

ชื่อโครงการ “การศึกษาวิธีผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-เถ้าลอย เพื่อใช้ในคอนกรีต”

ประภาพร หงษ์สุวรรณ¹⁾ และ อานนท์ ชัยพานิช²⁾

ชื่อผู้วิจัย¹⁾ และชื่อหัวหน้าโครงการ²⁾

- 1) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- 2) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ *

Email : arnon@chiangmai.ac.th

บทคัดย่อ

ในการศึกษาเกี่ยวกับ วิธีผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-เถ้าลอย เพื่อใช้ในคอนกรีต เถ้าลอยที่นำมาใช้ได้มาจาก โรงไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปูนเม็ด และ ยิปซัม) ในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำการทดลอง 2 วิธี คือ การบดผสม (ปูนเม็ด, ยิปซัม และเถ้าลอย) เปรียบเทียบกับ วิธีการแยกผสม (เถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์) ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต และกำลังอัดของมอร์ต้า และคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-เถ้าลอย ณ อายุการบ่ม 1, 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน และทำการทดสอบคุณสมบัติบางประการ เช่น การวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ด้วยเครื่อง XRF และลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM จากผลการทดลอง พบว่า ระยะเวลาการก่อตัว ของคอนกรีต ใช้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น เมื่อผสม ปริมาณเถ้าลอยที่เข้าไปแทนที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งวิธีการบดผสม และวิธีการแยกผสม และสำหรับการทดสอบกำลังอัด พบว่า กำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-เถ้าลอย ที่ผลิตโดยวิธีการบดผสม จะให้ค่ากำลังอัดที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา จากการทดสอบที่อายุการบ่ม 3 วันในมอร์ต้า และ 90 วันในคอนกรีต ซึ่งดีกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับ วิธีผลิตโดยการแยกผสม

1. บทนำ

เถ้าลอย (fly ash) เป็นวัสดุที่เกิดจากกระบวนการ เผาถ่านหินในโรงไฟฟ้า โดยเกิดขึ้นหลังก่อจากโซน เผา ตัวอนุภาคของเถ้าที่หลอมถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิ $1,500^{\circ}\text{C}$ ลดลงเป็น 200°C ในช่วงเวลาสั้นๆ และเถ้าลอยเหล่านี้กลายเป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นทรงกลมและลอยตัวไปอยู่ที่ปากปล่อง จึงเป็นที่เรียกกันในนามของ ‘เถ้าลอย’ [1]

เถ้าลอยได้รับความนิยมมากขึ้น ในการนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อเป็นการลดปริมาณของเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงและเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้ คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยยังมีความคงทนเท่าเทียมกับ หรือดีกว่าคอนกรีตที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ให้ผลิตภัณฑ์ชนิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็น

สารประกอบที่มีคุณสมบัติยึดประสาน ส่งผลดีให้มีกำลังอัดมากขึ้น [2]

สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของเถ้าลอย ซึ่งการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยนั้น โดยปกติแล้วจะเห็นผลในระยะยาว (>28 วัน) และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะมีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3, 4] ซึ่งทำให้เป็นอุปสรรคที่สำคัญอย่างหนึ่งต่อการใช้งานในทางปฏิบัติที่ต้องทนต่อกำลังอัดในช่วงแรก (≤ 28 วัน) ปัจจัยที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าลอยคือความละเอียดของอนุภาคเถ้าลอย [4] ทั้งนี้ได้มีการพบว่าการบดเถ้าลอยจะเพิ่มคุณสมบัติกำลังอัดให้เร็วขึ้น [4-8]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษเกี่ยวกับ กำลังอัดของคอนกรีต รวมถึงมอร์ต้า ที่ผสมเถ้าลอยที่ผ่านการบดแล้ว (วิธีบดผสม) เปรียบเทียบกับวิธีการผสมเถ้าลอยที่ใช้โดยปกติ (วิธีแยกผสม) นอกจากนี้นงานวิจัยนี้

ได้ทำการศึกษาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสม และไม่ผสมเถ้าลอยอีกด้วย

2. อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

- ก. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM)
- ข. เครื่องวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ X-Ray Fluorescence (XRF)
- ค. เครื่องบดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 21 นิ้ว บรรจุลูกบดเหล็กทรงกลม คละขนาด
- ง. เครื่องผสมคอนกรีต
- จ. เครื่องทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า และเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต
- ฉ. เครื่องมือทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

