

ความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยและการประยุกต์ใช้ในงาน บล็อกประสาน

Consistency of Chemical Composition of Bagasse Ash and Application in Interlocking Blocks

นิริชต์ สงวนเดือน,¹ กมล อมรฟ้า^{2*} และ ปุณยวีร์ เดชครอง³
Nitirach Sa-nguanduan,¹ Kamol Amornfa^{2} and Punyavee Dechkrong³*

Received 27 June 2023, Revised 13 November 2023, Accepted 16 November 2023

ABSTRACT

The objective of this research was to study the consistency of chemical composition of bagasse ash from a sugar factory in Tha Maka District, Kanchanaburi. Bagasse ash samples were collected from 3 production years. The results showed that the main composition of bagasse ash, SiO₂, was between 67.00% and 73.20%, and the average was 71.54% with a standard deviation of 2.91. A coefficient of variation was 4.06%. The essential composition of pozzolanic compounds (SiO₂+Fe₂O₃+Al₂O₃) was found, between 80.94% and 85.13% with an average value of 84.70% with a standard deviation of 3.91 and a coefficient of variation was 4.61%, which was considered as a little variance. Therefore, the bagasse ash produced from the same factory with the same production model will be consistent even with changing a production cycle. When three samples of bagasse ash were selected from different production cycles and when they were used as cement replacement in the production of interlocking blocks, the ratio of cement to soil was 1:7 when the bagasse ash was replaced for the cement, in the proportion of 20 percent by weight, it was found that the interlocking blocks had similar strength at 7 and 28 days of age.

Keywords: Chemical composition, Bagasse ash, Interlocking block, Coefficient of variation

¹ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 731400

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 731400

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

³ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง ศูนย์วิจัยและบริการวิชาการ คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Central Laboratory and Greenhouse Complex, Research and Academic Service Center, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

* Corresponding author: Tel. 0-3435-1851, E-mail address: fengkma@ku.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย จากโรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่งในอำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี โดยทำการเก็บตัวอย่างเถ้าชานอ้อยสามรอบปีการผลิต ผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบหลักของเถ้าชานอ้อย คือ SiO_2 มีปริมาณอยู่ระหว่างร้อยละ 67.00 ถึง 73.20 และมีค่าเฉลี่ย 71.54 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.91 และ ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันร้อยละ 4.06 เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบที่จำเป็นของสารปอซโซลาน ($\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$) พบว่ามีปริมาณอยู่ระหว่างร้อยละ 80.94 ถึง 85.13 และมีค่าเฉลี่ย 84.70 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.91 และ ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันร้อยละ 4.61 ซึ่งนับว่ามีความแปรปรวนน้อยมาก ดังนั้นเถ้าชานอ้อยที่ผลิตจากโรงงานเดียวกัน มีรูปแบบการผลิตแบบเดียวกัน จะมีความสม่ำเสมอแม้เปลี่ยนรอบการผลิต เมื่อนำเถ้าชานอ้อยสามตัวอย่างจากรอบของการผลิตต่างกันไปใช้ในแทนที่ปูนซีเมนต์การผลิตบล็อกประสาน ในอัตราส่วนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง เท่ากับ 1:7 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ก็พบว่าบล็อกประสานมีค่าความแข็งแรงที่อายุ 7 วันและ 28 วันใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: องค์ประกอบทางเคมี เถ้าชานอ้อย บล็อกประสาน ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน

คำนำ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกน้ำตาลรายใหญ่เป็นอันดับต้นของโลก ในปีการผลิต 2560 ประเทศไทยมีปริมาณอ้อยที่ผลิตรวม 105 ล้านตันต่อปี (พิพรรธน์ และสหลาภ, 2563) และในกระบวนการผลิตน้ำตาลทำให้เกิดชานอ้อยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งประมาณร้อยละ 0.62 ของน้ำหนักอ้อย (Fairbairn *et al.*, 2010) หรือประมาณ 651,000 ตัน และชานอ้อยเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตน้ำตาล และเกิดเถ้าชานอ้อยในปริมาณมากจนก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัด วิธีการกำจัดในปัจจุบัน นอกจากการนำไปปรับปรุงดินแล้ว เป็นเพียงแค่การกองทิ้งไว้ในพื้นที่ว่างเปล่าหรือใช้ประโยชน์ในการถมที่เท่านั้น

ประกอบกับในปัจจุบันอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีการนำทรัพยากรทางธรรมชาติมาใช้เพิ่มมากขึ้น คอนกรีตถือเป็นวัสดุที่ยังคงนิยมใช้ในงานก่อสร้างเป็นระยะเวลานานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งในกระบวนการผลิตคอนกรีตจะประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งมีองค์ประกอบธาตุ ดังนี้ C_2S , C_3S , C_3A และ C_4AF เมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ (H_2O) จะเกิดเป็นซีเมนต์เพสต์ และขั้นตอนนี้จะทำให้มีอิออนของแคลเซียม

