



ศักยภาพการนำเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์มาใช้ทดแทนวัสดุในงานทาง

POTENTIAL USES OF CEMENT-MIXED SUGAR CANE BAGASSE ASH IN SUBSTITUTION MATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION WORKS

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงษ์สุข^{1*} และสุนิต ประเวระทั่ง²

¹รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

²นิสิตปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

*Corresponding author: fengtjw@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาการนำเถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล มาใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมโยธา โดยการนำเถ้าชานอ้อยมาปรับปรุงคุณภาพ โดยการผสมซีเมนต์แล้วทำการบดอัด โดยวิธี Modified Compaction ตัวอย่างเถ้าชานอ้อยที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นเถ้าชานอ้อยที่ได้มาจากโรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น ผลการศึกษา ผลการทดสอบการบดอัด แสดงว่า เถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ ที่อัตราส่วน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักแห้ง มีพฤติกรรมการบดอัดที่ดีขึ้น ซีเมนต์มีผลให้การทำงานในระหว่างการบดอัดดีขึ้น โดยเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์มีการจับตัวกันเป็นก้อน (Coagulation) ทำให้ง่ายในการบดอัด โดยที่เถ้าชานอ้อยผสมปริมาณซีเมนต์มากขึ้นมีการจับตัวกันเป็นก้อนกลายเป็นวัสดุคล้ายมวลดิน (Cold-like materials) หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, MDD) ของเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ มีค่าระหว่าง 1,300 kg/m³ ถึง 1,500 kg/m³ หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดโดยเฉลี่ยของเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ มีค่ามากกว่า 1,400 kg/m³ ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มในการนำมาใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้างชั้นทางได้ ปริมาณน้ำ 25% ใช้ในการบดอัดเพื่อเตรียมตัวอย่างเพื่อหาคูสมบัตินทางวิศวกรรม ได้แก่ กำลังอัดแกนเดียวและค่า CBR ของเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ เพื่อการศึกษาศักยภาพการนำเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ไปใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้างทาง ผลการทดสอบ พบว่า เถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วน 4% ถึง 10% โดยน้ำหนักแห้ง มีกำลังอัดผ่านเกณฑ์ในการนำมาใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง (Subbase course) และวัสดุพื้นทาง (Base course) ตามมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

คำสำคัญ: เถ้าชานอ้อย, ดินซีเมนต์, การบดอัดดินซีเมนต์, การปรับปรุงคุณภาพดิน, เถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์

ABSTRACTS

This research study investigated the potential use of Sugar Cane Bagasse Ash, which is by-products from sugar industry, for material substitution in civil engineering works. Sugar Cane Bagasse Ash (SCA) used in this study was brought from Khon Kaen Sugar Industry Public Company Limited (KSL PLC.) The Modified Compaction of SCA mixed with cement at ratios of 2%,

Thaweesak Pitikhunpongsuk^{1*} and Sunit Praverathang²

¹Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok Campus

²Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok Campus

4%, 6%, 8% and 10% by dry weight was studied. The results showed that compaction characteristics of cement-mixed sugar cane bagasse ash was visibly obvious. Cement assisted for better ability to compaction of the materials. Cement-mixed SCA was coagulated by cementing materials and became clod-like materials. Experimental results showed the range of Maximum Dry Density (MDD) was between 1300 kg/m^3 and 1500 kg/m^3 . The average MDD more than 1400 kg/m^3 was determined. The value of MDD of the compacted materials indicated the potential use as materials for the road constructions. Compacting water content of 25% was used to prepare specimens for measuring engineering properties, i.e., the values of uniaxial compressive strength and CBR. The experimental results showed that strength of SCA mixed with of cement between 4% and 10% by dry weight was sufficient to the requirement for subbase and base courses of roads according to the Department of Highways (DOH) standard

KEYWORDS: Sugar cane bagasse ash, Soil cement, Compaction of soil cement, Soil improvement,
Sugar cane bagasse ash mixed with cement

1. บทนำ

ถนนหรือทาง (Roads) เป็นโครงสร้างพื้นฐานของประเทศที่สำคัญอย่างยิ่ง ในการนำพาความเจริญทางเศรษฐกิจและความสะดวกสบายจากในเมืองไปยังชนบท และจากชนบทมายังเมือง กล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า ถนนเป็นสิ่งก่อสร้างสำคัญในการเดินทางและการขนส่ง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับวัสดุที่จะนำมาใช้ทดแทนในงานก่อสร้างถนน อันเนื่องมาจากปัจจุบันนี้มีข้อจำกัดมากขึ้นในการระเบิดภูเขาเพื่อนำมาวัสดุมาก่อสร้างทางซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต

ประเทศไทย จัดเป็นผู้ผลิตและส่งออกผลผลิตจากอ้อยและน้ำตาลทรายเป็นอันดับ 1 ในภูมิภาคอาเซียน ส่งผลให้มีขี้เถ้าอ้อย (Sugar cane waste หรือ Bagasse) จากกระบวนการผลิตน้ำตาลเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ขี้เถ้าอ้อยเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตไฟฟ้า โรงงานน้ำตาล เป็นต้น ทำให้มี **เถ้าขี้เถ้าอ้อย (Sugar Cane Bagasse Ash)** กลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งพลอยได้ (By-products materials) เป็นปริมาณมากด้วย (ชัย, 2555; ปรีชา, 2532) คิดเป็นปริมาณเถ้าขี้เถ้าอ้อยปีละมากกว่า 40 ล้านตัน การศึกษาวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของเถ้าขี้เถ้าอ้อยที่เดิมแล้วเป็นวัสดุที่มีดี้อยู่คุณภาพในการใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง มาทำให้กลายเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น เพื่อศึกษาแนวทางการนำมาใช้ทดแทนในงานวัสดุทาง ตามเกณฑ์มาตรฐานวัสดุงานทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขี้เถ้าอ้อย ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ร่วมกับ องค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ Al_2O_3 , CaO , MgO , Fe_2O_3 , K_2O , P_2O_5 และ Na_2O เป็นต้น จากองค์ประกอบทางเคมีและขนาดอนุภาคที่มีละเอียดของเถ้าขี้เถ้าอ้อย แสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ที่นำมาผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ดี (สุวิมล, 2546) อย่างไรก็ตาม จากสภาพทางกายภาพทั่วไปของเถ้าขี้เถ้าอ้อยนั้น ที่มีความเป็นเหนียวต่ำมาก กล่าวคือ มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity) และมีคุณสมบัติทางด้านกำลังต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานในงานวัสดุทาง การศึกษาครั้งนี้ จึงได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้น โดยการ ใช้ซีเมนต์มาผสมกับเถ้าขี้เถ้าอ้อย ตามทฤษฎีการสร้างสารเชื่อมประสานจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ระหว่างซีเมนต์กับน้ำ มีผลให้เถ้าขี้เถ้าอ้อยเกาะกันเป็นก้อนและมีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น รวมทั้ง ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ที่เกิดขึ้นในระยะยาว (Abdulmatin et. al., 2018) ย่อมส่งผลให้ เถ้าขี้เถ้าอ้อยผสมซีเมนต์ มีการสร้างสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น ดังนั้น การศึกษาวิจัยครั้งนี้ หวังว่าจะช่วยบ่งชี้แนวทางการเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าขี้เถ้าอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการจากอุตสาหกรรมได้อีกด้วย (สุวิมล, 2546; ชัย, 2555; จีรวัดน์, 2560)

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เถ้าชานอ้อย (Sugar Cane Bagasse Ash หรือ SCA) คือ วัสดุเหลือทิ้ง (By-products) หลังจากการเผาไหม้ชานอ้อยในกระบวนการอุตสาหกรรม ชานอ้อย 1 ใน 3 ส่วน ถูกนำมาใช้ในการกระบวนการอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ส่วนที่เหลือ ถูกนำไปอัดเป็นแท่งถ่านและเชื้อเพลิงเหลว (ปรีชา, 2532) หลังจากการเผาไหม้ทำให้ได้ “เถ้าชานอ้อย” เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก เถ้าชานอ้อย ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นตัวอย่างเถ้าชานอ้อยจาก โรงงานไฟฟ้าน้ำตาล รูปที่ 1 แสดงการเก็บตัวอย่างเถ้าชานอ้อยโดยผู้วิจัย (ลำดับที่ 2) ที่บริเวณสถานที่จัดเก็บภายในโรงงาน ซึ่งแสดงถึงปริมาณเถ้าชานอ้อยที่เหลือทิ้งปริมาณมาก ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย จากโรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น พบว่า เถ้าชานอ้อย ประกอบด้วย ออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินา รวมมากกว่าร้อยละ 95 ซึ่งเป็นแร่องค์ประกอบนี้ มีความสำคัญในการบ่งชี้ว่าเถ้าชานอ้อย จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 สถานที่เก็บตัวอย่างเถ้าชานอ้อยจากโรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มาตรฐานวัสดุปอซโซลานและซีเมนต์ (ที่มา: ข้อมูลจากโรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น)

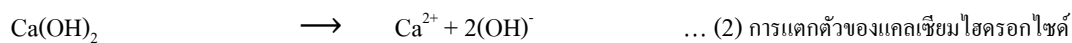
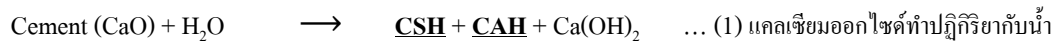
Order	Chemical properties	Chemical symbols	Pozzolanic Materials (ASTM C618), %	Sugar cane bagasse ash (This study), %	Cement, %
1	Calcium Oxide	CaO	-	2.08	60.0-67.0
2	Silicon Dioxide	SiO ₂	70	89.11	17.0-25.0
3	Aluminum Oxide	Al ₂ O ₃		0.67	3.0-8.0
4	Ferric Oxide	Fe ₂ O ₃		4.59	0.5-6.0
5	Sulfur Trioxide	SO ₃	4-5	0.11	1.0-3.0
6	Magnesium Oxide	MgO	-	0.08	0.1-5.5
7	Sodium Oxide	Na ₂ O+K ₂ O	-	0.42	0.5-1.3
8	Titanium Oxide	TiO ₂	-	0.65	0.1-0.4
9	Phosphorus Oxide	P ₂ O ₅	-	0.001	0.1-0.2
10	Others		13.0	-	-

ศาสตราจารย์ ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล เสนอแนะว่า เถ้าชานอ้อย "... เป็นเถ้าที่มีออกไซด์ของซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา ออกไซด์สูง ซึ่งโดยทั่วไปควรมากกว่า ร้อยละ 50 ของทั้งหมด มีความละเอียดสูงหรือสามารถทำให้มีความละเอียดสูงได้ และไม่เป็นผลึกคือสามารถทำปฏิกิริยากับค่า (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) ได้ ..." นอกจากนี้ เถ้าชานอ้อย เป็นวัสดุที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้ได้ ขณะที่เถ้าจากวัสดุอื่น เช่น เถ้าจากการเผาขยะ เถ้าจากการเผาเศษไม้ เถ้าจากการเผาเชื้อเพลิงไม้ เถ้าจากการเผากระดาษ และเถ้าจากการเผาขารถยนต์ เป็นต้น พบว่าเถ้าเหล่านี้ ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในงานก่อสร้าง สำหรับผสมเพื่อทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ (ชัย, 2555)

จิรวัดน์ (2560) ศึกษาเรื่องความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และกำลังอัดของเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์และหินปูน พบว่า การใช้หินปูนร่วมกับเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์มีผลให้ความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้นและการดูดซึมน้ำลดลง โดยทั่วไป ผลการทดสอบกำลังอัดของเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์และหินปูน มีค่ากำลังอัดสูงกว่า 25 ksc ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการใช้เป็นวัสดุอุ้บถึ้อค ประสานสำหรับถนนหรือทางเดินเท้าที่มีน้ำหนักรถทำปริมาณน้อย (Low volume traffic roads)

นอกจากนี้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ดังแสดงในงานวิจัยของ สุวิมล (2546), ชัย (2555) และ Abdulmatin et. al. (2018) เป็นต้น พบว่า เถ้าชานอ้อย ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีทั่วไป แสดงลักษณะความเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) อย่างชัดเจน และจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่เหมาะสมในงานวิศวกรรมโยธา โดยการนำมาใช้ผสมกับซีเมนต์และน้ำเพื่อสร้างสารเชื่อมประสานตามผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) และปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ตามแสดงไว้ในสมการที่ (1) ถึง (4)

Hydration Reaction of Cement and Water



Long-term Pozzolanic Reaction of Silica and Alumina (SCA Reaction)



ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังสมการที่ (1) เป็นปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์และน้ำ ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานจำพวก Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) เป็นต้น สารเชื่อมประสานที่เกิดขึ้นทำหน้าที่ ประสานอนุภาคเถ้าชานอ้อยให้รวมตัวกันกลายเป็นอนุภาคที่มีใหญ่ขึ้น ทำให้การบดอัดง่ายขึ้น จากนั้น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากสมการที่ (1) เกิดการแตกตัวกลายเป็นไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ ตามสมการที่ (2) ในระยะเวลาถัดมา ปฏิกิริยาปอซโซลานิก ตามสมการที่ (3) และ (4) แสดงว่า แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จะจับตัวกับ Silica (SiO_2) และ Alumina (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบในเถ้าชานอ้อย กลายเป็นสารเชื่อมประสาน ได้แก่ CSH และ CAH เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์มีความแข็งแรงมากขึ้น (ธีระชาติ, 2539; ทวีศักดิ์, 2556; สุวิมลและอาทิมา, 2548)

3. วัสดุและวิธีการศึกษาวิจัย

3.1 วัสดุวิจัย

วัสดุหลักที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ เถ้าชานอ้อยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยที่เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมโรงงานไฟฟ้า น้ำตาลขอนแก่น มีลักษณะเป็นเถ้าสีเทาดำ มีความละเอียดสูงและมีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ

(Uniform grain size) การเตรียมตัวอย่างเก้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ จะทำการศึกษาที่อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักแห้ง ขั้นตอนแรก เป็นการศึกษาพฤติกรรมการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) ของเก้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังอัด เพื่อพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุตามเกณฑ์ของวัสดุที่ใช้ในงานทาง ตามมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แสดงดังรูปที่ 2

4. ผลการศึกษาวิจัยและบทวิจารณ์ผลการทดสอบ

4.1 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Compositions of SCA)

องค์ประกอบทางเคมีของเก้าชานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงในตารางที่ 1 พบว่า เก้าชานอ้อยมีองค์ประกอบของ SiO_2 (89.11%), Al_2O_3 (0.67%) และ Fe_2O_3 (4.59%) รวมกันเท่ากับ 94.37% ซึ่งจัดว่ามีแนวโน้มเป็นวัสดุปอซโซลานตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 ที่กำหนดไว้ว่าวัสดุจำพวกเถ้าลอย (Fly ash) และเถ้าหนัก (Bottom ash) ที่มีองค์ประกอบของ SiO_2 (89.11%), Al_2O_3 (0.67%) และ Fe_2O_3 (4.59%) รวมมากกว่า 70% จัดเป็นองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ซึ่งในการแทนที่วัสดุมวลรวม และทำปฏิกิริยาปอซโซลันิก (Pozzolanic reaction) ตามสมการที่ (3) และ (4) ในการสร้างสารเชื่อมประสานในมวลดินที่ใช้เพิ่มความแข็งแรงได้

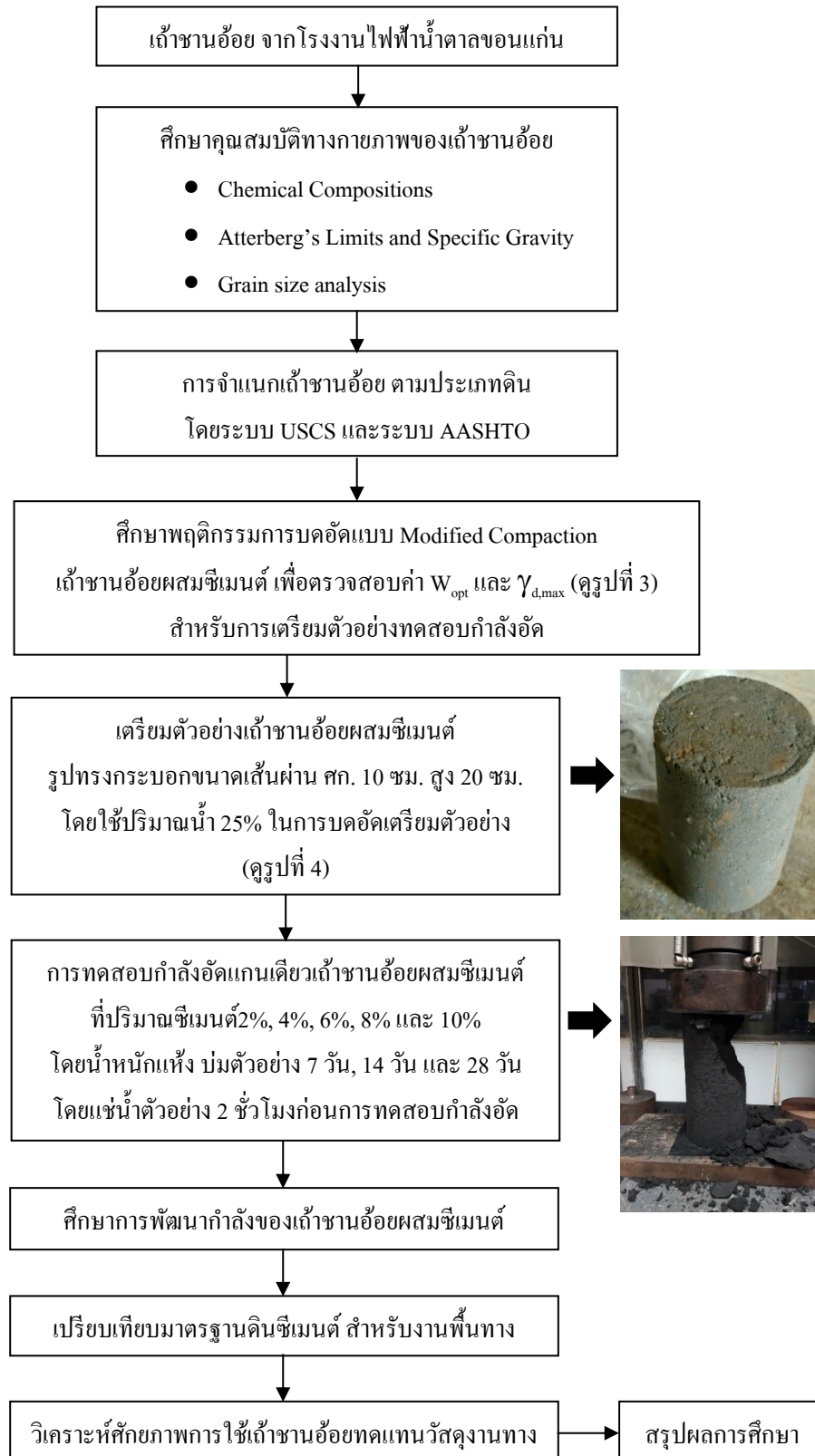
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเก้าชานอ้อย (Physical Properties of SCA)

เก้าชานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นตัวอย่างที่นำมาจากโรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น จากการสังเกตเก้าชานอ้อยมีลักษณะเป็นผงดินสีดำ ดังรูปที่ 3 (ซ้าย) จากคุณสมบัติทางกายภาพของเก้าชานอ้อย ดังตารางที่ 1 ได้แก่ ค่าดัชนี Atterberg's Limits และผลการทดสอบการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน เป็นต้น พบว่า เก้าชานอ้อยมีส่วนละเอียด 48.5% ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และไม่มีส่วนผสมเหนียว (Non-plastic materials) สามารถจำแนกเป็นตามประเภทดิน ได้เป็น ดินทรายปนทรายแป้ง หรือ Silty Sand (SM) ตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) และเก้าชานอ้อยจัดอยู่ในกลุ่ม A4 ตามระบบ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) เมื่อนำเก้าชานอ้อยมาคลุกผสมกับซีเมนต์ ดังรูปที่ 3 (ขวา) จะมีการรวมตัวเป็นก้อนทำให้การบดอัดเก้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ทำได้ดีขึ้น

4.3 พฤติกรรมการบดอัดเก้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ (Compaction Characteristics of Cement-mixed SCA)

พฤติกรรมการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) ของเก้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ แสดงดังรูปที่ 4 ผลการทดสอบ แสดงว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (W_{opt}) ที่ใช้ในการบดอัด มีค่าอยู่ในช่วง 19% ถึง 29% และความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) ของเก้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ มีค่าระหว่าง 1330 - 1520 kg/m^3 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัด มีค่าเท่ากับ 25% ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่นำไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับงานทดสอบกำลังอัด ดังจะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.4

นอกจากนี้ สิ่งที่พบในระหว่างการผสมเก้าชานอ้อยกับซีเมนต์ คือ เมื่อผสมปริมาณซีเมนต์มากขึ้น ส่งผลให้เก้าชานอ้อยจับตัวกันเป็นก้อนดิน (Clod-like materials) มากขึ้น ทำให้การบดอัดทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจาก ซีเมนต์ที่ดูดซับน้ำและทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในกระบวนการสร้างเชื่อมประสานขั้นต้น ทำให้สารเชื่อมประสาน จำพวก Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ประสานตัวกับอนุภาคของเก้าชานอ้อยกลายเป็นก้อนดินที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุในงานบดอัด ซึ่งเป็นการปรับปรุงทางด้านกายภาพของเก้าชานอ้อยที่เป็นผงเถ้าให้กลายเป็นก้อนมวลดิน



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทดสอบ



รูปที่ 3 เถ้าขานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ (ซ้าย) และเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับงานบดอัด (ขวา)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าขานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

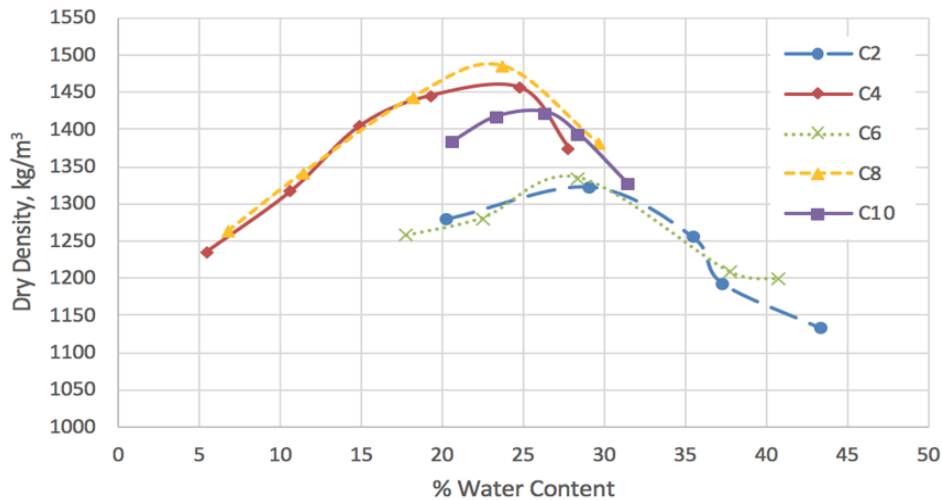
Physical Properties of SCA	Results
Sampling moisture content	9.3 %
Liquid limit (LL)	NP
Plastic limit (PL)	NP
Plasticity index (PI)	NP
Atterberg's soil content (Soil passed sieve no.40)	95.14%
Fine content (Soil passed sieve no.200)	48.5%
Specific gravity (G_s)	2.15
USCS classification	SM
AASHTO classification	A4

4.4 การเตรียมตัวอย่างเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์สำหรับการทดสอบกำลังอัด

การเตรียมตัวอย่างเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ในงานวิจัยครั้งนี้ ใช้วิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) ใช้พลังงานในการบดอัดประมาณ 56,300 ft-lb/ft³ ในแบบ Mold รูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. (4 นิ้ว) ความสูง 20 ซม. (8 นิ้ว) ดังรูปที่ 5 (ซ้าย) โดยทำการบดอัดเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ ด้วยค้อน (Hammer) น้ำหนัก 10 ปอนด์ ยกตกด้วยความสูง 1.5 ฟุต ทำการบดอัด 5 ชั้น ชั้นละ 44 ครั้ง

ปัญหาการเตรียมตัวอย่างในครั้งแรกพบว่า หลังการบดอัดและนำตัวอย่างออกมาจาก Mold พบว่า ตัวอย่างเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ ติดกับผนังของ Mold ดังรูปที่ 5 (ขวา) ทำให้ถอดตัวอย่างออกมาจาก Mold ไม่ได้ จึงได้แก้ปัญหาโดยการใช้แผ่นพลาสติกใสพันไว้ที่ผนังของ Mold ก่อนการบดอัดเตรียมตัวอย่าง ทำให้ถอดตัวอย่างออกจาก Mold ได้ จากผลการศึกษาพฤติกรรมการบดอัดเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ ดังตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำที่เหมาะสมเท่ากับ 25% ใช้ในการเตรียมตัวอย่างการเตรียมตัวอย่างเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ ดังรูปที่ 6 หลังจากการบดอัดและถอดตัวอย่างออกจาก Mold แล้ว ตัวอย่างเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ ถูกพันรอบด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อทำการบ่มตัวอย่าง โดยทำการบ่มไว้ในห้องเก็บตัวอย่าง เป็นเวลา 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน เพื่อให้มีการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก สร้างสารเชื่อมประสานภายในตัวอย่าง ทำให้อนุภาคเถ้าขานอ้อยรวมตัวกันและมี

กำลังเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม หลังจากครบอายุการบ่มแล้ว ตัวอย่างเก้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ถูกนำมาแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว



รูปที่ 4 พฤติกรรมการบดอัดเก้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการบดอัดของเก้าชานอ้อยผสมซีเมนต์

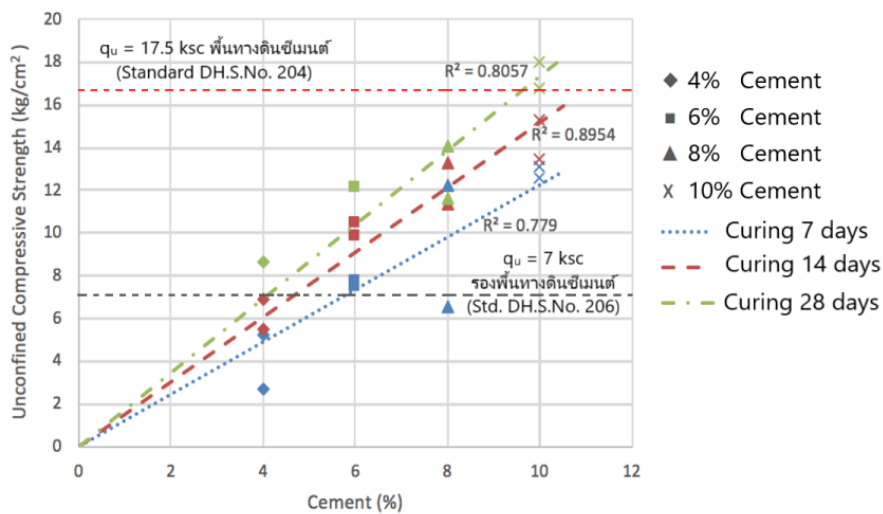
% Cement	Optimum Water Content, W_{opt} (%)	$\gamma_{d,max}$ (kg/m ³)
0	19	1520
2	29	1330
4	23	1460
6	27	1335
8	23	1490
10	26	1425
ค่าเฉลี่ย	25	1427



รูปที่ 5 แบบเหล็ก (Mold) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ความสูง 20 ซม. (ซ้าย) และปัญหาตัวอย่างดินผนังแบบหลังการบดอัด (ขวา)



รูปที่ 6 ตัวอย่างเก้าขานอ้อยผสมซีเมนต์บดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ความสูง 20 ซม. ที่บ่มไว้ในห้องเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวของเก้าขานอ้อยผสมซีเมนต์กับปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่ม

4.5 กำลังอัดของเก้าขานอ้อยผสมซีเมนต์

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของเก้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ พบว่า กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น เมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 7 และกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ตามมาตรฐานที่ ทล.ม. 204 กำหนดไว้ว่า งานพื้นทางดินซีเมนต์ ควรมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 17.5 ksc และ มาตรฐานที่ ทล.ม.206 กำหนดว่า วัสดุรองพื้นทางดินซีเมนต์ ควรมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 7 ksc ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้ในครั้งนี้ว่า เก้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ ที่มีส่วนผสมของซีเมนต์ 6% โดยน้ำหนักแห้ง อายุการบ่ม 7 วัน ได้ค่ากำลังอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ และที่มีส่วนผสมของซีเมนต์ 4% มีแนวโน้มผ่านเกณฑ์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

การใช้เก้าขานอ้อยผสมซีเมนต์สำหรับงานวัสดุพื้นทางดินซีเมนต์นั้น ผลการทดสอบ แสดงว่า การใช้ส่วนผสมซีเมนต์ 10% ที่อายุการบ่ม 28 วัน จึงผ่านเกณฑ์กำลังอัดมาตรฐานเท่ากับ 17.5 ksc (ทล.ม.204) ซึ่งการใช้ซีเมนต์ 10% เป็นส่วนผสมในการปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับงานก่อสร้างทางนั้น จัดว่าเป็นปริมาณ Additives ที่สูงมากในงานปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ซึ่งได้มีแนวทางการใช้ซีเมนต์เป็นส่วนผสมที่ปริมาณ 3-5% ตามข้อเสนอแนะจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังศึกษาได้จากบทความวิจัยของ ธีระชาติ (2539) จีรวัดน์ (2560) เป็นต้น กล่าวคือ การใช้ปริมาณซีเมนต์สูงถึง 10% จึงไม่เหมาะสมสำหรับงานวิศวกรรมทางด้านนี้ ดังนั้น การใช้เก้าขานอ้อยผสมซีเมนต์สำหรับงานพื้นทางดินซีเมนต์นั้น จึงควรใช้เก้าขานอ้อยผสมร่วมกับดินประเภทอื่น เช่น หินปลายตะแกรง ดิน

ลูกรัง และหินฝุ่น เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุเหลือทิ้งหลังจากกระบวนการโม่หิน ดังพบได้ในงานวิจัย เช่น ทวีศักดิ์ (2556) เป็นต้น ซึ่งเป็นการนำหินปลายตะแกรงมาทำการปรับปรุงคุณสมบัติให้สามารถนำมาใช้ในทดแทนเป็นวัสดุในงานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

4.6 ศักยภาพการใช้เถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์เป็นวัสดุงานทาง

เถ้าขานอ้อยจัดเป็นวัสดุปอชโซลานที่สามารถทำปฏิกิริยากับซีเมนต์และน้ำ กลายเป็นสารเชื่อมประสานจำพวก Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ทำให้อนุภาคเถ้าขานอ้อยจับตัวกันกลายเป็นมวลดิน ที่มีพฤติกรรมการบดอัดดีขึ้นและกำลังเพิ่มขึ้นได้ เถ้าขานอ้อยมีแนวโน้มนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุทดแทนดินได้ในงานก่อสร้างทางได้ จากผลการศึกษาวิจัย แสดงว่า เถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในงานวิศวกรรมโยธาได้ พฤติกรรมการบดอัดและกำลังอัดของเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ 4% ถึง 10% ที่ ผ่านเกณฑ์วัสดุรองพื้นทาง (Subbase course) และวัสดุพื้นทาง (Base course) อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบ พบว่า ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ยังเป็นปริมาณที่ค่อนข้างสูง จึงควรนำเถ้าขานอ้อยมาใช้ผสมร่วมกับดินทั่วไป เช่น ดินลูกรัง หินปลายตะแกรง หินฝุ่น เป็นต้น เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้ดินเหล่านี้ลงได้ ซึ่งช่วยลดปัญหาการขาดแคลนวัสดุงานทางได้

