

ผลของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ที่มีต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ Effect of Lignite Bottom Ash on Cement Paste Properties

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ ณรงค์ศักดิ์ มากุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง ปทุมธานี 12121

โทร 5643001-9 ต่อ 3105 โทรสาร 5643010

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเถ้าหนักจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ที่มีต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ โดยทำการศึกษาดังต่อไปนี้คือ การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ คุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์ ประกอบด้วย ความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก และคุณสมบัติด้านความคงทน ได้แก่ การขยายตัวในน้ำ การหดตัวแบบแห้งและออโตจีนัสและความทนทานต่อการกร่อนซัลฟูริก โดยใช้กรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตัวแปรหลักที่ใช้คือ ร้อยละการแทนที่ของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนัก (0, 10, 20 และ 30) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์และเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์) ที่ 0.30, 0.35 และ 0.40 ตามลำดับ จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่อร้อยละการแทนที่ของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย การขยายตัวในน้ำ การหดตัวแบบออโตจีนัสและการสูญเสียน้ำหนักจากการกร่อนซัลฟูริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกและการหดตัวแบบแห้งจะมีค่าลดลง

Abstract

The objective of this research was to study the effect of Lignite Bottom Ash (LBA), a by-product from lignite power plant, on cement paste properties. Physical properties and chemical composition of LBA were analyzed. Mechanical properties including normal consistency, setting time, compressive and splitting tensile strengths were studied. The investigation was conducted on the durability properties involving expansion in water and shrinkages (drying and autogenous) and sulfuric acid attack. Sulfuric acid attack was used at a concentration of 5 % by weight. The main variables were the percentage of LBA replacement in cement (0, 10, 20 and 30%) and water to binder materials (cement and LBA) ratio, which was kept constantly during each test, equal to 0.30, 0.35 and 0.40 respectively.

The test results showed that when the percentage of replacement of LBA in cement increased, normal consistency, initial and final setting times, expansion in water, autogenous shrinkage and the percentage of weight loss due to sulfuric acid attack increased. Whereas compressive and splitting tensile strengths and drying shrinkage decreased.

1. บทนำ ในยุคที่ประเทศไทยมีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคมทำให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเพิ่มขึ้นเป็นเงาตามตัว โดยวัตถุดิบที่ใช้ในประเทศไทยในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นถ่านหินลิกไนต์ ของเสียที่ตามมาคือ เถ้า (Ash) ซึ่งเป็นกากที่เหลือจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ในปัจจุบันเถ้าที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักคือ เถ้าลอย (Fly Ash) มีลักษณะเป็นของแข็ง เม็ดกลมละเอียด ลอยขึ้นมาพร้อมกับอากาศและถูกจับด้วยเครื่องดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) ซึ่งในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่แสดงถึงคุณสมบัติของเถ้าลอยที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพของคอนกรีต [1] ส่วนที่สองคือ เถ้าหนัก (Bottom Ash) ซึ่งพบอยู่บริเวณส่วนล่างของเตาเผาซึ่งมีปริมาณร้อยละ 15-20 ของปริมาณเถ้าทั้งหมด แต่ในปัจจุบันยังขาดงานวิจัยที่สนับสนุนการนำเถ้าดังกล่าวกลับมาใช้กับงานด้านคอนกรีต โดยส่วนใหญ่เถ้าชนิดนี้จะถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพของดินที่ใช้ในการถมที่ซึ่งไม่ได้ก่อให้เกิดประโยชน์เท่าที่ควรเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่จะได้รับดังเช่นการนำเถ้าลอยไปใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ในด้านคุณสมบัติทางกลและความคงทนของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์

2. การทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์จากบริษัท ปูนซีเมนต์ ทีพีโอ

จำกัด (มหาชน) จังหวัดระยอง, น้ำประปาและสารละลายกรดซัลฟริก (H_2SO_4) เจือจางในน้ำประปาที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

2.2 วิธีการทดสอบ

2.2.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

การทดสอบคุณสมบัติของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ร้อยละการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ปริมาณความชื้น พื้นที่ผิวจำเพาะและดัชนีการพัฒนากำลัง เป็นต้น

2.2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์

การทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ ตามมาตรฐาน ASTM C187

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM C191

การทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน ASTM C39 และ ASTM C496 ตามลำดับ โดยใช้ตัวอย่างเป็นทรงกระบอกขนาด ϕ 50 x 100 มิลลิเมตร หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน นำตัวอย่างไปทำการบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่ 3, 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ

2.2.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านความทนทานของซีเมนต์เพสต์