หลงเหลืออยู่ จากการศึกษาในอดีตพบว่าเถ้าชานอ้อยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานสามารถนำมาใช้แทนที่ซีเมนต์ได้ หากนำเถ้าชานอ้อยที่เป็นวัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ซิลิกา และ อะลูมินา องค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้เมื่อนำมาบดละเอียดจะมีความสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้คอนกรีตแข็งตัวเพิ่มขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยในอดีตได้แก่ สุวิมล (2546) Chusilp *et al.* (2009) และ Rukzon & Chindprasirt (2012) พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยที่ร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าก่อนคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ควบคุม อาทิมา (2549) ศึกษาการพัฒนาคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าชานอ้อยสำหรับงานก่อสร้าง โดยสามารถแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยได้ร้อยละ 10-50 โดยที่คอนกรีตบล็อกยังใช้งานได้ดี รัฐพล และชัย (2554) ศึกษาการนำเถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ซีเมนต์ในงานคอนกรีตที่มวลรวมหยาบได้จากการย่อยสลายเศษคอนกรีต โดยแทนที่ร้อยละ 20 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด ปวิณวัช และกมล (2558) ศึกษาการนำเถ้าชานอ้อยมาใช้งานบล็อกประสานจากดินลูกรังผสมซีเมนต์ โดยแทนที่ร้อยละ 10 เป็นอัตราส่วนที่ให้

กำลังสูงสุด สิริวิชัย และคณะ (2563) ศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยผสมในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยแทนที่ร้อยละ 10-30 พบว่ากำลังลดลงเล็กน้อย แต่ยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการใช้งานบล็อกปูพื้น หทัยรัตน์ และณพล (2559) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อย โดยแทนที่ร้อยละ 20 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) หมายถึงวัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา หรือ ซิลิกาและอลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมาก หรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลาน แบ่งได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังนี้

ก. Class N ได้แก่ สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) คือ วัสดุที่ได้จากการระเบิดภูเขาไฟ (Volcanic tuff) และหินพูน (Pumice) เป็นต้น

ข. Class F ได้แก่ สารประกอบปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) คือ วัสดุที่ได้จากกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัสดุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว หินเชล ซีเมนต์แกลบ เป็นต้น

ค. Class C ได้แก่ สารปอซโซลานสังเคราะห์ที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน เช่นเดียวกับ Class F แต่มีข้อกำหนดคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน

ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น โดยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในการจำแนกแสดงดังใน Table 1

Table 1 Chemical composition following ASTM C618

Chemical properties	Class		
	N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (min, %)	70	70	50
SO_3 (max, %)	4	5	5

เถ้าชานอ้อยจากแหล่งโรงงานน้ำตาลที่แตกต่างกันจะมีองค์ประกอบธาตุที่แตกต่างกัน (Villar-Cocifta *et al.*, 2008) จากการทบทวนการวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่พบการวิจัยที่มีการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณและคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยที่เกิดขึ้นในรอบปีการผลิต ซึ่งมีผลสำคัญอย่างยิ่งต่อจากพิจารณานำเถ้าชานอ้อยไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ ดังนั้น การวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาความสัมพันธ์ของเถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลในแต่ละรอบการผลิตและศึกษาผลิตภัณฑ์จากเถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลที่มา

จากรอบการผลิตที่ต่างกัน อันจะเป็นการสร้างมูลค่าและเพิ่มเชื่อมั่นให้กับการนำของเสียจากโรงงานน้ำตาลมาใช้และช่วยป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยความสม่ำเสมอจะพิจารณาที่ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ช่วยเพิ่มปฏิกิริยาปอซโซลานอันส่งผลให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยที่ต่างกันจากการเผาไหม้ของชานอ้อยในแต่ละรอบของการผลิตน้ำตาลที่มาจากโรงงานเดียวกัน และศึกษากำลังของบล็อกประสาน

ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยที่มาจากรอบการผลิตที่ต่างกันที่มาจากโรงงานเดียวกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์งานโครงสร้าง (สูตรไฮบริด) ทราบ ดินลูกรังร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 เถ้าชานอ้อยจากโรงงาน

น้ำตาลท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี (Figure 1) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการนำชานอ้อยจากกระบวนการผลิตน้ำตาลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า และได้ทำการบดและตรวจสอบความละเอียด พบว่า ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 เครื่องอัดบล็อกประสาน Cinva-ram แบบใช้แรงคน



Figure 1 Bagasse ash in sugar factory

ในการศึกษานี้มีขั้นตอนเริ่มต้นคือ เก็บตัวอย่างเถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลท่ามะกา โดยปกติโรงงานน้ำตาลจะผลิตน้ำตาลแค่ปีละ 2-3 เดือน โดยจะเริ่มทำการผลิตน้ำตาลในช่วงเดือน ธันวาคม-มกราคม และสิ้นสุดการผลิตในช่วงเดือน กุมภาพันธ์-มีนาคม ในงานวิจัยนี้มีรอบการเก็บต่างๆ ดังนี้

