

ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว

บรรณิตรี นิตร์วิระ¹ และ ทวีสินธุ์ คงทรัพย์²

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) คลองหลวง ปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำ คุณสมบัติที่ทำการศึกษาคือ การหดตัวแบบแห้ง การหดตัวแบบอโตจีเนียส ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอน-เนชั่น และการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและซัลฟูริก โดยใช้ปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 อัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.6, 0.7 และ 0.8 ตามลำดับ

จากการทดสอบ พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจะมีการหดตัวแบบแห้งและความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าคอนกรีตปกติ โดยที่ การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่ร้อยละ 20 จะมีค่ามากกว่าร้อยละ 40 และความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจะแปรค่าตามกับอัตราส่วนผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และไอรอนออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)/CaO อย่างไรก็ตาม การหดตัวแบบอโตจีเนียสและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารละลายกรดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติ

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

² นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

Durability of Concrete Containing Black RHA from Rice Mill

Burachat Chatveera¹ and Tavisan Kongsab²

Thammasat University (Rangsit Campus), Khlong Luang, Pathum Thani 12121

Abstract

The objective of this research was to study durability characteristics of Black Rice Husk Ash (BRHA). Those characteristics were drying shrinkage, autogeneous shrinkage, depth of carbonation reaction, and weight loss of specimens cured in hydrochloric (HCl) and sulfuric (H₂SO₄) acid solutions. In this study, the replacements of BRHA for cement were 20% and 40% by weight of cementitious materials. The ratios of paste volume to the volume of void content in compacted aggregates (γ) were 1.2, 1.4, and 1.6 while the water to binder (Portland cement and BRHA) ratios were 0.6, 0.7 and 0.8, respectively.

The tested results showed that the drying shrinkage and depth of carbonation reaction of BRHA concrete appeared to be higher than those of the normal concrete. For 20% BRHA concrete, the drying shrinkage was increased more than 40%. In addition, the depth of carbonation was directly varied with ratio of ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) to CaO. However, an autogeneous shrinkage and weight loss due to acid solutions of BRHA concrete were less than those of the normal concrete.

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering.

² Graduate Student, Department of Civil Engineering.

1. บทนำ

คอนกรีตนับเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมในประเทศไทย แต่จากสภาพเศรษฐกิจที่ถดถอยอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 ทำให้แนวทางในการผลิตคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างชัดเจน โดยจากการผลิตคอนกรีตที่ใช้เพียงปูนเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวมาเป็นการใช้วัสดุผสมทดแทนปูนซีเมนต์ โดยยังคงรักษาคุณภาพของคอนกรีตไว้ตามมาตรฐานและวัสดุที่นำมาผสมนั้นจะต้องมีส่วนช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตทั้งคุณสมบัติเชิงกลและความทนทาน โดยเฉพาะความทนทานที่เป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจปัญหาหนึ่ง เนื่องจากคอนกรีตไม่ใช่วัสดุก่อสร้างที่มีความทนทานสูง จากการศึกษาดังกล่าวถึงวัสดุในปัจจุบันที่มีศักยภาพในการนำมาใช้งานหลายชนิด เก้าแกลบนับเป็นวัสดุที่มีความเป็นไปได้ โดยปกติเก้าแกลบจะเป็นของเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรเนื่องจากประเทศไทยมีการทำนากันมากจึงมีปริมาณเหลือทิ้งจำนวนมาก จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าเก้าแกลบมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตได้แก่ เก้าแกลบที่ได้จากเตาเผา เมื่อนำมาทำการแทนที่ในปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 35 จะให้กำลังรับแรงที่ 28 วันใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน [1] และยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเก้าแกลบจะให้กำลังรับแรงอัดและแรงดึงเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละการแทนที่เท่ากับ 20 [2] ในขณะที่ผลต่อความทนทานจะพบว่าคอนกรีตที่ผสมเก้าแกลบจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา [3] รวมทั้งสามารถทนทานต่อสภาพที่เป็นกรดได้ดี [4] เป็นต้น แต่จากงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เก้าแกลบที่นำมาทำการศึกษามากเป็นส่วนใหญ่เป็นเก้าแกลบขาว (White Rice Husk Ash, WRHA) ในขณะที่เก้าแกลบดำ (Black Rice Husk Ash, BRHA) จากโรงสีข้าวมาผสมทดแทนปูนซีเมนต์ยังมีอยู่น้อย โดยเก้าแกลบดำจะเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงสีข้าวที่ได้จากการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงต้มน้ำเพื่อใช้แรงดันไอน้ำเดินเครื่องสีข้าวซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายภายในประเทศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิจัยถึงความเป็นไปได้ในการนำเก้าแกลบดำมาใช้ผสมในคอนกรีต โดยมีแนวทางที่จะมุ่งเน้นถึงคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตผสมเก้าแกลบดำและใช้อัตราส่วนการแทนที่ของเก้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เช่นเดียวกับการใช้เก้าแกลบขาว ซึ่งในที่นี้จะป็นร้อยละ 20 และ 40 ตามลำดับ

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของเก้าแกลบดำที่มีอัตราส่วนการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 20 และ 40 ต่อคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตผสมเก้าแกลบดำเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน

3. การทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ปูนซีเมนต์ : ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

เก้าแกลบดำ : ใช้เก้าแกลบดำจากจังหวัดนครปฐม นำมาบดในเครื่องบด (grinding machine) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 61 เซนติเมตร กว้าง 88 เซนติเมตร เป็นเวลา

75 นาที ใช้ตัวกลางเป็นเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร 45 เส้น ขนาด 12 มิลลิเมตร 45 เส้น และขนาด 15 มิลลิเมตร 35 เส้น ปริมาณน้ำเกลือดำที่ใส่ในเครื่องบดหนัก 20 กิโลกรัม ความเร็วรอบเท่ากับ 52 รอบต่อนาที

มวลรวมละเอียด : ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.12 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.54

มวลรวมหยาบ : ใช้หินย่อยขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 1 นิ้ว มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.35 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71