การทดสอบการขยายตัวในน้ำ โดยใช้ตัวอย่างขนาด 25 x 25 x 285 มิลลิเมตร หลังจากทำการถอดแบบหล่อที่ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย แล้ววัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยโดยบันทึกค่าเป็น (L_0) จากนั้น

นำตัวอย่างแช่ในน้ำแล้วนำเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5 นำแท่งตัวอย่างขึ้นจากน้ำทำการวัดความยาว (L_t) ทุกๆ 3 วัน แล้วจึงนำค่าความยาวที่เปลี่ยนไปเทียบกับความยาวเริ่มต้น ทำการวัดไปจนกระทั่งค่าการหดตัวมีแนวโน้มคงที่

การหดตัวแบบแห้ง ตามมาตรฐาน ASTM C596 โดยทำการหล่อตัวอย่างขนาด 25 x 25 x 285 มิลลิเมตร จนกระทั่งเวลาก่อตัวระยะสุดท้าย แล้วจึงถอดแบบออก จากนั้นนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ระหว่างนั้นให้นำตัวอย่างมาทำการเช่นเดียวกับการขยายตัวในน้ำ เมื่อครบ 28 วัน นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำทำการบ่มในตู้บ่มที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ทำการวัดเก็บข้อมูลเป็นประจำวันกระทั่งค่าการหดตัวมีแนวโน้มคงที่

การหดตัวแบบออโตจีเนียส โดยใช้ตัวอย่างเช่นเดียวกับการหดตัวแบบแห้ง ทำการหล่อตัวอย่างจนกระทั่งเวลาก่อตัวระยะสุดท้าย แล้วจึงแกะแบบออก จากนั้นนำตัวอย่างมาหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันน้ำในแท่งตัวอย่างระเหยออก นำแท่งตัวอย่างที่หุ้มเรียบร้อยแล้ววัดความยาวเช่นเดียวกับการขยายตัวในน้ำ

การทดสอบความทนทานต่อสภาพกรด โดยทำการหล่อตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร หลังจากนำตัวอย่างออกจากแบบแล้วจึงทำการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำมาแช่ในสารละลายกรดซัลฟริก (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก ที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ เพื่อหาค่าร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักไปเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น

2.2.4 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์

รายละเอียดของส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนวัสดุของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการทดสอบต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร

สัญลักษณ์	W C + LBA	LBA C + LBA (%)	ปูนซีเมนต์ (กก./ม ³)	LBA (กก./ม ³)	น้ำ (กก./ม ³)
LBA0-0.30	0.30	0	1593	0	478
LBA10-0.30	0.30	10	1434	159	478
LBA20-0.30	0.30	20	1275	318	478
LBA30-0.30	0.30	30	1116	477	478
LBA0-0.35	0.35	0	1433	0	502
LBA10-0.35	0.35	10	1290	143	502
LBA20-0.35	0.35	20	1147	286	502
LBA30-0.35	0.35	30	1004	429	502
LBA0-0.40	0.40	0	1376	0	550
LBA10-0.40	0.40	10	1238	138	550
LBA20-0.40	0.40	20	1100	276	550
LBA30-0.40	0.40	30	962	414	550

หมายเหตุ : LBA0-0.30; LBA คือเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์, 0, 10, 20 และ 30 คือร้อยละการแทนที่ของเถ้าหนัก และ 0.30, 0.35 และ 0.40 คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง

3. ผลการทดสอบและการวิจารณ์ผล

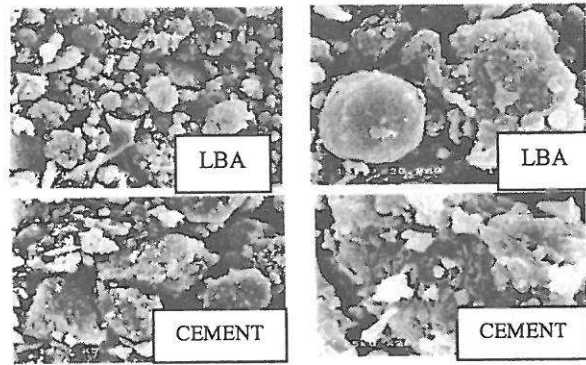
3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์

ขบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์แสดงในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าถ่านหินลิกไนต์ที่ขุดได้จากเหมืองถ่านหินจะนำมาผ่านขบวนการบดให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นจึงนำเข้าสู่เตาเผาได้พลังงานและเถ้า โดยในระหว่างการเผาจะทำการพ่นทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150- μ m) ในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของถ่านหินลิกไนต์ เถ้าที่ได้จากกระบวนการเผาจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ เถ้าลอย (Fly Ash) ประมาณร้อยละ 85 และเถ้าหนัก (Bottom Ash) ร้อยละ 15

จากผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในตารางที่ 2 ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ร้อยละ 16.10 มากกว่าในปูนซีเมนต์ที่มีร้อยละ 0.96 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 6603 cm^2/g มากกว่าในปูนซีเมนต์ที่มี 3248 cm^2/g เมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุ 7 และ 28 วัน พบว่ามีค่าร้อยละ 90 แสดงว่ามอร์ตาร์ที่ได้จากแทนที่เถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ในปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 20 สามารถให้กำลังที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อทำการทดสอบเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่กำลังขยาย 5000 และ 20000 เท่า ตามลำดับ พบว่าอนุภาคของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์จะมีขนาดโดยเฉลี่ยเล็กกว่าของปูนซีเมนต์และมีลักษณะทั้งเม็ดกลมและเป็นเหลี่ยมกระจายตัวอยู่ พื้นผิวค่อนข้างเรียบ ในขณะที่ปูนซีเมนต์จะมีลักษณะที่เป็นเหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระแสดงในรูปที่ 2



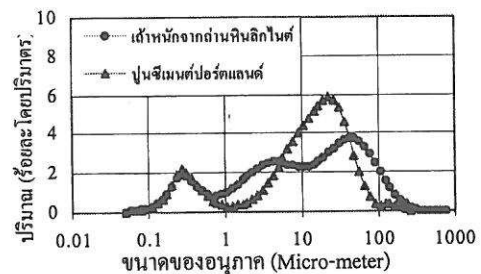
รูปที่ 1 กระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์โดยสังเขป



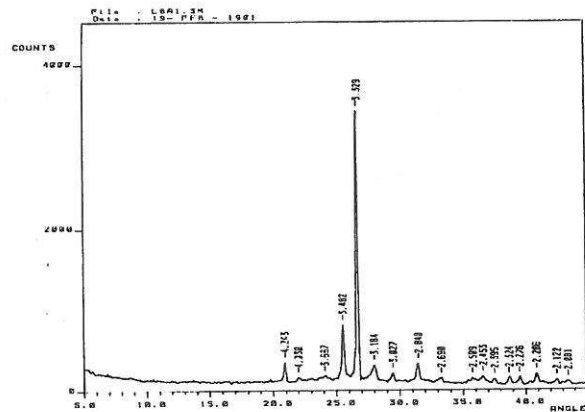
(ก) x 5000 เท่า

(ข) x 20000 เท่า

รูปที่ 2 ลักษณะของอนุภาคของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ก) กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) กำลังขยาย 20000 เท่า



รูปที่ 3 การกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 4 รูปแบบของผลึกของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์จากเครื่อง X-Ray Diffraction

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าหนักจากถ่านหิน-
ลิกไนต์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

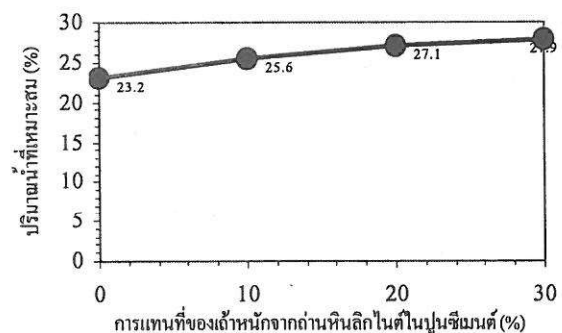
รายการวิเคราะห์		
องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	LBA
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	20.84	33.49
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	5.22	17.66
ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.20	4.90
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	66.28	11.61
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.24	0.95
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.22	0.56
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.10	0.07
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.41	0.33
ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO ₂)	0.25	1.13
ปูนขาวอิสระ (Free CaO)	0.99	1.57
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ (LOI, %)	0.96	16.10
ปริมาณความชื้น (%)	0.19	0.83
พื้นที่ผิวจำเพาะ (cm ² /g)	3248	6603
ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.53
ดัชนีการพัฒนากำลัง (SAI, %)		
7 วัน	100	90
28 วัน	100	90
ปริมาณน้ำที่ต้องการ (%)	100	101
ความหนาแน่นรวม (kg/l)	1.03	0.81

