

การศึกษากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียด
กรณีศึกษา ส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่
และค่าการยุบตัวคงที่

A STUDY OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE WITH
BOTTOM ASH AS PARTIAL REPLACEMENT FOR FINE AGGREGATE:
A CASE STUDY WITH A CONSTANT WATER CEMENT RATIO AND
A CONSTANT SLUMP VALUE

จิรา ธรรมนิยม*, สุรเชษฐ์ วรรณ

Jira Tamniyom*, Surachet Wanna

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: jira.t@psru.ac.th

วันที่เข้ารับ 21 พฤษภาคม 2567

วันที่แก้ไขบทความ 16 กันยายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 23 กันยายน 2567

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดกรณีศึกษา อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่และค่าการยุบตัวคงที่ โดยออกแบบคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.55 ใช้เถ้าก้นเตาสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ทดแทนมวลรวมละเอียดที่ ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 50 และ 100 โดยปริมาตร ทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, และ 28 วัน พบว่า กรณีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ค่าการยุบตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้นแปรผันตามปริมาณเถ้าก้นเตา และกำลังอัดมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อนำไปทดแทนมวลรวมละเอียดไม่เกินร้อยละ 30 กรณีค่าการยุบตัวของคอนกรีตคงที่ ขณะทำการผสมคอนกรีตจะมีน้ำส่วนเกินที่คายออกมาจากเถ้าก้นเตา ต้องทำการลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต เพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับคอนกรีตควบคุม และจากผลการทดสอบ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตในทุกอัตราส่วนผสมมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม

คำสำคัญ: เถ้าก้นเตา, กำลังอัดคอนกรีต, การบ่มภายใน

Abstract

This research aims to investigate the compressive strength of concrete using coal bottom ash as a replacement for fine aggregate. In this case study, the researchers fixed the water-to-cement ratio and the slump value. They designed concrete with a water-to-cement ratio (W/C) of 0.55 and used coal bottom ash in a saturated surface dry condition to replace fine aggregate at percentages of 0%, 10%, 20%, 30%, 50%, and 100% by volume. The results revealed that when the water-to-cement ratio was fixed, the slump value significantly increased with the increasing percentage of coal bottom ash, and the compressive strength was higher than that of the control concrete when the replacement of fine aggregate did not exceed 30%. In cases where the slump value of the concrete was fixed, excess water flowed out of the coal bottom ash during the mixing process. To achieve a slump value equivalent to the control concrete, reducing the amount of water used in concrete mixing was necessary. From the test results, it was found that the compressive strength of concrete at all replacement percentages was higher than that of the control concrete.

Keywords: Bottom ash, Compressive strength, Internal curing

1. บทนำ

เถ้าลอย (Fly ash) และเถ้าก้นเตา (Bottom ash) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยถูกนำไปใช้ในการผสมคอนกรีตโดยการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนอย่างแพร่หลาย แต่ในทางกลับกัน เถ้าก้นเตาถูกนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย ถึงแม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีจะมีความใกล้เคียงกับเถ้าลอย เนื่องจากเถ้าก้นเตามีขนาดใหญ่การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวด้านนอกที่สัมผัสน้ำเท่านั้น การนำเถ้าก้นเตาไปทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนนั้นจึงจำเป็นต้องนำไปบดละเอียดให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตให้เพิ่มมากขึ้น

การนำเถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีต เถ้าก้นเตามีลักษณะรูปร่างที่กลวงพรุน ผิวหยาบ ขรุขระ มีค่าการดูดซึมน้ำค่อนข้างสูง เมื่อนำมาผสมคอนกรีตความหนาแน่นของคอนกรีตจะลดต่ำลงและส่งผลกำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดต่ำลง ในทางกลับกันหากนำเถ้าก้นเตาที่มีความชื้นเท่ากับค่าการกักเก็บน้ำและนำไปใช้ผสมคอนกรีต เมื่อน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะหมดไปแล้วน้ำที่ถูกกักเก็บภายในเถ้าก้นเตาจะคายออกมาและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อเนื่องยาวนานเปรียบเสมือนการบ่มคอนกรีตจากภายใน (Internal curing) จากข้อดีข้อเสีย

ดังกล่าวหากใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดในปริมาณที่เหมาะสมนอกจากจะช่วยให้เกิดการนำของเหลือทิ้งไปใช้ให้เกิดประโยชน์แล้วยังช่วยเพิ่มกำลังอัดให้แก่คอนกรีต

ในการผสมคอนกรีตหากใช้เถ้าก้นเตาอยู่ในสถานะอิมตัวผิวแห้ง รูปพรุน โพรง ภายในเถ้าก้นเตาถูกบรรจุด้วยน้ำ นำไปแทนที่ทรายเพื่อประโยชน์ในทางด้านการบ่มตัวภายใน (Internal curing) นั้น ระหว่างการผสมคอนกรีตอาจเกิดการกระแทกกันทำให้เถ้าก้นเตาเกิดการแตกและน้ำภายในถูกคายออกมา ทำให้เกิดปริมาณน้ำส่วนเกินในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งทำให้คอนกรีตเหลวมากขึ้น ความสามารถในการเทได้เพิ่มมากขึ้นและอาจส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดโดยกำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เป็นค่าคงที่ เปรียบเทียบกับการกำหนดให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump) เป็นค่าคงที่ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำเถ้าก้นเตาไปทดแทนมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีตต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาปริมาณการใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีต

2.2 เพื่อศึกษาผลของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดในกรณีที่กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ และ ค่าการยุบตัวคงที่

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตราช้าง

3.1.2 เถ้าก้นเตา จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

3.1.3 มวลรวมหยาบ ขนาดโตสุด 1 นิ้ว

3.1.4 ทรายแม่น้ำ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 2.99

3.2 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเตา

3.2.1 รูปร่างลักษณะของเถ้าก้นเตา

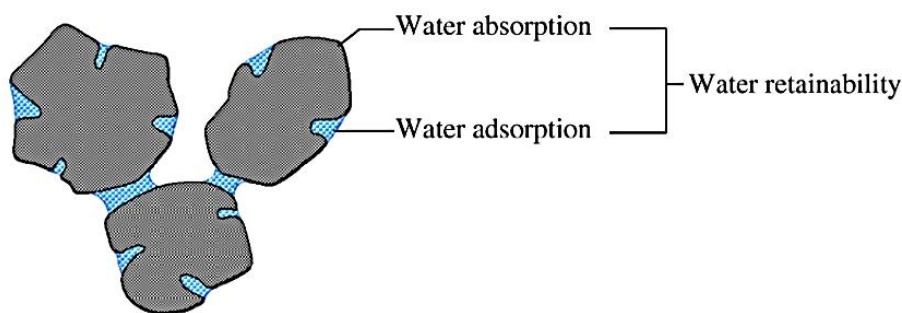
3.2.2 ทดสอบขนาดคละของเถ้าก้นเตาและค่าโมดูลัสความละเอียดของเถ้าก้นเตา ตามมาตรฐาน ASTM C136 และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C33-78

3.2.3 หน่วยน้ำหนักและความถ่วงจำเพาะ ของเถ้าก้นเตา

3.2.4 ค่าการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา (Water retain ability) ของเถ้าก้นเตาโดยทำตามขั้นตอนของ Kasemchaisiri & Tangtermsirikul (2007)

ในการหาปริมาณความชื้นของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 128 เป็นการวัดค่าปริมาณความชื้นที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry, SSD) โดยขั้นตอนการทดสอบจะนำมวลรวมละเอียดที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำในสถานะเปียก (Wet, W) มาทำให้ผิวแห้ง แรงยึดเหนี่ยวที่ผิวของมวลรวมละเอียดจะมีค่าลดลง หลังจากนั้นนำไปบรรจุใส่ภาชนะทรงกรวยเพื่อสังเกตุดูลักษณะการพังทลาย เมื่อได้ลักษณะการพังทลายตามมาตรฐานแล้วจะนำทรายนั้นไปหาปริมาณความชื้นของมวลรวมละเอียด แต่ในกรณีที่มวลรวมละเอียดมีความพรุน ผิวสัมผัสหยาบ ขรุขระ แรงยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสของมวลรวมมีปริมาณสูง ปริมาณความชื้นที่ลดลงไม่ได้ส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวของมวลรวมอย่างมีนัยสำคัญ และดังแสดงตามงานวิจัยของ Bucholc & Ghafoori (1996) เมื่อนำปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน ASTM C 128 ไปใช้ในการผสมคอนกรีต มวลรวมพรุนจะมีความต้องการน้ำมาก ลักษณะของคอนกรีตสดจะมีความชื้น มีความสามารถในการเทได้ต่ำ

ค่าการกักเก็บน้ำ (Water retainability) หมายถึงปริมาณความชื้นที่ดูดซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุของมวลรวม (Water absorption) รวมกับปริมาณความชื้นที่เกาะอยู่ที่ผิวสัมผัส บรรจุอยู่ในรูพรุน โพรงของมวลรวมภายใต้แรงโน้มถ่วง (Water Adsorption) ดังภาพที่ 1 ซึ่งปริมาณน้ำดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด โดยเฉพาะในด้านความสามารถการเทได้ (Workability) ซึ่งจากผลการทดสอบของ Kasemchaisiri & Tangtermsirikul (2007) พบว่าการใช้ค่าการกักเก็บน้ำ (Water retainability) ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจะให้คุณสมบัติของคอนกรีตสดและกำลังอัดของคอนกรีตที่เหมาะสม มากกว่าการใช้ปริมาณความชื้นตามวิธีการ ASTM C 128



ภาพที่ 1 แสดงลักษณะของความชื้นในการหาปริมาณค่าการกักเก็บน้ำ
ของมวลรวมที่มีความพรุน

(Kasemchaisiri & Tangtermsirikul, 2007)