น้ำ : ใช้น้ำประปามีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7

3.2 วิธีการผสมและการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

วิธีการผสมและเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่มีเกลือดำเป็นส่วนประกอบ สามารถกระทำได้เช่นเดียวกับคอนกรีตผสมสารปอซโซลานอื่นๆ เช่น เถ้าแกลบขาว เถ้าลอย เป็นต้น ถึงแม้ว่าเกลือดำจะมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.02 (จะได้กล่าวต่อไปในส่วนของการทดสอบ) ซึ่งค่อนข้างเบาเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีค่าเท่ากับ 3.11 และในขณะที่ทำการผสมควรระมัดระวังเรื่องของการฟุ้งกระจาย ดังนั้นจึงมีการผสมในโมที่มีฝาปิดและมีช่องเปิดเปิดสำหรับเติมน้ำภายหลังการผสมแห้ง

3.3 วิธีการทดสอบความทนทานของคอนกรีต

1. การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง โดยการประยุกต์ใช้จากมาตรฐาน ASTM C596 โดยทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10x10x50 เซนติเมตร หลังจากถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 23 ชั่วโมง จึงทำการฝัดหุ้ม (Demec) 2 ตัวไว้ที่ผิวหน้าคอนกรีต แล้วนำตัวอย่างดังกล่าวไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 30 นาที ก่อนที่จะทำการวัดความยาวครั้งแรก (L_0) โดยใช้เครื่องมือวัดค่าการยืดหดตัว (Elongation Strain Gauge) วัดค่าความยาวระหว่างหุ้ม 2 ตัว (วันที่ 0) แล้วจึงทำการแช่แท่งทดสอบไว้ในน้ำและเริ่มวัดความยาวระหว่างหุ้มอย่างสม่ำเสมอ (Li) เมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 28 วัน จึงนำแท่งทดสอบขึ้นจากน้ำเช็ดผิวให้แห้งแล้วทำการวัดความยาว (วันที่ 28) และเก็บตัวอย่างดังกล่าวในตู้บ่มซึ่งควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60 ± 5 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เริ่มวัดความยาวเช่นเดียวกับเมื่อแช่ตัวอย่างในน้ำ นำค่าความยาวที่วัดได้มาคำนวณหาการยืดหดตัวตามสมการที่ (1)

$$\text{ค่าการยืดหดตัว} = (L_i - L_0) * (\text{ค่าคงที่} = 0.75 \times 10^{-5}) \quad (1)$$

2. การทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีเนียส โดยทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10x10x50 เซนติเมตร โดยทำการฝัดหุ้ม Demec 2 ตัวไว้ที่ผิวหน้าคอนกรีตตัวอย่าง ถอดแบบที่อายุ 1 วัน หลังจากถอดแบบวัดความยาวเริ่มต้น (วันที่ 0) ตัวอย่างจะมีอายุ 1 วัน แล้วทำการบ่มด้วยการห่อด้วยพลาสติกและเก็บในห้องบ่มซึ่งควบคุมที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5 เริ่มวัดการหดตัวตามวิธีที่ประยุกต์จากมาตรฐานเดียวกับที่ใช้ในการวัดการหดตัวแบบแห้ง



4. การทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟูริก โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนคอนกรีตมีอายุ 28 วัน นำไปตากแดดให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักเริ่มต้นก่อนนำมาแช่สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 1.0 ทำการทดสอบหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่เวลาการแช่ที่ 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ

3.4 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

สัดส่วนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีต แสดงได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เมตร

เลขที่ ส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่ ของเถ้ากลบดำ	อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุผง	γ	สัดส่วนผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)				
				ปูนซีเมนต์	เถ้ากลบดำ	มวลรวม หยาบ	มวลรวม ละเอียด	น้ำ
1	0	0.6	1.2	305	0	929	929	183
2	0	0.6	1.4	358	0	866	866	215
3	0	0.6	1.6	410	0	802	802	246
4	0	0.7	1.2	275	0	929	929	193
5	0	0.7	1.4	323	0	866	866	226
6	0	0.7	1.6	370	0	802	802	259
7	0	0.8	1.2	251	0	929	929	201
8	0	0.8	1.4	294	0	866	866	235
9	0	0.8	1.6	337	0	802	802	270
10	20	0.6	1.2	235	59	929	929	176
11	20	0.6	1.4	276	69	866	866	207
12	20	0.6	1.6	316	79	802	802	237
13	20	0.7	1.2	213	53	929	929	186
14	20	0.7	1.4	250	62	866	866	219
15	20	0.7	1.6	287	72	802	802	251
16	20	0.8	1.2	195	49	929	929	195
17	20	0.8	1.4	228	57	866	866	228
18	20	0.8	1.6	262	65	802	802	262

หมายเหตุ γ คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เฟสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น

ตารางที่ 1 (ต่อ) อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เมตร

เลขที่ ส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่ ของเถ้าแกลบดำ	อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุผง	γ	สัดส่วนผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)				
				ปูนซีเมนต์	เถ้าแกลบดำ	มวลรวม หยาบ	มวลรวม ละเอียด	น้ำ
19	40	0.6	1.2	170	113	929	929	170
20	40	0.6	1.4	200	133	866	866	200
21	40	0.6	1.6	229	153	802	802	229
22	40	0.7	1.2	155	103	929	929	180
23	40	0.7	1.4	181	121	866	866	212
24	40	0.7	1.6	208	139	802	802	243
25	40	0.8	1.2	142	94	929	929	189
26	40	0.8	1.4	166	111	866	866	222
27	40	0.8	1.6	191	127	802	802	254

หมายเหตุ γ คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เฟสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดที่เวลา 75 นาที เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงในตารางที่ 2 พบว่า เถ้าแกลบดำมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูงถึงร้อยละ 78.12 ในขณะที่องค์ประกอบอื่นมีปริมาณเพียงเล็กน้อยและจากการเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM [5] ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าเถ้าแกลบดำสามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานประเภท N จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำมาผสมทำเป็นคอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ได้

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบดำ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบดำ (ผ่านการบด ที่เวลา 75 นาที)
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	20.84	78.12
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.22	0.31
ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.20	0.23
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	66.28	0.08
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.24	0.34
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.10	0.17
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.22	0.82
ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2)	0.25	0.04
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.41	0.09
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI)	0.96	8.31