- ฤดูกาล 2561/62 (หมายถึงรอบการผลิตที่เริ่มประมาณเดือนธันวาคม 2561 ไปจนถึงสิ้นสุดการผลิตประมาณเดือนมีนาคม 2562) ทำการเก็บ 2 ตัวอย่างไปทดสอบ

- ฤดูกาล 2562/63 ทำการเก็บ 2 ตัวอย่างไปทดสอบ

- ฤดูกาล 2563/64 ทำการเก็บ 8 ตัวอย่างไปทดสอบจากการเกิดเถ้าชานอ้อยรายสัปดาห์ จำนวน 8 สัปดาห์ (16/1/64, 23/1/64, 30/1/64, 6/2/64, 13/2/64, 20/2/64, 27/2/64, และ 6/3/64)

จากนั้นทำการเตรียมตัวอย่างเถ้าชานอ้อยเพื่อนำไปส่งทดสอบ โดยการนำตัวอย่างไปเข้าตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำตัวอย่างออกจากตู้อบไว้ให้เย็น นำใส่ถุงซิปล็อคแล้วจัดส่งไปให้ทางห้องปฏิบัติการทำการทดสอบ โดยใช้วิธีการทดสอบ X-ray fluorescence เพื่อหาคุณสมบัติทางเคมีของดินและเถ้าชานอ้อยที่รอบการเก็บต่างๆ

หลังจากได้ผลจากการทดสอบแล้วนำผลมาวิเคราะห์ค่าต่างๆ ทางสถิติ ได้แก่ ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน จากนั้นนำเถ้าชานอ้อย 3 ตัวอย่างจากต้นกลาง และปลายของรอบการผลิต ในปี 2563-2564 นำมาอบเพื่อนำเถ้าไปบดโดยใช้เครื่องลอสเองเจอลิส จำนวน 12,000 รอบ นำตัวอย่างเถ้าชานอ้อยไปผสมดินลูกรังกับน้ำ แล้วนำไปผสมกับปูนซีเมนต์งานโครงสร้าง (สูตรไฮบริด) ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง 1:7

และแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยที่ร้อยละ 20 แล้วนำไปอัดในเครื่องอัดบล็อกประสาน Cinva-ram แบบใช้แรงคน (Figure 2 3 และ 4) ทำการควบคุมคุณภาพเป็นอย่างดีทั้งปริมาณน้ำที่ใช้และความหนาแน่นในการอัดบล็อก นำบล็อกประสานที่ผ่านการอัดแล้วไปทำการบ่มในระยะเวลาประมาณ 7 วัน โดยบล็อกประสานจะ

ถูกผลิตให้มีผิวบนล่างเรียบไม่มีปุ่ม แล้วจึงนำไปทดสอบกับเครื่องทดสอบกำลังอัด (Figure 5) ที่อายุ 7 วัน 5 ก้อนและอายุ 28 วันอีก 5 ก้อน ทดสอบแรงอัดกระทำด้วยอัตราคงที่ โดยใช้เวลาประมาณ 1 นาที จนได้แรงอัดสูงสุด และนำผลมาวิเคราะห์เพื่อหากำลังรับแรงอัดของบล็อกประสาน



Figure 2 General interlocking block



Figure 3 Cinva-ram for interlocking block



Figure 4 Interlocking block from Cinva-ram



Figure 5 Compression test of interlocking block

ผล

1. การศึกษารวมองค์ประกอบทางเคมีของเก้าชานอ้อยจากงานวิจัยอื่น

เก้าชานอ้อยเป็นสารปอซโซลานที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง โดยจากการ

รวบรวมองค์ประกอบทางเคมีจากงานวิจัยอื่นๆ ดังแสดงใน Table 2 จากตารางพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเก้าชานอ้อย จากแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกัน องค์ประกอบหลักของเก้าชานอ้อย คือ SiO_2 มีปริมาณอยู่ระหว่างร้อยละ 41.63 ถึง 83.27

และเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบที่จำเป็นของสารปอชโซลาน ($\text{SiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3$) พบว่า มีปริมาณอยู่ระหว่างร้อยละ 43.30 ถึง 94.6 ซึ่งจัดได้ทั้ง Class F (มากกว่า 70) Class C (อยู่ระหว่าง 50 ถึง 70) และไม่มีความเป็นสารปอชโซลาน (ต่ำกว่า 50) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 74.82 เนื่องจากความสม่ำเสมอของเถ้าชานอ้อยขึ้นกับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น พันธุ์ของอ้อยที่ใช้ อุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการเผา ระยะเวลาของการเผา เทคโนโลยีของเตาเผา ช่วงเวลาการเปิดปิดเตา เป็นต้น ทำให้การวิจัยเรื่องเถ้าชานอ้อยควรมีการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีทุกครั้งเมื่อเปลี่ยนแหล่งโรงงานน้ำตาล

2. องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยจากการเก็บตัวอย่างของโรงงานเดียวกัน (โรงงานน้ำตาลท่ามะกา จ.กาญจนบุรี)