จากผลของการกระจายขนาดผลของอนุภาคเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงในรูปที่ 3 พบว่าขนาดอนุภาคของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร (D(v,0.5)) มีค่า 12.08 μm เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีขนาด 13.30 μm ซึ่งมีผลต่อการกระจายขนาดผลในส่วนผสมที่มีเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ และอนุภาคในช่วงขนาด 1 μm ถึง 10 μm เถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์จะมีปริมาณมากกว่าในปูนซีเมนต์ ในขณะที่ในช่วง 10 μm ถึง 100 μm จะมีค่าน้อยกว่า และเมื่อทำการวิเคราะห์รูปแบบผลึกของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction พบว่าเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์จะเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) (เส้นในแนวนานกับแกนนอน) เป็นส่วนใหญ่ จึงมีแนวโน้มที่เถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์จะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้

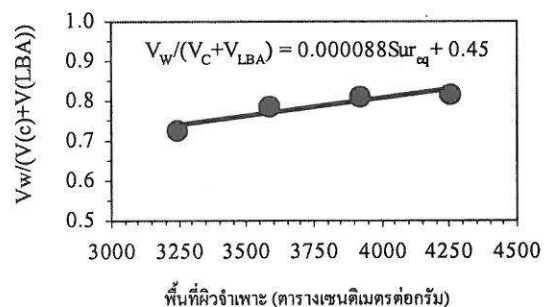
3.2 คุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เฟสค์

3.2.1 ความชื้นเหลวปกติ

จากผลการทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมแสดงในรูปที่ 5 พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 23.2, 25.6, 27.1 และ 27.9 ตามลำดับ เมื่อทำการแทนที่เถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ตามลำดับ เนื่องจากเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์มีพื้นที่ผิวสูงถึง 6603 cm²/g มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มี 3248 cm²/g ทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นในการเคลือบอนุภาคเพื่อให้เฟสค์อยู่ในสภาวะเหลว ประกอบกับปริมาณร้อยละการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ของเถ้าหนักสูงถึงร้อยละ 16.10 ซึ่งแสดงถึงปริมาณถ่านหินที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ [2] ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้น จากงานวิจัยของ Khunnoi D. [3] พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของวัสดุผง โดยความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับพื้นที่ผิวจำเพาะในวัสดุผง แสดงในรูปที่ 6 และความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์กับความชื้นเหลวปกติ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับพื้นที่ผิวจำเพาะเทียบเท่าของวัสดุผง

$$\frac{V_w}{V_c + V_{LBA}} = 0.000088 \text{ Sur}_{eq} + 0.45 \quad \text{.....(1)}$$

$$\text{Sur}_{eq} = r(\text{Sur}_{LBA}) + (1 - r)\text{Sur}_C \quad \text{.....(2)}$$

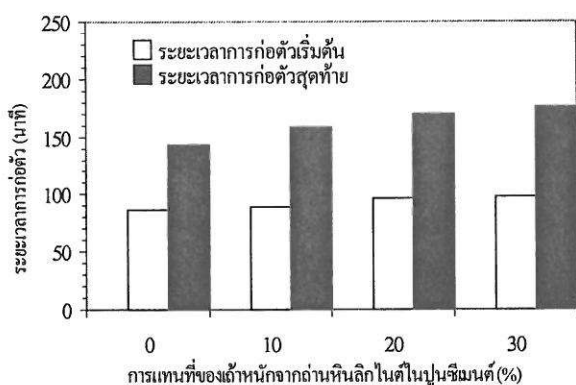
เมื่อ V_w , V_c และ V_{LBA} คือ ปริมาตรของน้ำ ปูนซีเมนต์ และเส้นใย
จากถ่านหินลิกไนต์ ตามลำดับ

Sur_{eq} , Sur_{LBA} และ Sur_c คือ พื้นที่ผิวจำเพาะเทียบเท่าของวัสดุผง
เส้นใยจากถ่านหินลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ ตามลำดับ

r คือ อัตราส่วนการแทนที่โดยน้ำหนักของเส้นใยจากถ่านหิน
ลิกไนต์ในปูนซีเมนต์ (0, 0.1, 0.2 และ 0.3)

3.2.2 ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวเป็นการอธิบายถึงการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์
จากสภาพที่ไหลได้เป็นสภาพที่แข็งตัว จากผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7
พบว่า การแทนที่ของเส้นใยจากถ่านหินลิกไนต์ที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ
30 ตามลำดับ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีค่า 87, 89, 97 และ 98 นาที ใน
ขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายมีค่า 143, 158, 169 และ 176 นาที ตาม
ลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการลด
ปริมาณปูนซีเมนต์ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเส้นใยจากถ่านหิน
ลิกไนต์ในส่วนผสม ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงตามลำดับ เป็นผลให้
ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวช้าลง [4] ระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะเริ่มต้นและสุด
ท้ายของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยจากถ่านหินลิกไนต์จึงนานกว่าซีเมนต์
เพสต์ธรรมดา