ตารางที่ 2 (ต่อ) องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบดำ

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบดำ (ผ่านการบดที่เวลา 75 นาที)
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ตร.ซม./กรัม)	3248	6185
ความถ่วงจำเพาะ	3.11	2.02
ความละเอียดข้างตะแกรงเบอร์ 325 (%)	9.35	14.77
ความชื้น (%)	0.19	2.35
ความต้องการน้ำ (% of control)	100	107
ดัชนีกำลังที่ 7 วัน (%)	100	76
ดัชนีกำลังที่ 28 วัน (%)	100	88

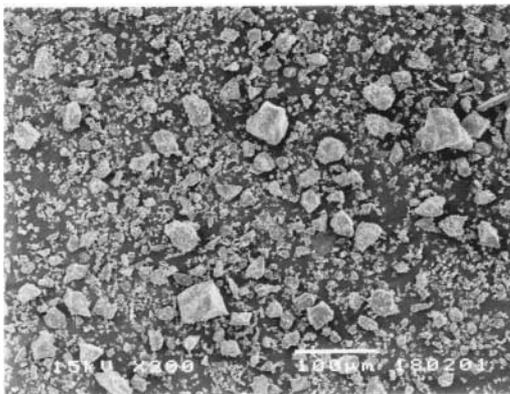
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าแกลบดำเปรียบเทียบกับสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM [5]

คุณสมบัติทางเคมี	วัสดุปอซโซลาน			เถ้าแกลบดำ (ผ่านการบด)
	N	F	C	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , min., %	70.0	70.0	50.0	78.66
Sulfur Trioxide (SO ₃), max., %	4.0	5.0	5.0	0.04
Alkalis as Na ₂ O, Na ₂ O (%) + 0.658 K ₂ O (%), max., %	1.5	1.5	1.5	0.71
Loss on Ignition, max., %	10.0	6.0	6.0	8.31
คุณสมบัติทางกายภาพ	วัสดุปอซโซลาน			เถ้าแกลบดำ (ผ่านการบด)
	N	F	C	
Amount retained when wet sieved No. 325, max., %	34	34	34	14.77
Water Requirement, max., %	115	105	105	107
Strength Activity Index				
At 7 days, min., %	75	75	75	76
At 28 days, min., %	75	75	75	88
Moisture Content, max., %	3.0	3.0	3.0	2.35
ความถ่วงจำเพาะ		-		2.02
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ตร.ซม./กรัม)		-		6185

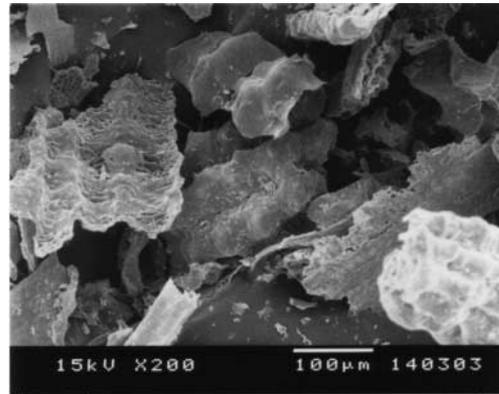
จากลักษณะผิวของอนุภาคเถ้าแกลบดำและปูนซีเมนต์ซึ่งถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 200 และ 7500 เท่า ดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบอนุภาคของเถ้าแกลบดำจะมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และมีลักษณะผิวที่มีความขรุขระ

มีเหลี่ยมคมมากกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งลักษณะของผิวอนุภาคเช่นนี้จะส่งผลต่อความต้องการน้ำของถ้าแกลบดำที่มีค่าสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 2 เนื่องจากความขรุขระและมีเหลี่ยมคมของอนุภาคถ้าแกลบดำจะทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเกาะบริเวณผิวของอนุภาคได้เพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบความละเอียดแบบเบลน (Blaine Fineness) จะได้อ่าความละเอียดของอนุภาคถ้าแกลบดำและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเท่ากับ 3248 และ 6185 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งถ้าแกลบดำมีค่าความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าปูนซีเมนต์ แต่จากการทดสอบความละเอียดด้วยการกระจายขนาดของอนุภาค (Particle Size Distribution) ดังแสดงรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ของปูนซีเมนต์และถ้าแกลบดำมีขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 μm โดยบางส่วนของปูนซีเมนต์จะมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1 μm ปูนซีเมนต์จึงมีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยเล็กกว่าถ้าแกลบดำเล็กน้อย ซึ่งให้ผลที่ขัดแย้งกับผลการทดสอบแบบเบลนเนื่องจากถ้าแกลบดำมีความพรุนหรือมีช่องว่างภายในอนุภาค โดยการทดสอบความละเอียดด้วยวิธี Blaine Fineness จะอาศัยหลักการวัดระยะเวลาที่อากาศปริมาณแน่นอนจำนวนหนึ่งไหลผ่านชั้นของวัสดุผงที่ถูกบรรจุให้มีความพรุนตามที่กำหนด และความละเอียดของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากระยะเวลาที่อากาศไหลผ่าน ค่าระยะเวลาที่ได้ของถ้าแกลบดำจึงมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์

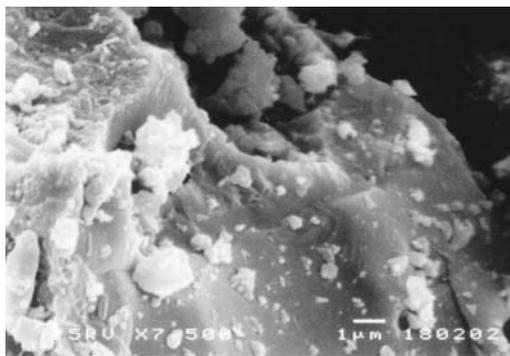


(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

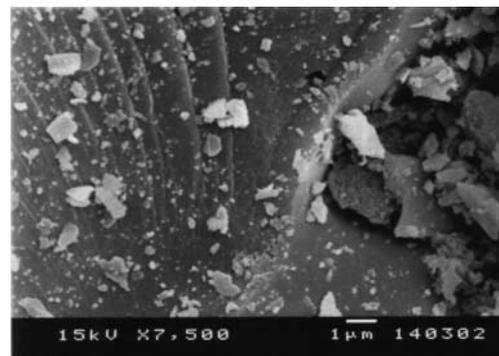


(ข) ถ้าแกลบดำ

รูปที่ 2 ภาพขยายขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) ขนาดกำลังขยาย 200 เท่า