ผลการทดสอบ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย แสดงดัง Table 3 และ Figure 6 จากผลการทดสอบพบว่า องค์ประกอบหลักของเถ้าชานอ้อย คือ SiO_2 มีปริมาณอยู่ระหว่างร้อยละ 67.00 ถึง 73.20 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 71.54 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.91 และ ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับร้อยละ 4.06 เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบที่จำเป็นของสารปอช

โซลาน ($\text{SiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3$) พบว่า มีปริมาณอยู่ระหว่างร้อยละ 80.94 ถึง 85.13 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84.70 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.91 และ ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับร้อยละ 4.61 ซึ่งเมื่อพิจารณาตาม ASTM C618 ถือเป็นสารปอชโซลานที่จัดอยู่ใน Class F ($\text{SiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 84.70 มากกว่า 70) และมีคุณภาพดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าชานอ้อยจากแหล่งอื่นๆ ในประเทศไทยซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 74.82 ดังใน Table 2 และมีความสม่ำเสมอสูง เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันน้อยกว่า 5 จึงถือว่า มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ยังพบสาร CaO อยู่ระหว่างร้อยละ 4.11 ถึง 6.21 และมี SO_3 น้อยมาก คือไม่เกิน 1.5 ซึ่งไม่เกินมาตรฐาน ASTM C618 จากผลการทดสอบมีความเป็นไปได้ว่าเถ้าชานอ้อยที่มาจากโรงงานเดียวกัน มีรูปแบบการผลิตเหมือนเดิม จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนเดิม จะเห็นได้ว่า เถ้าชานอ้อยจากปีที่ต่างกันสามปี และเถ้าชานอ้อยที่ผลิตปีเดียวกันแต่ต่างกันในแต่ละสัปดาห์ มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกัน จึงถือว่าเถ้าชานอ้อยนี้มีความสม่ำเสมอสูง ถ้าใช้เถ้าชานอ้อยจากโรงงานเดิมต่อเนื่องไป

Table 2 Chemical composition of bagasse ash from previous research

Examples of Research	Factories Location	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	$\text{SiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)
กฤษณ์ (2545)	Kanchanaburi	67.94	4.75	1.61	74.30
ศักดิ์รัฐ และ เรืองรัฐ (2562)	Kanchanaburi	74.81	4.74	3.89	83.44
ปกป้อง และคณะ (2559)	Ratchaburi	69.3	3.9	2.9	76.1
สุวิมล (2546) แหล่ง 1	Suphan Buri	62.92	3.46	*	66.38
สุวิมล (2546) แหล่ง 2	Suphan Buri	62.60	3.62	*	66.22
ศิริชัย และคณะ (2554) แหล่ง 3	Suphan Buri	75.40	4.11	1.22	80.73
ปวิณวัช และกมล (2558)	Suphan Buri	70.47	4.12	2.88	77.47
บุรฉัตร และ พงศกร (2552)	Suphan Buri	88.6	3.8	2.2	94.6
หทัยรัตน์ และ ณพล (2559)	Sing Buri	71.63	9.37	5.1	86.10
อาทิตมา (2549)	Nakhon Sawan	83.27	2.67	2.85	88.79
ศิริชัย และคณะ (2554) แหล่ง 1	Nakhon Sawan	75.10	7.38	2.78	85.26

Table 2 Chemical composition of bagasse ash from previous research (continue)

Examples of Research	Factories Location	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ +Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ (%)
วรรณภา และคณะ (2557)	Nakhon Sawan	71.12	8.96	4.73	84.81
ศิริชัย และคณะ (2554) แหล่ง 2	Lopburi	68.40	8.76	4.02	81.18
รัฐพล และชัย (2554)	Lopburi	55.0	5.1	4.1	64.2
อรรคเดช และคณะ (2561)	Lopburi	63.88	8.02	4.85	76.75
สุเมธ (2546)	Saraburi	51.96	1.37	0.82	54.15
สุรียัน และคณะ (2565)	Chaiyaphum	62.6	5.4	4.8	72.80
อรรถพล และดลฤดี (2565)	Khon Kaen	41.63	1.26	0.41	43.30
สุทัศน์ และคณะ (2552)	Udon Thani	58.00	2.10	1.30	61.40
พิพรรธน์ และ สหลาก (2563) แหล่ง A	Kalasin	77.57	4.15	4.66	86.38
พิพรรธน์ และ สหลาก (2563) แหล่ง B	Maha Sarakham	59.56	4.30	4.06	67.92
จิรวัดน์ (2564)	Buriram	60.75	3.46	9.63	73.84
Max		88.60	9.37	9.63	94.60
Min		41.63	1.26	0.41	43.30
Mean		66.93	4.76	3.44	74.82

