

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

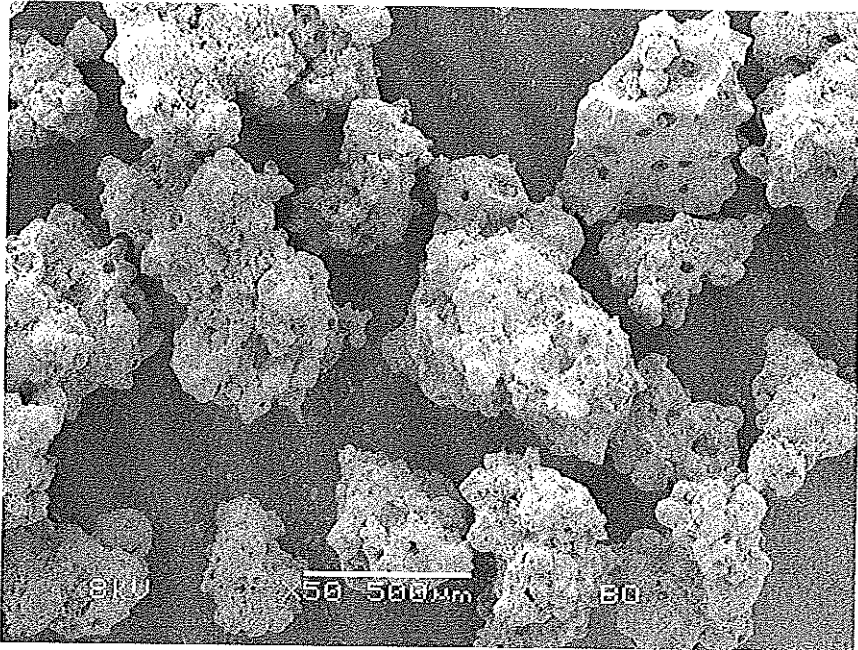
การแสดงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ของเก้าอี้กันเตาบดละเอียดและปูนซีเมนต์ ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่

1. คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ
2. องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ
3. กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต

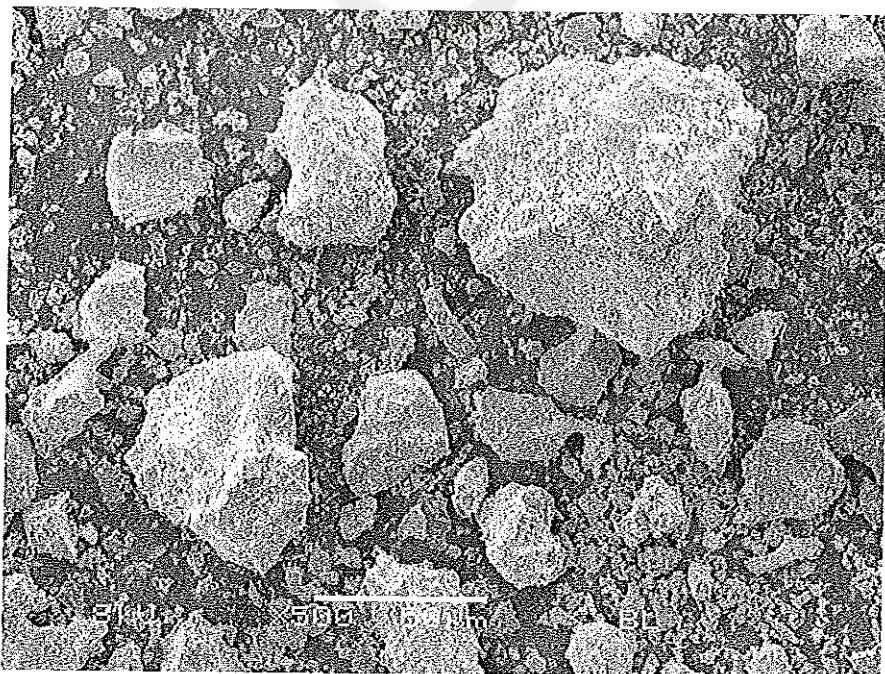
#### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