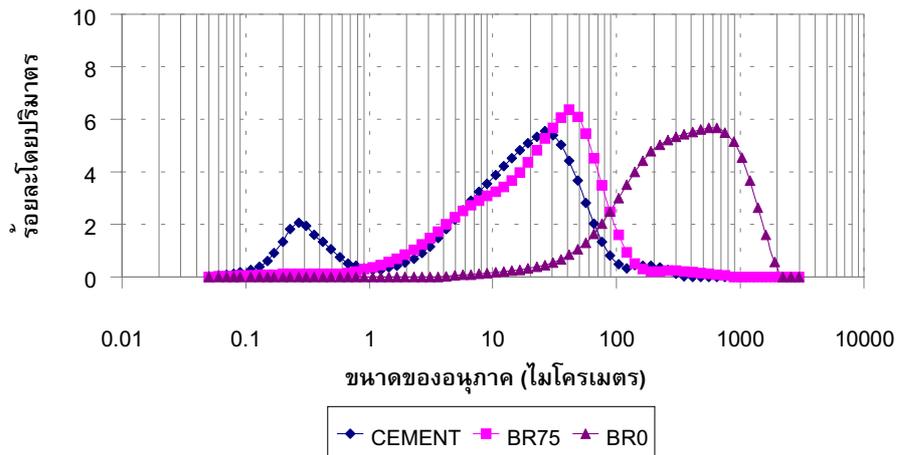


(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



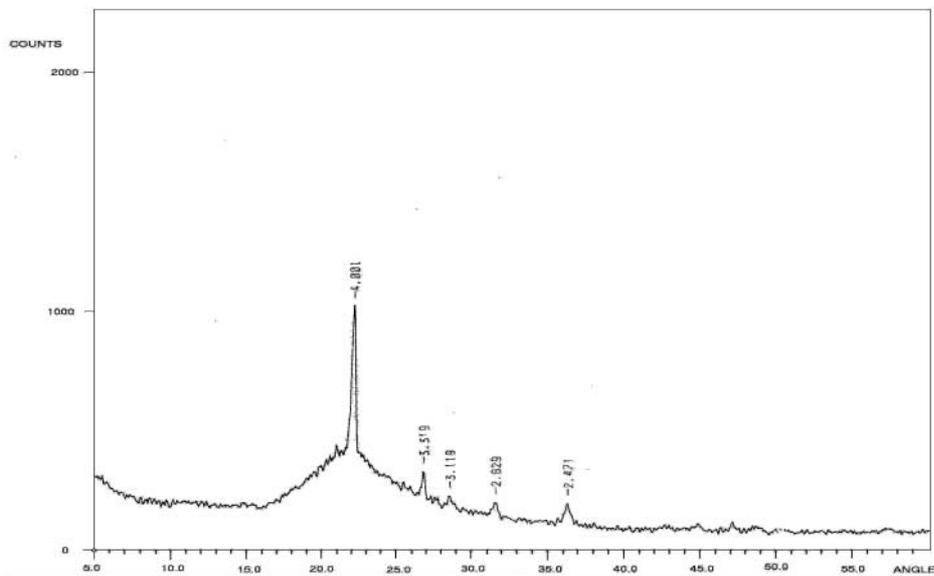
(ข) ถ้าแกลบดำ

รูปที่ 3 ภาพขยายขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) ขนาดกำลังขยาย 7500 เท่า



รูปที่ 4 การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (CEMENT) แก้วแกมบด 75 นาฬิกา (BR75) และแก้วแกมบดไม่บด (BR0)

จากผลการทดสอบความเป็นผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction ของแก้วแกมบด ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าแก้วแกมบดจะมีรูปแบบของผลึกเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) เป็นส่วนใหญ่ (เส้นในแนวขนานกับแกนนอน) จึงมีแนวโน้มที่แก้วแกมบดจะสามารถทำปฏิกิริยาได้

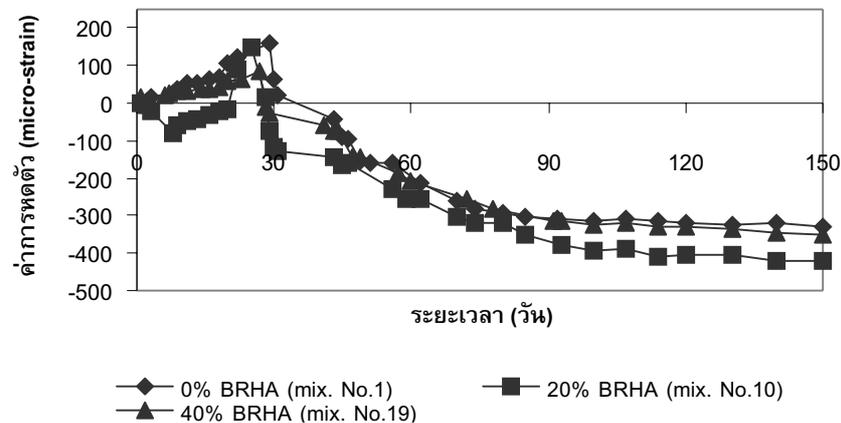


รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์แก้วแกมบดด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction

4.1 การหัตถ์แบบแห้ง

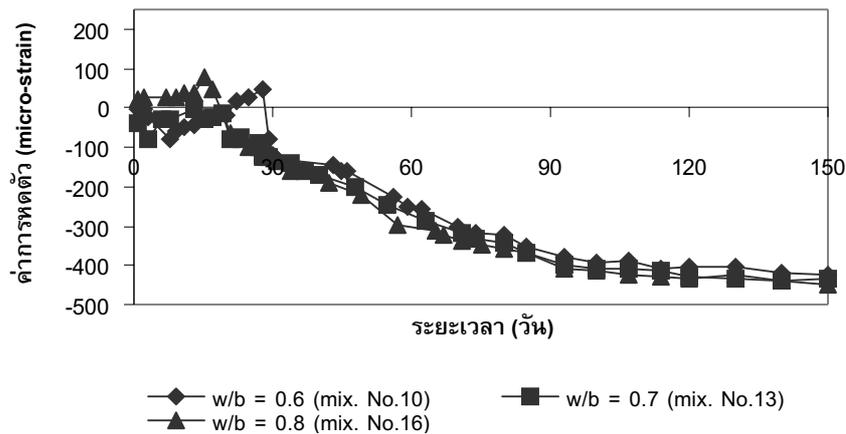
ผลการทดสอบการหัตถ์แบบแห้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.6 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เฟสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2 ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าคอนกรีตผสมแก้วแกมบดจะมีการหัตถ์แบบแห้งมากกว่าคอนกรีตปกติซึ่งจะเห็นได้จากขนาดของการหัตถ์ที่มากกว่าคอนกรีตปกติ (ค่าลบแสดงถึงว่าคอนกรีตมีความยาวที่เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้นแล้วมีค่าลดลง) เนื่องจากการหัตถ์แบบแห้งเกิดขึ้น