* less than 20 ppm

Table 3 Chemical composition of bagasse ash from this research

Sample No.	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	(SiO ₂ +Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃) (%)	CaO (%)	SO ₃ (%)
61/62-1	70.80	3.57	8.72	83.09	5.32	0.72
61/62-2	70.00	3.68	8.84	82.52	6.21	0.67
62/63-1	70.50	3.66	8.77	82.93	6.03	0.69
62/63-2	72.00	3.66	8.46	84.12	5.51	0.71
63/64-1 (16/1/64)	68.70	4.55	10.10	83.35	4.69	0.68
63/64-2 (23/1/64)	68.80	4.56	9.99	83.35	4.64	0.70
63/64-3 (30/1/64)	67.00	4.35	9.59	80.94	4.11	1.50
63/64-4 (6/2/64)	73.20	3.26	8.67	85.13	4.72	0.60
63/64-5 (13/2/64)	72.90	3.44	8.69	85.03	4.66	0.58
63/64-6 (20/2/64)	72.60	3.45	8.75	84.80	4.89	0.50
63/64-7 (27/2/64)	72.30	3.51	8.63	84.44	5.20	0.50
63/64-8 (6/3/64)	72.30	3.57	8.45	84.32	5.40	0.54
Max	73.20	4.56	10.10	85.13	6.21	1.50
Min	67.00	3.26	8.45	80.94	4.11	0.50
Mean	71.54	3.71	9.45	84.70	4.79	0.65
Standard Deviation	2.91	0.48	1.81	3.91	1.32	-
Coefficient of variation	4.06	12.91	19.20	4.61	27.58	-

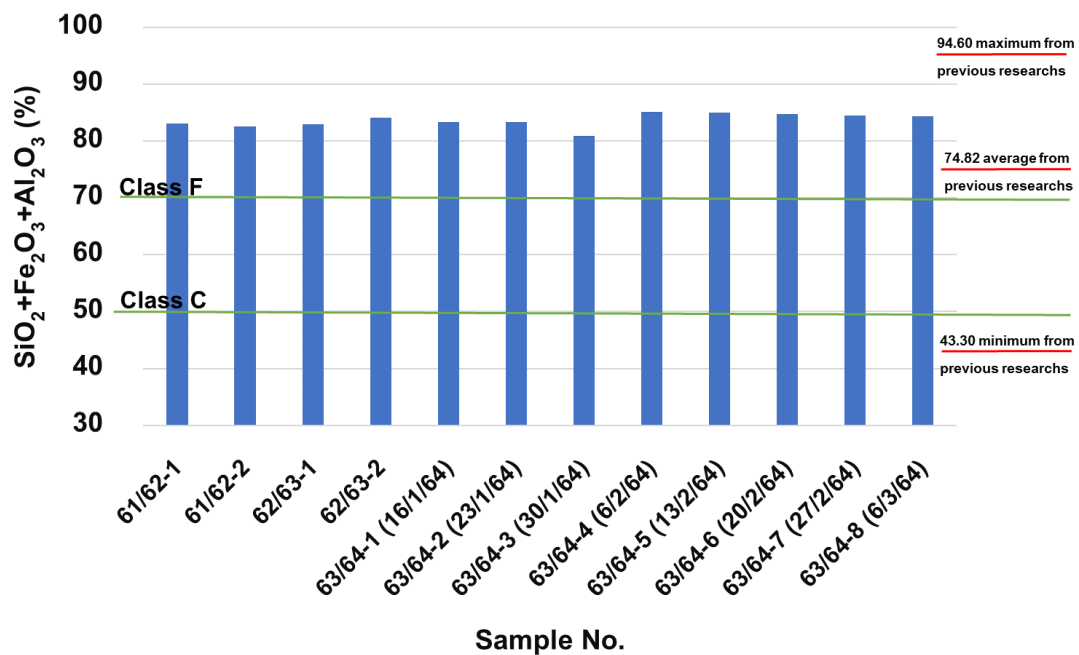


Figure 6 Percentage of $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$

3. ผลการนำเถ้าขานอ้อยจากตัวอย่างเถ้าขานอ้อยไปใช้ในการผลิตบล็อกประสาน ดินลูกรังที่ใช้ในการผลิตบล็อกประสานมาจากแหล่งดินในอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.85 สำหรับ Sieve Analysis และ Hydrometer Test แสดงผลใน Figure 7 โดยพบว่าดินร้อยละ 99.83 ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และมีส่วนของดินเม็ดละเอียดที่ผ่าน

ตะแกรงเบอร์ 200 ถึงร้อยละ 32.44 และมีค่า C_u เท่ากับ 400 ซึ่งมีค่ามากกว่า 4 และมีค่า C_c เท่ากับ 49 ซึ่งมีค่าไม่อยู่ในช่วง 1 ถึง 3 ดังนั้นดินลูกรังนี้จึงเป็นดินลูกรังที่มีขนาดคละกันไม่ดี (Poorly Grade) จากการทดสอบ Atterberg's Limit ไม่สามารถปั้นให้ขึ้นรูปได้ และไม่เกิดการไหล จึงแสดงว่าเป็น Non plastic