##### 4.1.1. รูปร่างของวัสดุ

ภาพประกอบที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงภาพถ่ายขยายของเก้าอี้กันเตาก่อนบด เก้าอี้กันเตาบดละเอียด และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถ่ายโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในกำลังขยายต่างๆ กันตามความเหมาะสมของขนาดอนุภาคของวัสดุ ซึ่งในภาพประกอบที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายขยายของเก้าอี้กันเตาก่อนบด เห็นได้ว่าเก้าอี้กันเตาก่อนการบดมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีรูปทรงที่ไม่แน่นอน พื้นผิวส่วนใหญ่มีลักษณะที่ขรุขระ มีรูพรุนสูง คล้ายกับการนำเอาวัตถุทรงกลมที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันหลายขนาดมาอัดติดกัน ส่วนภาพประกอบที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายขยายของเก้าอี้กันเตาบดละเอียด โดยเก้าอี้กันเตาเมื่อถูกบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงแล้วนั้น จะมีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุมอย่างเห็นได้ชัดเจนขึ้นและพื้นผิวภาพนอกเรียบมากขึ้นเมื่อเทียบกับเก้าอี้กันเตาก่อนบด จะสังเกตเห็นว่าพื้นผิวที่ผ่านกระบวนการบดมีการแตกหักที่ชัดเจนขึ้น รูพรุนภายในเนื้อเก้าอี้กันเตาลดลง พื้นผิวที่เคยขรุขระจากรูพรุนต่างๆ เปลี่ยนเป็นความขรุขระที่เกิดจากการบดละเอียดแบบตกรกระทบเหมาะแก่การทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น กล่าวคือเก้าอี้กันเตาบดละเอียดมีเนื้อแน่นหรือความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากไม่มีรูพรุนปรากฏให้เห็นจากภาพถ่ายขยายของเก้าอี้กันเตาบดละเอียดนั่นเอง

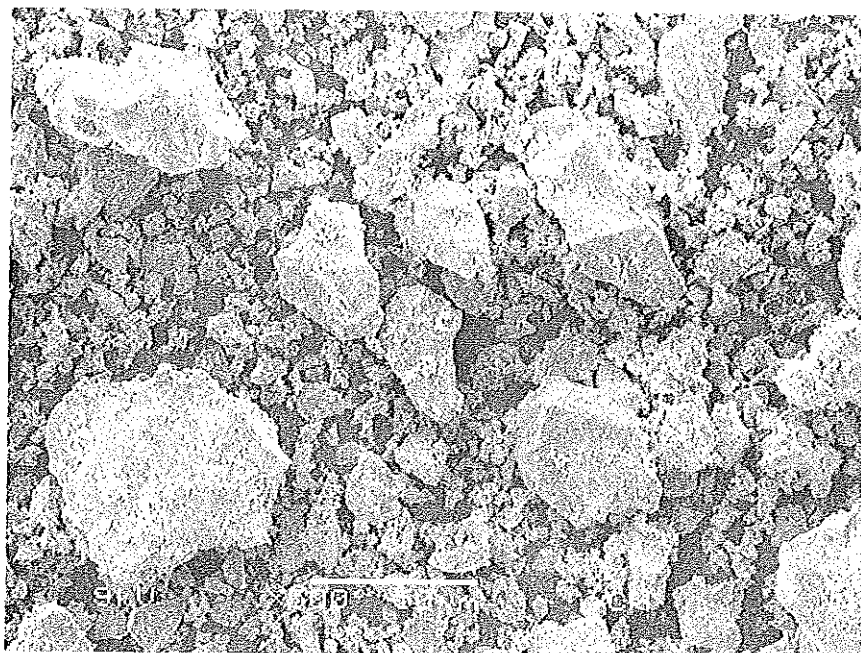


ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของถ้ำกั้นเตาถ่านอบค (OB) โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 50 เท่า



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของถ้ำกั้นเตาบละเอียด (BC) โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 500 เท่า





ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) กำลังขยาย 500 เท่า

สำหรับภาพประกอบที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อทำการพิจารณาจะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและมีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุม พื้นผิวบางส่วนมีลักษณะขรุขระ บางส่วนก็เรียบ แต่ก็มีความคล้ายคลึงกันดี มีเนื้อแน่นเนื่องจาก ไม่มีรูพรุนปรากฏให้เห็นที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคของปูนซีเมนต์

