



## การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดในงานคอนกรีตบดอัด

## USING OF GROUND BAGASSE ASH IN ROLLER COMPACTED CONCRETE

สุริยัน พันพิพัฒน์<sup>1</sup>, สิตธิศักดิ์ อันสนั่น<sup>1</sup> และเรืองรุชดี ชีระโรจน์<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>นิสิต, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

<sup>2</sup>อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

\*Corresponding author, E Mail: raungrut.c@msu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัดและทำนายกำลังอัดของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียด โดยนำเถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาบดให้ละเอียดจนมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก แล้วใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตบดอัดที่มีปริมาณของวัสดุประสานในส่วนผสมร้อยละ 10, 12, และ 14 โดยน้ำหนัก สำหรับทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28 และ 60 วัน แล้วนำผลที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้นเพื่อทำนายกำลังอัดของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าขานอ้อย จากผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตบดอัดลดลง โดยการแทนที่ร้อยละ 10 ให้กำลังอัดของคอนกรีตใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมมากที่สุด ส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน นั้นให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีตควบคุม แสดงให้เห็นว่าเถ้าขานอ้อยบดละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตบดอัดได้ สำหรับการทำนายกำลังอัดของคอนกรีต พบว่า แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้น สามารถทำนายกำลังอัดของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าขานอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าทางสถิติ  $R^2$ , MAPE และ RMSE ของชุดข้อมูลการฝึกฝนและชุดข้อมูลการทดสอบเท่ากับ 0.95994, 8.963, 19.646 และ 0.98243, 6.253, 14.596 ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** คอนกรีตบดอัด; เถ้าขานอ้อยบดละเอียด; การทำนายกำลังอัด

### ABSTRACT

The objective of this research was to study the compressive strength and to predict the compressive strength of roller compacted concrete (RCC) with ground bagasse ash. Bagasse ash from the sugar factory was ground until the particles retaining on sieve No. 325 less than 15% by weight. Portland cement was replaced by ground bagasse ash at the rates of 10%, 20%, and 30% by weight of binder to cast the samples of roller compacted concrete containing 10, 12, and 14 percent of the binder content in the mixture and tested the compressive strength at 3, 7, 28, and 60 days. The results were then used to develop a nonlinear multiple regression model to predict the compressive strength of ground bagasse ash roller compacted concrete. It showed that the replacement of cement with increased ground bagasse ash reduced the compressive strength of roller compacted concrete. At the 10% replacement, the compressive strength of the concrete was the closest value to the control concrete. As for the 20% replacement at

28 days, the compressive strength was higher than 75% of the control concrete. It has been shown that ground bagasse ash can be used as a pozzolanic material in roller compacted concrete applications. For predicting the compressive strength of concrete, it was found that the nonlinear multiple regression model was effectively predicted the compressive strength of ground bagasse ash roller compacted concrete with the  $R^2$ , MAPE and RMSE statistical values of the training and testing datasets of 0.95994, 8.963, 19.646 and 0.98243, 6.253, 14.596, respectively.

**KEYWORDS:** Roller compacted concrete; Ground bagasse ash; Prediction of the compressive strength

## 1. บทนำ

คอนกรีตบดอัด (Roller Compacted Concrete, RCC) เป็นเทคโนโลยีการก่อสร้างแบบหนึ่งที่น่าเอาคอนกรีตที่สภาพแห้งมากจนไม่มีค่ายุบตัว (No slump) มาทำการบดอัดโดยเครื่องจักรกลในลักษณะเดียวกับการบดอัดดินในการก่อสร้างชั้นผิวทางงานถนน เพื่อให้คอนกรีตสามารถใช้งานได้เร็วขึ้น ซึ่งคอนกรีตที่ได้จะมีช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุน้อยมาก [1] ส่งผลให้คอนกรีตบดอัดมีความแน่นมากกว่าคอนกรีตปกติทั่วไป นอกจากนี้ยังพบว่า คอนกรีตบดอัดใช้ปริมาณน้ำที่น้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปทำให้มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Water to Cement ratio) ที่ต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตบดอัดมีกำลังอัดที่สูง มีความแข็งแรงทนทาน ด้านทานต่อการสึกกร่อนได้ดี และมีโอกาสเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) ลดลง [2] สำหรับราคาก่อสร้างของคอนกรีตบดอัดพบว่ามีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป เนื่องจากต้องการแรงงานที่น้อยกว่า ง่ายต่อการเตรียมงาน ไม่ต้องมีเหล็กเสริม ไม่ต้องมีแบบหล่อ สามารถดำเนินการก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งเปิดใช้งานได้เร็วขึ้น [3] และมีความต้องการปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป [4] ดังนั้นคอนกรีตบดอัดจึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการก่อสร้างหรือบูรณะซ่อมแซมถนนคอนกรีต

เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) เป็นเถ้าชีวมวลที่เป็นวัสดุปอซโซลานที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยใช้ใบอ้อยและชานอ้อยเผารวมกันเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าชานอ้อยมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตจำนวนมาก เช่น Ganesan และคณะ [5] ศึกษาผลกระทบด้านคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ได้แก่ กำลังอัด กำลังดึงแยก การดูดซึมน้ำ ลักษณะการซึมผ่าน การแพร่กระจายของคลอไรด์ และความต้านทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ ซึ่งพบว่าการใช้เถ้าชานอ้อยทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ Chusilp และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยบด ซึ่งประกอบด้วย กำลังอัด การซึมผ่านของน้ำ และการพัฒนาความร้อน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสาน ซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเถ้าชานอ้อยบด สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตโดยมีกำลังอัดที่ยอมรับได้ มีการพัฒนาความร้อนที่ต่ำกว่า และการซึมผ่านของน้ำลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ต่อมา Somna และคณะ [7] ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งผลการวิจัยพบว่า โมดูลัสความยืดหยุ่น การซึมผ่านของน้ำ และความถี่การซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเมื่อใช้เถ้าชานอ้อยบดร้อยละ 20 ในส่วนผสมคอนกรีต นอกจากการใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์แล้ว เถ้าชานอ้อยยังสามารถนำมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียดได้อีกด้วย โดย Modani และ Vyawahare [8] นำเถ้าชานอ้อยที่ไม่บดมาแทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีตร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการวิจัยพบว่าเถ้าชานอ้อยที่ไม่บดสามารถนำไปใช้แทนที่มวลรวมละเอียดได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าขานอ้อยบดละเอียดเป็นวัสดุปอชโซลานที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆของคอนกรีตได้อย่างดี แต่งานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งขาดการศึกษาด้านการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยในงานคอนกรีตบดอัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาคูสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตบดอัดที่ผสมกับเถ้าขานอ้อย และพัฒนาแบบจำลองการลดรอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้นเพื่อทำนายกำลังอัดของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าขานอ้อย

## 2. วัสดุและวิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 และมีอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 14.1 โดยน้ำหนัก
2. เถ้าขานอ้อย จากโรงงานน้ำตาลมิตรผล อำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ นำมาอบแห้งและบดละเอียดเพื่อให้มีขนาดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ กล่าวคือมีน้ำหนักอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 14-15 โดยน้ำหนัก ก่อนนำมาผสมคอนกรีต โดยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.21 และมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าปริมาณของซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 62.6, 5.4 และ 4.8 ตามลำดับ และนอกจากนี้ยังมีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 1.2 และ 15.5 ตามลำดับ
3. มวลรวมหยาบ ใช้หินปูนย่อยที่มีขนาด โดสุต 12.7 มม. โดยมีความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.63 และ 1.35 ตามลำดับ
4. มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำ ซึ่งมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.68 และมีค่าความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.64 และ 4.26 ตามลำดับ
5. น้ำ ใช้น้ำประปาที่สะอาดในการผสมคอนกรีต

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยบดละเอียด

องค์ประกอบทางเคมี	$\text{SiO}_2$ (%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	CaO (%)	MgO (%)	$\text{K}_2\text{O}$ (%)	$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	$\text{Mn}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{SO}_3$ (%)	LOI (%)
เถ้าขานอ้อย	62.6	5.4	4.8	6.2	1.3	1.4	0.4	1.2	1.2	15.5

### 2.2 อัตราส่วนผสมคอนกรีตบดอัด

ในการออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าขานอ้อยสำหรับงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบส่วนผสมตามวิธี Soil Compaction Method [9, 10] โดยกำหนดปริมาณของวัสดุประสานในส่วนผสมที่ร้อยละ 10, 12 และ 14 ตามลำดับ และกำหนดอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยมีอัตราส่วนผสมทั้งหมด 12 ส่วนผสม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 สำหรับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่น โดยทำการทดสอบ Modified Compaction Test ตามมาตรฐาน ASTM D 1557-12 [11]

