

การศึกษาการใช้คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยแทนวัสดุชั้นทางเพื่อเพิ่ม
เสถียรภาพลาดดิน : กรณีศึกษาซอยปู่เล็งเจริญสุข

Study on Using Cellular Lightweight Concrete Mixed with Bagasse Ash
Replacing Pavement to Enhance Slope Stability: A Case Study of
Soi Pu Seng Charoensuk

พัฒนศักดิ์ ชัยพรรณา¹, อรรถพล มาลัย^{2*} และ ประชุม คำพุ่ม³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.พังโคน จ.สกลนคร

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี

*Corresponding Author E-mail: attapole.mal@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ¹

การวิจัยเพื่อศึกษาถนนแทนที่ชั้นทางด้วยคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อย ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ถูกแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยในสัดส่วนร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนักของซีเมนต์และ ศึกษาส่วนผสม วัสดุประสาน ต่อ ทราบ ในอัตรา 1:0.5, 1:1, 1:1.5 และ 1:2 จากนั้นหล่อมอร์ตาร์เพื่อ ทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดและคัดเลือกสัดส่วนเหมาะสมในการขึ้นรูปคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสโดย พิจารณาจากกำลังต้านทานแรงอัดและการเตรียมวัสดุ ในการวิจัยได้จำลองเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพถนน แปลงทดลองความสูง 1.5 เมตร การจำลองจะที่แทนที่ชั้นทางด้วยคอนกรีตมวลเบาดังกล่าวและจำลองกรณี การสูญเสียแรงดันน้ำข้างถนนฉับพลันทั้งแบบมีและไม่มีการสัณฐานบนถนนขนาด 6.0 กิโลเมตร การ ประมวลผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองซอฟต์แวร์และแบบจำลองมอร์-คูลอมป์การวิจัยพบว่า แปลงทดลองมีเสถียรภาพลาดดินต่ำหากสูญเสีย น้ำด้านข้างอย่างรวดเร็วและมีน้ำหนักกดทับจากการสัณฐาน แต่เมื่อแทนที่ดินบดอัดด้วยคอนกรีตมวลเบาจะเพิ่มเสถียรภาพลาดดินโดยมีอัตราส่วนความปลอดภัย มากกว่า 1.3 และเป็นไปตามเกณฑ์ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้

คำสำคัญ: ไฟไนต์เอลิเมนต์, เสถียรภาพลาดดิน, คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส, เถ้าขานอ้อย

Abstract

The study focuses on replacing road pavement with a cellular lightweight concrete mixing bagasse ash. The replacement of Portland Cement Type I with bagasse ash in amounts ranging from 0 to 40 percent by cement weight. Additionally, it studies various binders to sand mixtures at ratios of 1:0.5, 1:1, 1:1.5, and 1:2. The mortar was cast to test its compressive strength and to determine the appropriate proportions for forming lightweight cellular concrete based on the compressive strength and material preparation. The study involved in a simulation to assess the stability of an experimental road with a height of 1.5 meters, where the pavement material was substituted with lightweight concrete. The simulation observed the impact of a sudden loss of roadside water pressure, both with and without traffic at a pressure of 6.0 kPa. The study exposed that the test site was less stable when the soil rapidly lost water from the sides and was subjected to traffic pressure. The substitution of compacted soil with lightweight concrete resulted in an increase in stability to over 1.3 according to the Thailand engineering standards.

Keyword: Finite Element, Slope Stability, Cellular Lightweight Concrete, Bagasse Ash

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกน้ำตาลอันดับ 3 ของโลก เถ้าขานอ้อยกลายเป็นผลพลอยได้ที่สำคัญของอุตสาหกรรมน้ำตาล ขานอ้อยซึ่งเป็นเส้นใยที่เหลือจากการบดก้านอ้อยเพื่อสกัดน้ำอ้อย ส่วนใหญ่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนในโรงงานน้ำตาล การเผาไหม้ของขานอ้อยในหม้อไอน้ำทำให้เกิดเถ้าขานอ้อยซึ่งในอดีตถือเป็นของเสีย อย่างไรก็ตามขานอ้อยถือเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนในประเทศไทย โดยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าการผลิตไฟฟ้าแบบเดิม (Janghathaikul and Gheewala, 2006) การใช้เถ้าขานอ้อยในประเทศไทยกำลังได้รับความสนใจ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งพบว่าเป็นวัสดุเสริมซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต คุณสมบัติปอซโซลานของเถ้าขานอ้อยเนื่องจากมีปริมาณซิลิกาสูง สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีต ในขณะเดียวกันก็ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้งาน (Andreão et al., 2019) and (Brindhalakshmi et al., 2019)

คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ (CLC) เป็นคอนกรีตมวลเบาประเภทหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างมานานหลายทศวรรษ CLC ผลิตขึ้นโดยการใส่ฟองอากาศเข้าไปในส่วนผสมคอนกรีต โดยทั่วไปจะผ่านการเติมสารทำให้เกิดฟอง ซึ่งกระบวนการนี้ส่งผลให้วัสดุมีความหนาแน่นต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับ

คอนกรีตแบบปกติ Zareei et al., (2018) พบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยได้มากถึงร้อยละ 15 และเถ้าขานอ้อยสามารถปรับปรุงด้านความแข็งแรงและความทนทานต่อแรงกระแทกได้ถึงร้อยละ 5

การวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดเอียงของดินโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ทำให้เข้าใจพฤติกรรมละเอียดยิ่งขึ้นเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนภายในโครงสร้างของดิน FEM สามารถจำลองพฤติกรรมของดินโดยละเอียดภายใต้สภาวะต่าง ๆ โดยคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความหลากหลายของวัสดุ ความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต อิทธิพลของแรงดันน้ำภายในมวลดิน เป็นต้น วิธีการคำนวณนี้จะแบ่งความชันออกเป็นโครงตาข่ายขององค์ประกอบและโหนด ทำให้สามารถคำนวณความเค้นและความเครียดทั่วทั้งความชันภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักที่แตกต่างกัน Farah et al., (2011) เปรียบเทียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับวิธีขีดจำกัดสมดุล (Limit Equilibrium) พบว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีประสิทธิภาพและแม่นยำมากกว่า การใช้ FEM ในการวิเคราะห์ความเสถียรของทางลาดมีประโยชน์อย่างยิ่งในการออกแบบและการประเมินโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ เช่น เขื่อน เขื่อนกั้นน้ำ ถนน เป็นต้น ช่วยให้วิศวกรออกแบบมาตรการรักษาเสถียรภาพที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินยังบริหารความเสี่ยงและเพิ่มความปลอดภัยได้ด้วย (Dawson et al., 2000)

การวิจัยครั้งนี้มีเป้าประสงค์ศึกษาเสถียรภาพลาดดินของแปลงทดลองในพื้นที่ถนนซอยปู่เส็งเจริญสุข ตำบลศาลากลาง อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี ซึ่งเป็นถนนเลียบริมคลองสร้างแล้วเสร็จและเปิดใช้งานเมื่อปี พ.ศ.2540 เกิดปัญหาการทรุดตัวขอบถนนตามยาว การวิจัยจะใช้คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยซึ่งมีน้ำหนักเบา แทนที่ชั้นทางและวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในสภาวะสูญเสียแรงพยุ้งน้ำด้านข้างลาดดินฉับพลัน

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาเถ้าขานอ้อยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 0-40 ของซีเมนต์โดยน้ำหนัก และศึกษาส่วนผสม วัสดุประสาน ต่อ ทราบ ในอัตรา 1:0.5, 1:1, 1:1.5 และ 1:2 จากนั้นหล่อขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์และทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเพื่อคัดเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปมวลเบาและจำลองเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพถนนแทนที่ด้วยคอนกรีตมวลเบาให้มีอัตราความปลอดภัยมากกว่า 1.3 ทั้งในกรณีมีและไม่มีจราจร โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าขานอ้อย

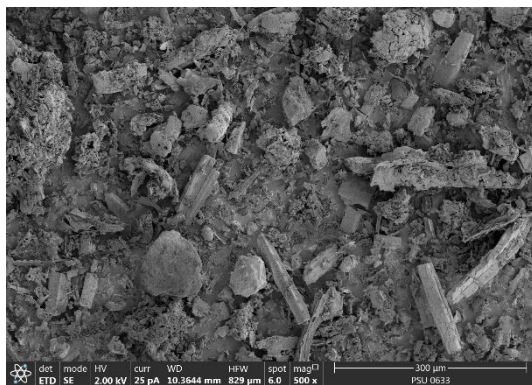
เถ้าขานอ้อยที่ใช้ในโครงการนำมาจากโรงงานผลิตน้ำตาลพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี มีสีเทาปนขาว บางครั้งหรือมีสีดำปนกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของขานอ้อยที่นำมาใช้ วิธีเผาและอุณหภูมิในการเผา เช่น ขานอ้อยที่มีสีเข้มหรือมีส่วนประกอบของน้ำตาลผสมอยู่เมื่อนำมาเผาอาจจะมีสีดำปนเทา เป็นต้น ความละเอียดเถ้าขานอ้อยจะมีความละเอียดน้อยเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.02 มิลลิเมตร ความยาว 1.40 มิลลิเมตร อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 85 ต่อ 1 ขนาดและรูปร่างของเถ้าขานอ้อยขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมน้ำตาลที่ทำ

ให้ขนาดต่างกันจึงทำให้ขนาดและรูปร่างอาจไม่มีความสม่ำเสมอ ถ้าขนาดในการวิจัยครั้งนี้จะบดจนมีขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 ก่อนนำมาผสมเป็นวัสดุมวลเบา รูปที่ 1 (a) และ (b) แสดงรูปร่าง ลักษณะ ถ้าขนาดที่ใช้ในการวิจัย

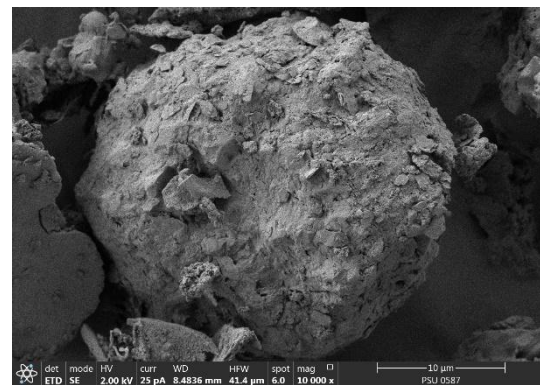
ตารางที่ 1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุประสาน

สมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ถ้าขนาด หลังปรับปรุงขนาด
ร้อยละค้ำตะแกรงเบอร์ 325	N/A	0-3
ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.30
ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (ตร.ซม./กรัม)	3,400	11,900

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับถ้าขนาด อ้อยหลังปรับปรุงขนาด พบว่าถ้าขนาดอ้อยมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า เมื่อผสมวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงทำให้วัสดุมีน้ำหนักเบาลงได้ และถ้าขนาดอ้อยมีความสามารถในการซึมผ่านของอากาศมากกว่าจึงเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดี



(a) ถ้าขนาดอ้อยกำลังขยาย 500 เท่า



(b) ถ้าขนาดอ้อยกำลังขยาย 10,000 เท่า

รูปที่ 1 ภาพขยายถ้าขนาดอ้อยในโครงการ (a) กำลังขยาย 500 เท่า (b) กำลังขยาย 10,000 เท่า