#### 4.1.2. ความถ่วงจำเพาะ

เมื่อทำการพิจารณาความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ และเถ้าก้นเตาบดละเอียด ซึ่งแสดงในตาราง 2 พบว่าปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 และความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาบดละเอียด (BC) มีค่าเท่ากับ 2.77 จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาคุณภาพด้วยการบดเถ้าก้นเตาให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะมีค่ามากขึ้น เหตุที่ความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตามีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการบด เพราะเถ้าก้นเตามีลักษณะที่กลวง ปริมาณของรูพรุนสูงทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าน้อย แต่เมื่อยังทำการบดให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง ปริมาณของรูพรุนก็หายไป ได้มากค่าความถ่วงจำเพาะจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Jaturapitakkul และ Cheerarot (2003 : 48-53) ได้ทำการศึกษาในเรื่องของการพัฒนาคุณภาพของเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ด้วยการบด พบว่าเถ้าก้นเตาก่อนบดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.13 หลังจากทำการบดเถ้าก้นเตาให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง จนมีปริมาณค่าคงตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแล้ว ส่งผลให้มีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.70 และงานวิจัยของ Cheriaf, Cavalcante Rocha และ Pera (1999 : 1389-1391) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของเถ้าก้นเตาในประเทศบราซิล ด้วยการบด

ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าเถ้ากั้นเตาอ่อนบดจะมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.00 หลังจากทำการบดเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.25

#### 4.1.3. ความละเอียด

ในการทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์ และเถ้ากั้นเตาบดละเอียด ทำการทดสอบตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (1997 E : 217-219) โดยการใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เป็นอุปกรณ์ในการวัดค่าความละเอียด จากการทดลองพบว่าปูนซีเมนต์มีปริมาณการค้ำของวัสดุบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าร้อยละ 13.2 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้ากั้นเตาบดละเอียด (BC) มีปริมาณการค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 33.6 โดยน้ำหนัก ซึ่งอยู่ในช่วงที่กำหนดและมีขนาดอนุภาคค้ำบนตะแกรงไม่เกินร้อยละ 34 ของน้ำหนักทั้งหมด ซึ่งเป็นไปตามค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ในการทดสอบหาคุณสมบัติความเป็นวัสดุปอช ไซทานของ American Society for Testing and Materials (1997 G : 294-296)

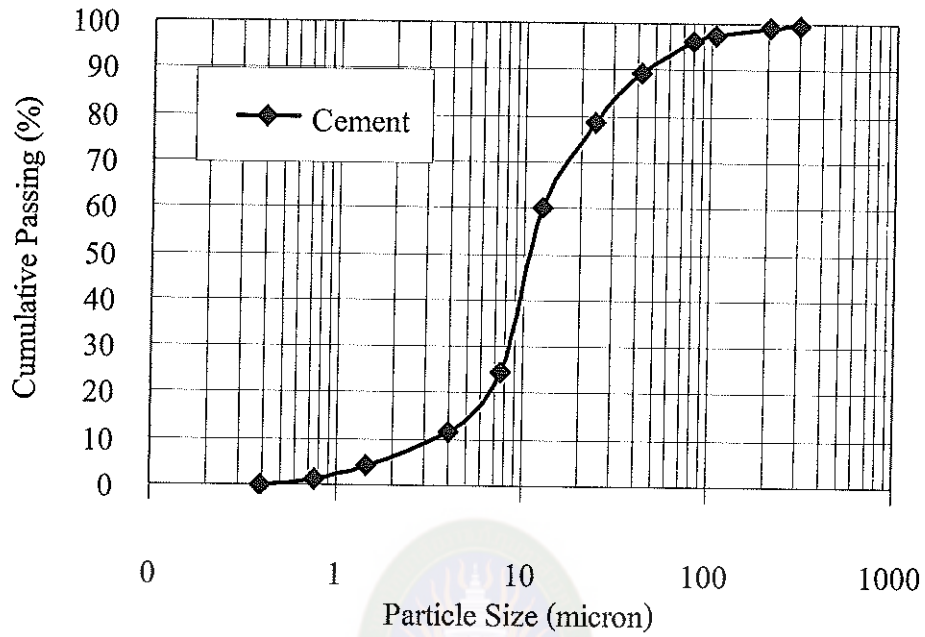
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

