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้สารตั้งต้นของปฏิกิริยาของกรดไนตริกลดลงเป็นผลให้การกักกร่อนจากกรดลดลง แต่กระนั้นเมื่อการแทนที่ของเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 ถึง 50 อันมีอิทธิพลต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ลดลง ทั้งนี้เพราะแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ประกอบกับความพรุนของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้น [2] ทำให้ไอออนกรดแทรกซึมเข้าไปทำลายภายในเนื้อมอร์ตาร์ได้เพิ่มขึ้น

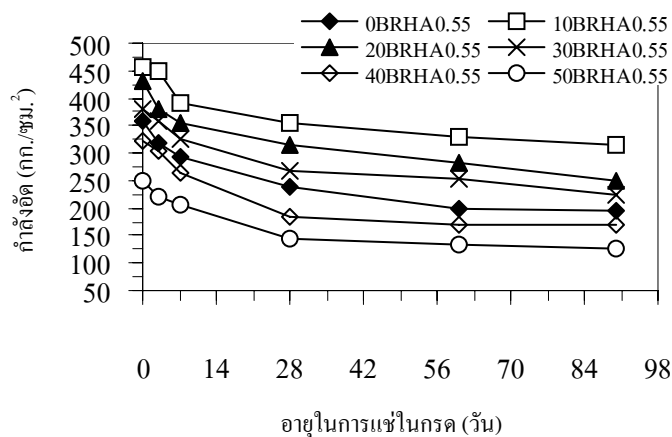


3.2.2 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากกรดอะซิติก

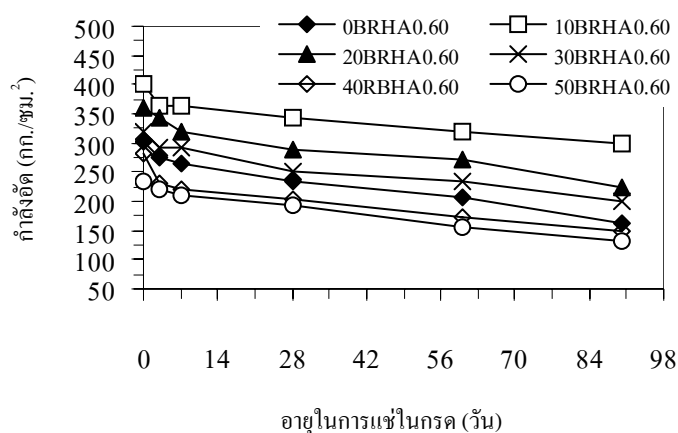
ผลของการกักกร่อนเนื่องจากกรดอะซิติกที่มีต่อการสูญเสียกำลังอัดแสดงในรูปที่ 8 พบว่าแนวโน้มของการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ตาร์มีลักษณะเช่นเดียวกับการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการกักกร่อนเนื่องจากเหตุผลข้างต้น ประกอบกับผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาของไอออนกรดอะซิติกดังสมการที่ (3) คือแคลเซียมอะซิเตต ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) มีความสามารถในการละลายน้ำที่สูง (43.6 กรัม ในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) [10] ทำให้ไอออนของกรดอะซิติกสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ดีและอย่างต่อเนื่อง



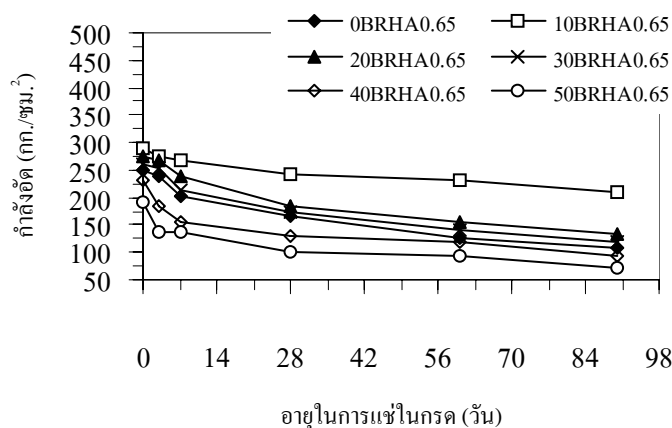
เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการต้านทานต่อการกักกร่อนเนื่องจากกรดลดลง เนื่องจากความพรุนที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำอิสระในเนื้อมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้น [11]