จากการสูญเสียน้ำในคอนกรีตออกไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านทางโพรงคาปิลลารี [6] ซึ่งจากลักษณะของเถ้าแกลบดำที่ผิวมีความขรุขระ เป็นเหลี่ยมคมมากกว่าปูนซีเมนต์ (จากรูปที่ 2) ทำให้เถ้าแกลบสามารถกักเก็บน้ำอิสระในอนุภาคได้มากทำให้ปริมาณความชื้นที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น การหดตัวแบบแห้งจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่จะเห็นว่าจากเวลาเริ่มต้น (วันที่ 28 ภายหลังทำการผสมตัวอย่างและทำการบ่มในน้ำ) ที่คอนกรีตอยู่ภายใต้สภาวะควบคุม (อุณหภูมิ 252 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 6 ± 5) ค่าการหดตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำที่มีการแทนที่ของเถ้าแกลบดำเท่ากับร้อยละ 20 จะมีค่ามากกว่าร้อยละ 40 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าแกลบดำจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 40 จะเป็นการเพิ่มโอกาสที่อนุภาคเถ้าแกลบดำจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งทำให้เพสต์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือปริมาณและขนาดโพรงคาปิลลารีที่ลดลง ดังนั้นการสูญเสียน้ำออกสู่ภายนอกจึงลดลงตามไปด้วย การหดตัวจึงน้อยกว่าการแทนที่ของเถ้าแกลบที่ร้อยละ 20

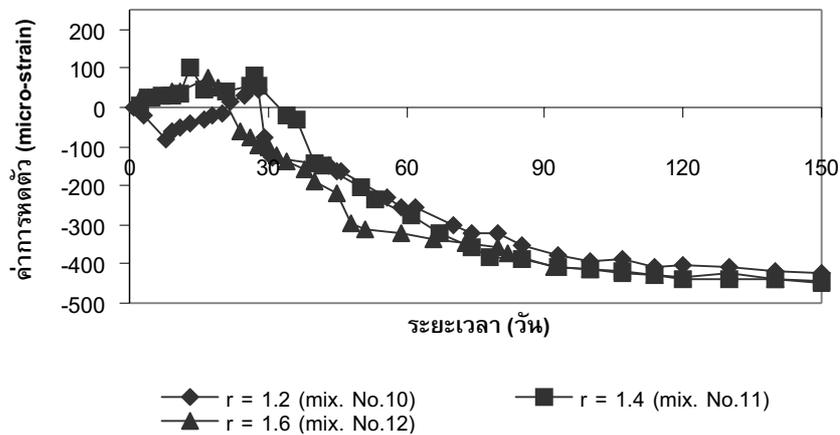


รูปที่ 6 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.6 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2

เมื่อพิจารณาในประเด็นของการควบคุมร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบดำที่ร้อยละ 20 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงจะทำให้คอนกรีตมีโพรงคาปิลลารีและปริมาณน้ำอิสระเพิ่มขึ้น ทำให้ความชื้นสูญเสียจากคอนกรีตได้มากขึ้น นอกจากนี้จากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงจะทำให้ปริมาณวัสดุผงลดลงซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกลดลงตามไปด้วย สิ่งที่เกิดขึ้นกลับเป็นโพรงที่เต็มไปด้วยน้ำอิสระที่สามารถสูญเสียออกสู่ภายนอกได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7 ในขณะที่เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดของมวลรวมอัดแน่น ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะปริมาณเพสต์ที่เพิ่มขึ้น นั่นคือปริมาณเถ้าแกลบดำที่ใช้ในการแทนที่เพิ่มขึ้น การหดตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้นจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ประกอบกับมวลรวมช่วยในการยึดโครงสร้างที่เกิดการหดตัวมีปริมาณลดลงทำให้การหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 7 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำที่มีการแทนที่เถ้าแกลบดำร้อยละ 20 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เฟสค์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2

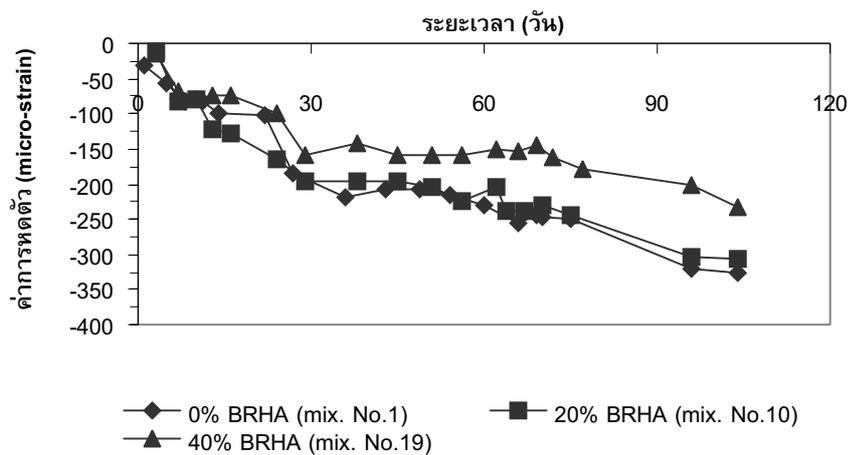


รูปที่ 8 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.6 และการแทนที่เถ้าแกลบดำร้อยละ 20