Sample	Specific Gravity	Median Particle Size, $d_{50}$ (micron)	Retained on Sieve No. 325 (%)
Cement	3.14	11.3	13.2
BC	2.77	22.2	33.6

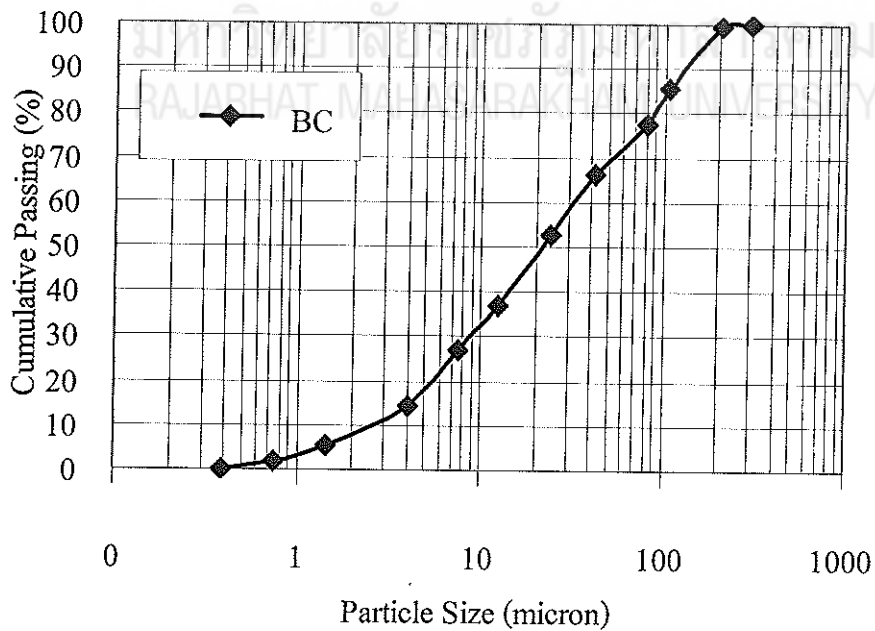
#### 4.1.4. ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาค

ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคสามารถหาได้โดยใช้เครื่อง LS Particle Size Analyzer สำหรับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ และเถ้ากั้นเตาบดละเอียดที่ได้จากการทดสอบได้แสดงในตาราง 2 พบว่าปูนซีเมนต์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 11.3 ไมโครเมตร สำหรับเถ้ากั้นเตาบดละเอียด (BC) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 22.2 ไมโครเมตร

สำหรับการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ แสดงในภาพประกอบที่ 7 ส่วนภาพประกอบที่ 8 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคเถ้ากั้นเตาบดละเอียด พบว่าการกระจายตัวของปูนซีเมนต์มีการกระจายตัวของอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันสม่ำเสมอ ส่วนเถ้ากั้นเตาบดละเอียด มีการกระจายตัวกว้างในช่วงสั้นๆ ของอนุภาคขนาดเล็กแต่เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่การกระจายตัวอยู่ในช่วงที่แคบลง เมื่อพิจารณาโดยรวมของการกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์และเถ้ากั้นเตาบดละเอียด พบว่าปูนซีเมนต์มีลักษณะการกระจายตัวที่แตกต่างจากเถ้ากั้นเตาบดละเอียด



ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแฉ่ำกันตาบดละเอียดขนาดใหญ่ (BC)