3.3 ออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีต (Mix design)

กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.55

ในกรณีศึกษา ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (FS) นั้น จะเริ่มทำการผสม ตัวอย่างคอนกรีตควบคุม W55BA0 และทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต Slump Test ซึ่งผลที่ได้มีค่าการยุบตัวที่ 20 cm. ซึ่งจะใช้ค่าการยุบตัวนี้เป็นค่าควบคุมของทุกตัวอย่างในกรณีศึกษาค่าการยุบตัวของคอนกรีต (FS)

3.4 การเตรียมตัวอย่าง

3.4.1 มวลรวมละเอียด (ทราย) อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) จะทำการปรับปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตตามสภาพความชื้นจริงขณะผสมคอนกรีต

3.4.2 มวลรวมละเอียด (เถ้าก้นเตา) มีปริมาณความชื้นเท่ากับค่าการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา (Water Retain ability) โดยจะนำเถ้าก้นเตาไปอบให้อยู่ในสถานะแห้ง (Oven dry) $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเถ้าก้นเตาใส่ถุงพลาสติกหนา เติมน้ำเท่ากับปริมาณค่าการกักเก็บ (Water Retainability) ของเถ้าก้นเตา คลุกเคล้าให้เข้ากันมิดปากถุงพลาสติกให้แน่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้งานจะทำการตรวจสอบปริมาณความชื้นของเถ้าก้นเตาอีกครั้งเปรียบเทียบกับค่าการกักเก็บน้ำ และปรับปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตต่อไป

3.4.3 มวลรวมหยาบ (หิน) อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง โดยจะนำหินแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำขึ้นจากน้ำ เช็ดผิว ผึ่งให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

3.4.4 การผสมคอนกรีตเพื่อให้ตัวอย่างคอนกรีตมีความสม่ำเสมอ จะทำการจับเวลาแต่ละขั้นตอนการผสมให้เท่ากันทุกอัตราส่วนผสม

3.4.5 การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143

ในกรณีศึกษาที่กำหนดให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (FS) เมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ปริมาณน้ำส่วนเกินจะเพิ่มมากขึ้น การผสมคอนกรีตจะเริ่มใส่น้ำที่ร้อยละ 70 และทำการทดสอบค่าการยุบตัว โดยค่าการยุบตัวควบคุมเท่ากับ 20 cm หากค่าการยุบตัวน้อยกว่า 20 cm จะค่อยๆเพิ่มปริมาณน้ำและทดสอบค่าการยุบตัวจนกระทั่งได้ค่าการยุบตัวเท่ากับ 20 cm และบันทึกปริมาณน้ำที่ใช้จริงเป็นไปตามตารางที่ 1 และหากทดสอบค่าการยุบตัวแล้วปรากฏว่า มีค่าการยุบตัวมากกว่า 20 cm จะยกเลิกการผสมคอนกรีตตัวอย่างนั้นและเริ่มทำการผสมใหม่อีกครั้ง

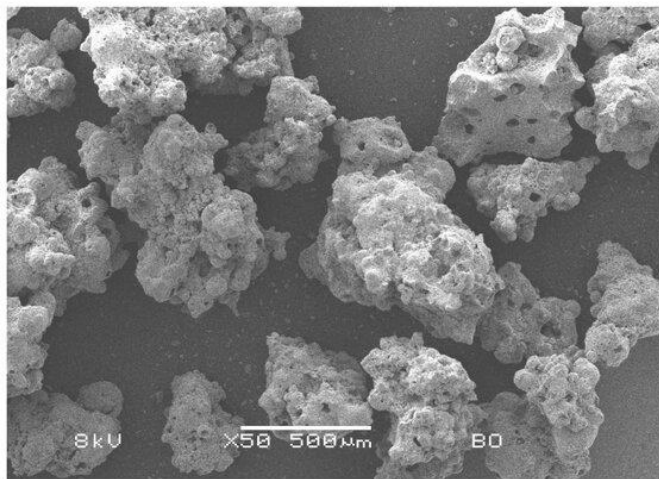
3.4.6 เก็บตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C192 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. อัตราส่วนผสมละ 3 ตัวอย่าง แยกออกจากแบบหล่อที่อายุ 1 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างบ่มในอากาศ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1 วัน , 3 วัน , 7 วัน , 14 วัน และ 28 วัน

3.4.6 ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39

4. ผลการวิจัย

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเตา

4.1.1 รูปร่างลักษณะของเถ้าก้นเตา มีเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ พรุณ มีฟองอากาศเป็นจำนวนมาก มีความเปราะ เมื่อมีแรงมากระทบสามารถแตกหักได้



ภาพที่ 2 ภาพขยายเถ้าก้นเตา จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ กำลังขยาย 50 เท่า
(Onprom *et al.*, 2015)