4.2 การหดตัวแบบอโตจีเนียส

จากผลการทดสอบในรูปที่ 9 เมื่อทำการเปรียบเทียบการหดตัวแบบอโตจีเนียสของคอนกรีตปกติกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบดำ พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจะมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งจะเห็นได้จากขนาดของการหดตัวที่น้อยกว่าคอนกรีตปกติ (ค่าลบที่แสดงจะมีความหมายในลักษณะเดียวกับการหดตัวแบบแห้ง) โดยในการศึกษานี้การแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 40 จะมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากปริมาณเถ้าแกลบดำที่เพิ่มขึ้นกลับทำให้ปูนซีเมนต์ที่มีสารประกอบไตรแคลเซียมออกไซด์ (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) มีปริมาณลดลง ซึ่งมีผลกระทบต่อเกิดการหดตัวแบบอโตจีเนียสลดลง กล่าวคือเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นเอ็ททริงไคต์ซึ่งเป็นผลึกเข็ม โดยปกติผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้จะมีการพัฒนาโครงสร้างขยายออกในแนวแกนของเข็ม ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มจำนวนโพรงที่ละเอียด (finer pores) ให้มากขึ้น [7] เมื่อปูนซีเมนต์มีปริมาณลดลงจึงทำให้สารประกอบที่ทำให้เกิดเอ็ททริงไคต์ลดลง โพรงที่ละเอียดมีจำนวนลดลง การหดตัวจึงลดลง ประกอบกับความสามารถในการ

กับเก็บน้ำที่มีในอนุภาคเถ้าแกลบดำที่มากกว่าปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณน้ำในโพรงคานิลลารีเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อความดันในโพรงคานิลลารีหลังจากน้ำในโพรงถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลง น้อยกว่าคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน และเมื่อทำการเปรียบเทียบคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบ ร้อยละ 20 และ 40 ตามลำดับ จะได้ว่าค่าการหดตัวแบบอโตจีเนียสที่การแทนที่ร้อยละ 20 จะมีค่ามากกว่าร้อยละ 40 ทั้งนี้เพราะการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าแกลบดำต้องใช้น้ำในกระบวนการทำปฏิกิริยา ทำให้ปริมาณที่เหลืออยู่ในโพรงน้อยกว่าการแทนที่เถ้าแกลบที่ร้อยละ 40 ค่าการหดตัว จึงมีค่ามากกว่า

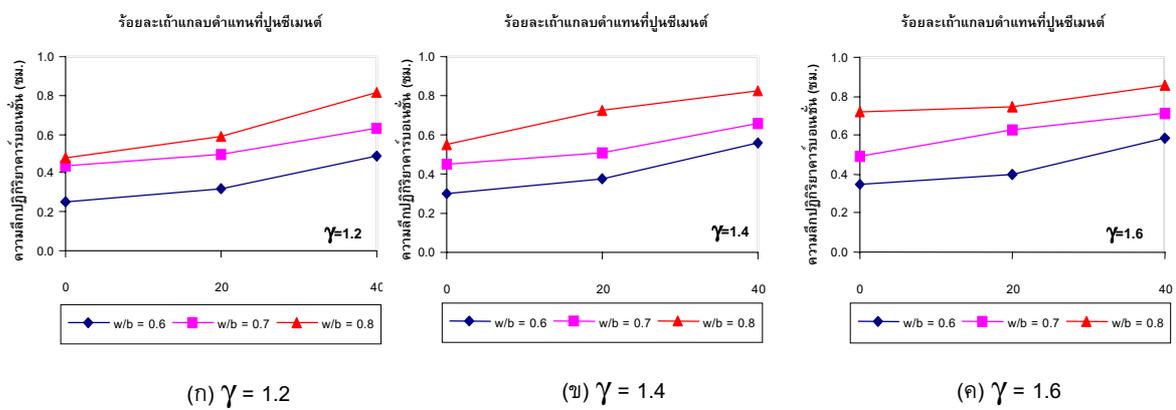


รูปที่ 9 การหดตัวแบบอโตจีเนียสของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างกัน เมื่อส่วนผสมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.6 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2

4.3 ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น

จากผลการศึกษาความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่อายุ 180 วัน ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจะมีความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นเพิ่มขึ้น โดยในการศึกษานี้จะมีค่าสูงสุดเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบดำที่ร้อยละ 40 ในขณะที่คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปกติจะมีค่าต่ำสุด โดยปกติปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจะเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แทรกซึมผ่านทางโพรงของเพสต์และทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมในคอนกรีตเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้น แต่เมื่อทำการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์จะทำให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถแพร่ผ่านเข้าภายในเนื้อคอนกรีตได้ง่ายขึ้น ประกอบกับน้ำที่เกาะที่ผิวของอนุภาคเถ้าแกลบดำมากกว่าปูนซีเมนต์ซึ่งจะช่วยให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายได้เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจึงมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบที่อัตราส่วนโดยปริมาตรซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างต่ำสุดของมวลรวมที่ 1.2, 1.4 และ 1.6 ตามลำดับ พบว่าผลกระทบของการแทนที่ของเถ้าแกลบดำจะมีมากขึ้น อันเป็นผลมาจาก

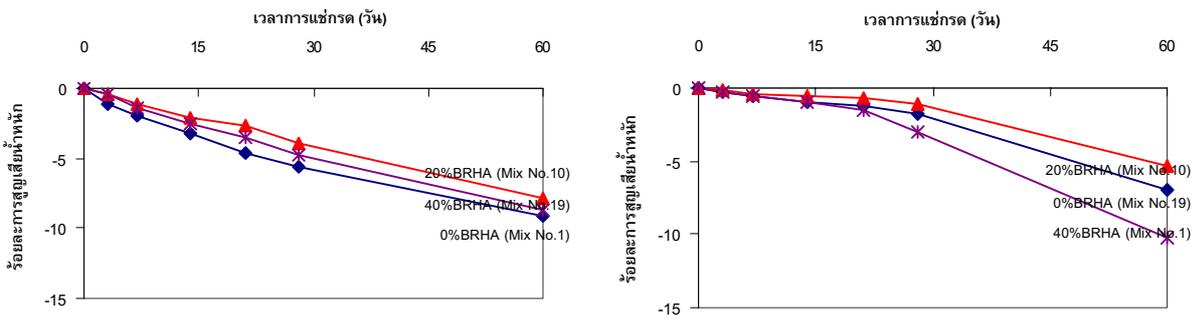
ปริมาณเพสต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเพสต์จะประกอบไปด้วยโพรงต่างๆ ที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีต ซึ่งทั้งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงและอัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นจะส่งผลให้ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในแต่ละส่วนผสมของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปด้วย ทำให้ความลึกจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นไม่เท่ากันและจากผลการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงในคอนกรีตทำให้น้ำที่เพิ่มขึ้นแปรสภาพกลายเป็นโพรงภายในคอนกรีตที่มีน้ำอยู่ภายในเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงสูงขึ้นเท่าใดก็จะมีปริมาณโพรงรวมทั้งน้ำในโพรงสูงขึ้นเท่านั้น ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่ผ่านเข้ามาทางโพรงที่มีความชื้นเหล่านั้นแล้วทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมที่มีในคอนกรีตเพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 10 ความลึกปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำที่เวลา 180 วัน ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ (ก) $\gamma = 1.2$ (ข) $\gamma = 1.4$ (ค) $\gamma = 1.6$