## 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

จากการศึกษาของ Tangtermsirikul (2002 : 169-177) ที่ทำการศึกษาร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เก้าอี้โดยการเก็บตัวอย่างของเก้าอี้เก้าอี้ทุกสองสัปดาห์เป็นเวลาสามเดือน พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เก้าอี้ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีค่าออกไซด์ของซิลิกาอยู่ในช่วงร้อยละ 45.24 ถึง 53.26 และมีออกไซด์ของอะลูมินาอยู่ในช่วงร้อยละ 18.43 ถึง 20.40 ส่วนออกไซด์ของเหล็กมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5.0 ถึง 7.86 ซึ่งเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เก้าอี้มีค่าสม่ำเสมอสำหรับ Jaturapitakkul และ Cheerarot (2003 : 48-53) ได้ทำการศึกษารายละเอียดคุณภาพเก้าอี้เก้าอี้ด้วยการบด โดยเก้าอี้เก้าอี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกใช้เป็นเก้าอี้เก้าอี้ที่ยังไม่ผ่านการบด ส่วนที่สองถูกนำไปบดด้วยเครื่อง Los Angeles และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบเคมีของเก้าอี้เก้าอี้พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก โดยมีผลต่างของออกไซด์ ซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก ของเก้าอี้เก้าอี้ก่อนบดและหลังบดอยู่ร้อยละ 2.1, 1.2 และ 0.1 ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เก้าอี้จากแหล่งเดียวกัน มีค่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือกล่าวได้ว่าไม่มีผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ถึงแม้จะถูกทำให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงด้วยวิธีการบดละเอียดก็ตาม ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกเก้าอี้เก้าอี้บดละเอียดขนาดเล็ก (BS) เพียงอย่างเดียวมาทำการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer หลังจากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีแล้วจะได้ค่าต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีหลักของเก้าอี้เก้าอี้บดละเอียดขนาดเล็กมีออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก อยู่ร้อยละ 46.02, 22.31 และ 10.64 ของออกไซด์ทั้งหมดตามลำดับ โดยคิดเป็นผลรวมของออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กเท่ากับร้อยละ 78.97 ของออกไซด์ทั้งหมด จากมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (1997 G : 294-296) ได้กำหนดชนิดเก้าอี้เก้าอี้หิน ชั้น F ต้องมีผลรวมออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็ก มีค่ารวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ของออกไซด์ทั้งหมด ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ซึ่งเก้าอี้เก้าอี้บดละเอียดขนาดเล็กมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเท่ากับร้อยละ 1.52 และ 2.72 ของออกไซด์ทั้งหมดตามลำดับ เห็นได้ว่าข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เก้าอี้บดละเอียดขนาดเล็กที่ได้จากตาราง 2 สามารถจัดเก้าอี้เก้าอี้จัดอยู่ในเก้าอี้เก้าอี้หิน Class F เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เก้าอี้บดละเอียดขนาดเล็กของงานวิจัยนี้กับเก้าอี้เก้าอี้หินที่นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งนำมาจากแหล่งเดียวกันของงานวิจัยที่ผ่านมาของ Kiattikomol และคณะ (2001 : 340) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เก้าอี้หินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะนี้จัดอยู่ในเก้าอี้เก้าอี้หิน ชั้น F โดยมีออกไซด์ของซิลิกา, อะลูมินา, เหล็ก และ LOI มีค่าเท่ากับร้อยละ 46.25, 26.43, 10.71,

และ 0.23 ของออกไซด์ทั้งหมดตามลำดับ เห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาบดละเอียด ขนาดเล็กจากงานวิจัยนี้กับเถ้าถ่านหินที่มาจากแหล่งเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical Composition (%)	Bottom Ash (BC)
SiO <sub>2</sub>	46.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.64
CaO	11.48
MgO	3.47
Na <sub>2</sub> O	0.07
K <sub>2</sub> O	3.47
SO <sub>3</sub>	1.52
LOI	2.72

#### 4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด ได้แสดงในตาราง 4 สำหรับกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด สามารถแยกพิจารณาออกเป็นหลายส่วน คือ ร้อยละกำลังอัด ผลกระทบของปริมาณการแทนที่

##### 4.3.1. ร้อยละกำลังอัด

ร้อยละกำลังอัดคืออัตราส่วนร้อยละระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่เถ้าก้นเตาบดละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยนำหน้าวัสดุประสานเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม (CC) ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

ร้อยละกำลังอัด (Percentage Compressive Strength)

$$= [A/B] \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่ A คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วน ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยนำหน้าวัสดุ