2.1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

- ก. ปูนเม็ด (Clinker)
- ข. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- ค. เถ้าลอย จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง
- ง. ยิปซัม จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง
- จ. ทราย ล้างน้ำจนสะอาดและอบให้แห้ง
- ฉ. หินคละขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 3/4 นิ้ว ล้างจนสะอาดและอบให้แห้ง
- ช. น้ำประปา

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 วิธีผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-เถ้าลอย

การทดลองนี้ได้แบ่ง วิธีการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-เถ้าลอยออกเป็น 2 วิธี คือ

1. วิธีการแยกผสม (Separate Mix)

การแยกผสม คือ การนำเถ้าลอย มาผสมรวมกันกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบทั้งในมอร์ต้า และคอนกรีต

2. วิธีการบดผสม (Inter Grind)

การบดผสม คือ การนำเถ้าลอย มาบดผสมรวมกันกับปูนเม็ด และยิปซัม ในร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบทั้งในมอร์ต้า และคอนกรีต

2.2.2 ขั้นตอนการผสมและทดสอบคุณสมบัติ

คุณสมบัติทางกายภาพ

ทำการทดสอบลักษณะทางกายภาพ ของผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงเถ้าลอย ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) เพื่อดูลักษณะอนุภาคของผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงเถ้าลอย

คุณสมบัติทางเคมี

ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนเม็ด และเถ้าลอย ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence

การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต

ผลการทดสอบการก่อตัวของตัวอย่างคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ ทราย หิน น้ำ) ด้วยเครื่องมือทดสอบ Setting time สามารถหาได้จากการนำข้อมูล ของระยะเวลา (นาที่) และระยะจม (ปอนด์/ตารางนิ้ว) ที่ได้ไปหากราฟความสัมพันธ์ โดยทำการหาระยะการก่อตัว 3 ช่วง คือระยะเริ่มก่อตัว (นาที่) ที่ 70 ปอนด์/ตารางนิ้ว ก่อตัวระยะต้น (นาที่) ที่ 500 ปอนด์/ตารางนิ้ว และก่อตัวระยะปลาย (นาที่) ที่ 4,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM C403

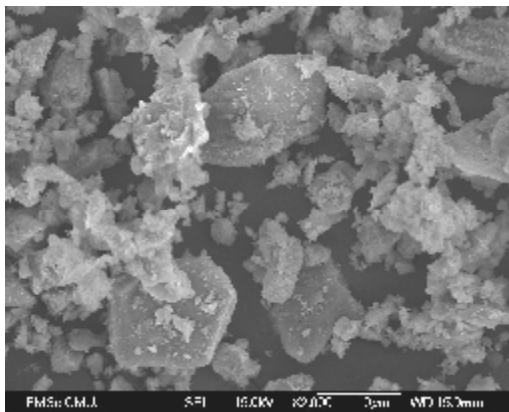
การทดสอบกำลังอัด

ทำการผสมมอร์ต้า (ทราย, ปูนซีเมนต์ และน้ำ) และคอนกรีต (หิน, ทราย, ปูนซีเมนต์ และน้ำ) จากนั้นนำมาหล่อเป็นก้อนทดสอบขนาด 50x50x50 ลูกบาศก์ มิลลิเมตร สำหรับมอร์ต้า และ 150x150x150 ลูกบาศก์ มิลลิเมตร สำหรับคอนกรีต โดยนำก้อนทดสอบมอร์ต้า ไปบ่มในห้องบ่ม ที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 23 ± 1.7 องศาเซลเซียส และความชื้นมากกว่า 95% ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่มที่ 12-2532 ส่วนก้อนทดสอบคอนกรีต บ่มในบ่อน้ำประปาตามธรรมชาติ เมื่อก้อนทดสอบมีอายุทดสอบตามกำหนด นำไปหาค่ากำลังอัด

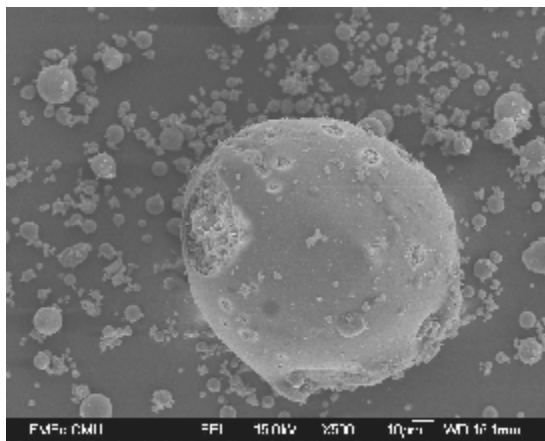
ณ อายุทดสอบนั้น ซึ่งมีหน่วยเป็น kgf/cm^2 ตามมาตรฐาน BS 1881