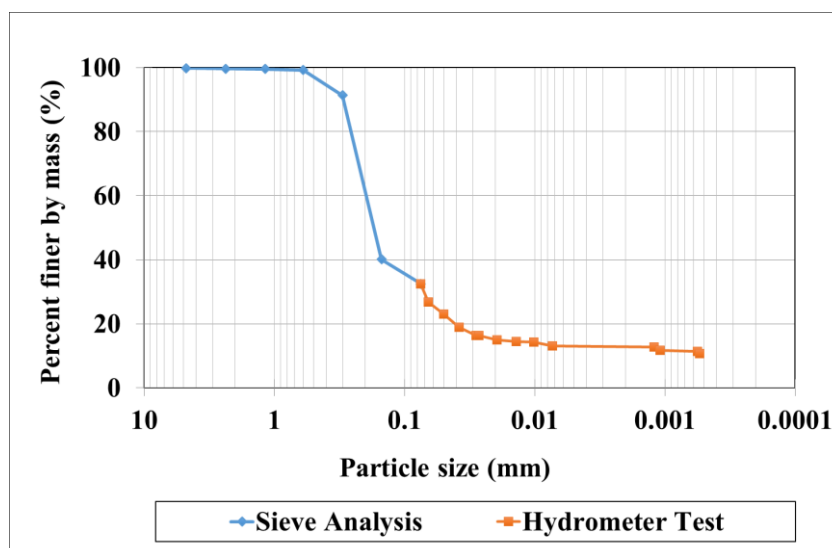


Figure 7 Grain size distribution of lateritic soil

จากการทดสอบพบว่าดินลูกรังถูกจัดเป็นดินประเภทดินเม็ดละเอียดประเภท A-2-4 จากวิธีจำแนกแบบ AASHTO และถูกจัดเป็นดินประเภท SM จากการจำแนกด้วยวิธี USCS

โดยทางสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย แนะนำว่าเมื่อทำการทดสอบหาขนาดผลที่ตะแกรงเบอร์ 200 แล้วพบว่ามึ้น้ำหนักของดินลูกรังหายไปมากกว่าร้อยละ 35 แสดงว่าดินนั้นเป็นดินที่มีความละเอียดมากซึ่งไม่เหมาะสมแก่การนำมาใช้ในการผลิตบล็อกประสานทันที เพราะดินเม็ดละเอียดจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าดินเม็ดหยาบ ควรเพิ่มวัสดุหยาบ เช่น ทราย หรือ หินฝุ่น จากผลการกระจายตัวของดินลูกรังในงานวิจัยนี้มีขนาดผลผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับร้อยละ 32.44 แสดงว่าดินในงานวิจัยนี้เป็นดินเม็ดหยาบซึ่งเหมาะสมแก่การนำมาใช้ในการผลิตบล็อกประสานทันทีโดยไม่ต้องเพิ่มวัสดุหยาบ

ทำการผลิตบล็อกประสาน ด้วยอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง 1 : 7 และเลือกเถ้าชานอ้อย 3 ตัวอย่าง ได้แก่ เถ้าหมายเลข 63/64-1 (16/1/64)

ขอเรียกว่า BA1 เถ้าหมายเลข 63/64-4 (6/2/64) ขอเรียกว่า BA2 และเถ้าหมายเลข 63/64-8 (6/3/64) ขอเรียกว่า BA3 มาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดย เถ้าชานอ้อย BA1 BA2 BA3 มี SiO_2 ร้อยละ 68.70 73.20 72.30 ตามลำดับ และมี $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 83.35 85.13 84.32 ตามลำดับ ซึ่งถือว่า ทั้ง BA1 BA2 และ BA3 มีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบแสดงดัง Figure 8 จากกราฟจะเห็นได้ว่า ความแข็งแรงที่อายุ 7/28 วันของบล็อกประสานโดยใช้ BA1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.3/43.4 ksc ที่ใช้ BA2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.0/43.3 ksc และใช้ BA3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 23.3/44.6 ksc โดยที่อายุ 7 วันกำลังของ BA1 และ BA2 มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้น BA3 มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย อาจเนื่องจากการบ่มตัวอย่าง ในขณะที่อายุ 28 วันกำลังของทั้ง BA1 BA2 BA3 มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในภาพรวมจึงถือว่ามีความใกล้เคียงกัน และผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนบล็อกประสานแบบไม่รับน้ำหนัก มผช 602/2547 ดังนั้นการใช้เถ้าชานอ้อยที่เก็บตัวอย่างคนละรอบการผลิตแต่มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน เมื่อนำไปใช้ในการผลิตบล็อกประสาน ก็ทำให้ความแข็งแรงของบล็อกประสานมีความสม่ำเสมอ