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าชานอ้อย

ชื่อส่วนผสม	ปูนซีเมนต์ (กก./ลบ.ม.)	มวลรวม ละเอียด (กก./ลบ.ม.)	มวลรวมหยาบ (กก./ลบ.ม.)	เถ้าชานอ้อย บดละเอียด (กก./ลบ.ม.)	หมายเหตุ
C-1	250	950	1,180	0	คอนกรีตควบคุม
C-2	290	950	1,180	0	คอนกรีตควบคุม
C-3	330	950	1,180	0	คอนกรีตควบคุม
1BA10	225	946	1,175	25	แทนที่ 10% (C-1)
1BA20	200	941	1,169	50	แทนที่ 20% (C-1)
1BA30	175	937	1,164	75	แทนที่ 30% (C-1)
2BA10	261	945	1,174	29	แทนที่ 10% (C-2)
2BA20	232	940	1,169	58	แทนที่ 20% (C-2)
2BA30	215	935	1,163	75	แทนที่ 30% (C-2)
3BA10	297	945	1,174	33	แทนที่ 10% (C-3)
3BA20	264	940	1,167	66	แทนที่ 20% (C-3)
3BA30	231	934	1,161	99	แทนที่ 30% (C-3)

\* C-n หมายถึง คอนกรีตควบคุมชุดที่ n และ nBAxx หมายถึง คอนกรีตบดอัดชุดที่ n ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ xx

### 2.3 ขั้นตอนการผลิตตัวอย่างคอนกรีตบดอัด

1. การผสมคอนกรีต ใช้เครื่องผสมคอนกรีตแบบกระทะ โดยเติมน้ำลงไป 2/10 ของน้ำทั้งหมด ใส่หินและทรายลงในโม่ผสม ใส่ปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อยบดละเอียดตามส่วนผสมลงไป จากนั้นเติมน้ำ 8/10 ส่วนที่เหลือไปแล้วทำการผสมจนคอนกรีตเข้ากันได้ดี โดยใช้เวลาผสมไม่น้อยกว่า 3 นาที

2. การหล่อตัวอย่าง เมื่อทำการผสมส่วนผสมจนเข้ากันได้แล้ว จากนั้นนำส่วนผสมมาทำการหล่อก้อนตัวอย่าง โดยใช้แบบหล่อรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. โดยวางแบบหล่อบนโต๊ะเขย่าคอนกรีต (Vibrating table) จากนั้นเทคอนกรีตลงในแบบหล่อที่ทำน้ำมัน โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นเท่า ๆ กัน และใช้น้ำหนักกดทับก้อนตัวอย่างโดยอิสระ ซึ่งแต่ละชั้นใช้เวลาเขย่าที่ได้จากเวลาของวิธี จากนั้นทำการสั่นเทมอร์ตา หากมอร์ตาเคลื่อนตัวมาเคลือบรอบๆ น้ำหนักกดทับในลักษณะที่เป็นวงแหวน จะทำการปิดโต๊ะเขย่า และดำเนินการในขั้นตอนนี้จนครบ 3 ชั้น โดยเมื่อทำการบดอัดชั้นสุดท้ายแล้วเสร็จ จากนั้นจะนำแบบหล่อออกจากโต๊ะเขย่าแล้วปาดผิวหน้าให้เรียบ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการหล่อก้อนตัวอย่างทั้งหมด 12 ก้อน ต่อ 1 อัตราส่วนผสม

3. หลังจากหล่อตัวอย่างแ่งคอนกรีตและตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว จะนำพลาสติกปิดผิวหน้าของคอนกรีตให้สนิท แล้วนำตัวอย่างแ่งคอนกรีตพร้อมแบบหล่อไปเก็บไว้ในที่ซึ่งมีอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นแกะแบบหล่อแล้วนำแ่งคอนกรีตไปบ่มที่อุณหภูมิปกติ โดยการแช่ลงในบ่อบ่ม ระหว่างการบ่มในน้ำ ต้องตรวจสอบระดับน้ำไม่ให้ต่ำกว่า 20 ซม. จากผิวหน้าตัวอย่างแ่งคอนกรีต โดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 3, 7, 28 และ 60 วัน