3. ผลการทดลอง และอภิปรายผล

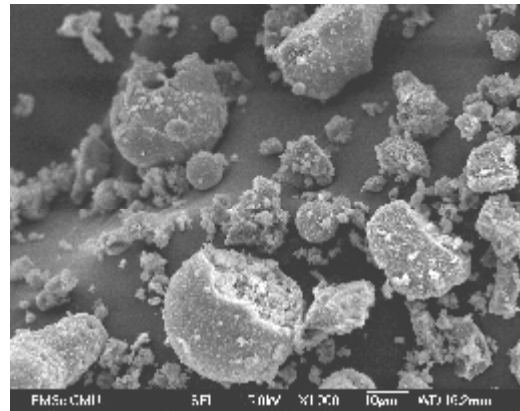
การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ คือ ทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ทั้งทางด้านกายภาพ และทางด้านองค์ประกอบทางเคมี ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1, 3.2(ก), 3.2(ข) และตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพถ่าย SEM แสดง อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำลังขยาย 2,000 เท่า



รูปที่ 3.2(ก) ภาพถ่าย SEM แสดง อนุภาคของเถ้าลอยแม่เมาะ โดยไม่ได้ผ่านการบด กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 3.2(ข) ภาพถ่าย SEM แสดง อนุภาคของเถ้าลอยแม่เมาะ โดยผ่านการบดรวมกับปูนเม็ด กำลังขยาย 1,000 เท่า

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

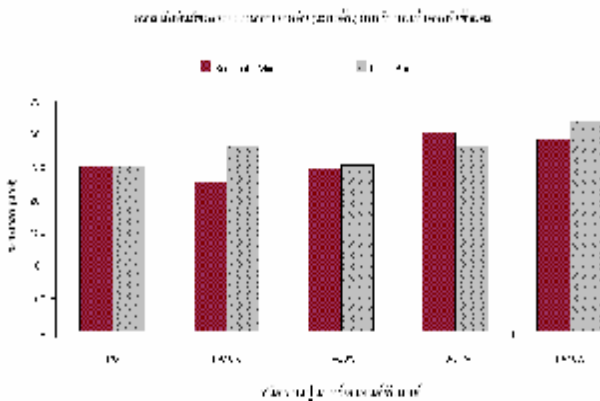
องค์ประกอบทางเคมี		ปูนซีเมนต์	ปูนเม็ด	เถ้าลอย
Silicon dioxide (SiO_2)	%	20.85	21.79	42.74
Aluminum oxide (Al_2O_3)	%	4.98	5.13	24.16
Ferric oxide (Fe_2O_3)	%	3.52	3.36	11.60
Calcium oxide (CaO)	%	64.30	66.08	13.64
Magnesium oxide (MgO)	%	1.53	1.44	3.14
Sulfur trioxide (SO_3)	%	2.64	0.47	1.53
Loss on ignition (LOI)	%	1.40	0.96	0.28

เมื่อทำการถ่ายภาพ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) พบว่า อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (รูปที่ 3.1) นั้นมีขนาด และรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม และขรุขระ ส่วนลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอย โดยเถ้าลอยที่ยังไม่ผ่านการบด (รูปที่ 3.2(ก)) จะประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม กลวงบรรจุด้วยอนุภาคขนาดเล็กอยู่ภายใน เมื่อผ่านการบด จะทำให้อนุภาคทรงกลมขนาดเล็ก ที่อยู่ภายในแตกออกมา (รูปที่ 3.2(ข))

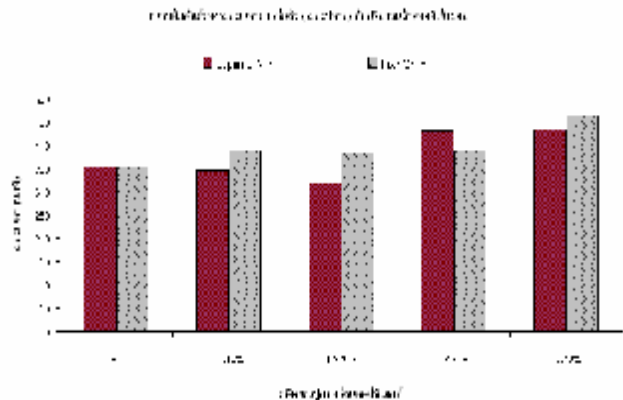
จากตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี ของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) จะเห็นว่าเถ้าลอยที่นำมาใช้เป็น ส่วนผสมคอนกรีตนั้น มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ ร้อยละ 42.74 และ 24.16 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ของปูนซีเมนต์