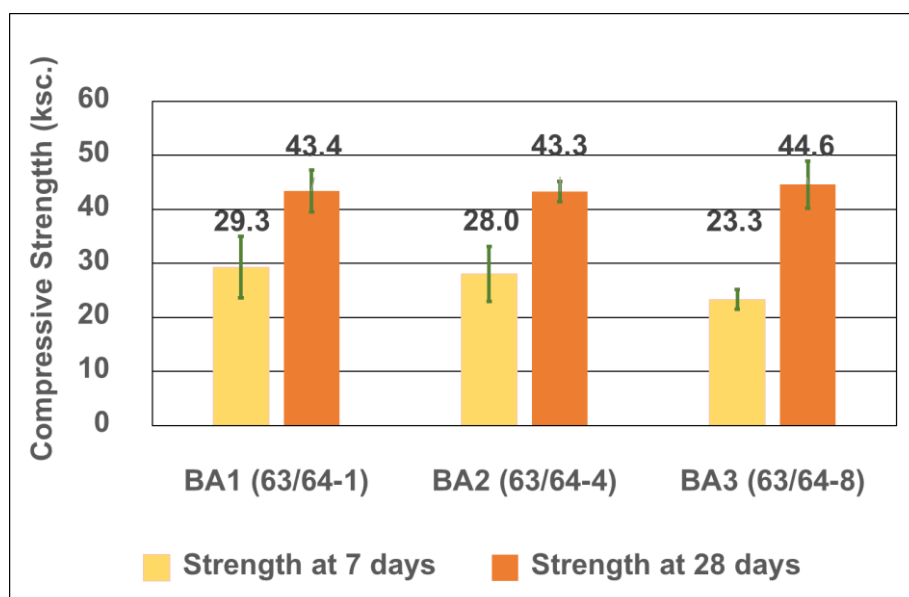


Figure 8 Interlocking block test result

สรุปและวิจารณ์

จากการรวบรวมองค์ประกอบทางเคมีของเถาซานอ้อยในงานวิจัยต่างๆ พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถาซานอ้อยมีความแตกต่างกันในแต่ละแหล่ง สำหรับผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถาซานอ้อยที่เก็บมาจากโรงงานน้ำตาลเดียวกัน 3 รอบปีการผลิต พบว่าองค์ประกอบหลักของเถาซานอ้อยคือ SiO_2 มีปริมาณอยู่ระหว่างร้อยละ 67.00 ถึง 73.20 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 71.54 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.91 และ ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับร้อยละ 4.06 เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบที่จำเป็นของสารปอซโซลาน ($\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$) พบว่า มีปริมาณอยู่ระหว่างร้อยละ 80.94 ถึง 85.13 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84.70 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.91 และ ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับร้อยละ 4.61 ซึ่งเมื่อพิจารณาตาม ASTM C618 ถือเป็นสารปอซโซลานที่มีคุณภาพดีมากจัดเป็น Class F และมีความสม่ำเสมอสูง เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันน้อยกว่า 5 จึงถือว่ามี ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน จากผลการทดสอบมีความเป็นไปได้ว่าเถาซานอ้อยที่มาจากโรงงานเดียวกัน มีรูปแบบการผลิตเหมือนเดิม จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนเดิม จะเห็นได้ว่าเถาซานอ้อยจากปีที่ต่างกันสามปี และเถาซานอ้อยที่ผลิตปีเดียวกันแต่ต่างกันในแต่ละสัปดาห์ มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกัน จึงถือว่าเถาซานอ้อยนี้มีความสม่ำเสมอสูง จากนั้นทำการผลิตบล็อกประสานด้วยอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง 1 : 7 และสุ่มเถาซานอ้อยสามตัวอย่างซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าความแข็งแรงที่อายุ 7 และ 28 วันของบล็อกประสานโดยใช้เถาซานอ้อยทุกตัวอย่างมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นการใช้เถาซานอ้อยที่เก็บตัวอย่างคนละรอบ เมื่อนำไปใช้ในการผลิตบล็อกประสานที่มีการควบคุมคุณภาพการผลิตที่ดี ก็ทำให้ความแข็งแรงของบล็อกประสานมีความสม่ำเสมอ ทั้งนี้ถึงแม้ว่าเถาซานอ้อยในงานวิจัยนี้จะมีความสม่ำเสมอ แต่การส่งเถาซานอ้อยไปทดสอบองค์ประกอบทางเคมียังมีความจำเป็นในกระบวนการตรวจสอบ โดยเฉพาะเมื่อปัจจัยในการผลิตเปลี่ยนไป

เช่น พันธุ์อ้อย วิธีการเก็บเกี่ยวเครื่องจักรการผลิต นอกจากนี้ยังควรศึกษาคุณสมบัติอื่น ๆ นอกจากกำลังรับแรง เช่น ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ สีและลักษณะพื้นผิว เป็นต้น

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2564 รหัส KPS-RDI 2021-024 ขอขอบคุณโรงงานน้ำตาลท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี ที่ให้การสนับสนุนเถาซานอ้อยที่เป็นวัตถุดิบหลักในงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้ออำนวยสถานที่สำหรับทำงานวิจัย ขอขอบคุณความร่วมมือในการทดลองและเก็บข้อมูลจาก นายจิราวัฒน์ ผลเจริญรัตน์ นายชูแสง ฉัตรบุบผา และ นายณัฐพล เกตุคำ นิสิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- กฤษณ์ จารุทะวัย.(2545). การใช้เถาลอยเส้นปาล์มและเถาซานอ้อยแทนที่ซีเมนต์บางส่วน (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิราวัฒน์ วิมุติสุขวิริยา.(2564). การศึกษาคุนสมบัติคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักผลิตจากหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเถาซานอ้อยในพื้นที่อำเภอเมืองบุรีรัมย์. วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 10(1), 1-15.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพงศกร พรหมสวัสดิ์. (2552). ผลกระทบของการแทนที่เถาซานอ้อยในมวลรวมละเอียดต่อคุณสมบัติทางกลของปูนฉาบ. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 20(1), 59-68.