#### 2.4 การสังเคราะห์แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้น

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้น (Multiple Non-linear regression) ในการสังเคราะห์แบบจำลอง เพื่อทำนายกำลังอัดของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าขานอ้อย (CS) โดยใช้โปรแกรม SPSS 16.0 และจะทำการแบ่งชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝน (Training data) และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบ (Testing data) ออกเป็นร้อยละ 75 : 25 โดยมีขอบเขตของตัวแปรที่ศึกษาดังตารางที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย ร้อยละของวัสดุเชื่อมประสาน (B) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 10 – 14 ร้อยละการแทนที่ของเถ้าขานอ้อยบดละเอียด (PR) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0-30 และอายุของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าขานอ้อย (AC) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 3 - 60 วัน ซึ่งรูปแบบของสมการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้นแสดงดังสมการที่ 1

ตารางที่ 3 ขอบเขตของตัวแปรที่ใช้ในการสังเคราะห์แบบจำลอง

ตัวแปรนำเข้า/ส่งออก	ค่าที่ใช้ในการสังเคราะห์แบบจำลอง	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
ร้อยละของวัสดุเชื่อมประสาน, B (ร้อยละ)	10	14
ร้อยละการแทนที่ของเถ้าขานอ้อยบดละเอียด, PR (ร้อยละ)	0	30
อายุของคอนกรีตบดอัด, AC (วัน)	3	60

$$CS = a_0 + a_1B + a_2PR + a_3AC + a_4B^2 + a_5PR^2 + a_6AC^2 + a_7(B)(PR) + a_8(B)(AC) + a_9(PR)(AC) \quad (1)$$

โดยที่ CS คือ กำลังอัดของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าขานอ้อย B คือ ร้อยละของวัสดุเชื่อมประสาน PR คือ ร้อยละการแทนที่ของเถ้าขานอ้อยบดละเอียด AC คือ อายุของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าขานอ้อย และ  $a_1 - a_9$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร

สำหรับค่าทางสถิติที่ใช้เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้นในงานวิจัยนี้ มีดังนี้ 1) ค่าความแปรปรวนสัมบูรณ์ (Absolute Fraction of Variance,  $R^2$ ) ตามสมการที่ 2 ซึ่งเป็นการหาค่าความคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ และชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ 2) ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) ตามสมการที่ 3 ซึ่งเป็นการประเมินค่าความแตกต่างระหว่างชุดข้อมูลที่เป็นตัวแปรต้น (ชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง) และตัวแปรตาม (ชุดข้อมูลที่ได้จากการทำนายผล) 3) ร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) ตามสมการที่ 4 ซึ่งเป็นการประเมินค่าความแตกต่างระหว่างชุดข้อมูลของตัวแปรต้นและตัวแปรตาม โดยสามารถใช้เพื่อประเมินค่าความแตกต่างของชุดข้อมูลที่มีหน่วยไม่เหมือนกันได้ เนื่องจากหน่วยที่ได้นี้จะอยู่ในรูปของร้อยละ เมื่อ P คือ ค่ากำลังอัดที่ได้จากการทำนายผลในชุดข้อมูล  $j$ , T คือค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดลองในชุดข้อมูล  $j$  และ n คือจำนวนชุดของข้อมูล ซึ่งหาก  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วน MAPE และ RMSE มีค่าใกล้ 0 หมายความว่าแบบจำลองที่เสนอมีความแม่นยำในการทำนายสูง

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (P_j - T_j)^2}{\sum_{j=1}^n (T_j)^2} \quad (2)$$

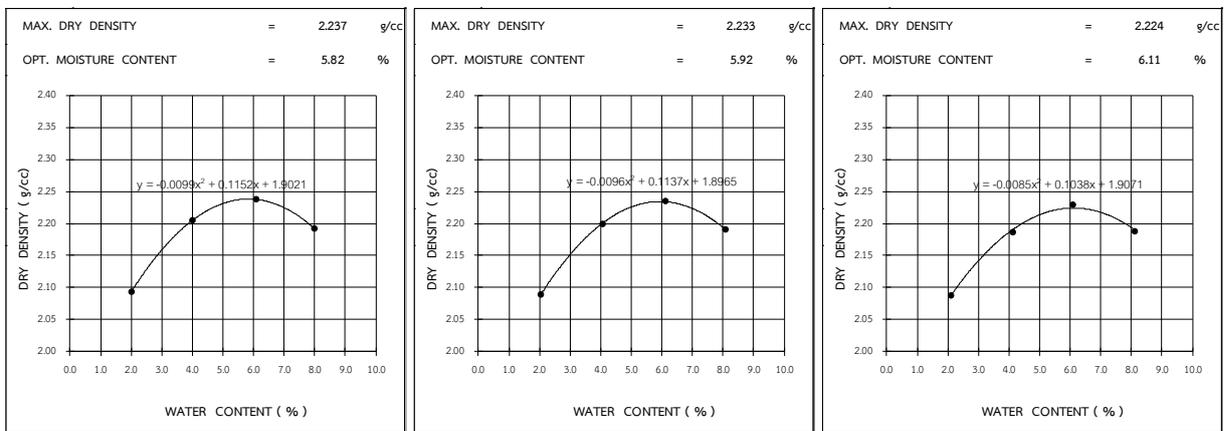
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_j - T_j)^2} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{j=1}^n \left( \frac{T_j - P_j}{T_j} \right) \quad (4)$$