(ก) มอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.55

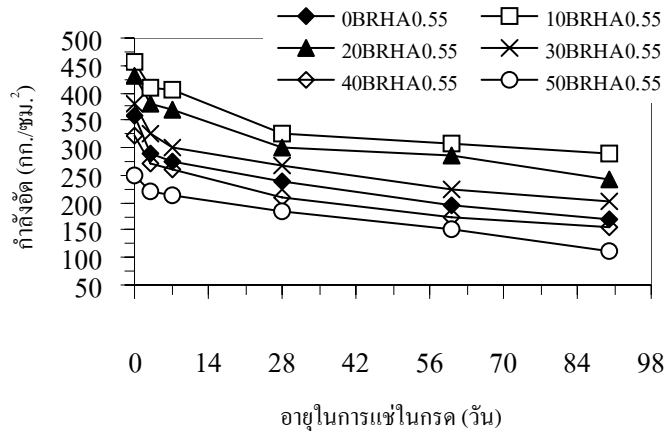


(ข) มอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.60

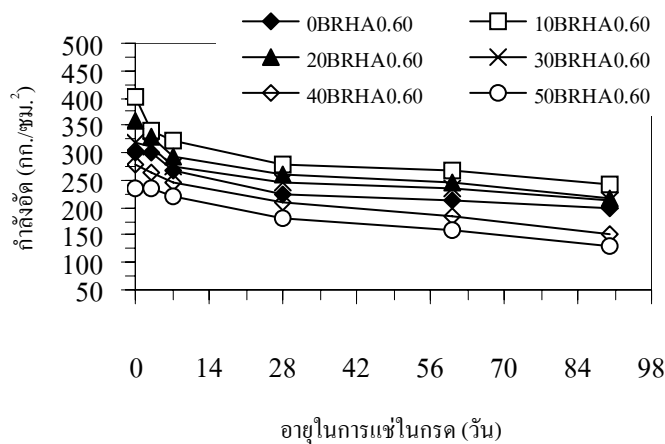


(ค) มอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65

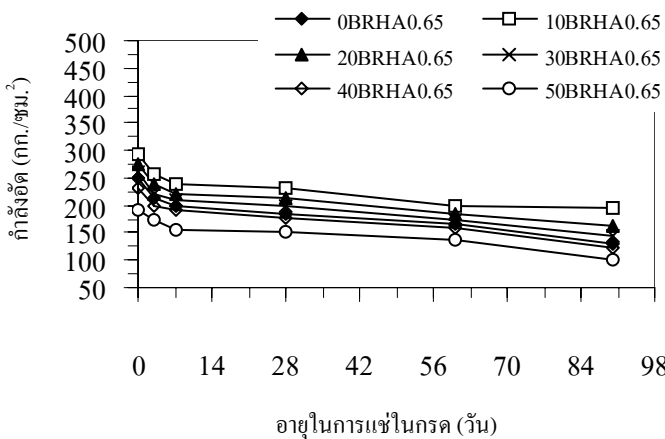
รูปที่ 7 กำลังของมอร์ตาร์เมื่อทำการแช่ในสารละลายกรดไนตริก



(ก) มอร์ต้าร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.55



(ข) มอร์ต้าร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.60



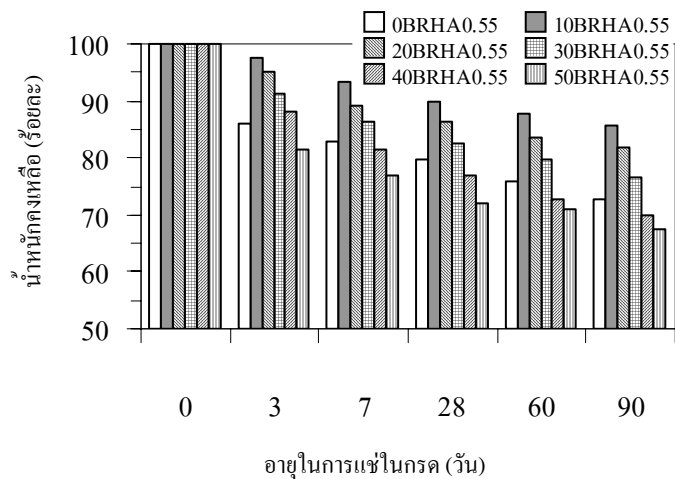
(ค) มอร์ต้าร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65

รูปที่ 8 กำลังของมอร์ต้าร์เมื่อทำการแช่ในสารละลายกรดอะซิติก

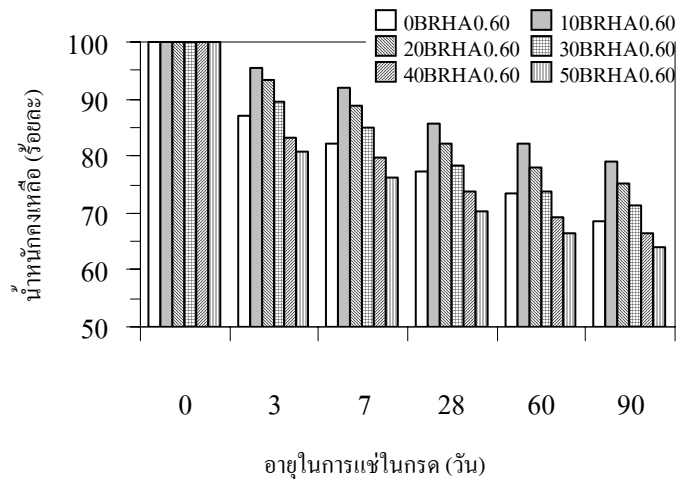
3.3 การสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนของกรด

3.3.1 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไนตริก

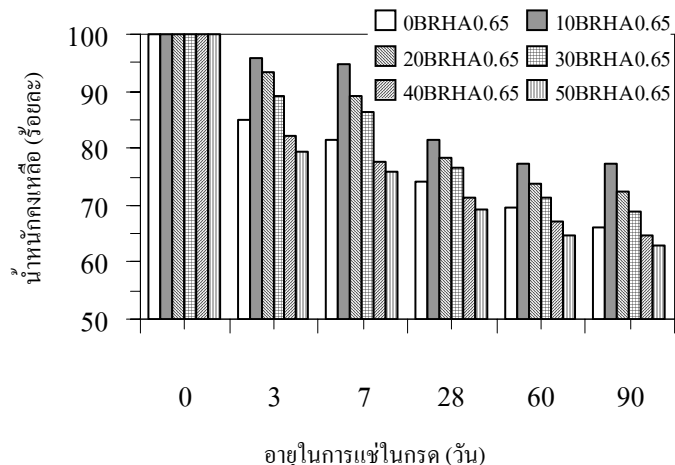
เมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไนตริกหรือในอีกนัยหนึ่งในรูปของความต้านทานจากการกัดกร่อนของกรดไนตริกการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ภายใต้ดัชนีของร้อยละน้ำหนักของเถ้าแกลบดำแสดงในรูปที่ 9 พบว่าแนวโน้มของน้ำหนักที่คงเหลือในทุกๆ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบดำ) โดยมีสัดส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 10, 20 และ 30 ภายใต้จากการกัดกร่อนของสารละลายกรดไนตริกมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าร์ปกติ จากนั้นที่สัดส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบดำร้อยละ 40 และ 50 มอร์ต้าร์มีน้ำหนักคงเหลือต่ำกว่ามอร์ต้าร์ปกติ เนื่องจากโดยปกติแคลเซียมไนเตรด ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) มีความสามารถในการละลายที่สูงมาก (266.0 กรัม ในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ซึ่งสูงกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ผลต่อการตกตะกอนของชั้นที่ถูกกัดกร่อนและมีความพรุนสูง [12,13] จากผลดังกล่าวทำให้ความสามารถในการต้านทานการแพร่ลดลงซึ่งหมายถึงอัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่เมื่อทำการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในช่วงต้นมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งส่งผลต่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากการลดลงดังกล่าวทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างไอออนของกรดไนตริกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ประกอบกับความสามารถในการดูดซับน้ำของเถ้าแกลบดำทำให้ภายในช่องคาวาลารี่มีน้ำลดลงซึ่งมีผลสืบเนื่องถึงการละลายของไอออนกรดไนตริกที่ลดลงตามไปด้วย [14] การกัดกร่อนจึงมีค่าลดลง โดยจะเห็นอย่างชัดเจนเมื่อร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบดำเท่ากับร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่การกัดกร่อนน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปกติ ในขณะที่เมื่อแทนที่ของเถ้าแกลบดำเพิ่มขึ้นทำให้ความพรุนของมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นซึ่งหมายถึงภายในช่องคาวาลารี่มีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไอออนของกรดเข้าไปภายในเนื้อมอร์ต้าร์และทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น ส่วนผลของปริมาณน้ำในมอร์ต้าร์ที่เพิ่มขึ้นทำให้การกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากความพรุนที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



(ก) มอร์ดิอาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำตาลต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.55



(ข) มอร์ดิอาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำตาลต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.60

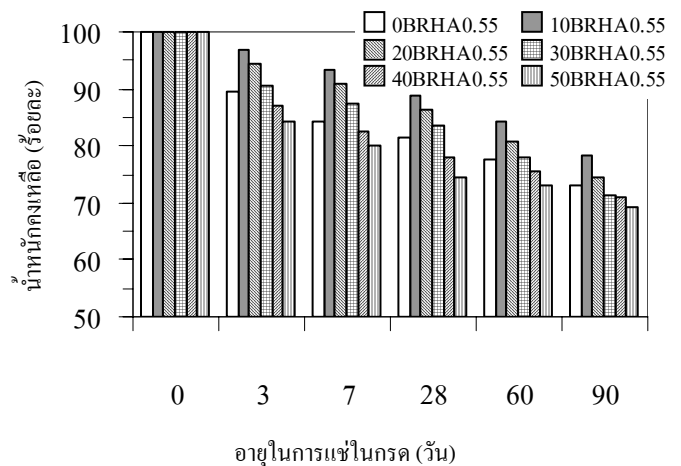


(ค) มอร์ดิอาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำตาลต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65