- ปกป้อง รัตนชู, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2559). สมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับเถ้าชานอ้อยบดละเอียด. *วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, 4(2), 36-48.
- ปวีณวิษ ยอดดำเนิน และกมล อมรฟ้า. (2558). การประยุกต์ใช้เถ้าชานอ้อยในการผลิตบล็อกประสาน. *การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20* (น. 215-MAT-1-8). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- พิพรรธน์ อินปลัด และสหลาก หอมวุฒิมวงศ์. (2563). ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม. *วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยนเรศวร*, 15(2), 67-74.
- รัฐพล สมณา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*. 34(4) 369-381.
- วรรณดา ต.แสงจันทร์, ปราณี จันทร์ลา, ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ, และสุทธิมา ศรีประเสริฐสุข. (2557). การสังเคราะห์คอร์เตียไรต์จากเถ้าชานอ้อย. *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 3(3) 9-14.
- ศักดิ์ราวุธ ทองออน และเรืองรุชดี ชีระโรจน์. (2562). ผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงต่อการทนไฟของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียด. *วารสารวิจัยรำไพพรรณี*, 13(1) 32-42
- ศิริชัย ก้านกิ่ง, ศรินทร ทองแสง, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, ชาคริต สิริสิงห์ และเอกชัย วิมลมาลา. (2554). อิทธิพลของแหล่งชานอ้อยและปริมาณของซิลิกาในผงเถ้าชานอ้อยที่มีสมบัติการบ่มสุกและเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49* (น. 89-95). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- สิริวิญญู สาสน์ธรรมบท, ณัฐพนธ์ พลพวง, กนต์พงศ์ รอดบางยาง, กมล อมรฟ้า และ นิธิรัชต์ สงวนเดือน. (2563). คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเถ้าชานอ้อย. *การประชุมทางวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน* (น. 920-927). นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
- สุทัศน์ จันบัวลา, มานะ เอี่ยมบัว, และพิทักษ์ เหล่ารัตนกุล. (2552). การพัฒนาผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาจังหวัดสิงห์บุรี. *วารสารวิจัย มสท สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 2(1), 15-24.
- สุเมธ เตชะกุลวิโรจน์. (2546). *การใช้เถ้าลอยชานอ้อยมาบำบัดน้ำเสียเสียอมแล้วนำไปทำคอนกรีตบล็อก* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุริยัน พันพิพัฒน์, สิทธิศักดิ์ อันสนั่น, และเรืองรุชดี ชีระโรจน์. (2565). การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในงานคอนกรีตบดอัด. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์*, 33(4), 77-87.
- สุวิมล สัจจวานิชย์. (2546). ผลกระทบของเถ้าชานอ้อยในลักษณะวัสดุประสาน. *วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 48, 18-22.

- หทัยรัตน์ ภูระหงษ์ และณพล อยู่บรรพต. (2559). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน กรุงเทพมหานครด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อย. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21* (น. 1242-1248). สงขลา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
- อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์, นัฐภาพ ถานะวุฒพงษ์, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2561). กำลังอัดประลัย อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อย บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปริมาณสูง. *วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, 6(1), 1-9.
- อรรถพล พระโคตร และดลฤดี หอมดี. (2565). การปรับปรุงสมบัติการรับแรงอัดและความคงทนของชั้นพื้นทางด้วยจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้เถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบ. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์*, 33(1), 35-47.
- อาทิมา ดวงจันทร์. (2549). *การพัฒนาคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าชานอ้อยสำหรับงานก่อสร้าง* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete, *Construction and Building Materials*. 23, 3352–3358. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.030
- Fairbairn, E. M. R., Americano, B. B., Cordeiro, G. C., Paula, T. P., Toledo Filho, R. D., & Silvano, M. M. (2010). Cement replacement by sugarcane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental Management*, 91(9), 1864–1871. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.04.008
- Rukzon, S., & Chindaprasirt, P. (2012). Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Materials & Design*. 34, 45–50. doi: 10.1016/j.matdes.2011.07.045
- Villar-Cocifta, E., Frias, M., & Valencia, E. (2008). Sugar cane wastes as pozzolanic materials: application of mathematic model. *ACI Materials Journal*, 105, 258-264. doi: 10.14359/19822