### 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

#### 3.1 ผลการทดสอบการบดอัด

ในงานวิจัยนี้ ทำการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของคอนกรีตควบคุม C-1, C-2 และ C-3 ที่จะทำให้อ่อนกรีตบดอัดมีความหนาแน่นสูงสุด โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่น ดังรูปที่ 1 พบว่าคอนกรีตควบคุม C-1, C-2 และ C-3 มีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ทำให้คอนกรีตบดอัดมีความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 5.82 5.92 และ 6.11 ตามลำดับ โดยสิ่งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Harrington [10] ที่พบว่า โดยส่วนใหญ่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 8 ซึ่งจากผลทดสอบนี้จะเห็นว่า คอนกรีตควบคุม C-3 มีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุด นั่นเป็นเพราะว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของวัสดุประสานมากขึ้น ส่วนผสมจะมีความต้องการความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดมากขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง โดยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมทั้งสามนี้จะถูกนำไปใช้กับชุดตัวอย่างคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าขาน้อยในแต่ละชุด เช่น ชุดทดสอบ IBA10-IBA30 จะใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมร้อยละ 5.82 เป็นต้น



ก) คอนกรีตควบคุม C-1      ข) คอนกรีตควบคุม C-2      ค) คอนกรีตควบคุม C-3

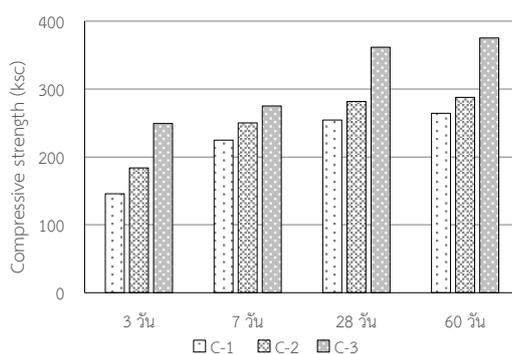
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่นของคอนกรีตควบคุม C-1 C-2 และ C-3

#### 3.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตบดอัด แสดงในตารางที่ 4 โดยแสดงกำลังอัดเฉลี่ยและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมเถ้าขาน้อยบดละเอียดที่อายุ 3 7 28 และ 60 วัน จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตควบคุม C-1 มีกำลังอัดที่อายุ 3 7 28 และ 60 วัน เท่ากับ 145.96, 224.62, 254.47 และ 264.45 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตควบคุม C-2

และ C-3 มีกำลังอัดที่อายุ 3 7 28 60 วัน เท่ากับ 183.88, 250.27, 281.63, 287.76 กก./ตร.ซม. และ 249.31, 275.14, 361.82, 375.31 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตควบคุมของแต่ละส่วนผสมที่อายุต่างๆ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยปริมาณของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นนี้จะมีปริมาณซีเมนต์เจลดเพิ่มมากขึ้นและเข้าไปแทนที่รูพรุนของคอนกรีตได้มากขึ้น จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง [12] โดยคอนกรีตบดอัดทั้ง 3 ส่วนผสมจะให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 250 ถึง 360 กก./ตร.ซม.