4.1.2 ตารางที่ 2 แสดงขนาดคละของเถ้าก้นเตาจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ผลปรากฏว่าขนาดคละไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 โดยร้อยละสะสมน้ำหนักเถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 มีค่าเท่ากับ 72.76 มีค่ามากกว่ามาตรฐานที่ต้องอยู่ในช่วงร้อยละ 25 – 60 และ ร้อยละสะสมน้ำหนักเถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 มีค่าเท่ากับ 38.52 มีค่ามากกว่ามาตรฐานที่ต้องอยู่ในช่วงร้อยละ 10 – 30 และค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย (F.M.) มีค่าเท่ากับ 2.22 ซึ่งโมดูลัสความละเอียดของทรายควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2.3–3.2 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงขนาดคละให้ได้ตามมาตรฐานก่อนนำไปใช้งาน

จากภาพที่ 3 จะเห็นว่าร้อยละสะสมน้ำหนักผ่านตะแกรงเบอร์ 16 เริ่มมีแนวโน้มที่ใกล้กับค่าขีดจำกัดบนของมาตรฐาน และมีค่ามากกว่ามาตรฐานที่ร้อยละสะสมน้ำหนักผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และ เบอร์ 50 ซึ่งแสดงว่าปริมาณมีเถ้าก้นเตาขนาดใหญ่ที่น้อยเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับค่าโมดูลัสของเถ้าก้นเตาที่มีค่าเท่ากับ 2.22 แสดงให้เห็นว่าเถ้าก้นเตามีขนาดเล็ก ควรเพิ่มสัดส่วนเถ้าก้นเตาที่มีขนาดใหญ่ ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงเถ้าก้นเตา ดังนี้



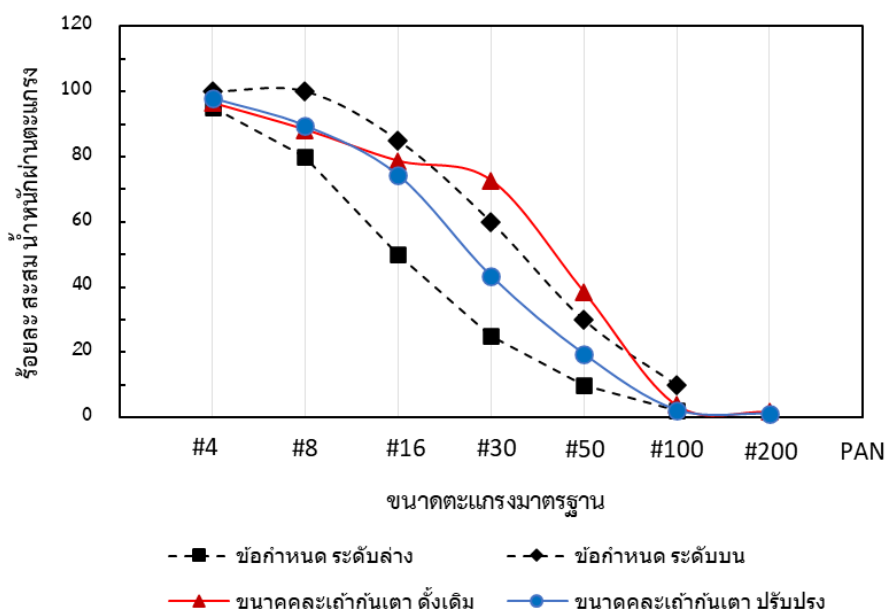
เพิ่มปริมาณเอ้ากันเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8-ค้ำตะแกรงเบอร์ 16 20 กรัมต่อเอ้ากันเตาเดิม 100 กรัม และเพิ่มปริมาณเอ้ากันเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 16-ค้ำตะแกรงเบอร์ 30 48 กรัมต่อเอ้ากันเตาเดิม 100 กรัม ทำการคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นอย่างดีและทำการทดสอบหาขนาดคละของเอ้ากันเตาที่ผ่านการปรับปรุงแล้วอีกครั้ง โดยได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3 และ ภาพที่ 3 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดของเอ้ากันเตาเมื่อปรับปรุงขนาดคละแล้ว เท่ากับ 2.74

ตารางที่ 2 ขนาดคละของเอ้ากันเตาโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนักค้ำ ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละ น้ำหนักค้ำ ตะแกรง	ร้อยละ สสม น้ำหนักค้ำ ตะแกรง	ร้อยละ สสม น้ำหนักผ่าน ตะแกรง	ร้อยละสสม ASTM C33
No.4	10.56	3.52	3.52	96.48	95 - 100
No.8	24.60	8.20	11.72	88.28	80 - 100
No.16	28.68	9.56	21.28	78.72	50 - 85
No.30	17.88	5.96	27.24	72.76	25 - 60
No.50	102.72	34.24	61.48	38.52	10 - 30
No.100	104.28	34.76	96.24	3.76	2 - 10
No.200	6.12	2.04	98.28	1.72	-
PAN	5.16	1.72	100.00	0.00	-
รวม	300.00				
FM	2.22				

ตารางที่ 3 ขนาดคละของเอ้ากันเตาโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ที่ผ่านการปรับปรุงขนาดคละ

