



Journal of Thailand Concrete Association วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

HIGH-STRENGTH CONCRETE CONTAINING HIGH VOLUME OF GROUND BOTTOM ASH

คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าก้นเตาบาดละเอียดปริมาณสูง

บุษรา มินยุทธ์¹ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร² ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received September 27, 2019

Received Revised Form:

October 31, 2019

Accepted: November 1, 2019

ABSTRACT:

This research studied the use of ground bottom ash to replace ordinary Portland cement (OPC) at the rates of 35, 50, and 65% by weight of binder to produce high strength concrete. Bottom ash used in this study was sieved through a No. 50 sieve. After that, it was ground until the particles retained on a No. 325 sieve less than 1% by weight. W/B ratio of concrete was 0.25 and slump was controlled at 150-200 mm. Compressive strength, elastic modulus, and heat evolution of concrete were investigated. The results showed that the replacement of OPC with ground bottom ash at the rate of 35% by weight of binder had higher compressive strength than control concrete at 28 days. Moreover, concrete containing ground bottom ash at 50% by weight of binder had compressive strength more than 55 MPa since 7 days and the compressive strength was increased to 80.9 MPa at 28 day. Therefore, it could be classified as high strength concrete. The elastic modulus of concrete was increased with the increasing of compressive strength. Moreover, it was also found that concrete containing ground bottom ash could reduce heat evolution and extend the time of peak temperature rise in concrete. The results concluded that ground bottom ash is a good pozzolanic material and could be used to replace OPC up to 50% by weight of binder to produce high strength concrete.

KEYWORDS: Bottom ash, High strength concrete, High volume, Pozzolanic material

*Corresponding Author,
Email address:
bussara134578@gmail.com

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เถ้านเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 35, 50, และ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูง เถ้านเตาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 หลังจากนั้นนำมาบดละเอียดจนมีอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 และควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 150-200 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ ทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต, ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่าแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้านเตาร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน ยิ่งไปกว่านั้นคอนกรีตที่มีเถ้านเตาในส่วนผสมร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงได้ตั้งแต่อายุ 7 วัน ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากกว่า 55 เมกะปาสกาล โดยที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดสูงถึง 80.9 เมกะปาสกาล และพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เถ้านเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพสามารถลดความร้อนและช่วยยืดเวลาการเกิดความร้อนสูงสุดในคอนกรีต ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าเถ้านเตาบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีชนิดหนึ่งและสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูง

คำสำคัญ: เถ้านเตา, คอนกรีตกำลังสูง, การแทนที่ในปริมาณสูง, วัสดุปอซโซลาน

1. บทนำ

ปัจจุบันมีสิ่งก่อสร้างเกิดขึ้นจำนวนมากและวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้าง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นส่วนผสมสำคัญสำหรับการผลิตคอนกรีตในโครงสร้างต่าง ๆ แต่การผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน ต้องใช้พลังงานสูงและมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศสูงถึงประมาณ 1 ตัน ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก จึงนำไปสู่ปัญหาสภาวะโลกร้อน [1] อีกทั้งจากการมีสิ่งก่อสร้างเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากและราคาที่ดินที่มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ข้อจำกัดในด้านพื้นที่การก่อสร้างมีมากขึ้น ในปัจจุบันอาคารสูงจึงเป็นที่นิยมอย่างมาก ซึ่งการก่อสร้างอาคารสูงนิยมใช้คอนกรีตที่มีกำลังสูงเนื่องจากการรับน้ำหนักที่มากขึ้น จึงทำให้ราคาคอนกรีตสูงขึ้น ดังนั้นการหาวัสดุมาแทนที่ปูนซีเมนต์จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากต่อการลดราคาคอนกรีต โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้แก่ วัสดุปอซโซลาน

เถ้านเตาเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตได้ดี ซึ่งเถ้านเตาเป็นผลพลอยได้จากการเผาเถ้านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเถ้านเตาจะจับตัวกันเป็นก้อนระหว่างการเผาที่มีหลายขนาดและน้ำหนักมากจึงตก

ลงสู่ก้นเตา โดยเถ้านเตามีลักษณะเป็นรูพรุนสูง ผิวขรุขระ รูปร่างและขนาดไม่แน่นอน เถ้านเตาส่วนใหญ่ถูกนำไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์ในปริมาณที่สูงถึง 1.4 ล้านตัน ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะเป็นอย่างมาก [2]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้านเตาที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตต่ำเมื่อเทียบกับการใช้เถ้านหิน ด้วยเหตุนี้เถ้านเตาจึงถูกนำมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียด เนื่องจากลักษณะที่มีรูพรุนสูง ทำให้มีสมบัติในการบ่มภายในได้ [3] อย่างไรก็ตาม Jaturapitakkul และ Cheerarot [4] ได้ศึกษาการนำเถ้านเตาบดละเอียดมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน พบว่าเถ้านเตามีสมบัติทางเคมีคล้ายกับเถ้านหินที่มาจากแหล่งเดียวกัน และพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้านเตาที่บดละเอียดมีกำลังมากกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้านเตาที่ไม่บดในอัตราส่วนการแทนที่ที่เท่ากัน และสามารถพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ช่วงอายุปลายได้สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งการพัฒนากำลังขึ้นอยู่กับการปริมาณการแทนที่และความละเอียดของเถ้านเตา นอกจากนี้ ชลตรงค์ [5] ได้ศึกษาการใช้เถ้านเตาโดยนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วย

การคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 8, ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ค้างตะแกรงเบอร์ 16, ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ค้างตะแกรงเบอร์ 30, ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้างตะแกรงเบอร์ 50, และขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 50 จากนั้นจึงนำเอากันเตาแต่ละขนาดมาบดให้มีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5±1 แล้วนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเพื่อทดสอบค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ พบว่าการปรับปรุงคุณภาพเอากันเตาโดยการคัดขนาดผ่านตะแกรงก่อนนำมาบดส่งผลให้เอากันเตามีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยมอร์ตาร์ที่ใช้เอากันเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 มาแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุด และสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วันขึ้นไป

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเห็นได้ว่าเมื่อนำเอากันเตามาปรับปรุงคุณภาพด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดเล็กและบดละเอียดสามารถเพิ่มสมบัติการเป็นวัสดุปอซโซลานได้ดี อย่างไรก็ตามการศึกษาเอากันเตาเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตกำลังสูงนั้นยังมีน้อย รวมถึงข้อจำกัดในเรื่องปริมาณการใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการใช้เอากันเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 50 แล้วนำมาบดละเอียดให้มีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงเพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูง โดยทดสอบดัชนีกำลังของเอากันเตาบดละเอียดและประสิทธิภาพในการรับกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่อายุตั้งแต่ 7 วันไปจนถึงช่วงอายุปลาย รวมถึงทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตกำลังสูง

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC), เอากันเตา (BA) สำหรับใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์, ทราเยมน้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้างเบอร์ 100 สำหรับใช้เป็นมวลรวมละเอียดในส่วนผสมมอร์ตาร์, ทราเยมน้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 สำหรับใช้เป็นมวลรวมละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีต และหินขนาด 3/8 นิ้ว สำหรับใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีต

เอากันเตาที่ใช้ศึกษานี้ได้นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งอยู่ในสภาพเปื่อยขึ้น ก่อนใช้จึงนำไปอบแห้ง แล้วนำเอากันเตาส่วนแรกมาบดละเอียดให้มีขนาดอนุภาคค้างบน

ตะแกรงเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) น้อยกว่าร้อยละ 1 (GBA) สำหรับเอากันเตาส่วนที่สองนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 4.75 มม.) แบ่งย่อยเป็น 2 ชนิด ชนิดแรกนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้างถาด (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 0.60 มม.) ใช้สัญลักษณ์ GBA30-PAN และอีกชนิดนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างถาด (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 0.30 มม.) ใช้สัญลักษณ์ GBA50-PAN จากนั้นนำทั้ง 2 ชนิด (GBA30-PAN และ GBA50-PAN) ไปบดให้มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อทดสอบค่าดัชนีกำลังของเอากันเตาทั้ง 3 ชนิด (GBA, GBA30-PAN และ GBA50-PAN) จากนั้นเลือกเอากันเตาบดละเอียดที่มีค่าดัชนีกำลังสูงสุดไปใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูง

2.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สมบัติทางกายภาพของ OPC และ GBA แสดงดังตารางที่ 1 OPC มีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 11.35 โดยน้ำหนัก สำหรับ GBA, GBA30-PAN และ GBA50-PAN มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 0.79, 0.77 และ 0.75 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะของ OPC มีค่าเท่ากับ 3.14 ซึ่งมากกว่าความถ่วงจำเพาะของเอากันเตา ส่วนความถ่วงจำเพาะของเอากันเตาบดละเอียดมีค่าอยู่ระหว่าง 2.85 ถึง 2.87 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเอากันเตาแต่ละชนิดผ่านการบดให้ความละเอียดที่ใกล้เคียงกัน

2.3 สมบัติทางเคมีของวัสดุ

สมบัติทางเคมีของ OPC และ GBA แสดงในตารางที่ 2 จากสมบัติทางเคมีสามารถระบุได้ว่าเอากันเตามีสมบัติทางเคมีสอดคล้องกับวัสดุปอซโซลาน Class C ที่กำหนดไว้โดยมาตรฐาน ASTM C618 [6] ซึ่งระบุไว้ว่าผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก รวมทั้งปริมาณของ SO_3 และ LOI ต้องไม่เกินร้อยละ 5 และ 6 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติทางเคมีของเอากันเตาบดละเอียดมีค่าใกล้เคียงกับเอากันเตาจากแหล่งเดียวกัน [7]