B คือ กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เพียงอย่างเดียว

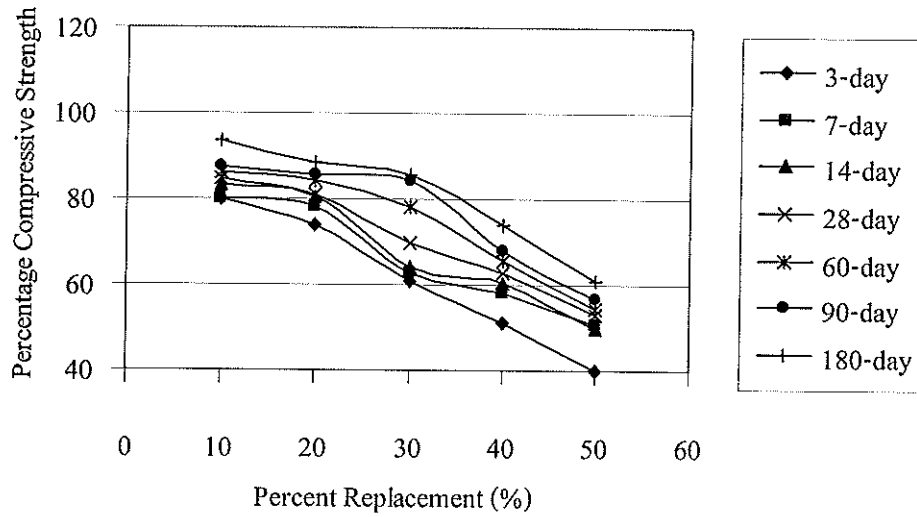


แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม โดยคอนกรีต 10BC(0.80), 20BC(0.80), 30BC(0.80), 40BC(0.80) และ 50BC(0.80) มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 12, 8, 10, 10 และ 12 ซม. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้แทนตาบดละเอียดที่ใช้ไม่ส่งผลกระทบต่อค่ายุบตัวของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นตาบดละเอียด ถูกแสดงในภาพประกอบที่ 9 พบว่าถ้าใช้แทนตาบดละเอียดที่อายุช่วงต้น มีเฉพาะคอนกรีตผสมเถ้ากั้นตาบดละเอียดที่มีอัตราการแทนที่น้อยกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สามารถพัฒนา กำลังอัดที่อายุ 7 วัน ได้สูงกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีตควบคุม เท่านั้น นอกนั้นทุกปริมาณการแทนที่ของเถ้ากั้นตาบดละเอียด ไม่สามารถพัฒนา กำลังอัดให้สูงกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีตควบคุม ได้ ตัวอย่างเช่น คอนกรีต CC(0.80), 10BC(0.80) และ 20BC(0.80) ที่อายุ 7 และ 14 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 117, 114 และ 153, 148 กก./ซม<sup>2</sup>. หรือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 80, 78 และ 85, 81 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ สาเหตุเป็นเพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากั้นตาบดละเอียดจะลดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และเถ้ากั้นตาซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานจำเป็นต้องอาศัยปฏิกิริยาไฮเดรชันในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งการทำปฏิกิริยาปอซโซลานนี้เกิดที่อายุช่วงปลายเท่านั้น ดังนั้นที่อายุช่วงต้นเถ้ากั้นตาบดละเอียดจึงไม่สามารถพัฒนา กำลังอัดให้สูงกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีตควบคุม

สำหรับกำลังอัดที่อายุช่วงปลายของเถ้ากั้นตาบดละเอียด พบว่าถ้าใช้แทนตาบดละเอียด จะสามารถพัฒนา กำลังอัดให้ใกล้เคียงร้อยละ 75 ของคอนกรีตควบคุมได้ เมื่อมีการแทนที่เถ้ากั้นตาในอัตราส่วนที่น้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 40 โดยที่อายุ 180 วันมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 208 กก./ซม<sup>2</sup>. หรือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 74 ของคอนกรีตควบคุม สำหรับปริมาณการแทนที่ของเถ้ากั้นตาบดละเอียดร้อยละ 50 สามารถพัฒนา กำลังอัดได้เท่ากับ 171 กก./ซม<sup>2</sup>. หรือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 61 ของคอนกรีตควบคุม เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงปริมาณปูนซีเมนต์จำนวนน้อยส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์น้อยตาม การทำปฏิกิริยาปอซโซลานจึงเกิดขึ้นช้า การพัฒนา กำลังอัดจึงเกิดขึ้นช้า กล่าวคือการพัฒนาคุณภาพของเถ้ากั้นตาด้วยการบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ โดยสามารถใช้ได้สูงถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน





ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณการแทนที่ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาละเอียด (BC)



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY