



## การพัฒนากำลังอัดของเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างชั้นทาง

### Strength Development of Sugar Cane Bagasse Ash Stabilized by Cement for Road Construction Works

ทวิศักดิ์ ปิตักุณพงศ์สุข<sup>1\*</sup>, สุนิต ประเวระทัง<sup>2</sup> และ รัฐพงษ์ ศรุติรัตนวรกุล<sup>3</sup>

<sup>1</sup> รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

<sup>2</sup> ผู้จัดการแผนกวิศวกรรมโยธา, บริษัท เทต้า จำกัด ถนนแจ้งวัฒนะ ปากเกร็ด นนทบุรี

<sup>3</sup> ผู้จัดการอาวุโสแผนกวิศวกรรมโยธา, บริษัท เทต้า จำกัด ถนนแจ้งวัฒนะ ปากเกร็ด นนทบุรี

\*Corresponding author: fengtwj@ku.ac.th

#### บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการนำเสนอการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มของเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ เถ้าขานอ้อย ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงาน ไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น การศึกษาทำการบดอัดเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วนซีเมนต์ 2% ถึง 10% โดยน้ำหนักแห้ง โดยการบดอัดด้วยวิธี *Modified Compaction* พบว่า เถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ที่ได้รับการบดอัดแล้วมีการเชื่อมประสานจับตัวเป็นก้อน (*Coagulation*) โดยความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ มีค่าระหว่าง  $1,335 \text{ kg/m}^3$  ถึง  $1,490 \text{ kg/m}^3$  และปริมาณน้ำที่เหมาะสมโดยเฉลี่ยประมาณ 25% โดยเป็นปริมาณน้ำที่ใช้บดอัดเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัด กล่าวคือ การเตรียมตัวอย่างงานทดสอบกำลังอัดทำการบดอัดเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ที่ 4%, 6%, 8% และ 10% โดยผสมน้ำ 25% และบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน ผลทดสอบ แสดงว่า เถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์มีกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นและตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น อายุการบ่มเป็นปัจจัยทำให้มีการพัฒนากำลังอัดให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยงานวิจัยได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนาำลังอัด ( $q_u$ ) กับอายุการบ่ม ( $t$ ) ของตัวอย่างเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ โดยผลการศึกษาด้านกำลังอัด แสดงว่า เถ้าขานอ้อยที่อัตราส่วนผสมซีเมนต์ 6%, 8% และ 10% ที่อายุการบ่ม 7 วัน ได้ค่ากำลังอัดสูงกว่า  $7 \text{ kg/cm}^2$  ซึ่งผ่านมาตรฐานสำหรับงานวัสดุชั้นรองพื้นทาง (*Subbase course*) ในขณะที่ส่วนผสมซีเมนต์ 4% สามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงกว่า  $7 \text{ kg/cm}^2$  ได้ที่อายุการบ่มประมาณ 21 วัน ส่วนทางด้านการใช้งานเป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (*Base course*) นั้น ผลการทดลองเสนอแนะให้ใช้ส่วนผสมซีเมนต์ 10% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในการพัฒนากำลังอัดให้สูงกว่า  $17.5 \text{ kg/cm}^2$  ตามมาตรฐานการใช้งานวัสดุชั้นพื้นทาง จากข้อมูลการศึกษา แสดงว่า การใช้เถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์เป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าขานอ้อยในงานวิศวกรรมโยธาและเป็นวิธีการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนสำหรับงานก่อสร้างชั้นทางได้

**คำสำคัญ:** เถ้าขานอ้อย, เถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์, ดินซีเมนต์, การบดอัดดินซีเมนต์, วัสดุทดแทนสำหรับงานก่อสร้างชั้นทาง

Thaweesak Pitikhunpongsuk<sup>1\*</sup>, Sunit Prawerathang<sup>2</sup> and Rattapong Sarutirattanaworakun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok Campus, Bangkok

<sup>2</sup> Manager, Civil Engineering Department, TEDA Company Ltd., Nonthaburi, Thailand

<sup>3</sup> Senior Manager, Civil Engineering Department, TEDA Company Ltd., Nonthaburi, Thailand

## ABSTRACTS

*This study investigated the development of compressive strength of **sugar cane bagasse ash (SCA)** mixed with cement. Sugar cane bagasse ash is the by-products from sugar industry. In this study, the material SCA was brought from Sugar Power Plant Company Limited. The set of modified compaction of SCA mixed with cement at 2% upto 10% were performed. The compaction results showed that the maximum dry density (MDD) was measured between  $1,335 \text{ kg/m}^3$  and  $1,490 \text{ kg/m}^3$  and the average amount of optimum water content of 25% was reported. This amount of water content at 25% was to be used in preparing specimens for unconfined compression tests (UCS tests). The strength tests included the SCA specimens mixed with cement at 4%, 6%, 8% and 10% with the curing periods of 7 days, 14 days and 28 days. As a results of cementation by hydration of cement and water, the UCS test results showed that the strength increased with increasing the amount of cement and curing periods. At the certain amount of cement, this study proposed the relationship between the values of unconfined compressive strength ( $q_u$ ) and curing time ( $t$ ). Also, with the cement content at least 6% at the curing age of 7 days, the test results showed that the specimens had strength more than  $7 \text{ kg/cm}^2$  satisfying the requirement for subbase course. However, specimens with the cement content of 4% required the curing period at least 21 days to develop the strength upto  $7 \text{ kg/cm}^2$  for the subbase course. In addition, the results suggested the use of 10% cement content at the curing time of 28 days to satisfy the strength at  $17.5 \text{ kg/cm}^2$  according to the DOH standard for the base course materials. Therefore, the study results recommended that SCA mixed with cement be the materials with values added for civil engineering works with the potential to be used as material substitution for road constructions.*

**KEYWORDS:** Sugar cane bagasse ash, Sugar cane bagasse ash mixed with cement, Soil cement, Soil improvement, Soil cement compaction, Substitution materials for roads

## 1. บทนำ

ดินและหิน จัดเป็นวัสดุพื้นฐานสำคัญในงานก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธา ที่กำลังมีแนวโน้มราคาเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความขาดแคลนแหล่งวัสดุทำให้ดินและหินที่ต้องนำมาใช้ในงานก่อสร้างหาได้ยากขึ้น ในขณะที่ความจำเป็นต้องการใช้วัสดุสำหรับการก่อสร้างต่างๆ เพิ่มมากขึ้น เช่น งานก่อสร้างถนน คลองชลประทาน อาคารบ้านเรือนและตึกสูง เป็นต้น รวมทั้ง ด้วยปัญหาทางด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ส่งผลให้แหล่งวัสดุทั่วไป เช่น การระเบิดภูเขาเพื่อนำหินมาใช้ในการก่อสร้างถนนหนทางนั้น เป็นสิ่งที่กระทำได้ยากขึ้น โดยบางพื้นที่มีการบังคับใช้กฎหมายเพื่อห้ามมิให้มีการระเบิดทำลายภูเขา เป็นต้น ด้วยเหตุผลเหล่านี้ ในปัจจุบันการศึกษาวิจัยเพื่อหาวัสดุทดแทน (Material substitution) นั้น จึงกลายเป็นหัวข้อที่มีความสำคัญยิ่งขึ้น ดังนั้น การศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีแนวคิดในการนำวัสดุเหลือทิ้งพลอยได้ (By-products) กล่าวคือ **เถ้าขานอ้อย (Sugar cane bagasse ash หรือ SCA)** จากกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ที่มีเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยเฉลี่ยปีละประมาณ 5 ถึง 7 แสนตัน (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2558) เพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุทดแทนในงานก่อสร้างถนน โดยทั่วไป เถ้าขานอ้อยมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) กล่าวคือ สามารถนำเถ้าขานอ้อยมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ที่มีแนวโน้มการเชื่อมประสานและการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นได้ในระยะยาว โดยร่วมกับการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์และน้ำ สำหรับ **เถ้าขานอ้อย** ที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ นำมาจากโรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น ซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการใช้ขานอ้อย (Sugar cane waste หรือ Bagasse) เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตน้ำตาล และการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น โดยการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้มีการนำเสนอพฤติกรรมของการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่างและนำเสนอสมการ

ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการคาดคะเนกำลังที่เพิ่มขึ้นของเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง (Cement-mixed SCA) (ทวีศักดิ์และสุนิต, 2563; ชัย, 2555; สุวิมล, 2546; ปรีชา, 2532)

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยจากแหล่งต่าง ๆ และเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 ของวัสดุปอซโซลานิก (ทวีศักดิ์และสุนิต, 2563; ชัย, 2555)

| Chemical<br>Composition                                                            | Chemical<br>Symbols            | Cement<br>Type I | Source of Sugar Cane Bagasse Ash (SCA) |                                      |          |            |             |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|----------|------------|-------------|
|                                                                                    |                                |                  | Pozzolans by<br>ASTM C618              | <b>This study<br/>from Khon Kaen</b> | Lop Buri | Ratchaburi | Nakhonsawan |
| Calcium Oxide                                                                      | CaO                            | 60-67            | -                                      | 2.1                                  | 14.8     | 3.6        | 15.4        |
| Silica                                                                             | SiO <sub>2</sub>               | 17-25            | 70                                     | 89.1                                 | 59.3     | 67.1       | 54.5        |
| (Silicon Dioxide)                                                                  |                                |                  |                                        |                                      |          |            |             |
| Alumina                                                                            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3-8              |                                        | 0.7                                  | 4.5      | 4.5        | 6           |
| (Aluminium Oxide)                                                                  |                                |                  |                                        |                                      |          |            |             |
| Iron Oxide                                                                         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.5              |                                        | 4.6                                  | 3.4      | 2.4        | 3.2         |
| Sulfur Trioxide                                                                    | SO <sub>3</sub>                | 1-3              | 5                                      | 0.1                                  | 1.6      | 1.6        | 0.1         |
| Magnesium Oxide                                                                    | MgO                            | 0.1-5.5          | -                                      | 0.1                                  | 2.7      | 4.3        | 0.1         |
| Potassium Oxide                                                                    | K <sub>2</sub> O               | 0.5-1.3          |                                        | 0.4                                  | 1.8      | 2.1        | 1.4         |
| Sodium Oxide                                                                       | Na <sub>2</sub> O              |                  |                                        |                                      |          |            |             |
| Titanium Oxide                                                                     | TiO <sub>2</sub>               | 0.1-0.4          |                                        | 0.6                                  | -        | -          | -           |
| Phosphorus Oxide                                                                   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.1-0.2          |                                        | 0.1                                  | -        | -          | -           |
| Others                                                                             | -                              | -                | 13                                     | -                                    | -        | -          | -           |
| SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                | 20.5-33.5        | 70                                     | 94.4                                 | 69.2     | 73.9       | 63.7        |

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เถ้าชานอ้อย (SCA) เป็นวัสดุพลอยได้ที่ได้มาหลังจากการใช้ชานอ้อย (Bagasse) เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการอุตสาหกรรม เถ้าชานอ้อยมีลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไป เป็นผงเถ้า (Powder-like materials) สีเทาเข้มถึงสีดำ ขนาดอนุภาคของเถ้าชานอ้อยไม่เป็นก้อนผลึก ขนาดของเถ้าชานอ้อยจัดอยู่ในกลุ่มดินทราย (Sands) และทรายแป้ง (Silt) เป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียว (Non-plastic materials หรือ NP) ส่วนประกอบทางเคมีที่พบโดยทั่วไป แสดงว่า เถ้าชานอ้อย จัดได้ว่าเข้าข่ายเป็นวัสดุปอซโซลานิก (Pozzolanic materials) ตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 โดยส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยจากแหล่งต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1 (ทวีศักดิ์และสุนิต, 2563; ชัย, 2555) ทั้งนี้ ประเทศไทยจัดเป็นประเทศอันดับที่ 3 ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล รองจากประเทศบราซิลและอินเดีย (ชัย, 2555) โดยประเทศไทยผลิตอ้อยได้ทั้งหมดประมาณปีละ 70 ถึง 105 ล้านตัน โดยที่หลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลมีกระเบื้องชานอ้อย (Bagasse) ประมาณ 27 ล้านตัน ที่ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยหลังจากนั้น กลายเป็นเถ้าชานอ้อยเหลือทิ้งปีละประมาณ 5 แสนถึง 7 แสนตัน (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2558) โดยบางส่วนคิดเป็นประมาณ 30% ของเถ้าชานอ้อยถูกนำไปใช้ถมดินเพื่อการเกษตรช่วยลดปัญหาสภาพดินเปรี้ยวหรือลดความเป็นกรดในดิน (ชัย 2555; ปรีชา, 2532) อย่างไรก็ตาม เถ้าชานอ้อยยังคงเหลืออยู่จำนวนมาก ทำให้มีแนวคิดเพื่อเพิ่มมูลค่าของเถ้าชาน

อ้อยเพื่อใช้ในงานก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธา เพื่อการปรับปรุงคุณภาพวัสดุทางวิศวกรรมให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นตามแนวทางการนำมาใช้เป็นวัสดุงานทางตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

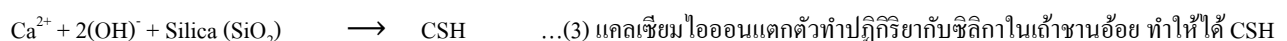
เหตุผลหลักที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เถ้าขานอ้อย เป็นวัสดุที่มีปริมาณมากและหาได้ง่ายจึงเหมาะสมในการนำมาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างทาง ซึ่งเป็นงานทางเป็นงานก่อสร้างที่ต้องใช้วัสดุจำนวนมากในแต่ละครั้ง ศาสตราจารย์ ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล กล่าวว่า เถ้าขานอ้อย “... เป็นเถ้าที่มีออกไซด์ของซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาออกไซด์สูง ซึ่งโดยทั่วไปควรมากกว่าร้อยละ 50 ของทั้งหมด มีความละเอียดสูงหรือสามารถทำให้มีความละเอียดสูงได้ และไม่เป็นผลึกคือสามารถทำปฏิกิริยากับด่าง (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) ได้...” นอกจากนี้ เถ้าขานอ้อย เป็นวัสดุที่คุณสมบัติแตกต่างจากเถ้าวัสดุอื่น เช่น เถ้าจากการเผาขยะมูลฝอย เถ้าจากการเผาเศษไม้ เถ้าจากการเผาเชื้อเพลิงไม้ เถ้าจากการเผาขาง เป็นต้น ซึ่งพบว่าเถ้าเหล่านี้ไม่แสดงการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากการผสมเถ้ากับซีเมนต์ ซึ่งไม่เหมาะสมนำมาใช้ในงานก่อสร้าง ส่วนเถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลเป็นวัสดุที่พลอยได้ (By-product materials) ซึ่งแสดงความเป็นวัสดุปอซโซลานิก (Pozzolan materials) ตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 และพบได้ทั่วไปจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทยที่มีอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล เช่น ราชบุรี นครสวรรค์ ขอนแก่น ลพบุรี เป็นต้น โดยที่คุณสมบัติของเถ้าขานอ้อย ขึ้นอยู่กับอ้อยที่ปลูกในแหล่งนั้นๆ ส่งผลให้เถ้าขานอ้อยจากคนละแหล่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 (ชัย, 2555; ทวีศักดิ์และสุนิต, 2563)

วัสดุปอซโซลานิก (Pozzolan materials) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยผลรวมของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปริมาณมากกว่า 70% (ตามมาตรฐาน ASTM C618) โดยแร่องค์ประกอบหลักทั้ง 2 อย่างนี้ ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (สมการที่ 3 และ 4) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่ได้มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (สมการที่ 1 และ 2) ระหว่างแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) กลายเป็นสารเชื่อมประสาน ประกอบด้วย Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ได้ที่อุณหภูมิปกติ โดยที่ CSH และ CAH ที่ปรากฏขึ้นทำหน้าที่เป็นแร่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานวัสดุ (Cementation materials) ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น วัสดุเหลือทิ้งจำพวกเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมที่จัดได้ว่าเป็นกลุ่มของวัสดุปอซโซลานิกมีหลายอย่าง เช่น เถ้าขานอ้อย เถ้าลอยจากถ่านหิน เถ้าแกลบ ซิลิกาฟุ้ง เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าดินขาวเถ้าจากอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ชัย (2555) ระบุว่า เถ้าบางประเภทไม่มีคุณลักษณะเป็นวัสดุปอซโซลานิก เช่น เถ้าจากการเผาขยะ เถ้าจากการเผาเศษไม้ เถ้าจากการเผาเชื้อเพลิงไม้ เถ้าจากกระดาษและพลาสติก เถ้าจากการเผาขางรถยนต์ พบว่า มีส่วนประกอบหลักเป็นพวกธาตุคาร์บอนและอาจมีการจับตัวเป็นก้อนผลึก ทำให้ไม่เหมาะในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกและการจับตัวกับซีเมนต์ ดังนั้น งานวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้ จะได้กล่าวถึง **เถ้าขานอ้อย** ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานิกที่ใช้ที่สามารถปรับปรุงคุณภาพได้ด้วยการผสมกับซีเมนต์ (Abdulmatin et al., 2018; สุวิมล, 2546; สุวิมลและอาทิมา, 2547)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์และน้ำ สร้างสารเชื่อมประสาน CSH และ CAH



ปฏิกิริยาปอซโซลานิก ระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาในเถ้าขานอ้อย



ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolan reaction) คือ ปฏิกิริยาของแร่องค์ประกอบหลักในเถ้าขานอ้อย ได้แก่ ซิลิกาและอลูมิเนียม มาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ระหว่าง

ซีเมนต์กับน้ำ ดังแสดงในผังสมการที่ (1) ถึง (4) งานวิจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ได้แก่ งานวิจัยของ ศาสตราจารย์ เกียรติคุณ ดร.ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และคณะ จากศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ที่ได้รวบรวมผลการสำรวจตัวอย่างดินซีเมนต์จากถนนในชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง ที่มีการก่อสร้างระหว่างปี พ.ศ. 2510 ถึงปี พ.ศ. 2514 พบว่า ก้อนตัวอย่างทรงกระบอกดินซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานิกที่เก็บมาจากชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง มีกำลังอัดแกนเดียวเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก และกำลังอัดสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานที่อายุการบ่ม 7 วันและ 28 วัน ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยในช่วงแรกที่ช่วงอายุการบ่ม 7 วัน ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นทำให้ได้ซีเมนต์เพสต์ที่เป็นสารเชื่อมประสานประเภท CSH และ CAH หลังจากนั้น ปฏิกิริยาปอซโซลานิก ระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาเกิดขึ้นส่งผลให้ได้สารเชื่อมประสานที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นซึ่งเป็นกลไกในการพัฒนากำลังอัดของวัสดุในอายุการบ่มระยะยาว (Long-term strength development) พร้อมกับปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงอายุการบ่ม 7 วัน ถึง 28 วัน (ธีระชาติ, 2539; ชัย, 2555; Abdulmatin et al., 2018; ทวีศักดิ์และสุนิต, 2563)

### 3. วัสดุและวิธีการดำเนินการศึกษาวิจัย

#### 3.1 วัสดุวิจัย

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าขานอ้อย ซึ่งนำมาจากการเก็บตัวอย่างที่โรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น ดังรูปที่ 1 โดยทั่วไป พบว่า เถ้าขานอ้อยมีสีเทาเข้มถึงสีดำ โดยการสัมผัสเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุผงไม่เกาะตัวกันมีความละเอียด ผลทดสอบ แสดงว่า มีส่วนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ประมาณ 48% โดยส่วนมากเป็นวัสดุประเภททรายแป้ง (Silt หรือ M) อนุภาคของเถ้าขานอ้อยจากการสัมผัสมีความละเอียดสม่ำเสมอ (Uniform grain size) ไม่จับตัวกันเป็นก้อนผลึก เป็นวัสดุที่ดูดซับน้ำได้น้อยและไม่มีความเหนียวเมื่อผสมน้ำ (Non-plastic materials หรือ NP)

#### 3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัด

การเตรียมตัวอย่างเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ โดยการผสมซีเมนต์ 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักแห้ง แล้วทำการศึกษาพฤติกรรมการบดอัดเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ โดยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัด เพื่อนำเสนอผลการพัฒนากำลังอัดของเถ้าขานอ้อยเทียบกับระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง และเพื่อพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุตามหลักเกณฑ์การใช้วัสดุในงานก่อสร้างชั้นทางตามมาตรฐานของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้มีขนาดของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. (4 นิ้ว) และความสูงของตัวอย่าง 20 ซม. (8 นิ้ว) โดยทำการบดอัดเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์โดยวิธี Modified compaction ลงในแบบเหล็ก (Mold) รูปทรงกระบอกขนาด  $\phi 4'' \times h 8''$  ดังรูปที่ 2 โดยใช้ค้อน (Hammer) น้ำหนัก 10 ปอนด์ และระยะยกสูง 1.5 ฟุต ทำการบดอัดเป็นชั้นๆ จำนวน 5 ชั้น และบดอัดชั้นละ 44 ครั้ง หลังจากการบดอัดเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ถูกนำออกจาก mold แล้วถูกนำมาพันโดยรอบด้วยแผ่นพลาสติกและบรรจุไว้ในถุงพลาสติกเพื่อบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกภายในตัวอย่างในการสร้างเชื่อมประสานของมวลดิน เมื่อครบอายุการบ่มแล้ว ตัวอย่างเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ถูกนำมาแช่น้ำไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วจึงนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว

### 3.3 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 การเก็บตัวอย่างเถ้าขาน้อยจากสถานที่กองวัสดุของโรงงานไฟฟ้าน้ำตาละขอนแก่น



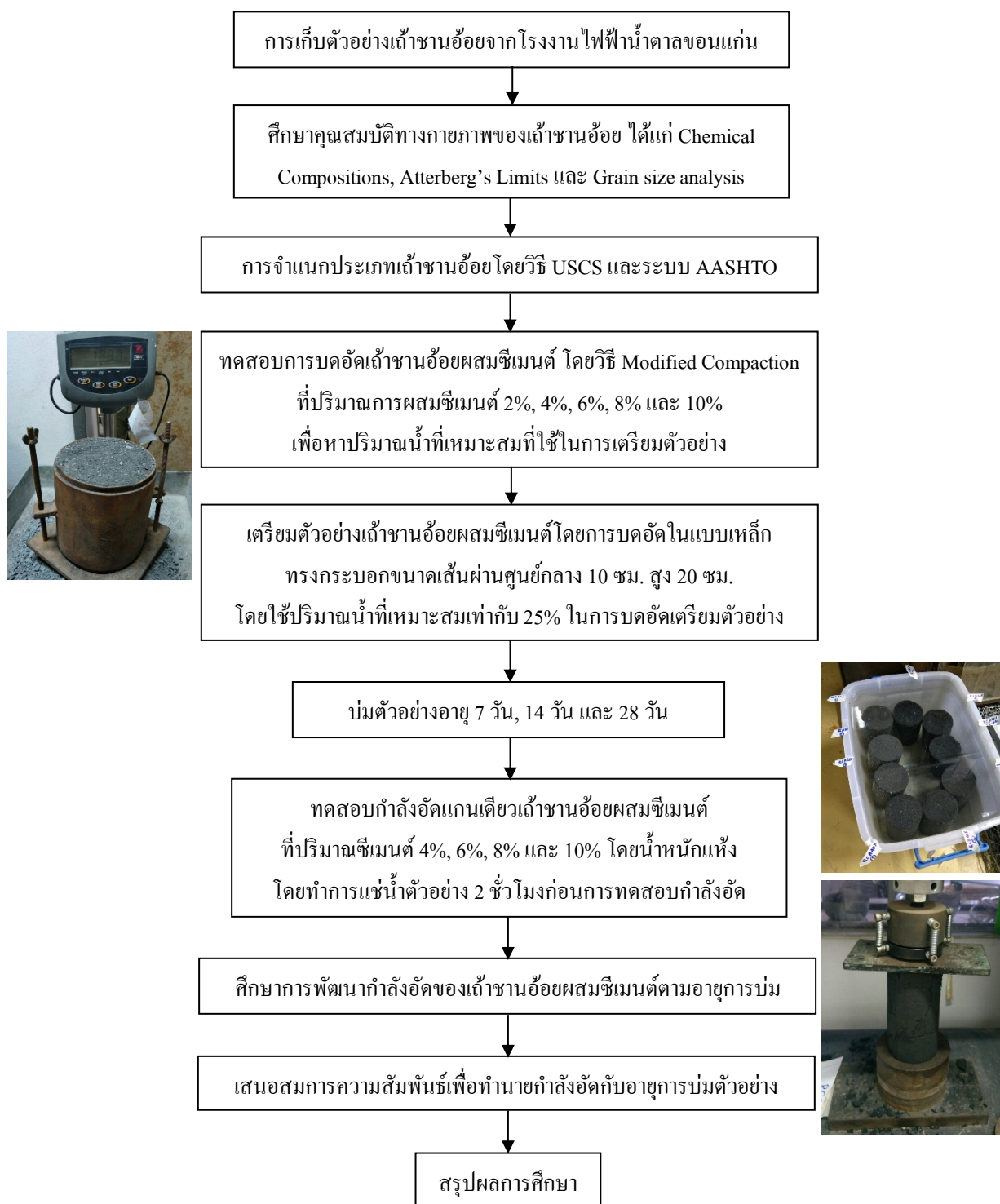
รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างเถ้าขาน้อยผสมซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ความสูง 20 ซม. ที่ใช้ในการทดสอบ

## 4. ผลการศึกษาวิจัยและบทวิจารณ์ผลการทดสอบ

### 4.1 คุณสมบัติของเถ้าขาน้อยและการจำแนกประเภทดิน (Soil Classification of SCA)

ส่วนประกอบทางเคมีของแร่ที่พบในเถ้าขาน้อยที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า เถ้าขาน้อยประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  (89.1%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.7%) และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (4.6%) โดยรวมกันได้เท่ากับ 94.4% ซึ่งจัดได้ว่าเป็นวัสดุปอซโซลานตามข้อเสนอแนะของ ชัย (2555) และเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 ที่กำหนดไว้ว่าวัสดุปอซโซลานเป็นเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีผลรวมของแร่ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ), แร่อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และแร่เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่า 70% โดยกลุ่มแร่โลหะออกไซด์ในวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในกระบวนการของปฏิกิริยาปอซโซลานิกในการสร้างสารเชื่อมประสานทำให้มวลดินจับตัวกันและเพิ่มความแข็งแรงของมวลดิน เถ้าขาน้อยที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แสดงดังรูปที่ 4 นำมาจากโรงงานไฟฟ้าน้ำตาละขอนแก่น มีลักษณะเป็นผงสีดำ เนื้อของเถ้าขาน้อยมีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง เมื่อโดนน้ำไม่จับตัวกันเป็นก้อนผลึก โดยผลทดสอบ Atterberg's limits แสดงว่าเถ้าขาน้อยเป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียว (Non-plastic materials หรือ NP) เถ้าขาน้อยผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ประมาณ 48% โดยระบบ USCS (Unified Soil Classification System) สามารถจำแนกเถ้าขาน้อยได้เป็นดินทรายปนทรายแป้ง หรือ Silty Sand (SM) และจัดอยู่ในกลุ่ม A4 ตามการจำแนกดินโดยวิธี AASHTO (ระบบ

American Association of State Highway and Transportation Officials) เมื่อนำเข้าขานอ้อยมาคลุกผสมกับซีเมนต์ พบว่า จับตัวกันได้ดีเข้าขานอ้อยผสมซีเมนต์มีการรวมตัวเป็นก้อนคัสซิ่ง (Clod-like materials)



รูปที่ 3 ขั้นตอนวิธีการศึกษาวิจัย



รูปที่ 4 ถังช้อนอ้อยที่ใช้ในการศึกษาวิจัย



รูปที่ 5 ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ความสูง 20 ซม. สำหรับทดสอบกำลังอัดของถังช้อนอ้อยผสมซีเมนต์

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการบดอัดถังช้อนอ้อยผสมซีเมนต์

| % Cement                                                    | 2%    | 4%    | 6%    | 8%    | 10%   | Average |
|-------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Optimum water content, $w_{opt}$ (%)                        | 29    | 23    | 27    | 23    | 26    | 25      |
| Maximum dry density, $\gamma_{d, max}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 1,335 | 1,460 | 1,335 | 1,490 | 1,425 | 1,409   |

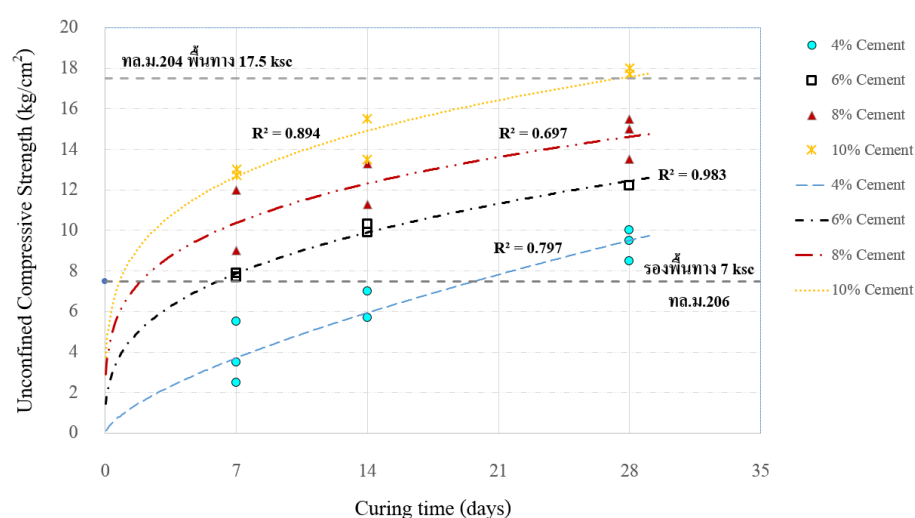
#### 4.2 ผลทดสอบการบดอัดของถังช้อนอ้อยผสมซีเมนต์และการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัด

ผลทดสอบการบดอัดถังช้อนอ้อยผสมซีเมนต์ที่ปริมาณต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุด มีค่าอยู่ในช่วง 1,335 ถึง 1,490 kg/m<sup>3</sup> และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 23% ถึง 29% โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 25% ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่นำไปใช้ในการบดอัดเพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับงานทดสอบกำลังอัดของถังช้อนอ้อยผสมซีเมนต์ ดังรูปที่ 5 แสดงตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ความสูง 20 ซม. ของถังช้อนอ้อยผสมซีเมนต์บดอัด โดยหลังจากการบดอัดแล้ว ตัวอย่างจะถูกถอดออกจากแบบ แล้วทำการพันด้วยแผ่นพลาสติกแบบบางและบรรจุไว้ในถุงพลาสติกเพื่อทำการบ่มตัวอย่างทำให้

ตัวอย่างมีการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่อายุ 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน เมื่อครบอายุการบ่มแล้ว พบว่าตัวอย่างเถาขานอ้อยผสมซีเมนต์มีการเชื่อมประสานดีขึ้นโดยเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาพอซโซลานิกภายในตัวอย่าง หลังจากนั้น นำตัวอย่างเถาขานอ้อยผสมซีเมนต์ไปแช่น้ำไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดโดยการทดสอบ Unconfined Compressive Strength Test

#### 4.3 การพัฒนากำลังอัดและสมการความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับอายุการบ่มของเถาขานอ้อยผสมซีเมนต์

ผลทดสอบแสดงว่ากำลังอัดแกนเดียวยของเถาขานอ้อยผสมซีเมนต์เพิ่มขึ้น ตามปริมาณซีเมนต์และมีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มตัวอย่าง ดังรูปที่ 6 เมื่อใช้ส่วนผสมซีเมนต์ 6%, 8% และ 10% ที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่า กำลังอัดของเถาขานอ้อยผสมซีเมนต์ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงสำหรับใช้ในงานวัสดุชั้นรองพื้นทาง (7 ksc) ในขณะที่ปริมาณซีเมนต์ 4% ต้องการการพัฒนากำลังอัดที่อายุการบ่มประมาณ 21 วันเพื่อให้ได้กำลังไม่ต่ำกว่า 7 ksc เพื่อให้ผ่านเกณฑ์สำหรับงานวัสดุรองพื้นทาง ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.ม. 204 สำหรับกำลังอัดตามมาตรฐานงานวัสดุชั้นทางที่กำหนดไว้ 17.5 ksc (ทล.ม. 206) นั้น ต้องใช้ปริมาณซีเมนต์สูงถึง 10% และการพัฒนากำลังที่อายุการบ่ม 28 วัน เพื่อการปรับปรุงคุณภาพเถาขานอ้อยให้สามารถใช้สำหรับงานวัสดุชั้นพื้นทางได้ อย่างไรก็ตาม ข้อเสนอแนะในการใช้ส่วนผสมซีเมนต์สำหรับงานบดอัดดินซีเมนต์นั้น อยู่ที่ประมาณ 3% ถึง 5% โดยน้ำหนักแห้ง (ทวีศักดิ์และสุนิต, 2563; จิรวัดน์, 2560; ชีระชาติ, 2539) ดังนั้น การใช้ส่วนผสมซีเมนต์ 10% จัดว่าเป็นปริมาณ Admixture ที่ค่อนข้างสูงสำหรับงานบดอัดดินซีเมนต์ จึงควรเลือกใช้การผสมเถาขานอ้อยกับดินประเภทอื่น เช่น ดินลูกรัง หินปลายตะแกรง เป็นต้น ที่ช่วยให้ลดปริมาณการผสมซีเมนต์ลงมาได้อยู่ที่ปริมาณซีเมนต์ 3% ถึง 5% (ทวีศักดิ์และคณะ, 2563; ทวีศักดิ์, 2556) จากรูปที่ 6 แสดงว่ากำลังอัดของเถาขานอ้อยผสมซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มตัวอย่าง โดยการศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์แสดงถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด ( $q_u$ ) ตามระยะเวลาการบ่ม ( $t$ ) อันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาพอซโซลานิกที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มตัวอย่างทำให้มีการสร้างเชื่อมประสานที่ส่งผลให้เถาขานอ้อยผสมซีเมนต์มีกำลังอัดที่สูงขึ้น



$$\begin{aligned} \text{ที่ปริมาณซีเมนต์ 4\%, } q_u (\text{ksc}) &= 0.99 t^{0.678} & \text{ที่ปริมาณซีเมนต์ 6\%, } q_u (\text{ksc}) &= 4.15 t^{0.329} \\ \text{ที่ปริมาณซีเมนต์ 8\%, } q_u (\text{ksc}) &= 6.41 t^{0.248} & \text{ที่ปริมาณซีเมนต์ 10\%, } q_u (\text{ksc}) &= 7.97 t^{0.237} \end{aligned}$$

รูปที่ 6 การพัฒนากำลังอัดตามอายุการบ่มของเถาขานอ้อยผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 4%, 6%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักแห้ง

## 5 สรุปผลการวิจัย

- 5.1 เถ้าขานอ้อย จัดเป็นวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาลที่เหลือทิ้งเป็นปริมาณสูงมาก โดยเฉลี่ยถึงประมาณปีละ 5 แสนตัน ถึง 7 แสนตัน หรืออาจมากกว่านั้น (ขึ้นกับสภาพเศรษฐกิจและการบริโภคน้ำตาลของช่วงปีนั้น) โดยประมาณ 30% ของเถ้าขานอ้อย ถูกนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตร โดยนำไปถมพื้นที่เพื่อลดปัญหาสภาพกรดในดินหรือการลดปัญหาดินเปรี้ยว ส่วนเถ้าขานอ้อยที่ยังคงเหลือปริมาณมาก จัดว่าเป็นปัญหาที่ต้องมีการจัดการอย่างถูกวิธีและมีประโยชน์เพื่อเป็นการเพิ่มคุณค่าของเถ้าขานอ้อย โดยทั่วไป พบว่า ลักษณะทางกายภาพเถ้าขานอ้อยไม่เกาะตัวกันเป็นผลึกและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยที่ใช้ในครั้งนี มีผลรวมของซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ ประมาณ 94.4% แสดงว่า สามารถนำเถ้าขานอ้อยมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานวิศวกรรมโยธาและงานวัสดุบดอัดในการก่อสร้างชั้นทางได้
- 5.2 ผลการศึกษา พบว่า เถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม โดยสามารถแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ( $q_u$  หน่วยเป็น ksc) กับอายุการบ่ม ( $t$  หน่วยเป็น วัน) ที่ส่วนผสมซีเมนต์ระดับต่างๆ ได้แก่
- |                                                     |                                                      |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| ที่ปริมาณซีเมนต์ 4%, $q_u$ (ksc) = $0.99 t^{0.678}$ | ที่ปริมาณซีเมนต์ 6%, $q_u$ (ksc) = $4.15 t^{0.329}$  |
| ที่ปริมาณซีเมนต์ 8%, $q_u$ (ksc) = $6.41 t^{0.248}$ | ที่ปริมาณซีเมนต์ 10%, $q_u$ (ksc) = $7.97 t^{0.237}$ |
- 5.3 ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ แสดงว่า ที่ส่วนผสมซีเมนต์ 4% ถึง 8% มีแนวโน้มกำลังอัดสูงกว่า 7 ksc เป็นไปตามหลักเกณฑ์มาตรฐานสำหรับงานวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase course) และที่ส่วนผสมซีเมนต์ 10% มีแนวโน้มให้กำลังอัดสูงกว่า 17.5 ksc ซึ่งแสดงว่าสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (Base course) ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอบขอบคุณ โรงงานไฟฟ้า น้ำตาลขอนแก่น สำหรับเถ้าขานอ้อยเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณภาคีวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาวิจัยเป็นอย่างดี รวมทั้ง นายสิริวิชญ์ สีหา นายธนนัท ฉายาพงศ์ และนายพรเทพ แข็งขัน ที่ได้มีส่วนช่วยจัดเตรียมงานทดสอบและการบันทึกข้อมูลที่ใช้ในการนำเสนอบทความ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (2558). “รายงานการผลิตอ้อยและน้ำตาลทราย ปี 2558” กองอุตสาหกรรมและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย กรุงเทพมหานคร.
- [2] ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข และ สุนิต ประเวระทั้ง (2563). “ศักยภาพการนำเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์มาใช้ทดแทนวัสดุในงานทาง” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 31 ฉบับที่ 4 เมษายน ถึง ธันวาคม. หน้า 83 ถึง 93.
- [3] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2555). “การใช้เถ้าขานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต” วารสารคอนกรีต (TCA e-magazine). สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย ฉบับที่ 11. กรุงเทพฯ. หน้า 1 ถึง 11, จำนวน 11 หน้า.
- [4] สุวิมล สัจจาณิษฐ์ (2546). “ผลกระทบของเถ้าขานอ้อยในลักษณะวัสดุประสาน” วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 48 เดือน ธันวาคม ถึง มีนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 18-22.
- [5] ปรีชา เกียรติกระจ่าย (2532). “การใช้ประโยชน์จากขานอ้อย” วารสารน้ำตาล 25. 5. เดือน กันยายน ถึง ตุลาคม กรุงเทพฯ. หน้า 13-19.
- [6] Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. and Jaturakpitakul, C. (2018). “An Investigation of Bottom Ash as A Pozzolanic Material” Construction and Building Materials 186 (2018). pp.155–162

- [7] จีรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา (2560). “คุณสมบัติเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์และหินฝุ่น” การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม (RMU GRC 2017). มหาสารคาม. หน้า 542-547.
- [8] ASTM C618 (2015). “Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete” ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [9] ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ (2539). “เอกสารทางวิชาการ การปรับปรุงคุณภาพวัสดุและปัญหาในประเทศไทย เรื่องการ ปรับปรุงคุณภาพดินโดยผสมซีเมนต์” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร
- [10] ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข (2556). “การปรับปรุงหินคลุกด้วยคุณภาพเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 เดือน กรกฎาคม ถึง กันยายน. หน้า 1 ถึง 7.
- [11] ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข, สุนิต ประเวระทั้ง, สิริวิชญ์ สีหา, ธนนันท์ ฉายาพงศ์, พรเทพ แข็งขัน และ กฤต อินทรกุล (2563). “พฤติกรรมการบดอัดและกำลังอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าขานอ้อยและซีเมนต์” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 58, กรุงเทพฯ, 5-7 ก.พ. 2563, หน้า 335 ถึง 343
- [12] สุวิมล สัจจาณิษฐ์ และ อาทิตมา ดวงจันทร์ (2547). “ดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าขานอ้อยและความต้องการน้ำ” เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 2 สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย เชียงใหม่. หน้า 118 ถึง 120.
- [13] ทล.ม.204 (Standard DH.S.No.204) (2556). “มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)” กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรุงเทพมหานคร. 8 หน้า.
- [14] ทล.ม.206 (Standard DH.S.No.206) (2532). “มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase)” กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรุงเทพมหานคร. 13 หน้า.