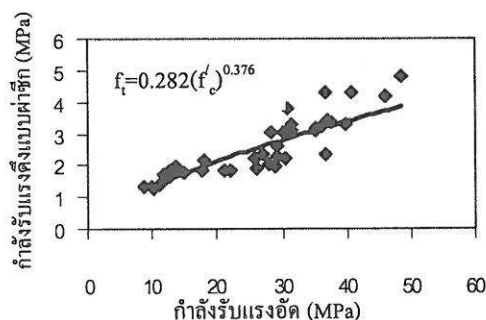
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์กับ
ร้อยละการแทนที่ของเส้นใยจากถ่านหินลิกไนต์

3.2.3 กำลังรับแรงอัด

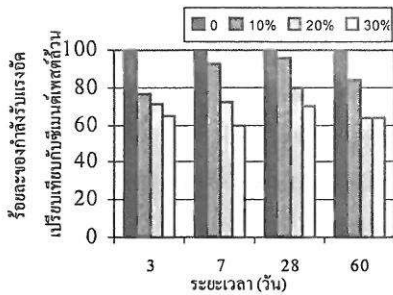
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 3, 7, 28
และ 60 วัน ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์จะ
มีค่าลดลงตามร้อยละการแทนที่ของเส้นใยจากถ่านหินลิกไนต์ในปูน
ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือที่อายุของเพสต์ 3 วัน แนวโน้มของกำลังรับแรง
อัดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.30 เมื่อทำการแทนที่เส้นใยจาก
ถ่านหินลิกไนต์จะมีค่าลดลงค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์
เพสต์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน และค่าความแตกต่างจะลดลงเมื่อมีอัตรา
ส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากในช่วงระยะต้นเส้นใยจาก
ถ่านหินลิกไนต์ไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิ
เกตไฮดรอกไซด์ ประกอบกับเส้นใยจากถ่านหินลิกไนต์มีปริมาณ
แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เพียงร้อยละ 11.61 ต่ำกว่าที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์
ที่มีร้อยละ 66.28 ซึ่งมีผลต่อกำลังรับแรงและค่าร้อยละการสูญเสีย
น้ำหนัก (LOI) ของเส้นใยจากถ่านหินลิกไนต์มีค่าสูงถึงร้อยละ 16.10 ทำ
ให้อายุที่การบ่มตัวอย่างในน้ำเกิดการดูดซับน้ำเข้าไปในเนื้อเพสต์
เมื่อปริมาณน้ำในเพสต์เพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดที่ได้จึงมีค่าลดลง แต่ในช่วง
อายุเพสต์เท่ากับ 7, 28 และ 60 วัน แนวโน้มของความแตกต่างจะลดลงใน
ทุกๆ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ทำการทดสอบ โดยที่ร้อยละการแทนที่
ของเส้นใยจากถ่านหินลิกไนต์ในปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 การพัฒนา
กำลังจะมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ล้วน ในขณะที่ร้อยละการแทนที่ 20
และ 30 กำลังรับแรงที่ได้จะมีค่าลดลงแต่จะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจาก
เส้นใยจากถ่านหินลิกไนต์ทำปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณ
ของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น

3.2.4 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

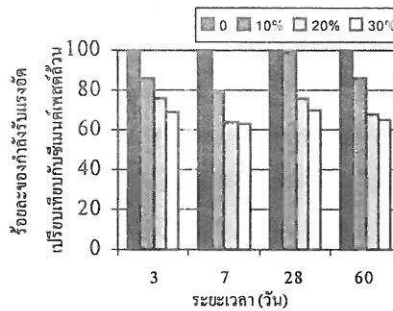
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของซีเมนต์เพสต์ที่
อายุ 3, 7, 28 และ 60 วัน แสดงในรูปที่ 10 ตามลำดับ พบว่ากำลังรับแรง
ดึงของซีเมนต์เพสต์ (f_t) จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่ากำลังรับแรงอัด (f'_c)
และเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ พบว่า
กำลังรับแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8



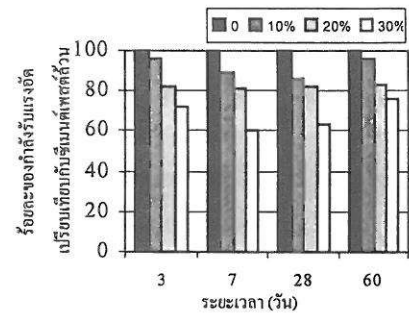
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับ
กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก



(ก) W/B = 0.30

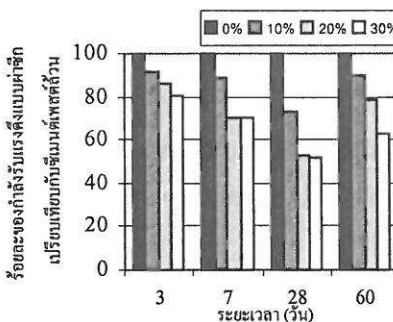


(ข) W/B = 0.35

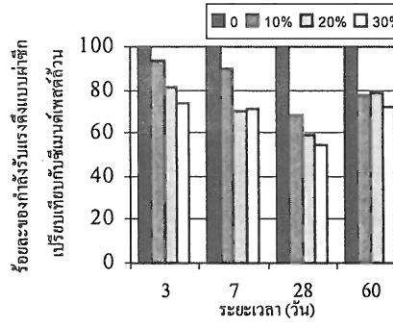


(ค) W/B = 0.40

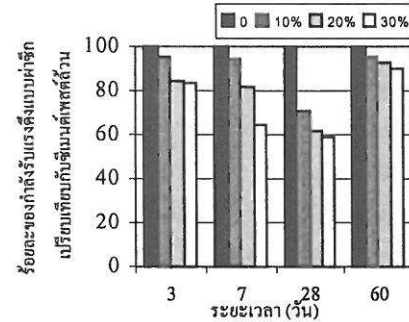
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์



(ก) W/B = 0.30



(ข) W/B = 0.35



(ค) W/B = 0.40

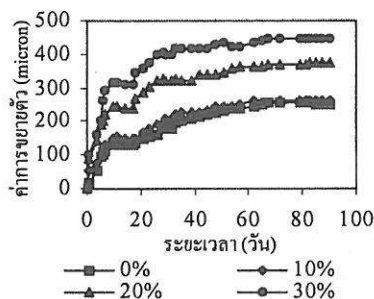
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของซีเมนต์เพสต์

3.3 คุณสมบัติด้านความคงทนของซีเมนต์เพสต์

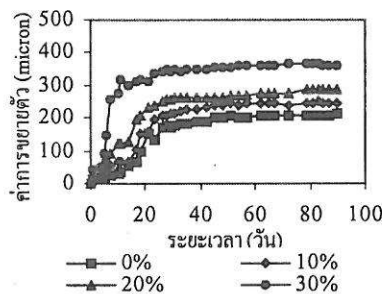
3.3.1 การขยายตัวในน้ำ

ผลการทดสอบการขยายตัวในน้ำของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์แสดงในรูปที่ 11 พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.30 การขยายตัวในน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และจะมีแนวโน้มเดียวกันทั้งที่อัตราส่วน 0.35 และ 0.40 เนื่องจากปริมาณของปูนขาวอิสระ (Free Lime) ของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ที่มีร้อยละ 1.57 มากกว่าใน

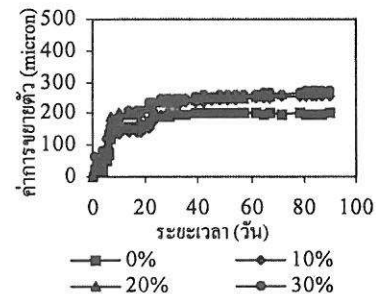
ปูนซีเมนต์ที่มีร้อยละ 0.99 การขยายตัวจึงเพิ่มขึ้นประกอบกับเถ้าหนักมีปริมาณร้อยละการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ที่สูงถึงร้อยละ 16.10 แสดงถึงปริมาณของคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำแล้วเกิดการขยายตัว [2] เมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะที่อิ่มตัวในน้ำ จึงมีแนวโน้มที่มีน้ำเข้าไปในโมเลกุลของคาร์บอนได้มากส่งผลให้เกิดการขยายตัวที่เพิ่มขึ้น



(ก) W/B = 0.30



(ข) W/B = 0.35



(ค) W/B = 0.40

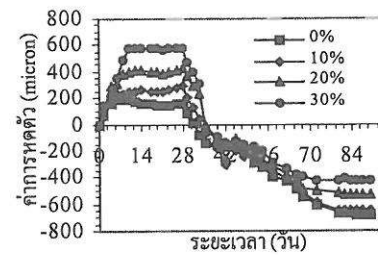
รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่าการขยายตัวในน้ำของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์