รูปที่ 9 น้ำหนักคงเหลือของมอร์ดิอาร์เมื่อทำการแช่ในสารละลายกรดไนตริก

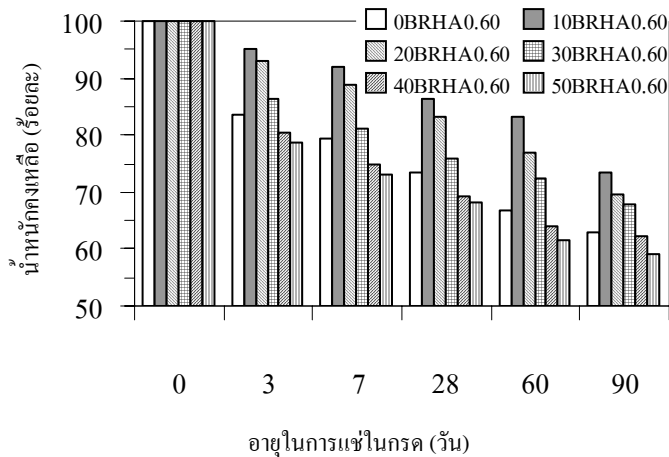
3.3.2 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติก

สำหรับการกลไกการกัดกร่อนของกรดอะซิติก (CH_3COOH) เริ่มขึ้นจากการแตกตัวของไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) และอะซิเตดไอออน (CH_3COO^-) ดังสมการที่ (4) แทรกซึมผ่านทางน้ำในโพรงคาพิลลารีทำให้สภาพสมดุลภายในสูญเสียไป (ความเป็นด่างลดลง) เมื่อค่าความเป็นกรดค่า (pH) ลดลงน้อยกว่า 12.0 จะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ละลายซึ่งส่งผลให้โพรงคาพิลลารีมีความสามารถในการเชื่อมต่อกันมากขึ้น จากนั้นไอออนของกรดจะเข้าไปทำลายโครงสร้างภายในได้ลึกขึ้น นอกจากนั้นความเป็นด่างที่ลดลงทำให้โครงสร้างของแคลเซียมซัลเฟตไฮดรอกไซด์สลายตัวเกิดโพรงขนาดใหญ่ด้วย [2] โดยน้ำหนักคงเหลือของมอร์ดิอาร์ปกติและมอร์ดิอาร์ผสมเถ้าแกลบดำเมื่อถูกแช่ในสารละลายกรดอะซิติกแสดงในรูปที่ 10 พบว่าแนวโน้มคล้ายคลึงกับการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไนตริก โดยมีมอร์ดิอาร์ผสมเถ้าแกลบดำที่อัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 มากกว่ามอร์ดิอาร์ปกติ ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลทางด้านกายภาพและเคมีซึ่งเถ้าแกลบมีความพรุนสูงทำให้ดูดซับน้ำเข้าไปภายในอนุภาคทำให้การแตกตัวของไอออนกรดภายในเนื้อมอร์ดิอาร์ยากขึ้น รวมทั้งการที่ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงทำให้อัตราการผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงตามลำดับ ในขณะที่การแทนที่เถ้าแกลบเพิ่มขึ้นมีผลต่อความพรุนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นอัตราส่วนน้ำตาลต่อวัสดุผงที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการกัดกร่อนของกรดเพิ่มขึ้น

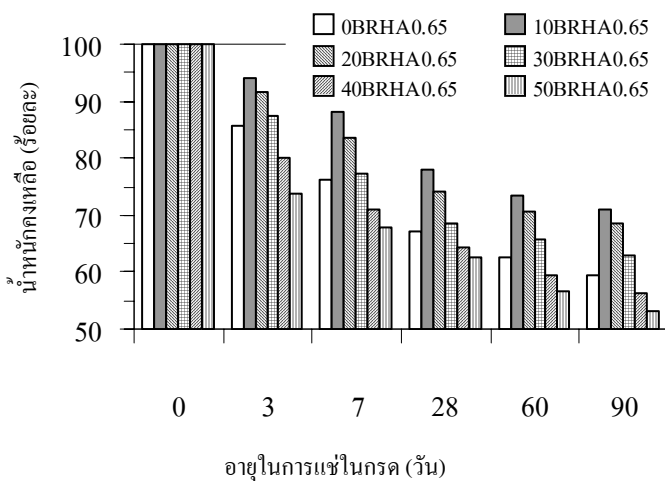


(ก) มอร์ดิอาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำตาลต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.55

รูปที่ 10 น้ำหนักคงเหลือของมอร์ดิอาร์เมื่อทำการแช่ในสารละลายกรดอะซิติก



(ข) มอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.60



(ค) มอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65

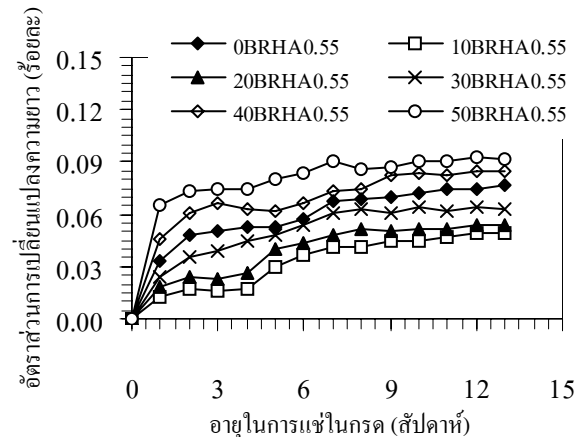
รูปที่ 10 (ต่อ) น้ำหนักงอกเหลือของมอร์ตาร์เมื่อทำการแช่ในสารละลายกรดอะซิติก

3.4 การเปลี่ยนแปลงความยาวในระหว่างการกักคร่อนโดยกรด

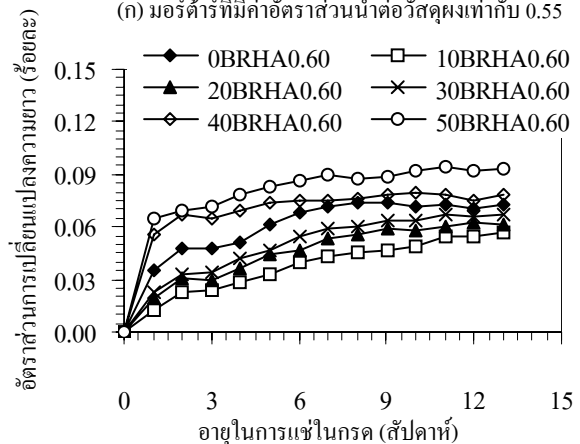
3.4.1 การเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากกรดในตริก

ผลทดสอบการบดและ/หรือการหัดตัวของมอร์ตาร์ภายใต้การกระทำเนื่องจากกรดในตริกแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งพบว่าทั้งมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้ากลบมีการขยายตัว โดยมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้ากลบเท่ากับร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าปกติ ในขณะที่อัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 มีค่าการขยายตัวที่มากกว่ามอร์ตาร์ปกติ ทั้งนี้เพราะโดยธรรมชาติของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาระหว่างไอออนกรดในตริกและแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นปัจจัยเกี่ยวกับการพัฒนาโครงสร้างของมอร์ตาร์จึงเป็นประเด็นสำคัญ กล่าวคือการแทนที่เถ้ากลบในปริมาณที่สูง (ร้อยละ 40 และ 50) ทำให้ความพรุนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ไอออนกรดเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ดี ประกอบกับคุณสมบัติของเถ้ากลบค่าที่เป็นสารปอซโซลาน ดังนั้นการดำเนินปฏิกิริยาจึงไปได้ช้ากว่าปูนซีเมนต์ ผลก็คือโครงสร้างมีแรงยึดเหนี่ยวภายในน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้ากลบในปริมาณที่ต่ำ (ร้อยละ

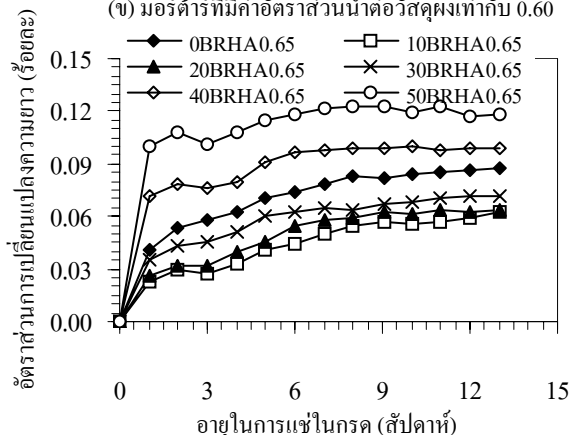
10, 20 และ 30) และมอร์ตาร์ปกติ ดังนั้นปริมาณที่เพิ่มขึ้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้การขยายตัวมีค่ามาก ในขณะที่การแทนที่เถ้ากลบค่าในปริมาณที่ต่ำทำให้โครงสร้างของมอร์ตาร์มีความหนาแน่นมากขึ้นซึ่งมาจากระดับที่ซิลิกอนไดออกไซด์ในมอร์ตาร์ผสมเถ้ากลบทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์



(ก) มอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.55



(ข) มอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.60



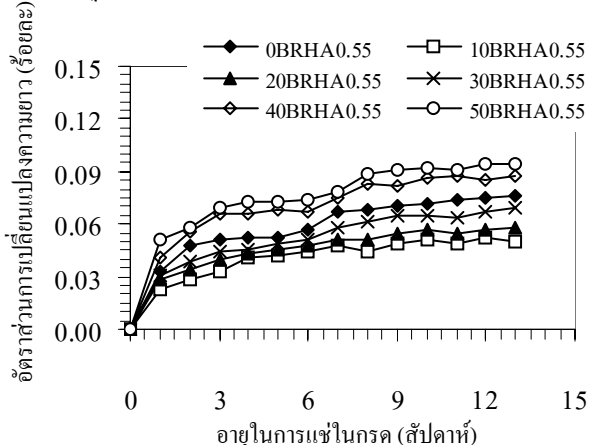
(ค) มอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65

รูปที่ 11 อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความยาวของมอร์ตาร์เมื่อทำการแช่ในสารละลายกรดในตริก

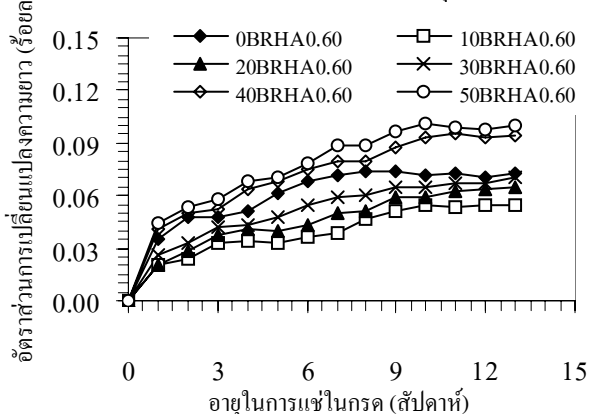
3.4.2 การเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากกรดอะซิติก

ในกรณีของการกัดกร่อนเนื่องจากกรดอะซิติกดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่าในช่วงแรกอัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงและมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ เพราะในช่วงแรกปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีอยู่มากและสามารถละลายออกมาสู่ภายนอกได้ดีทำให้ไอออนของกรดเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี ในขณะที่เมื่อเวลาผ่านไปไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ที่ละลายออกสู่ภายนอกทำให้สารละลายอยู่ในสถานะอิ่มตัว เมื่อสารประกอบดังกล่าวละลายออกหมดเหลือเพียงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่กับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งละลายออกมาได้ยากกว่า ส่งผลให้การละลายลดลง ไอออนกรดจึงทำปฏิกิริยาได้น้อยลง

เช่นเดียวกับแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความยาวของมอร์ตาร์ภายใต้การบ่มในกรดไนตริก การบ่มในกรดอะซิติกทำให้มอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำมีการขยายตัวที่เพิ่มขึ้นกล่าวคือ มอร์ตาร์ที่มีการที่เถ้าแกลบร้อยละ 40 และ 50 มีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ปกติ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีผลไม่มากเมื่อเทียบกับผลของความพรุนในเนื้อมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต่างกับกรณีที่มีมอร์ตาร์ซึ่งมีเถ้าแกลบดำในสัดส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ปกติ ซึ่งมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน

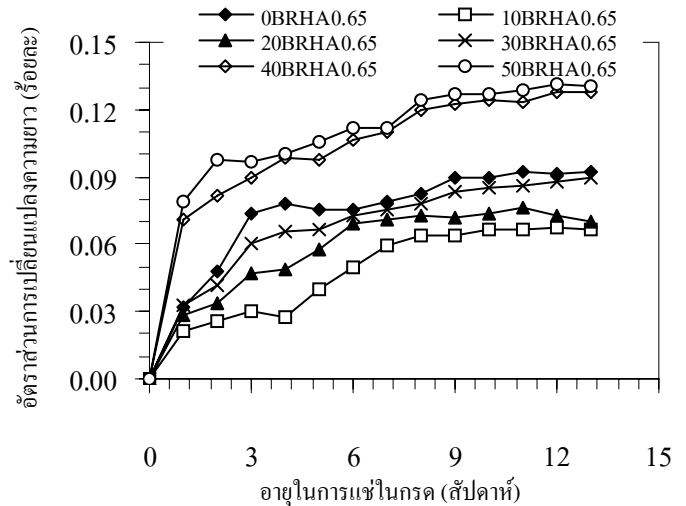


(ก) มอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.55



(ข) มอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.60

รูปที่ 12 อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความยาวของมอร์ตาร์เมื่อทำการแช่ในสารละลายกรดอะซิติก