5. สรุปผลการวิจัย

- 5.1 เถ้าขานอ้อยที่นำมาทำการศึกษานี้ จัดกลุ่มดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ได้เป็นดินทรายผสมทรายแป้งที่ไม่มีควมเหนียว (Silty Sand) หรือ SM และตามระบบ AASHTO จำแนกได้เป็นดินกลุ่ม A4 ค่าความถ่วงจำเพาะ Specific gravity (G_s) ประมาณ 2.15 เถ้าขานอ้อยไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก (Non-Plastic) และมีค่าความชื้นจากสถานที่เก็บตัวอย่าง เท่ากับ 9.30 %
- 5.2 เถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์บดอัดแบบ Modified Compaction ที่ส่วนผสมซีเมนต์ 2% ถึง 10 % โดยน้ำหนักแห้ง มีค่า Maximum Dry Density (MDD) เฉลี่ยเท่ากับ $1,400 \text{ kg/m}^3$ และค่า Optimum Water Content เฉลี่ยเท่ากับ 25% ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด เตรียมตัวอย่างสำหรับสำหรับทดสอบกำลังอัด (ค่า %Compaction ของตัวอย่างกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 95% MDD หรือ $0.95 \times 1,400 = 1,330 \text{ kg/m}^3$ ใช้เป็นเกณฑ์ควบคุมคุณภาพการบดอัดในการเตรียมตัวอย่าง)
- 5.3 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength หรือ UCS) แสดงว่า เถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ 4% ถึง 6% มีกำลังอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับวัสดุชั้นรองพื้น (Subbase course) และเถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ 10% มีแนวโน้มนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้น (Base course) ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานที่ถูกกำหนดไว้
- 5.4 ผลการศึกษาวิจัย แสดงว่า การปรับปรุงเถ้าขานอ้อยโดยการผสมด้วยซีเมนต์มีศักยภาพและแนวโน้มนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างชั้นทางได้ อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าขานอ้อยผสมซีเมนต์ สำหรับใช้ในงานทาง ยังต้องใช้ปริมาณซีเมนต์ค่อนข้างมาก ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรใช้เถ้าขานอ้อยร่วมกับดินทั่วไป เช่น ดินลูกรัง หินคลุกปลายตะแกรง เป็นต้น เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งมีราคาสูง ซึ่งงานดินซีเมนต์ โดยทั่วไปควรใช้ปริมาณซีเมนต์เป็นส่วนผสม ประมาณ 2% ถึง 4% ดังนั้น การนำเถ้าขานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุที่พลอยได้ (By-product materials) มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุทดแทนดิน มีแนวโน้มทำให้ลดปริมาณการใช้ดินซึ่งหาได้ยากขึ้นลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณ โรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น สำหรับเจ้าชานอ้อยเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการ ศึกษาวิจัย นิสิตในรายวิชา 01203499 ครงงานวิศวกรรมโยธา ประจำปีการศึกษา 2561 ได้แก่ นายวิศรุต มุ่งประสิทธิ์ชัย นายธีร ภัทร เจริญฉัตรชัย และนายภูพิรชัย ศักดิ์จิรพาพงษ์ ซึ่งนิสิตทั้ง 3 คน เป็นผู้เตรียมตัวอย่างและทำการทดสอบตัวอย่างเจ้าชานอ้อย ผสมซีเมนต์ รวมถึงการช่วยจัดเตรียมผลการทดสอบที่น่าเสนอในบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. “การใช้เจ้าชานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต” *วารสารคอนกรีต (TCA e-magazine)*. สมาคมคอนกรีต แห่งประเทศไทย.2555, ฉบับที่ 11. กรุงเทพฯ. หน้า 1 ถึง 11
- [2] ปรีชา เกียรติกระจาย. “การใช้ประโยชน์จากชานอ้อย” *วารสารน้ำตาล* 25. 2532, 5. เดือน ก.ย. - ต.ค. กรุงเทพฯ. หน้า 13-19.
- [3] Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. and Jaturakpitakkul, C. (2018). An Investigation of Bottom Ash as A Pozzolan Material, *Construction and Building Materials* 186, 2018. pp.155–162.
- [4] สุวิมล สัจจวานิชย์. “ผลกระทบของเจ้าชานอ้อยในลักษณะวัสดุประสาน” *วิศวกรรมสาร มก.* ฉบับที่ 48 เดือน ธ.ค.-มี.ค. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.2546, หน้า 18-22.
- [5] จิรวัดน์ วิมุติสุขวิริยา, คุณสมบัติเจ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์และหินปูน, *การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม (RMU GRC 2017)*. มหาสารคาม. 2560. หน้า 542-547.
- [6] ASTM C618. *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [7] ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์. *เอกสารทางวิชาการ การปรับปรุงคุณภาพวัสดุและปัญหาในประเทศไทย เรื่องการปรับปรุงคุณภาพดินโดยผสมซีเมนต์*, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร, 2539.
- [8] ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข. “การปรับปรุงหินคลุกด้วยคุณภาพเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง” *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2556, ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 เดือน กรกฎาคม ถึง กันยายน. หน้า 1 ถึง 7.
- [9] สุวิมล สัจจวานิชย์ และ อาทิตมา ดวงจันทร์. ดัชนีความเป็นปอซโซลานของเจ้าชานอ้อยและความต้องการน้ำ, *เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีต แห่งชาติครั้งที่ 2* สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย เชียงใหม่. 2548, หน้า 118 ถึง 120.
- [10] ทล.ม.204 (Standard DH.S.No.204). *มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)*, กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรุงเทพมหานคร, 2556.
- [11] ทล.ม.206 (Standard DH.S.No.206). *มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase)*, กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรุงเทพมหานคร. 2532.