3.3.2 การหดตัวแบบแห้ง

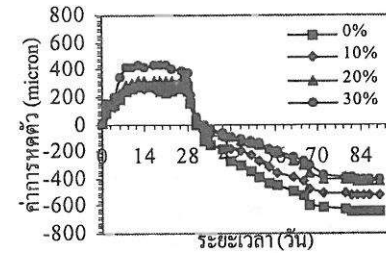
การหดตัวแบบแห้งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อซีเมนต์เพสต์อยู่ในอากาศที่มีสภาวะความชื้นต่ำ ทำให้บริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศเกิดการสูญเสียและหดตัว โดยเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ จากผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 12 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ การหดตัวจะมีค่าลดลงตามลำดับ โดยมีค่าน้อยที่สุดที่ร้อยละการแทนที่เท่ากับ 30 ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ที่มีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์เข้าไปในสัดส่วนที่มากขึ้น จะทำให้ขนาดของช่องคาพิลลารี (Capillary) มีขนาดเล็กลง ทำให้ปริมาณน้ำที่ออกสู่บรรยากาศลดลง การหดตัวแบบแห้งจึงมีค่าลดลงตามลำดับ

3.3.3 การหดตัวแบบออโตจีเนียส

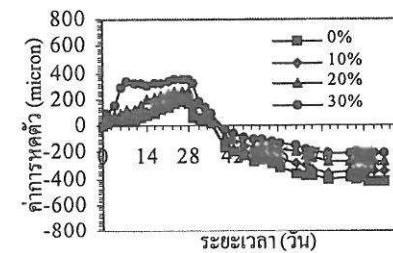
การหดตัวแบบออโตจีเนียส เป็นการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียไอน้ำในปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงอย่างเดียว โดยไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนกับสภาพแวดล้อม จากผลการทดสอบของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์แสดงในรูปที่ 13 พบว่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์มีปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) อยู่ร้อยละ 17.66 ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีร้อยละ 5.22 ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณของโครเมียมอะลูมิเนียมและเตตระไฮดรอกซีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อการหดตัว [5] กล่าวคือเมื่อสารตั้งต้นดังกล่าวทำปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่เป็นเอททริงไกต์ซึ่งเป็นผลึกเข็มจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยผลึกเข็มดังกล่าวจะมีการพัฒนาโครงสร้างขยายออกในแนวแกนของเข็ม ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มจำนวนโพรงที่ละเอียดให้มากขึ้น [5] ประกอบกับขนาดอนุภาคของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโพรงได้ จากเหตุผลข้างต้นทำให้แรงดันในโพรงเพิ่มขึ้น การหดตัวจึงเกิดขึ้นมาก ส่วนการหดตัวแบบออโตจีเนียสที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35 และ 0.40 ตามลำดับ จะมีแนวโน้มลักษณะ



(ก) W/B = 0.30



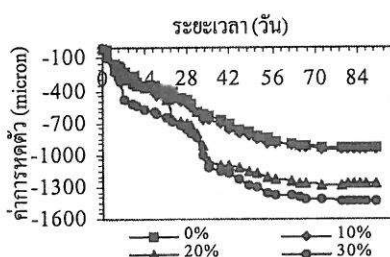
(ข) W/B = 0.35



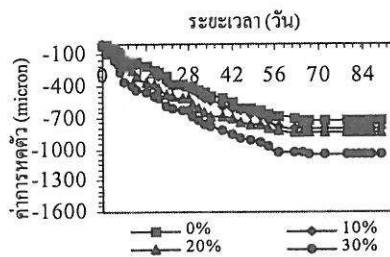
(ค) W/B = 0.40

รูปที่ 12 การเปรียบเทียบการหดตัวแบบแห้ง

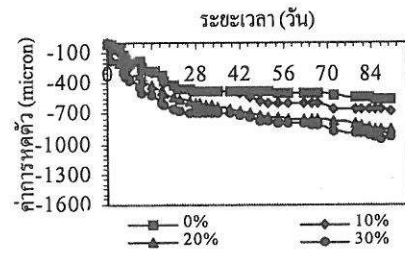
เดียวกัน แต่จะมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราส่วน 0.30 เนื่องจากปริมาณน้ำมากขึ้น จะมีน้ำอิสระ (Free Water) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้นเป็นสาเหตุให้ความดันในช่องคาพิลลารีลดลง การหดตัวแบบออโตจีเนียสจึงลดลงตามลำดับ