(ค) มอร์ตาร์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65

รูปที่ 12 (ต่อ) อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความยาวของมอร์ตาร์เมื่อทำการแช่ในสารละลายกรดอะซิติก

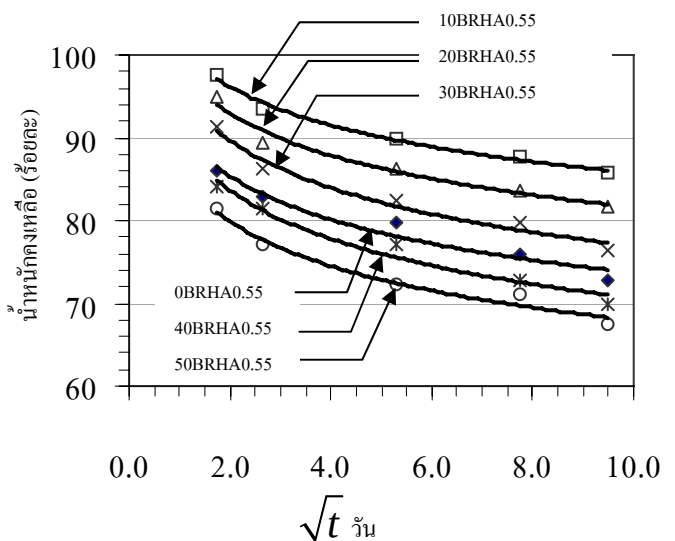
3.5 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักคงเหลือที่ได้จากการทดสอบ

3.5.1 กรดไนตริก

จากผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดไนตริกสามารถนำมาพิจารณาความสัมพันธ์ตามสมการเอมไพริคัลดังสมการที่ (5) [15] โดยร้อยละของน้ำหนักคงเหลือ ($Weight_retained(\%)$) แปรผันตามเวลาที่ทำการแช่ในสารละลายกรดไนตริก

$$Weight_retained(\%) = a(\sqrt{t})^n \quad (5)$$

โดยที่ a และ n เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงและปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 13 และค่าสัมประสิทธิ์ตามตารางที่ 3



รูปที่ 13 ตัวอย่างร้อยละของน้ำหนักที่คงเหลือของมอร์ตาร์เมื่อทำการแช่ในสารละลายกรดไนตริก

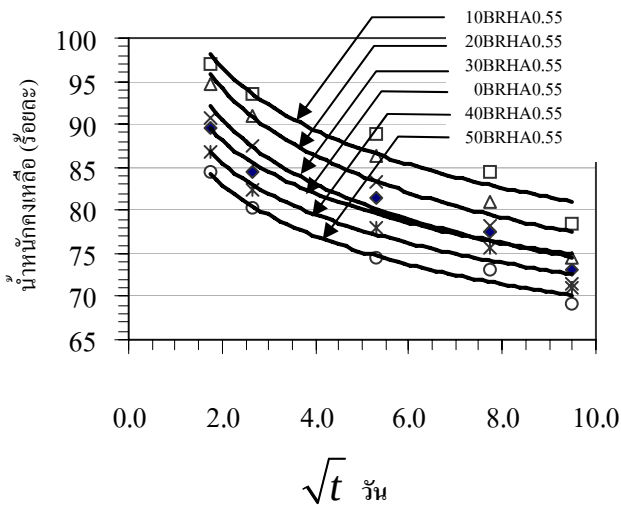
ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์จากความสัมพันธ์ของร้อยละน้ำหนักที่คงเหลือกับเวลาที่ทำการแช่กรดในตริกตามสมการ $Weight_retained(\%) = a(\sqrt{t})^n$

BRHA %wt.	w/b = 0.55		w/b = 0.60		w/b = 0.65	
	a	n	a	n	a	n
0	90.939	-0.0913	93.550	0.1267	93.175	-0.1453
10	100.960	-0.0709	101.770	-0.1076	105.550	-0.1455
20	98.233	-0.0805	100.210	-0.1245	102.490	-0.1569
30	95.751	-0.0950	96.690	-0.1327	98.496	-0.1551
40	89.940	-0.1048	90.221	-0.1303	88.593	-0.1357
50	85.664	-0.1007	87.084	-0.1334	86.204	-0.1381

จากค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์ความถดถอยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าน้ำหนักที่คงเหลือของมอร์ตาร์ที่ทำการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10 มีค่าสัมประสิทธิ์ a สูงที่สุด ในทุกค่าของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง

3.5.2 กรดอะซิดิก

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดอะซิดิกสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ตามสมการที่ (5) โดยที่ a และ n เป็นค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 14 และค่าสัมประสิทธิ์ตามตารางที่ 4 พบว่าแนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเช่นเดียวกับกรดไนตริก



รูปที่ 14 ตัวอย่างร้อยละของน้ำหนักที่คงเหลือของมอร์ตาร์เมื่อทำการแช่ในสารละลายกรดอะซิดิก

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์จากความสัมพันธ์ของร้อยละน้ำหนักที่คงเหลือกับเวลาที่ทำการแช่กรดอะซิดิกตามสมการ $Weight_retained(\%) = a(\sqrt{t})^n$

BRHA %wt.	w/b = 0.55		w/b = 0.60		w/b = 0.65	
	a	n	a	n	a	n
0	94.750	-0.1046	92.357	-0.1591	91.785	-0.1901
10	104.320	-0.1122	104.030	-0.1297	103.160	-0.1664
20	102.700	-0.1252	103.040	-0.1530	99.435	-0.1695
30	98.642	-0.1240	92.876	-0.1295	94.836	-0.1854
40	92.009	-0.1052	87.209	-0.1482	88.024	-0.1960
50	89.450	-0.1080	86.264	-0.1612	81.993	-0.1827

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาผลของกรดไนตริกและอะซิดิกที่มีต่อความทนทานของซีเมนต์เถ้าแกลบจากโรงผลิตสามารถได้ดังนี้

1. ในการหาเวลาที่เหมาะสมในการบดเถ้าแกลบบดที่เวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะในความละเอียดแบบเบลนเท่ากับ 5,370 ซม.²/ก.
2. ในสารละลายกรดไนตริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับ 10 มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยที่สุด ส่วนร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 50 มีน้ำหนักที่สูญเสียไปมากที่สุด ในขณะที่ความยาวที่เปลี่ยนไปของเถ้าแกลบที่ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับ 10 มีการขยายตัวน้อยที่สุด
3. ในสารละลายกรดอะซิดิกที่มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 10 มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยที่สุด ส่วนน้ำหนักคงเหลือพบว่าร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับ 50 มีน้ำหนักสูญเสียไปมากที่สุด ในขณะที่ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) ต่อความยาวที่เปลี่ยนไป โดยการแทนที่เถ้าแกลบค่าในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีการขยายตัวน้อยที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ทางผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าแกลบ โรงไฟฟ้าปทุมไรชมิล แอนด์ แกรนารี ที่ให้อนุเคราะห์เถ้าแกลบค่า สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องบดเถ้าแกลบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM Committee, "ASTM C 618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
- [2] Hewlett, P. C., Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Fourth Edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998.
- [3] ก้องกิจ แนวกิจ, นายรัฐพงษ์ วิมลโสภณกิตติ, นายจักรี สุวรรณกุล, พฤติกรรมเชิงกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดมาก, โครงการปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2544
- [4] ทวีสันห์ คงทรัพย์, ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบค่าจากโรงสีข้าว, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2543

- [5] ASTM Committee, "ASTM C 33 Standard Specification for Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
- [6] คณะอนุกรรมการคอนกรีตวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขา วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, ความคงทนของคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2543.
- [7] ASTM Committee, "ASTM C 39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
- [8] American Society for Testing and Materials, "ASTM C 596: Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement", Annual Book of ASTM Standard, Volume 04.02, Philadelphia, PA, USA, 2002.
- [9] Columnna, V.B., The Effect of Rice Husk Ash in Cement and Concrete Mixes, Master's Thesis No. 678, AIT, 1974.
- [10] Pavli'k V., Corrosion of Hardened Cement Paste by Acetic and Nitric Acids Part I : Calculation of Corrosion Depth, Cement and Concrete Research 24 (1994) 551 – 562.
- [11] Bendsted, J. and Barnes, P., 2002, Structure and Performance of Cement, London, England.
- [12] Pavli'k V., Corrosion of Hardened Cement Paste by Acetic and Nitric Acids Part II : Formation and Chemical Composition of the Products Layer, Cement and Concrete Research 24 (1994) : 1495 - 1508.
- [13] Pavli'k V., Corrosion of Hardened Cement Paste by Acetic and Nitric Acids Part III : Influence of water/cement Ratio, Cement and Concrete Research 26 (1996) : 475 – 490.
- [14] Pavli'k V., and S.Uncik, The Rate of Corrosion of Hardened Cement Pastes and Mortars with Additive of Silica Fume in Acids, Cement and Concrete Research 27 (1997) : 1731 – 1745.
- [15] Neville, A. M., Properties of Concrete, Pitman Books Limited, London, England, 1995.