รูปที่ 2 กำลังอัดเฉลี่ยของแท่งคอนกรีตควบคุม C1-C3

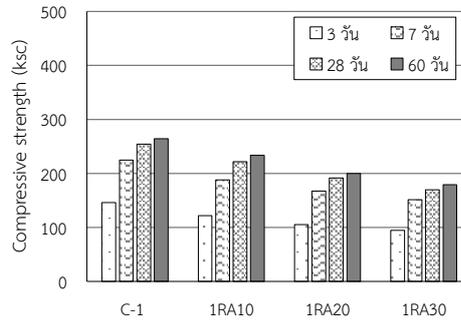
ตารางที่ 4 กำลังอัดเฉลี่ยของแท่งตัวอย่างการทดสอบ

ประเภท	กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.) - ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต (%)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน
C-1	145.96 - (100)	224.62 - (100)	254.47 - (100)	264.45 - (100)
C-2	183.88 - (100)	250.27 - (100)	281.63 - (100)	287.76 - (100)
C-3	249.31 - (100)	275.14 - (100)	361.82 - (100)	375.31 - (100)
1BA10	121.75 - (83)	188.07 - (84)	221.51 - (87)	233.58 - (88)
1BA20	105.03 - (72)	167.29 - (74)	191.52 - (75)	199.54 - (75)
1BA30	94.83 - (65)	151.4 - (67)	169.95 - (67)	178.96 - (68)
2BA10	157.1 - (85)	215.99 - (86)	249.89 - (89)	258.49 - (90)
2BA20	143.84 - (78)	199.76 - (80)	232.37 - (83)	239.79 - (83)
2BA30	129.74 - (71)	180.41 - (72)	213.00 - (76)	217.39 - (76)
3BA10	232.18 - (93)	260.55 - (95)	349.38 - (97)	370.25 - (99)
3BA20	207.25 - (83)	230.23 - (84)	325.3 - (90)	347.93 - (93)
3BA30	136.42 - (55)	154.6 - (56)	303.42 - (84)	322.54 - (86)

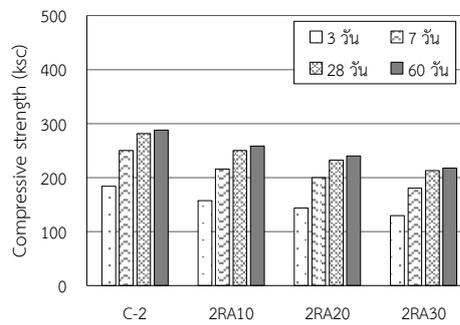
### 3.2 กำลังอัดของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียด

ในส่วนผสมที่ 1 เป็นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 10 20 และ 30 ในคอนกรีตควบคุม C-1 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดของชุดทดสอบกับคอนกรีตควบคุม C-1 ที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตบดอัดคิดเป็นร้อยละ 87 75 และ 67 ของคอนกรีต C-1 ตามลำดับ สำหรับในส่วนผสมที่ 2 เป็นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 10 20 และ 30 ในคอนกรีตควบคุม C-2 ซึ่งทำการเพิ่มปริมาณวัสดุประสานจาก 250 กก./ลบ.ม. เป็น 290 กก./ลบ.ม. เมื่อพิจารณากำลังอัดที่อายุ 28 วัน พบว่า ชุดทดสอบ 2BA10, 2BA20 และ 2BA30 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 249.89 232.37 และ 213.00 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 89 83 และ 76 ของคอนกรีตควบคุม C-2 ซึ่งหากทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลกำลังอัดของชุดทดสอบ C-1 จะเห็นได้ว่าหากใช้ปริมาณวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสิ่งนี้เป็นเพราะปริมาณของซีเมนต์เจลที่เพิ่มขึ้นและสามารถเข้าไปแทนที่รูพรุนของคอนกรีตได้ดีขึ้น [13, 14] สำหรับส่วนผสมสุดท้าย เป็นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในคอนกรีตควบคุม C-3 ซึ่งมีปริมาณวัสดุประสาน 330 กก./ลบ.ม. เมื่อพิจารณากำลังอัดที่อายุ 28 วัน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 10 จะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดเท่ากับ 349.38 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม แต่หากเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อยในวัสดุประสานร้อยละ 30 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดของชุดทดสอบ 3BA10, 3BA20 และ 3BA30 กับคอนกรีตควบคุม C-3 พบว่าชุดการทดสอบเหล่านี้มีค่ากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 97, 90 และ 84 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของชุดตัวอย่างการทดสอบทั้ง 3 ชุดนี้ พบว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือการเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุประสาน ทำให้กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้คือเมื่อเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม จะทำให้มีปริมาณของซีเมนต์เจลเพิ่มมากขึ้นและเข้าไปแทนที่รูพรุนของคอนกรีตได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาถึงการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียด พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยมากขึ้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มที่จะลดลงมากขึ้น ซึ่งสิ่งนี้เกิดจากการใช้เถ้าชานอ้อยในปริมาณมากเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่งผลให้มีปริมาณ CSH จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตต่ำลง อีกทั้งปริมาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  อาจมีไม่เพียงพอสำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิก [13] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Somna และคณะ [14] นอกจากนี้การใช้เถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI ที่สูงก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ต่ำลง แต่หากมีการเผาเถ้าชานอ้อยซ้ำเพื่อลดค่า LOI ก็จะทำให้มีกระบวนการและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น [15]