(ก) W/B = 0.30



(ข) W/B = 0.35



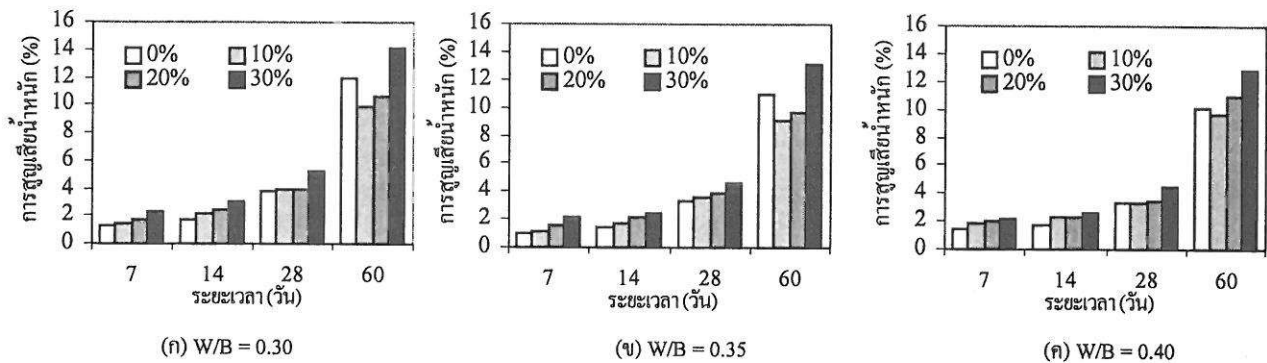
(ค) W/B = 0.40

รูปที่ 13 การเปรียบเทียบค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์

3.4 ความทนทานต่อกรดซัลฟูริก

ผลการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกแสดงในรูปที่ 14 พบว่าในช่วง 7, 14, 28 และ 60 วัน เมื่อแทนที่เถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์เพิ่มขึ้นค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าหนักมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ถึงร้อยละ 16.10 ซึ่งเพิ่มการดูดซับน้ำ เมื่อถูกแช่ในกรดซัลฟูริกจึงสามารถกัดกร่อนเนื้อของซีเมนต์เพสต์ได้เพิ่มขึ้น ประกอบกับปริมาณขี้ขี้ซึ่งทำปฏิกิริยากับกรดได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติในการขัดเกาะกับผิวของซีเมนต์เพสต์

ลดลง ค่าการสูญเสียน้ำหนักจึงเพิ่มขึ้น แต่จะสังเกตว่าที่อายุของซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 60 วัน การแทนที่เถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ที่ร้อยละ 10 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์จะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ล้วน เนื่องจากเริ่มเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและมีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้น ทำให้เนื้อของซีเมนต์เพสต์มีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นและความละเอียดของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ทำให้เพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน การกัดกร่อนจึงลดลง



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียน้ำหนักจากกรดซัลฟูริกกับร้อยละการแทนที่ของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ในปูนซีเมนต์

4. สรุป

1. จากการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์พบว่าค่าดัชนีการพัฒนากำลังที่ 7 และ 28 วัน มีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ล้วน
2. จากคุณสมบัติทางกลของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ พบว่า
 - 2.1 ค่าความชื้นเหลวปกติจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุผง โดยความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ

$$\frac{V_w}{V_c + V_{LBA}} = 0.000088 \text{ Sur}_{eq} + 0.45$$

- 2.2 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น
- 2.3 ซีเมนต์เพสต์ในช่วง 3 และ 7 วัน การแทนที่เถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ในปริมาณเพิ่มจะลดกำลังรับแรงลง ในขณะที่อายุ 60 วัน เมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าหนักในปูนซีเมนต์เท่ากับ 10 มีการพัฒนากำลังขึ้นมาใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ล้วน
3. จากคุณสมบัติด้านความคงทน พบว่าค่าการขยายตัวในน้ำ การหดแบบบอโดจีเนียสและค่าการสูญเสียน้ำหนักจากกรดจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่การหดตัวแบบแห้งกลับลดลงตามสัดส่วนการแทนที่เถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ในปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าหนักจากถ่านหินลิกไนต์ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศุภโรจ พูลวณิชชสกุล และคณะ "คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมมวลรวมถ่านลิกไนต์" วิศวกรรมสาร ฉบับที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2542 หน้า 63 - 68
- [2] Hewlett, P.C., (1998), "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", 4th Edition, Edward Arnold Ltd., New York USA.
- [3] Khunnoi D. (1996) "Development of Aggregates Utilizing Lignite Fly Ash", M.Eng Thesis No. ST. 96-1, Asian Institute of Technology Thailand.
- [4] Neville A.M., (1995) "Properties of Concrete", Longman, London, England.
- [5] Tazawa E., (1999), "Autogenous Shrinkage of Concrete", 1st edition, E & FN Spon, London, England.