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนักค้ำ ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละ น้ำหนักค้ำ ตะแกรง	ร้อยละ สสม น้ำหนักค้ำ ตะแกรง	ร้อยละ สสม น้ำหนักผ่าน ตะแกรง	ร้อยละสสม ASTM C33
No.4	6.29	2.10	2.10	97.90	95 - 100
No.8	25.36	8.45	10.55	89.45	80 - 100
No.16	45.64	15.21	25.76	74.24	50 - 85
No.30	92.79	30.93	56.69	43.31	25 - 60
No.50	71.86	23.95	80.65	19.35	10 - 30
No.100	51.36	17.12	97.77	2.23	2 - 10
No.200	3.64	1.21	98.98	1.02	-
PAN	3.06	1.02	100.00	0.00	-
รวม	300.00				
FM	2.74				



ภาพที่ 3 เปรียบเทียบขนาดละเอียดของเก่าก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

หน่วยน้ำหนักของทรายในสภาพแห้งที่ใช้ในการทดสอบ มีค่าเท่ากับ $1,673 \text{ kg/m}^3$ ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายสภาพอิ่มตัวแห้ง มีค่าเท่ากับ 2.59 และหน่วยน้ำหนักของเก่าในสภาพแห้ง มีค่าเท่ากับ $1,037 \text{ kg/m}^3$ ค่าความถ่วงจำเพาะของเก่าในสภาพอิ่มตัวแห้งเท่ากับ 1.83

4.1.3 ค่าการกักเก็บน้ำ(Water retainability)ของเก่า มีค่าเท่ากับร้อยละ 30.82

4.2 นำข้อมูลต่างๆ มาออกแบบส่วนผสมคอนกรีต การคิดร้อยละของเก่าคำนวณโดยปริมาตร ก่อนการผสมคอนกรีตจะทำการตรวจสอบปริมาณความชื้นของมวลรวมและปรับแก้ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม ซึ่งปริมาณน้ำที่ปรากฏในตารางเป็นปริมาณน้ำที่ใช้จริงในการหล่อตัวอย่างคอนกรีต รายละเอียดอัตราส่วนผสมคอนกรีตต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต (อัตราส่วนของคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม.)

No.	Mix Id	Cement Type I (kg.)	Water (L.)	Coarse Aggregate (kg.)	Fine Aggregate (kg.)	Bottom Ash (kg.)
1	W55 BA0 (Control)	585.40	312.48	779.00	528.44	0.00
2	W55 BA10 FW	585.40	313.48	779.00	475.60	30.76
3	W55 BA20 FW	585.40	314.44	779.00	422.76	61.60
4	W55 BA30 FW	585.40	315.40	779.00	369.92	92.36
5	W55 BA50 FW	585.40	317.40	779.00	264.24	153.96
6	W55 BA100 FW	585.40	322.28	779.00	0.00	307.92
7	W55 BA10 FS	585.40	278.12	779.00	468.24	30.48
8	W55 BA20 FS	585.40	250.00	779.00	416.20	60.96
9	W55 BA30 FS	585.40	229.16	779.00	364.16	91.44
10	W55 BA50 FS	585.40	222.24	779.00	260.12	152.40
11	W55 BA100 FS	585.40	208.32	779.00	0.00	305.40

หมายเหตุ ตัวอย่างการอธิบายชื่อ อัตราส่วนผสม W55BA10 FW

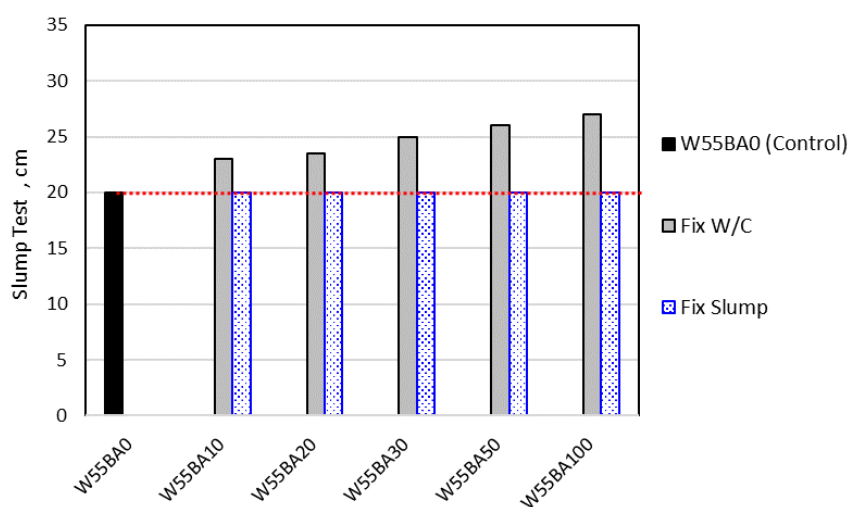
W55 หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.55

BA10 หมายถึง ปริมาณเถ้าก้นเตา ร้อยละ 10

FW หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ เป็นค่าคงที่

FS หมายถึง ค่าการยุบตัว (Slump) เป็นค่าคงที่

4.3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test)



ภาพที่ 4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ถ้าก้อนเตามีลักษณะทางพรุน กลวง ผิวหยาบ ขรุขระ ซึ่งเมื่อนำไปผสมคอนกรีตจะมีผลของการเกาะเกี่ยวกันที่ผิว (Interlocking) และหากถ้าก้อนเตาที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในสถานะอบแห้ง (Oven dry) หรือ แห้งในอากาศ (Air dry) จะเกิดการดูดซึมน้ำจากส่วนผสม ส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อปริมาณถ้าก้อนเตาเพิ่มมากขึ้น (Aggarwal & Siddique, 2014) และ (Ankur & Singh, 2021) แต่ในทางกลับกันหากถ้าก้อนเตา อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ภายในถ้าก้อนเตาถูกกักเก็บไปด้วยน้ำ แต่ด้วยถ้าก้อนเตามีความเปราะ แตกง่าย ขณะผสมคอนกรีตอาจเกิดการกระทบกัน น้ำภายในถ้าก้อนเตาบางส่วนคายออกมาทำให้คอนกรีตมีมีเหลวมากขึ้น ค่าการยุบตัว (Slump Test) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณถ้าก้อนเตา (Kim *et al.*, 2021)

ในการทดลองนี้ เลือกใช้ถ้าก้อนเตาที่ปริมาณความชื้นเท่ากับค่าการกักเก็บน้ำ (Water retainability) รูปพรุน โพรง ในเม็ดถ้าก้อนเตาถูกบรรจุด้วยน้ำ ผลปรากฏว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้นแปรผันตามปริมาณถ้าก้อนเตาที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่กล่าวข้างต้น ดังภาพที่ 4

4.4 ค่ากำลังอัดคอนกรีต (Compressive Strength)

จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 1 วัน , 3 วัน , 7 วัน , 14 วัน และ 28 วัน ได้ผลดังตารางที่ 2

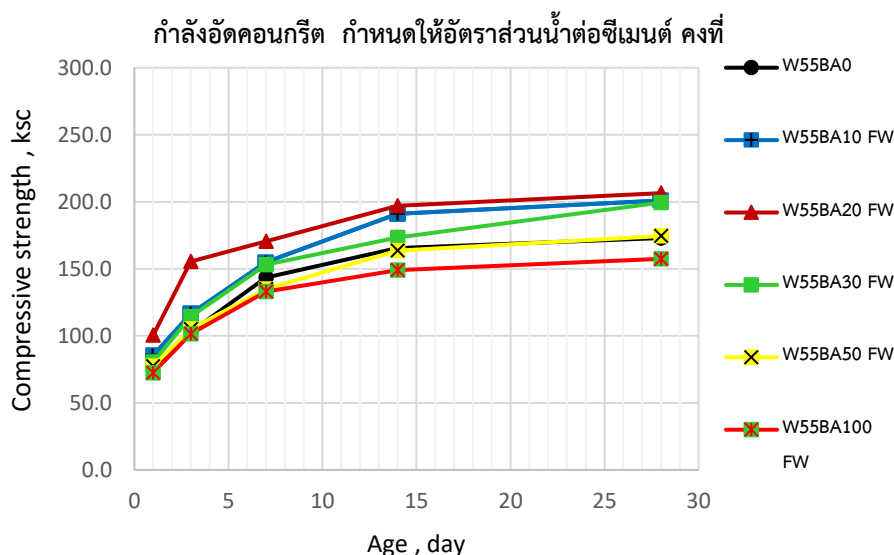
ตารางที่ 2 กำลังอัดคอนกรีต ksc.

No.	Mix Id	Compressive Strength , ksc.				
		1 day	3 days	7 days	14 days	28 days
1	W55 BA0 (Control)	75.0	103.0	143.5	165.5	173.0
2	W55 BA10 FW	85.5 + 14%	116.5 + 13%	155.0 + 8%	191.0 + 15%	201.0 + 16%
3	W55 BA20 FW	100.5 + 34%	155.5 + 51%	170.5 + 19%	197.0 + 19%	206.5 + 19%
4	W55 BA30 FW	80.5 + 7%	114.5 + 11%	153.0 + 7%	173.5 + 5%	199.5 + 15%
5	W55 BA50 FW	77.5 + 3%	105.0 + 2%	135.0 - 6%	163.5 - 1%	174.5 + 1%
6	W55 BA100 FW	72.5 - 3%	101.5 - 1%	133.0 - 7%	149.0 - 10%	157.5 - 9%
7	W55 BA10 FS	85.0 + 13%	110.0 + 7%	155.0 + 8%	172.5 + 4%	184.5 + 7%
8	W55 BA20 FS	97.5 + 30%	137.0 + 33%	170.5 + 19%	191.0 + 15%	206.0 + 19%
9	W55 BA30 FS	99.0 + 32%	170.5 + 66%	195.0 + 36%	244.0 + 47%	251.5 + 45%
10	W55 BA50 FS	98.0 + 31%	161.5 + 57%	190.5 + 33%	214.0 + 29%	222.0 + 28%
11	W55 BA100 FS	96.5 + 29%	139.0 + 35%	171.0 + 19%	196.0 + 18%	221.5 + 28%

หมายเหตุ 85.5 + 14% หมายถึง ค่ากำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 85.5 ksc. และค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 14

4.4.1 กรณีศึกษา กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ (FW)

เมื่อใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดไม่เกินร้อยละ 30 ผลปรากฏว่าค่ากำลังอัดทุกอัตราส่วนผสมและอายุของตัวอย่างทดสอบ มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม W55BA0 และมีค่ากำลังอัดสูงมากที่สุด เมื่อปริมาณเถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดที่ร้อยละ 20 โดยมีกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ 206.5 ksc ซึ่งผลการวิจัยสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Kadam & Patil (2014) และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดมากกว่าร้อยละ 30 กำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ผลการทดสอบดังตารางที่ 2 และ ภาพที่ 5



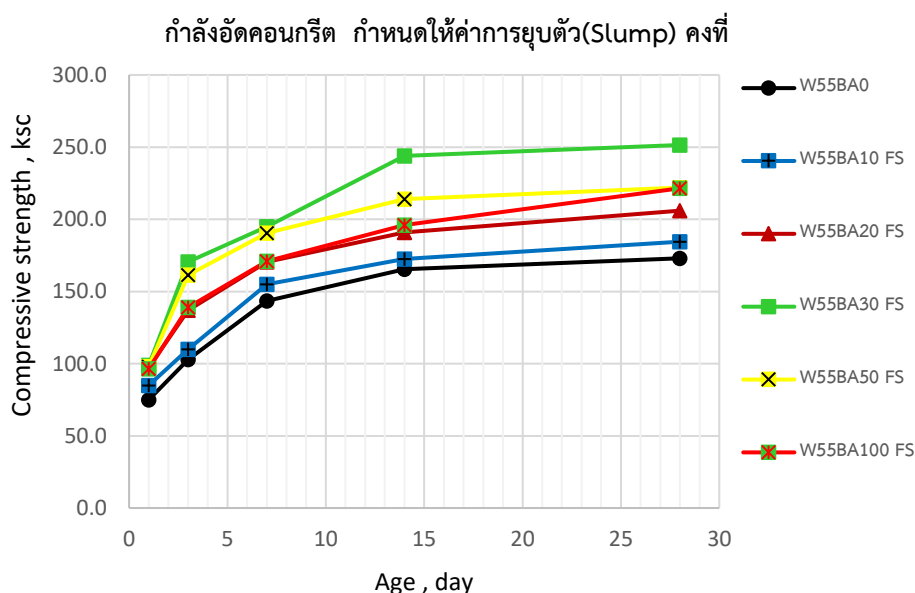
ภาพที่ 5 ค่ากำลังอัดของคอนกรีต กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่
ที่อายุ 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน และ 28 วัน, ksc

4.4.2 กรณีศึกษา กำหนดค่าการยุบตัวคงที่ (FS)

ขณะผสมตัวอย่างจะนำน้ำส่วนเกินออกจากส่วนผสมคอนกรีต แต่ยังคงความสามารถการเทได้ (Workability) เท่าเดิม โดยมีค่าการยุบตัว (Slump Test) 20 cm. เท่ากับคอนกรีตควบคุม ผลปรากฏว่า ค่ากำลังอัดทุกอัตราส่วนผสมและอายุของตัวอย่างทดสอบ มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม W55BA0 ทั้งหมด โดยอัตราส่วนผสมที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดมากที่สุดในทุกช่วงอายุตัวอย่าง ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 251.5 ksc ดังภาพที่ 6

กำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเกิดการกำจัดปริมาณน้ำส่วนเกิน (Free water) ส่งผลให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง (Bai *et al.*, 2005) โดยเมื่อใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดร้อยละ 10, 20, 30, 50 และ 100 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 0.48, 0.43, 0.39,

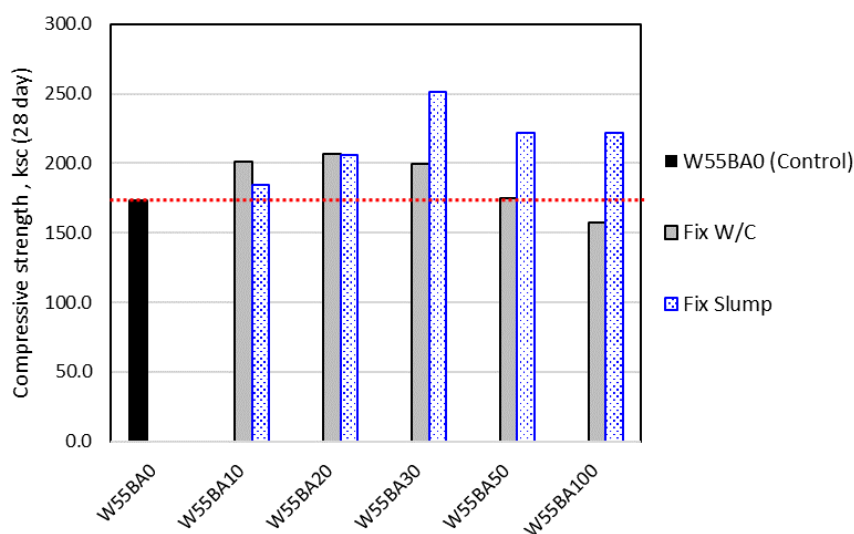
0.38 และ 0.36 ตามลำดับ และเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตามากกว่าร้อยละ 30 ความหนาแน่นของเถ้าก้นเตาส่งผลให้คอนกรีตมีค่าหนาแน่นต่ำลง กำลังคอนกรีตจึงลดต่ำลง (Kadam & Patil, 2014)



ภาพที่ 6 ค่ากำลังอัดของคอนกรีต กำหนดให้ค่าการยุบตัวคงที่
ที่อายุ 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน และ 28 วัน, ksc

4.4.3 เปรียบเทียบค่ากำลังอัด กรณีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ (FW) และ ค่าการยุบตัวคงที่ (FS)

จากภาพที่ 7 หากพิจารณาจากเงื่อนไขที่ต้องการใช้เถ้าก้นเตาให้มีปริมาณที่มากที่สุดเท่าที่จะสามารถนำมาใช้ได้ โดยพิจารณาคุณสมบัติทางด้านกำลังอัดและยังมีความสามารถในการเทได้เท่ากับคอนกรีตควบคุม การผสมคอนกรีตเลือกใช้การผสมคอนกรีต โดยวิธีให้ค่าการยุบตัวคงที่ (FS) นำปริมาณส่วนเกินออก จะสามารถใช้ปริมาณเถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดได้ทั้งหมด



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน, ksc

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากผลการศึกษากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียด กรณีศึกษา กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่และค่าการยุบตัวคงที่ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 การนำเถ้าก้นเตาไปทดแทนมวลรวมละเอียด กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ (FW) ตามการออกแบบ โดยเถ้าก้นเตาอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ค่าการยุบตัว (Slump Test) ของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นแปรผันตามปริมาณของเถ้าก้นเตา และมีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่อนำไปทดแทนมวลรวมละเอียดไม่เกิน ร้อยละ 30

5.2 การนำเถ้าก้นเตาไปทดแทนมวลรวมละเอียด กำหนดค่าการยุบตัวคงที่ (FS) ค่าการยุบตัว เท่ากับคอนกรีตควบคุม โดยเถ้าก้นเตาอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ขณะทำการผสมคอนกรีตจะมีน้ำส่วนเกินที่คายออกมาจากเถ้าก้นเตา ดังนั้น หากต้องการควบคุมให้คอนกรีต มีความสามารถเทพได้ให้เท่ากับคอนกรีตควบคุม ต้องทำการลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต และจากผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต ในทุกอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าก้นเตา ค่ากำลังอัด มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชยานนท์ หารรรษิณโญ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผู้เป็นแรงบันดาลใจและกระตุ้นให้ข้าพเจ้าทำวิจัยเสมอมา

7. เอกสารอ้างอิง

- Aggarwal, Y., & Siddique, R. (2014). Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. **Construction and Building Materials**, 54, 210-223
- Ankur, N., & Singh, N. (2021). Performance of cement mortars and concretes containing coal bottom ash: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 149.
- Bai, Y., Darcy, F., & Basheer, P.A.M. (2005). Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. **Construction and Building Materials**. 19, 691-697.
- Ghafoori, N., & Bucholc, J. (1996). Investigation of lignite-based bottom ash for structural concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 8(3), 128-137.
- Kadam, M. P., & Patil, Y.D. (2014). Effect of sieved coal bottom ash as a sand replacement on the properties of cement concrete. **Magazine of concrete Research**, 67(5), 227-234
- Kasemchaisiri, R., & Tangtermsirikul, S. (2007). A Method to Determine Water Retainability of Fine Porous Aggregate for Design and Quality Control of Fresh Concrete. **Construction and Building Materials**, 21, 1322-1334
- Kim, Y., Kim, H., Yang, K., & Ha, J. (2021). Effect of concrete unit weight on the mechanical properties of bottom ash aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, 273.
- Onprom, P., Chaimoon, K., & Cheerarot, R. (2015). Influence of bottom ash replacement as fine aggregate on the property of cellular concrete with various foam contents. **Advances in Materials Science and Engineering**. 1-11.
- Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M., Hussin, M., & Khankhaje, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. **Construction and Building Materials**, 116, 15-24
- Singh, M., & Siddique, R. (2016). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete. **Journal of Cleaner Production**, 112, 620-630



Singh, M., & Siddique, R. (2014) Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, 73, 20-32.