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Material	Retained on a No. 325 sieve (% by weight)	Specific gravity
OPC	11.35	3.14
GBA	0.79	2.87
<i>GBA30-PAN</i>	0.77	2.85
<i>GBA50-PAN</i>	0.75	2.86

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical compositions (%)	OPC	GBA	FA [7]
Silicon dioxide (SiO ₂)	20.9	25.3	27.9
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	4.8	12.8	14.4
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	3.4	22.0	15.6
Calcium oxide (CaO)	63.3	28.3	27.9
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.7	4.2	7.1
Magnesium oxide (MgO)	1.3	1.4	2.2
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.3	0.6	1.9
Potassium oxide (K ₂ O)	0.4	2.8	2.8
Loss on ignition (LOI)	2.9	3.3	0.2

2.4 ส่วนผสมของมอร์ตาร์และการทดสอบดัชนีกำลังของเถ้ากั้นเตาบละเอียด

การศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้ากั้นเตา GBA, GBA30-PAN และ GBA50-PAN แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ไว้ที่ร้อยละ 110±5 ผสม

มอร์ตาร์และเทใส่แบบหล่อขนาด 5x5x5 ซม.³ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นถอดแบบแล้วนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำจนถึงอายุทดสอบ ทดสอบหาความต้องการน้ำและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากั้นเตาตามมาตรฐาน ASTM C311 [8] ทดสอบที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยค่าดัชนีกำลังในแต่ละอายุการทดสอบได้มาจากค่าเฉลี่ยของมอร์ตาร์ทั้งหมด 5 ตัวอย่าง

2.5 ส่วนผสมของคอนกรีตและการทดสอบ

นำเถ้ากั้นเตาบละเอียดที่มีค่าดัชนีกำลังสูงสุดที่ได้จากข้อ 2.4 มาใช้ในส่วนผสมของคอนกรีต โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 35, 50 และ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.25 และควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 150-200 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3 ผสมคอนกรีตและเทใส่แบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นถอดแบบแล้วนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำ ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 [9] ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน และทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C469 [10] ที่อายุ 28 และ 90 วัน โดยค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในแต่ละอายุการทดสอบได้มาจากค่าเฉลี่ยของคอนกรีตทั้งหมด 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง

Mix	Mix proportions (kg/m ³)							Slump (mm)
	Cement	GBA	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water	SP (%)	w/b	
CT	560	-	780	1018	140	0.9	0.25	150
GBA35	364	196	777	1015	140	1.0	0.25	170
GBA50	280	280	774	1012	140	1.1	0.25	160
GBA65	196	364	770	1008	140	1.2	0.25	180

การทดสอบหาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตกำลังสูงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานโดยหล่อคอนกรีตในแบบหล่อขนาด 450x450x450 มม.³ ภายในกรูผนังด้วยโฟมที่มีความหนา 50 มม. เทคอนกรีตแบ่งเป็น 2 ชั้น กระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง แล้วฝังสาย Thermocouple ไว้ที่ศูนย์กลางแบบหล่อตกแต่งผิวหน้าให้เรียบปิดด้วยโฟมหนา 50 มม. ตัวอย่างทดสอบที่ได้มีขนาด 350x350x350 มม.³ ทำการทดสอบโดยต่อสาย Thermocouple เข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิอัตโนมัติแล้วทำการต่อเครื่องวัดอุณหภูมิอัตโนมัติเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลและต่อ Thermocouple อีกเส้นเพื่อวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมวัดความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่เริ่มเทคอนกรีตลงแบบหล่อจนถึง 168 ชั่วโมง ภายหลังจากการเทคอนกรีต

3. ผลการทดสอบ

3.1 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์แสดงดังตารางที่ 4 พบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีความต้องการน้ำมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (CT) เพราะเถ้าก้นเตามีความละเอียดและมีรูพรุนสูงมากกว่า OPC [11, 12] และสำหรับเถ้าก้นเตาบดละเอียดแต่ละชนิดมีความละเอียดใกล้เคียงกัน จึงมีความต้องการน้ำแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยมอร์ตาร์ GBA, GBA30-PAN และ GBA50-PAN มีค่าความต้องการน้ำร้อยละ 103, 102 และ 102 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียดแต่ละชนิดมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ใกล้เคียงกันจึงส่งผลให้เถ้าก้นเตามีความพรุนที่ใกล้เคียงกันทำให้ค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ GBA, GBA30-PAN และ GBA50-PAN มีค่าใกล้เคียงกันด้วย

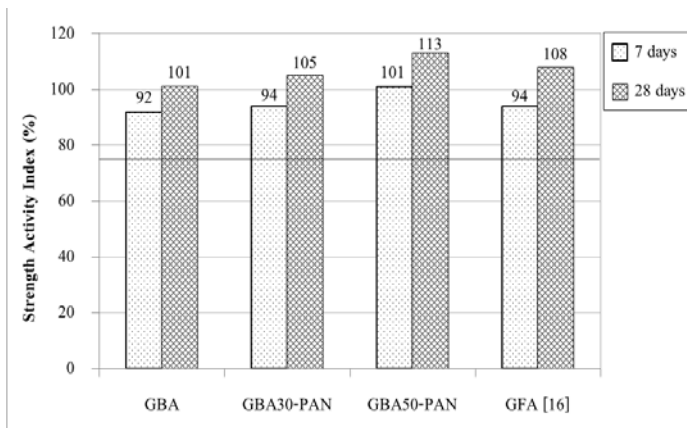
3.2 ส่วนผสมของคอนกรีตและการทดสอบ

มาตรฐาน ASTM C 618 [6] กำหนดว่าเถ้าก้นเตาต้องมีค่าดัชนีกำลังมากกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน เมื่อพิจารณามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาทุกส่วนผสมพบว่ามีค่าดัชนีกำลังมากกว่าร้อยละ 75 ทุกช่วงอายุการทดสอบ

จากรูปที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังของเถ้าก้นเตา GBA, GBA30-PAN และ GBA50-PAN พบว่าดัชนีกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเถ้าก้นเตามีอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีการพัฒนากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ [13, 14] โดย GBA50-PAN มีค่าดัชนีกำลังสูงที่สุดในทุกช่วงอายุ เมื่อเทียบกับเถ้าก้นเตาชนิดอื่นๆ โดยมีค่าดัชนีกำลังสูงกว่า GBA30-PAN ร้อยละ 7 และ 8 ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพโดยการนำเถ้าก้นเตามาร้อนผ่านตะแกรงขนาดเล็กก่อนบดละเอียดมีการพัฒนา กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากกว่าการร้อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดใหญ่ก่อนบดละเอียด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim [15] ที่พบว่าเถ้าก้นเตาที่ร้อนผ่านตะแกรงมีการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ดีกว่าเถ้าก้นเตาที่ไม่ผ่านการร้อนตะแกรง เมื่อพิจารณาที่ขนาดอนุภาคและปริมาณการแทนที่ที่เท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าดัชนีกำลังของเถ้าก้นเตาที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงถึงร้อยละ 113 ซึ่งสูงกว่าเถ้าก้นเตาแม่เมาะที่มีความละเอียดใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าดัชนีกำลังเท่ากับร้อยละ 94 และ 108 ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ [16] ดังนั้นเถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 จากนั้นนำไปบดละเอียดจัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดี

ตารางที่ 4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, ความต้องการน้ำ และ ดัชนีกำลังของมอร์ตาร์

Mortar	w/b	Water requirement (%)	Compressive Strength (MPa) - <i>Strength activity index (%)</i>	
			7 days	28 days
CT	0.61	100	32.0- 100	36.9- 100
GBA	0.63	103	29.6- 92	37.3- 101
GBA30-PAN	0.62	102	30.0- 94	38.8- 105
GBA50-PAN	0.62	102	32.4- 101	41.6- 113



รูปที่ 1 ดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาแต่ละชนิด

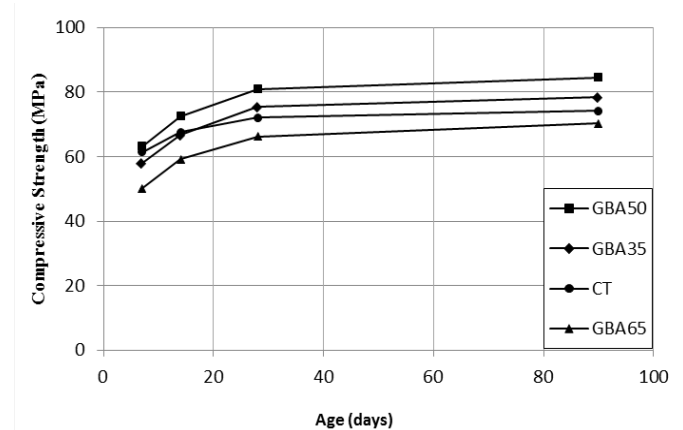
จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า GBA50-PAN เป็นเถ้าก้นเตาที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ ชลตรงค์ [5] นอกจากนี้ Abdulmatin [17] ยังได้แนะนำการเลือกใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดให้เหมาะสมกับงานต่างๆ เช่น เถ้าก้นเตาที่มีความละเอียดข้างตะแกรงเบอร์ 325 ระหว่างร้อยละ 5 ถึง 25 โดยน้ำหนัก ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตทั่วไปและความละเอียดข้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตกำลังสูง เป็นต้น

3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตในทุกส่วนผสมแสดงดังรูปที่ 2 พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 (GBA50-PAN) และนำไปบดละเอียดเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงกว่า 55 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน ในทุกส่วนผสม จึงสามารถจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงได้ตามมาตรฐาน ACI 363 [18]

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาปรับปรุงคุณภาพร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GBA35) พบว่ามีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม (CT) ในช่วงอายุต้นและมีความแข็งแรงสูงกว่าคอนกรีตควบคุม (CT) ที่อายุ 28 วัน โดยคอนกรีตควบคุม (CT) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 61.4, 67.5, 72.1 และ 74.2 เมกะปาสคาล ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีต GBA35 มีกำลังอัดที่อายุดังกล่าวเท่ากับ 58.0, 66.7, 75.3 และ 78.4 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เห็นได้ว่าในช่วงอายุต้นคอนกรีตควบคุม (CT) มีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าคอนกรีต GBA35 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

Chandra and Bjornstrom [19] เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นเร็วกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาทุกส่วนผสมมีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดที่สูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้มากขึ้นเมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสิ่งสำคัญจากผลการทดสอบนี้คือการใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้การพัฒนา กำลังอัดในคอนกรีตดีขึ้นทั้งในช่วงอายุต้นและอายุปลาย



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตกำลังสูง

คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาปรับปรุงคุณภาพร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GBA50) มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดในทุกส่วนผสม โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 63.2, 72.5, 80.9 และ 84.5 เมกะปาสคาล โดยคิดเป็นร้อยละ 103, 107, 112 และ 114 ของคอนกรีตควบคุม (CT) ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงได้ตั้งแต่ 7 วัน เป็นผลมาจากการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าก้นเตาด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 แล้วนำไปบดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim [15] ที่พบว่าการร่อนผ่านตะแกรงช่วยคัดเถ้าก้นเตาขนาดใหญ่ออกเมื่อพิจารณาที่ขนาดอนุภาคและการแทนที่ที่เท่ากัน เถ้าก้นเตาที่ร่อนผ่านตะแกรงจะมีความเป็นอสัณฐานสูงกว่าเถ้าก้นเตาที่ไม่ได้นำมาร่อนผ่านตะแกรง ส่งผลให้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและรวดเร็ว อีกทั้งการบดละเอียดจะทำให้ขนาดอนุภาคลดลง ความพรุนจึงลดลงเช่นกันโดยความละเอียดของอนุภาคเถ้าก้นเตาจะเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้คอนกรีตที่ได้นี้มีความแข็งแรงและสามารถรับกำลังอัดได้สูงมากแม้ในช่วงอายุต้นนั่นเอง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Poon และ

คณะ [20] ที่ศึกษาการผลิตคอนกรีตกำลังสูงโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 45 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.24 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 80 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการใช้เถ้าถ่านหินในงานวิจัยนี้และเถ้าถ่านหินสามารถใช้ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้เช่นเดียวกับเถ้าถ่านหิน

สำหรับคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินตาปรับปรุงคุณภาพร้อยละ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GBA65) พบว่ามีค่ากำลังอัดเท่ากับ 50.1, 59.2, 66.2 และ 70.2 เมกะปาสคาล ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตส่วนผสมอื่นที่อายุเดียวกัน เป็นผลมาจากการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินตาบดละเอียดในปริมาณที่สูงเกินไป มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อย ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรเจนลดลงและยังทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยลง ทำให้กำลังอัดของคอนกรีต GBA65 ต่ำกว่าคอนกรีตส่วนผสมอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินตาบดละเอียดในปริมาณสูงถึงร้อยละ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้เป็นอย่างมากคุ้มค่าต่อการนำไปใช้และยังสามารถจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงหลังอายุ 14 วัน ได้อีกด้วย

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าถ่านหินตาผ่านการปรับปรุงคุณภาพและนำไปบดละเอียดในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสามารถผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูงได้ ซึ่งมีผลดีทั้งในด้านการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตเป็นอย่างมาก รวมถึงยังเป็นการนำเถ้าถ่านหินที่เหลือทิ้งจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในงานคอนกรีตได้

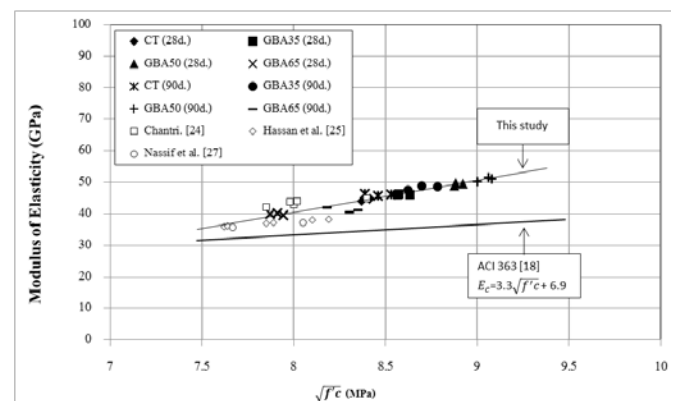
3.4 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

รูปที่ 3 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทั้ง 4 ส่วนผสม ซึ่งทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง ในแต่ละอายุ (28 วัน และ 90 วัน) เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 363 [18] พบว่าคอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน พิจารณาที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีต GBA35 และ GBA50 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าคอนกรีตควบคุม (CT) ทั้งหมด โดย GBA35 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 46.4, 46.2 และ 46.3 จิกะปาสคาล และ GBA50 มีค่าโมดูลัส

ยืดหยุ่นเท่ากับ 48.9, 49.6 และ 49.7 จิกะปาสคาล และสำหรับคอนกรีต CT มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 44.8, 44.9 และ 44.0 จิกะปาสคาล ในขณะที่ GBA65 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำที่สุดทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 39.4, 40.0 และ 40.1 จิกะปาสคาล

สำหรับคอนกรีตที่อายุ 90 วัน ทั้ง 4 ส่วนผสม พบว่าคอนกรีต GBA35 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละตัวอย่างเท่ากับ 49.0, 48.8, 47.7 จิกะปาสคาล และคอนกรีต GBA50 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 50.2, 51.1, 51.5 จิกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุม (CT) ทั้งหมด โดย CT มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละตัวอย่างเท่ากับ 45.8, 46.2, 46.3 จิกะปาสคาล ในขณะที่คอนกรีต GBA65 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 42.1, 41.2, 40.5 จิกะปาสคาล ซึ่งต่ำที่สุดทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน ยังคงเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดเช่นเดียวกับโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ซึ่งเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดเช่นกัน

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของ



คอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

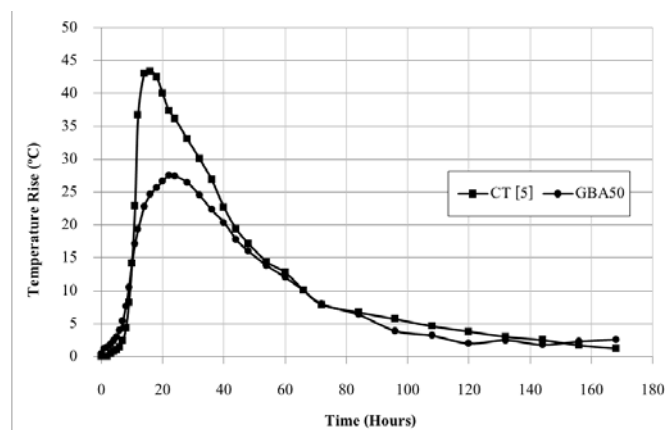
จากผลการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินไม่ส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยตรง แต่จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงหรือสมบัติการเสีรูปของซีเมนต์เพสต์ มวลรวม และการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวม ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีผลกระทบโดยตรงต่อการรับกำลังอัดของคอนกรีตเป็นหลัก [21- 23] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chantri [24] ที่ศึกษาการนำเถ้าถ่านหินมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดที่สูงขึ้น และจากงานวิจัยของ

Hassan และคณะ [25] ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3-0.4 พบว่าเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีกำลังอัดใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 36.0-38.2 จิกะปาสกาล ซึ่งต่ำกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบนี้ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 ในทุกส่วนผสม เนื่องจากปริมาณน้ำในคอนกรีตที่มากกว่าส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความอ่อนแอกว่า ยิ่งไปกว่านั้นปริมาณมวลรวมหยาบในทุกส่วนผสมมีน้อยกว่าจึงทำให้คอนกรีตเสียรูปได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Neville [26] พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังของมวลรวมมากกว่ากำลังของซีเมนต์เพสต์ โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 3 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟุ่มที่มีกำลังอัดใกล้เคียงกันอีกด้วย [27] แสดงให้เห็นว่าเถ้าก้นเตาที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาดเล็กจากนั้นนำไปบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการจากมาตรฐาน ACI 363 [18] พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบทั้งอายุ 28 และ 90 วัน มีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่กำหนดโดย ACI 363 [18] ทุกอัตราส่วน ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไปคำนวณออกแบบโครงสร้าง เพราะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูงที่มีความแข็งแรงและความต้านทานต่อการเสียรูปได้ จากผลการทดสอบจึงสรุปได้ว่าการใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลานในปริมาณสูงไม่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน

3.5 ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีต

จากผลการทดสอบความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานแสดงดังรูปที่ 4 โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมจากงานวิจัยของ ชลตรงค์ [5] เห็นได้ว่าแนวโน้มของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตมีลักษณะเดียวกัน คือเป็นรูปประฆังคว่ำ นั่นคืออุณหภูมิของคอนกรีตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนถึงจุดสูงสุดเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 16-24 ชั่วโมง จากนั้นจึงค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิห้องเมื่อเวลาผ่านไป 6-7 วัน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตกำลังสูงที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากงานวิจัยของ ชลตรงค์ [5]

จากตารางที่ 5 คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GBA50) พบว่ามีอุณหภูมิที่จุดสูงสุดเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมหลังจากเทคอนกรีตใส่แบบหล่อเป็นเวลา 22 ชั่วโมง เท่ากับ 27.6 องศาเซลเซียส ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ (CT) จากงานวิจัยของ ชลตรงค์ [5] พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ 16 ชั่วโมง เท่ากับ 43.4 องศาเซลเซียส โดยคอนกรีต GBA50 มีอุณหภูมิลดลงจากคอนกรีต CT มากถึง 15.8 องศาเซลเซียส ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 36.4 จึงเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ปูนซีเมนต์มีอุณหภูมิภายในคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชลตรงค์ [5] เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาเป็นการลดปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตทำให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง และจากงานวิจัยของ นันทชัย ชูศิลป์ [28] พบว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินสามารถลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ความร้อนภายในคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต ดังนั้นการเพิ่มวัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ ในอัตราส่วนที่มากขึ้นเป็นการลดความร้อนภายในคอนกรีตได้ [29] อย่างไรก็ตามควรต้องระวังในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มากเกินไป เพราะจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง

เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มจากงานวิจัยของ Mahmoud และ Salehi [30] จากตารางที่ 5 พบว่าคอนกรีตมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 32.0 องศาเซลเซียส จากสิ่งแวดล้อม ซึ่ง

ลดลงจากคอนกรีตควบคุมเพียงร้อยละ 1.6 และที่อายุ 7 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 53.1 เมกะปาสกาล ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีต GBA50 ในงานวิจัยนี้ที่มีกำลังอัดเท่ากับ 63.2 เมกะปาสกาล เนื่องมาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 0.3 จึงเห็นได้ว่าการใช้เถ้าก้นเตาสามารถช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตได้ดีกว่า ในขณะที่เยียวยังสามารถรับกำลังอัดที่สูงได้ดีอีกด้วย

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นหินที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ใกล้เคียงกันอยู่ที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของ

วัสดุประสานและมีกำลังอัดใกล้เคียงกันที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 66.1 เมกะปาสกาล จากงานวิจัยของ Vanchai [31] ดังตารางที่ 5 พบว่า คอนกรีตมีอุณหภูมิสูงสุดจากสิ่งแวดล้อมที่เวลา 18 ชั่วโมง เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิลดลงจากคอนกรีตควบคุมร้อยละ 25.5 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของคอนกรีต GBA50 ที่สามารถช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตได้ดีและช่วยยืดเวลาการเกิดความร้อนสูงสุดออกไปได้อีกด้วย

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีต

Sample	Max Temp. Rise (°C)	Reduce Temp. from CT (°C)	Reduce from CT (%)	Time at Peak Temp. (hrs)
CT [5]	43.4	-	-	16
GBA50	27.6	15.8	36.4	22
CT [30]	33.5	-	-	23
SF [30]	32.0	1.5	1.6	25
CT [31]	47.0	-	-	12
FM40 [31]	35.0	12.0	25.5	18

นอกจากนี้ความละเอียดของวัสดุประสานมีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตด้วยเช่นกัน โดย สันต์ ต้นขรากรณ์ [32] ได้ศึกษาความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าก้นหินที่มีความละเอียดต่างกัน พบว่าการใช้เถ้าก้นหินที่มีความละเอียดในคอนกรีตมีแนวโน้มที่ใช้เวลาในการเกิดอุณหภูมิสูงสุดเร็วกว่าเถ้าก้นหินปกติ เนื่องจากเถ้าก้นหินที่ละเอียดมากจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็ว และการเพิ่มปริมาณการแทนที่มีแนวโน้มขยายเวลาการเกิดอุณหภูมิสูงสุดออกไปด้วย

4. สรุปผลการทดสอบ

4.1 เถ้าก้นเตาที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 (GBA30-PAN) และเบอร์ 50 (GBA50-PAN) แล้วนำมาบดละเอียดข้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (CT) ที่อายุ 28 วัน และมอร์ตาร์

GBA50-PAN มีค่าดัชนีกำลังสูงถึงร้อยละ 101 และ 113 ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ

4.2 คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 35, 50 และ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงที่อายุ 28 วัน และคอนกรีต GBA50 สามารถจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงได้ตั้งแต่อายุ 7 วันแรก โดยมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 80.9 เมกะปาสกาล ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในปริมาณมากถึงร้อยละ 50 ส่งผลดีในด้านการนำเถ้าก้นเตามาใช้ประโยชน์สูงสุดในงานคอนกรีตกำลังสูง

4.3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตเป็นหลัก กล่าวคือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น

4.4 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถลดความร้อนสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตได้ โดยลดความร้อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 36.4 จากคอนกรีตควบคุม และช่วยยืดระยะเวลาในการเกิดความร้อนสูงสุดออกไปด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเถ้าก้นเตาเพื่อใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์ เพื่อการพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา (CE-KMUTT 6305)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546, “เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีต” เอกสารประกอบสัมมนาเรื่องการนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้งานคอนกรีต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 2-15.
- [2] A. Abdulmatin, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, “Effect of types of superplasticizer on properties of paste and mortar made with a binder of bottom ash and calcium carbide residue” *Journal of Thailand Concrete Association*, Vol. 3, No. 1, pp. 31-41, 2015.
- [3] M. Singh, and R. Siddique, “Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 91, pp. 269-278, 2015.
- [4] C. Jaturapitakkul, and R. Cheerarot, “Development of bottom ash as pozzolanic material” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 48-53, 2003.
- [5] ชลตรงค์ เจริญไวยเจตน์, 2560, การพัฒนาคุณภาพเถ้าก้นเตาเพื่อใช้งานคอนกรีตกำลังสูง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 110 หน้า.
- [6] STM., “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, ASTM C618, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [7] จูติพงศ์ ส่วนทอง, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2561, “การปรับปรุงผิวหน้าคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินโดยการทาเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13.
- [8] ASTM., “Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland Cement Concrete”, ASTM C311 / C311M, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [9] ASTM., “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, ASTM C39/C39M, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [10] ASTM., “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”, ASTM C469/C469M, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [11] L.B. Andrade, J.C. Rocha, and M. Cheriaf, “Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete” *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 609-614, 2009.
- [12] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn, K. Pimraksa, and A. Chaipanich, “Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials” *Materials and Design*, Vol. 35, pp. 434-439, 2012.
- [13] K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, S. Songpiriyakij, and S. Chutubtim, “A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, No. 4, pp. 335-343, 2001.
- [14] C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, and A. Songpiriyakij, “study of strength activity index of ground coarse fly ash with portland cement” *Science Asia*, Vol. 25, pp. 223-229, 1999.
- [15] H.K. Kim, “Utilization of sieved and ground coal bottom ash powders as a coarse binder in high-strength

mortar to improve workability” *Construction and Building Materials*, Vol. 91, pp. 57-64, 2015.

[16] จตุพล ตั้งปกาศิต, 2541, การศึกษาค่าดัชนีกำลังและผลของขนาดของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 112 หน้า.

[1 7] A. Abdulmatin, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, “An investigation of bottom ash as pozzolanic material” *Construction and Building Materials*, Vol. 186, pp.155-162, 2018.

[1 8] American Concrete Institute (ACI) Committee, “Report on High-Strength Concrete”, ACI 3 6 3 R, American Concrete Institute, 2010.

[1 9] S. Chandra, and J. Bjornstrom, “Influence of superplasticizer type and dosage on theInfluence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portlandcement mortar” *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1613-1619, 2002.

[20] C.S. Poon, L. Lam, and Y.L. Wong, “A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash” *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 447-455, 2000.

[21] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2557, “คอนกรีตกำลังสูง: วัสดุที่ใช้และปัจจัยที่ควรพิจารณา” วารสารคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ฉบับที่ 22, 9 หน้า.

[22] R. Khatri, V. Sirivivatnanon, and W. Gross, “Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete” *Cement and Concrete Research*, Vol. 25(1), pp. 209-220, 1995.

[23] R. Hooton, “Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity” *ACI Materials Journal*, Vol. 90(2), pp. 143-151, 1993.

[24] P. Chantri, 2009, A study on meachanical properties of high strength concrete containing bagasse ash, Civil

Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mounkut University of technology Thonburi, 137 p.

[25] I. Hassan, M. Ismail, T. Yusuf, A. Noruzman, and P. Forouzani, 2014, The effect of blended palm oil fuel ash and pulverized burnt clay on the relationship between hardened properties of self-consolidating high performance concrete, UTM Construction Research Centre, Faculty of civil engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM.

[26] A.M. Neville, “Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete” *ACI Materials Journal*, Vol. 94, pp. 71-78, 1997.

[27] H.H. Nassif, N. Husam, and S. Nakin, “Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 661-670, 2005.

[28] นันทชัย ชูศิลป์, 2543, การศึกษาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 181 หน้า.

[29] K. Montakarniwong, N. Chusilp, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, “Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry” *Materials and Design*, Vol. 49, pp. 414-420, 2013.

[3 0] N. Mahmond, and A.M. Salehi, “Assessing the effectiveness of pozzolans in massive high-strenght concrete” *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2108–2116, 2010.

[31] V. Sata, 2004, Development of local pozzolanic materials for high strength concrete, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mounkut University of technology Thonburi, 126 p.

[32] สันติ์ ต้นขรากรณ์, 2543, ความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่างกัน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 85 หน้า.