4.4 ความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

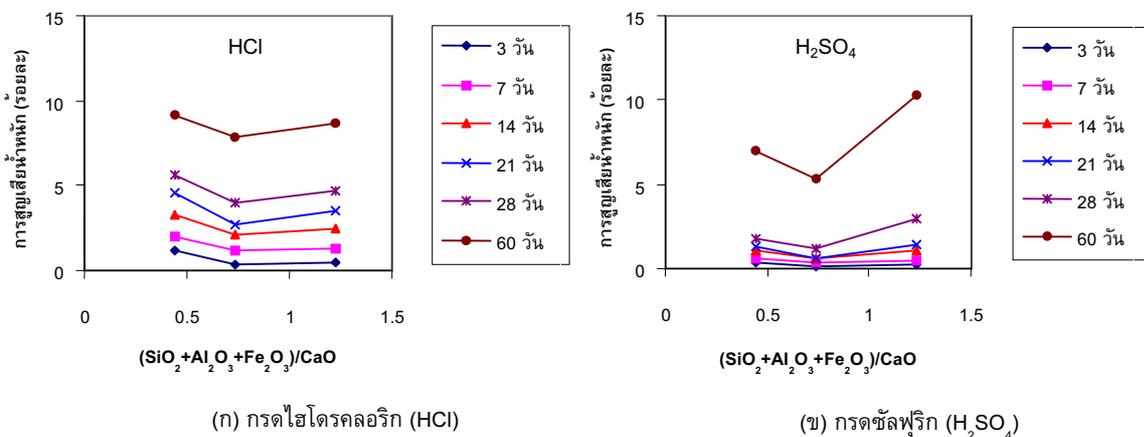
ผลการทดสอบคอนกรีตที่แช่ในกรดไฮโดรคลอริกและซัลฟูริกในรูปที่ 11 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจะมีการสูญเสียน้ำหนักจากกรดไฮโดรคลอริกน้อยกว่าคอนกรีตปกติ (ค่าลบแสดงถึงว่าคอนกรีตมีน้ำหนักที่เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นแล้วมีค่าลดลง) ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของเถ้าแกลบดำมีลักษณะไม่แน่นอน โดยที่การแทนที่เถ้าแกลบดำที่ร้อยละ 40 มีมากกว่าคอนกรีตปกติ แต่ที่การแทนที่ร้อยละ 20 มีค่าน้อยกว่า เนื่องจากลักษณะการกัดกร่อนของกรดทั้งสองจะมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ กรดไฮโดรคลอริกจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมในคอนกรีตเกิดเกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ซึ่งสามารถละลายน้ำและถูกชะล้างออกได้ง่าย ในขณะที่กรดซัลฟูริกจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมในคอนกรีตเช่นกันแต่จะเกิดเป็นเกลือแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ซึ่งจะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว



รูปที่ 11 การสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนของกรด HCl และ H₂SO₄ ต่อกอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำ เมื่อส่วนผสมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุสูงเท่ากับ 0.6 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เฟสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2

การแทนที่เถ้าแกลบดำในการวิจัยนี้สามารถช่วยลดการกัดกร่อนได้ดีที่สุดเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำร้อยละ 20 ซึ่งมีสาเหตุที่ทำให้การกัดกร่อนมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วนคือ ความเป็นด่างในคอนกรีตลดน้อยลง เนื่องจากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งทำให้น้ำเฟสมีความหนาแน่นและมีการยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมดีขึ้น ในขณะที่คอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบดำร้อยละ 40 จะมีการกัดกร่อนไม่แน่นอนเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณซิลิโคนไดออกไซด์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ถึงแม้ว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะน้อยทำให้ความเป็นด่างเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง แต่กรดสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมทุกตัวในคอนกรีตจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนมากขึ้น คอนกรีตจะมีความพรุนเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนของกรดมากขึ้น

จากองค์ประกอบทางเคมีของแต่ละส่วนผสม พบว่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดจะมีค่าแปรตามอัตราส่วน $(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) / CaO$ โดยการสูญเสียน้ำหนักจะมีค่าต่ำสุดเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.74 ซึ่งเป็นการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20 สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอัตราส่วนดังกล่าวแสดงในรูปที่ 12

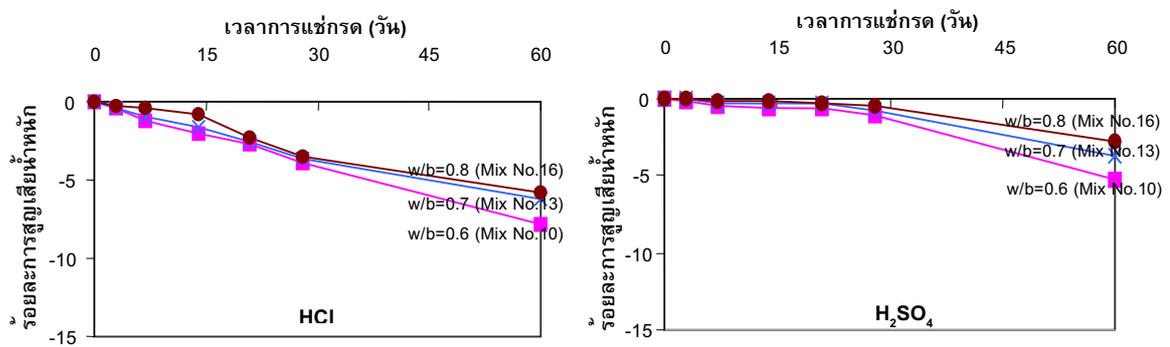


(ก) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

(ข) กรดซัลฟูริก (H₂SO₄)

รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีกับการสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดซัลฟูริก (H₂SO₄)

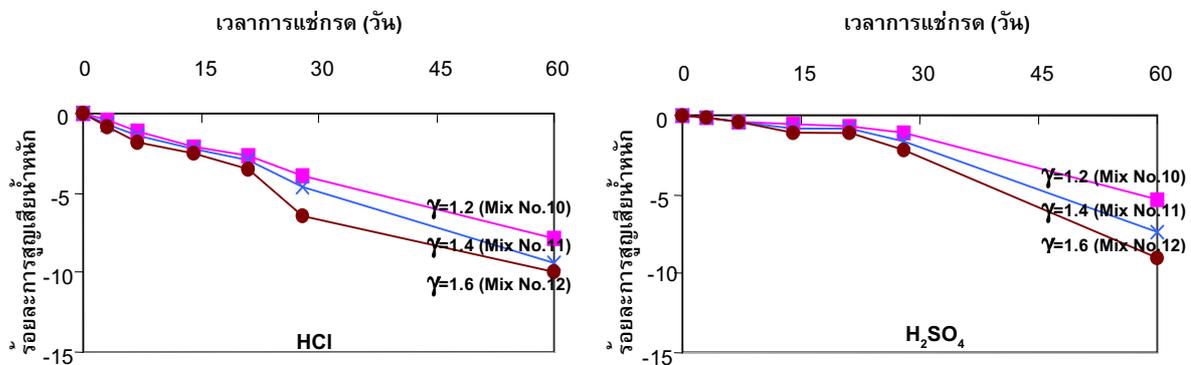
นอกจากนี้ตัวแปรในการวิจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนนอกเหนือจากร้อยละการแทนที่ คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงและอัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น จะได้ว่า การสูญเสียน้ำหนักจะลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้นเนื่องจากส่วนผสมจะมีปริมาณวัสดุผงในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกลดลง ส่วนที่เพิ่มขึ้นก็คือปริมาณน้ำ ทำให้ผลผลิตของปฏิกิริยาทั้งสองลดลงแต่จะมีปริมาณโพรงที่เต็มไปด้วยน้ำหรือความชื้นเพิ่มมากขึ้น เนื้อซีเมนต์เพสต์ถูกกัดกร่อนน้อยลงเพราะมีโพรงที่มีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก เหตุผลอีกประการก็คือ เมื่อคอนกรีตประกอบไปด้วยโพรงที่มีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก การซึมผ่านของกรดเพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาก็จะยากขึ้นเนื่องจากต้องเอาชนะแรงดันน้ำภายในโพรงซึ่งอยู่ภายในคอนกรีต การสูญเสียน้ำหนักจึงลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 การสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนของกรด HCl และ H₂SO₄

ต่อคอนกรีตผสมแก้วกลบค่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่างกัน เมื่อมีการแทนที่แก้วกลบดำร้อยละ 20 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2

นอกจากนี้ตัวแปรอีกตัวหนึ่งคือการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 14 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของส่วนผสมที่จะทำปฏิกิริยาแล้วแข็งตัวเป็นซีเมนต์เพสต์ซึ่งหมายถึงสารประกอบแคลเซียมในคอนกรีตมีปริมาณเพิ่มขึ้น กรดจึงสามารถกัดกร่อนสารประกอบแคลเซียมได้มาก การสูญเสียน้ำหนักจึงมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 14 การสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนของกรด HCl และ H₂SO₄

ต่อคอนกรีตผสมแก้วกลบค่าที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นต่างกัน เมื่อส่วนผสมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.6 และการแทนที่แก้วกลบดำร้อยละ 20

5. สรุป

1. แก้วแกลบดำจากโรงสีข้าวที่ผ่านการบดเป็นเวลา 75 นาที จะมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพสามารถจัดเป็นสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM อยู่ในประเภท N
2. การหดตัวแบบแห้งของแก้วแกลบดำจะมีค่ามากกว่าคอนกรีตปกติและการแทนที่แก้วแกลบดำในปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 20 จะมีค่าการหดตัวมากกว่าการแทนที่ที่ร้อยละ 40
3. คอนกรีตผสมแก้วแกลบดำจะมีค่าการหดตัวแบบบอโตจีเนียสน้อยกว่าคอนกรีตปกติ
4. ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อการแทนที่ของแก้วแกลบดำเพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วน $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{CaO}$ โดยเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวเพิ่มขึ้นความลึกของปฏิกิริยาก็จะเพิ่มขึ้น
5. ค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมแก้วแกลบดำเนื่องจากการกักความร้อนของกรดไฮโดรคลอริกและซัลฟูริกจะมีค่าลดลง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และแก้วแกลบดำ และขอขอบคุณโรงสีไฟมิตรไฟบูลย์ จ.นครปฐม ที่อนุเคราะห์แก้วแกลบดำเพื่อใช้ในการวิจัย รวมทั้งคุณณรงค์ศักดิ์ มากุล ที่ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลงานวิจัยดังกล่าวนี้แล้วเสร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

1. We A. B., 1981, Production of RHA and Its Applications in Mortar and Concrete, *M.eng. Thesis No. ST-81-20*, A.I.T., Bangkok, Thailand.
2. สาโรจน์ ดำรงค์สีล, 2541, แบบจำลองในการทำนายกำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตผสมแก้วแกลบ, *วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต*.
3. อนุวรรตน์ ไคววารินทร์, 2542, การพัฒนาคอนกรีตความร่อนต่ำโดยใช้แก้วแกลบ, *วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต*.
4. Metha, P. K., 1977, Properties of Blended Cements Made from RHA, *ACI Journal*, Vol. 74, No. 9, September.
5. American Society for Testing and Material, 1993, *Annual Book of ASTM Standard*, Vol 4.02, United State of America.

6. Neville, A. M., 1995, *Properties of Concrete*, 4th Edition, Pitman Books Limited, London, England.

7. Tazawa, E., 1999, “*Autogenous Shrinkage of Concrete*”, 1st Edition, E & FN Spon, London, England.