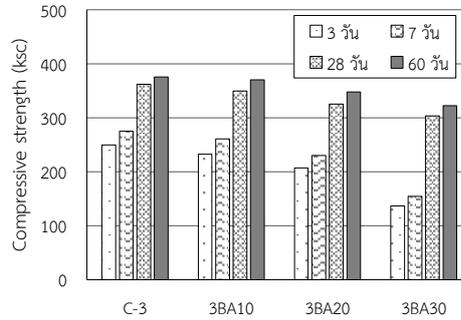
จากตารางที่ 4 ในส่วนผสมทั้ง 3 สามารถสรุปได้ว่าเถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานิกได้ ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดไม่เกินร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุประสาน จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าชานอ้อยที่อายุ 28 วัน มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีตควบคุม โดยรูปที่ 3-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่มีปริมาณของวัสดุประสานที่แตกต่างกัน จากรูปจะเห็นได้ว่า กำลังอัดของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าชานอ้อยในทุกอัตราส่วนการแทนที่ที่มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุม ซึ่งสิ่งนี้อาจเกิดจากขนาดอนุภาคของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดเล็กไม่พอ ทำให้ไม่สามารถเข้าไปแทรกภายในช่องว่างของคอนกรีตได้ดีเท่าที่ควร ซึ่งเหตุผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramjan [16] และยังคงสอดคล้องกับงานวิจัยจำนวนมากที่พบว่า การใช้วัสดุปอซโซลานิกที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า [17, 18] โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 10 จะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมมากที่สุด



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในคอนกรีตควบคุม C-1



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในคอนกรีตควบคุม C-2



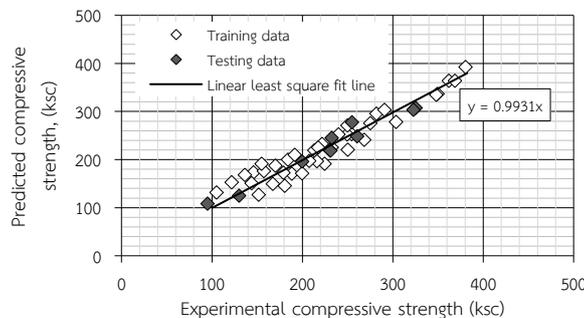
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในคอนกรีตควบคุม C-3

### 3.3 ผลการการสังเคราะห์แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้น

ในการสังเคราะห์แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้นของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าชานอ้อย ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรนำเข้าที่ใช้ ได้แก่ ร้อยละของปริมาณวัสดุผสม ( $B$ ) ร้อยละการแทนที่ ( $PR$ ) และอายุของคอนกรีตบดอัด ( $AC$ ) และมีตัวแปรส่งออกคือ กำลังอัดของคอนกรีต ( $CS$ ) จากนั้นนำผลการทำนายมาคำนวณค่าทางสถิติซึ่งประกอบด้วย  $R^2$ ,  $MAPE$  และ  $RMSE$  เพื่อแสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองในการทำนายที่ได้ ซึ่งหาก  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1 และ  $MAPE$  และ  $RMSE$  มีค่าเข้าใกล้ 0 จะหมายความว่าแบบจำลองที่เสนอมีความแม่นยำในการทำนายกำลังอัดของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าชานอ้อย โดยสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แบบจำลองนี้แสดงดังสมการที่ 5

$$CS = 434.283 - 60.807 B - 0.337 PR + 1.986 AC + 3.320 B^2 - 0.005 PR^2 - 0.063 AC^2 - 0.167 (B)(PR) + 0.316 (B)(AC) + 0.002 (PR)(AC) \quad (5)$$

รูปที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบผลของกำลังอัดที่ได้จากการทดลอง (Experimental compressive strength) และการทำนาย (Predicted compressive strength) ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่นำเสนอสามารถทำนายกำลังอัดของคอนกรีตอัดผสมเถ้าขานอ้อยได้ใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งสามารถดูได้จากเส้นตรงของค่าเฉลี่ยกำลังอัดที่มีความชัน (m) เท่ากับ 0.9931 และสำหรับค่าทางสถิติของผลการทำนายกำลังอัดของคอนกรีตอัดผสมเถ้าขานอ้อยของแบบจำลองที่เสนอพบว่า ในชุดข้อมูลการฝึกฝนและชุดข้อมูลการทดสอบค่าทางสถิติ  $R^2$ ,  $MAPE$  และ  $RMSE$  เท่ากับ 0.95994, 8.963, 19.646 และ 0.98243, 6.253, 14.596 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าทางสถิตินี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เสนอมีความแม่นยำที่เพียงพอและสามารถนำไปใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตอัดผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียดได้



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ได้จากการทดลองและการทำนาย

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 10 ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตอัดผสมเถ้าขานอ้อยมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมมากที่สุด แต่เมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดของคอนกรีตอัดมีแนวโน้มลดลง
2. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดไม่เกินร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุประสาน จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตอัดผสมเถ้าขานอ้อยที่อายุ 28 วัน มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีตควบคุม
3. แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้น สามารถทำนายกำลังอัดของคอนกรีตอัดผสมเถ้าขานอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีค่าทางสถิติ  $R^2$ ,  $MAPE$  และ  $RMSE$  ของชุดข้อมูลการฝึกฝนและชุดข้อมูลการทดสอบเท่ากับ 0.95994, 8.963, 19.646 และ 0.98243, 6.253, 14.596 ตามลำดับ

#### ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Dechasakulsom, M. et al. Designing and behavioral observation of Roller Compacted Concrete Pavement. *Bureau of road research and development*, 2006, Report NO. RD 230
- [2] Rahman, S.S. and Khattak, M.J. Roller compacted geopolymer concrete using recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 2021, 283, pp. 122624.
- [3] Mohamed, I. et al. Investigating the possibility of constructing low cost roller compacted concrete dam. *Alexandria Engineering Journal*, 2014, 53 (1), pp. 131-142.
- [4] Debieb, F. et al. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 2009, 23 (11), pp. 3382-3387.
- [5] Ganesan, K. et al. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and concrete composites*, 2007, 29 (6), pp. 515-524
- [6] Chusilp, N. et al. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Cement and concrete composites*, 2009, 23 (11), pp. 3352-3358.
- [7] Somna, R. et al. Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Materials & Design (1980-2015)*, 2012, 36, pp. 597-603.
- [8] Modani, P.O. and Vyawahare, M. Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete. *Procedia Engineering*, 2013, 51, pp. 25-29.
- [9] Choi, Y.K. and Groom, J.L. RCC mix design-soils approach. *American Society of Civil Engineers Journal of Materials in Civil Engineering*, 2001, 13 (1), pp. 71-76.
- [10] Harrington, D. et al. Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements. *InTrans Project Reports*, 2010, 102. Available from: [http://lib.dr.iastate.edu/intrans\\_reports/102](http://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/102) [Accessed 1 August 2010].
- [11] Annual Book of ASTM Standards. ASTM D 1557-12: 2012. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))*. Pennsylvania: ASTM, 2012
- [12] Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C. *Cement. Pozzolan and Concrete*, 3rd ed. Bangkok: SCG cement, 2012.
- [13] Lam, L., Wong, Y.L. and Poon, C.S. Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30 (5), pp. 747-756.
- [14] Somna, R. et al. Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 37 (7), pp. 848-854.
- [15] Thongon, S. and Cheerarot, R. Effect of High Temperatures on Fire Resistance of Concrete Containing Ground Bagasse Ash. *Rajabhat Rambhai Barni Research Journal*, 2019, 13 (1), pp. 32-42.
- [16] Ramjan, S. et al. Influence of bagasse ash with different fineness on alkali-silica reactivity of mortar. *Materiales De ConstruCCión*, 2018, 68 (332). Available from: <https://doi.org/10.3989/mc.2018.08617> [Accessed 30 December 2018].
- [17] Payá, J. et al. Mechanical treatment of fly ashes: Part IV. Strength development of ground fly ash-cement mortars cured at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30 (4), pp. 543-551.
- [18] Chindaprasirt, P. et al. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27 (4), pp. 425-428.