3.1 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

จากผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว ของคอนกรีตที่ผสม และไม่ผสมเถ้าลอย ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต กับปริมาณเถ้าลอยที่เข้าไปแทนที่ร้อยละ 10 20 30 และ 40 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาการก่อตัวชัดเจนขึ้น นั่นคือเมื่อใส่ปริมาณเถ้าลอย แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10 20 30 และ 40 จะทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อตัวนานขึ้น



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการก่อตัว (ระยะต้น) ของคอนกรีต กับปริมาณเถ้าลอยที่เข้าไปแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40

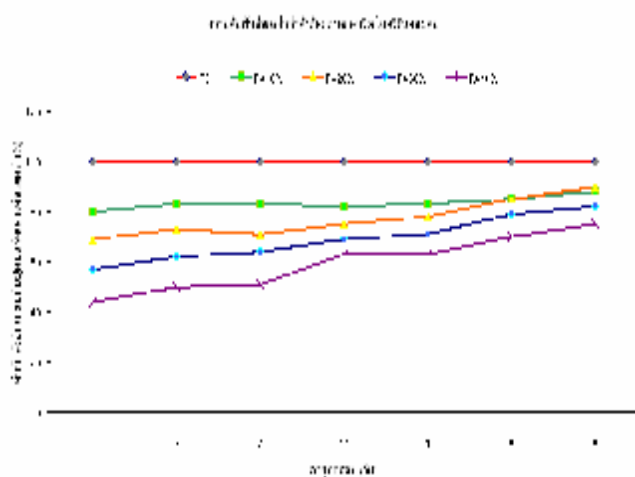


รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการก่อตัว (ระยะปลาย) ของคอนกรีต กับปริมาณเถ้าลอยที่เข้าไปแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40

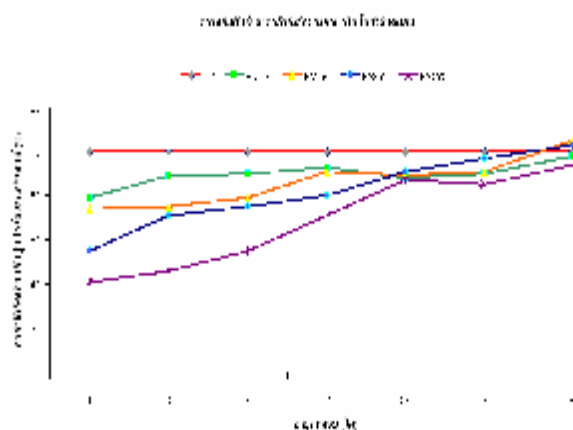
3.2 ผลการทดสอบกำลังอัด

ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าที่ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 10 20 30 และ 40) โดยวิธีการแยกผสม จะให้กำลังอัดใกล้เคียง หรือสูงกว่ามอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าลอย (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 100%) ที่อายุ 90 วัน สำหรับค่ากำลังอัดของมอร์ต้าที่ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 10 20 30 และ 40) โดยวิธีการบดผสมนั้นให้กำลังอัดใกล้เคียง หรือสูงกว่ามอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าลอย (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 100%) ที่อายุ 28 วัน และให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าที่อายุ 3 วัน เมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 10 ส่วนค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 10 20 30 และ 40) โดยวิธีการแยกผสมพบว่า ระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต มีผลต่อการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยนั้น มีการพัฒนา กำลังอัดขึ้นเรื่อยๆ แต่จากผลการทดลองเห็นได้ว่า การทดลองโดยวิธีแยกผสมนี้ต้องใช้เวลานานกว่า 90 วัน ดังรูปที่ 3.5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต คิดเป็นร้อยละเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดเฉลี่ยของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่ผสมเถ้าลอย จึงเห็นผลของกำลังอัดที่สูงกว่า คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 100%) สำหรับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 10 20 30 และ 40) โดยวิธีการบดผสม จะให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียง หรือ

สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 100%) ที่อายุ 90 วัน โดยผลการทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต คิดเป็นร้อยละเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดเฉลี่ย ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่ผสมเถ้าลอย เห็นได้จากรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตคิดเป็นร้อยละเทียบกับกำลังอัดเฉลี่ยของปูนปอร์ตแลนด์



ไม่ผสมเถ้าลอย โดยวิธีการแยกผสม

รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตคิดเป็นร้อยละเทียบกับกำลังอัดเฉลี่ยของปูนปอร์ตแลนด์ไม่ผสมเถ้าลอย โดยวิธีการบดผสม

มอร์ต้า และคอนกรีต โดยวิธีการบดผสมเถ้าลอย จะให้ค่ากำลังอัดที่ดีกว่า มอร์ต้า และคอนกรีต โดย

วิธีการแยกผสม เนื่องจากการบดเถ้าลอยที่มีลักษณะเป็นทรงกลม และกลวง จะทำให้อนุภาคเล็กๆ ที่อยู่ภายในนั้นหลุดออกมา ซึ่งอนุภาคเล็กๆ เหล่านี้จะช่วยอุดบริเวณช่องว่าง ที่เกิดระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ทำให้มีความแน่นตัวมากขึ้น ปริมาณช่องว่างลดลง และช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.1 พบว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-เถ้าลอย โดยวิธีการบดผสมนั้น สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้ดียิ่งขึ้น

4.2 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยวิธีการแยกผสม และบดผสม ซึ่งทำการผสมเถ้าลอย โดยการแทนที่ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ร้อยละ 10 20 30 และ 40 พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของคอนกรีต ทั้งวิธีการแยกผสม และบดผสม จะใช้เวลา นานมากขึ้น เมื่อปริมาณเถ้าลอยที่เข้าไปแทนที่ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพิ่มขึ้น

4.3 จากการวิเคราะห์กำลังอัดของมอร์ต้า และคอนกรีต โดยวิธีการแยกผสม และบดผสม ซึ่งทำการผสมเถ้าลอย โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 10 20 30 และ 40 พบว่าเถ้าลอยที่ผ่านการบด หรือโดยวิธีบดผสม เมื่อนำไปใช้เป็นส่วนผสมมอร์ต้า และคอนกรีต จะมีการพัฒนากำลังอัดดีกว่าเถ้าลอยที่ถูกผสมโดยตรง หรือ โดยวิธีการแยกผสม เปรียบเทียบในปริมาณแทนที่ของเถ้าลอย ที่เท่ากัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการ โครงงานอุตสาหกรรม สำหรับนักศึกษาปริญญาตรี (IPUS) ประจำปี 2546 ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ หวังว่าโครงงานนี้จะมีประโยชน์ในการใช้เป็นแนวทางของการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จาก

การเผาถ่านหินลิกไนต์ ไปใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์-เถ้าลอยต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

1. Malhotra V.M. and Mehta P.K.,
Pozzolan and cementitious materials,
Advance in Concrete Technology, Vol.1,
1996, Gordon and Breach Publishers,
191pp.
2. Joshi R.C. and Lohtia R.P., Types and
properties of fly ash, Progress in cement,
Ed. Ghosh S.N., 1993, pp118-157.
3. Neville A.M., Properties of concrete,
1995, 4th Edition, Longman, 844pp.
4. Mehta P.K., Influence of fly ash
characteristics on the strength of
Portland-fly ash mixture, Cement and
Concrete Research, 1985, Vol. 15,
pp.669-674.
5. Slanicka S., The influence of fly ash
fineness on the strength of concrete,
Cement and Concrete Research, 1991,
Vol. 21, pp.285-296.
6. Erdogan K. and Turker P., Effects of fly
ash particle size on strength of Portland
cement fly ash mortars, Cement and
Concrete Research, 1998, Vol. 28,
pp.1217-1222.
7. Paya J., Monzo J., Borrachero M.V.,
Peris E. and Gonzalez-Lopez E.,
Mechanical treatments of fly ashes. Part
III: Studies on strength development of
ground fly ashes (GFA)-Cement Mortars,
Cement and Concrete Research, 1997,
Vol. 27, 1365-1377.
8. Kiattikomol K., Jaturapitakkul C.,
Songpiriyakij and Chutubtim S., A study
of ground coarse fly ashes with different

finenesses from various sources as
pozzolanic materials, Cement and
Concrete Composites, 2001, 23, pp.335-
343.