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยในประเทศไทยเปรียบเทียบกับเถ้าขานอ้อยในโครงการ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	สำเร็จ รักซ้อน และคณะ (2551)	Rukzon and Chindaprasirt (2012)	เถ้าขานอ้อย ในโครงการ
SiO ₂	64.7	65	66.8
CaO	8.5	3.9	2.9
Al ₂ O ₃	4.8	4.8	6.8
Fe ₂ O ₃	3.2	0.9	2.97
MgO	0.01	na	1.0
K ₂ O	2.0	2.0	3.3
SO ₃	0.9	0.9	0.9
LOI	17.5	10.5	12.8
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	72.7	70.7	76.57

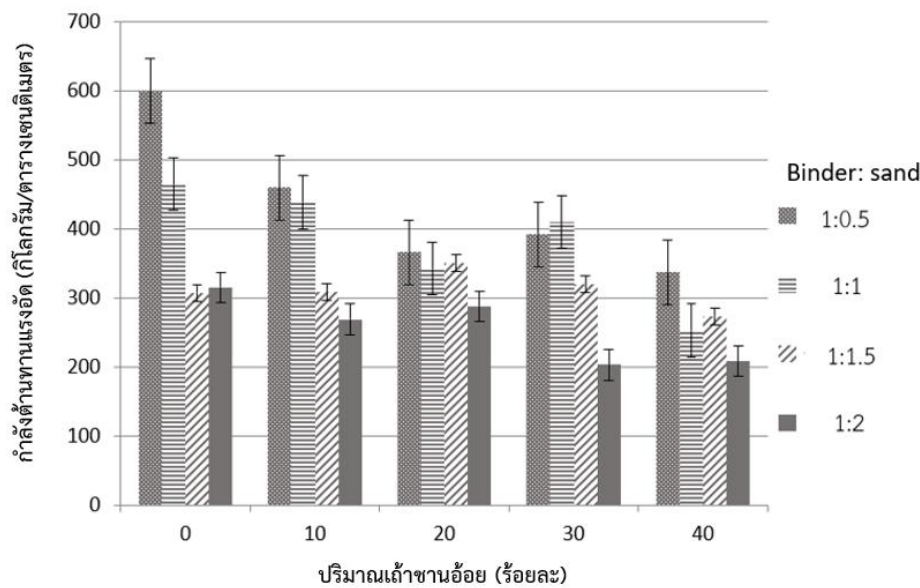
เพื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยที่ใช้ในโครงการดัง ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเถ้าขานอ้อยมีผลรวมของ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂)+ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃)+ไอออนออกไซด์ (Fe₂O₃) มากกว่าร้อยละ 70, มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ไม่เกินร้อยละ 4.0 จัดปอชโซลานเป็นชั้นคุณภาพ N

2.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของทราย

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา ซึ่งพบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.52 โมดูลัสความละเอียด (F.M.) มีค่าเท่ากับ 1.25 และร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าเท่ากับ 1.7 ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าทรายที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาครั้งนี้เป็นทรายละเอียดเนื่องจากมีค่า F.M. อยู่ในช่วง 1.25 ซึ่งปกติทรายที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไปมีค่า F.M. อยู่ในช่วง 2.2-3.2 ตาม มาตรฐานของ ASTM C136-06 (2005)

ตารางที่ 3 ค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของทราย

มวลรวม	ความถ่วงจำเพาะ	โมดูลัสความละเอียด	ร้อยละการดูดซึมน้ำ
ทราย	2.52	1.25	1.7



รูปที่ 2 ผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน

2.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์

รูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเถ้าขาน้อยที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เมื่อแทนที่ในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ความต้านทานแรงอัดลดลง

- ในสัดส่วนผสมทราย 0.5 เท่าของปูนซีเมนต์และผสมเถ้าขาน้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 598 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้ในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีกำลังต้านทานแรงอัดมากกว่าอัตราส่วนร้อยละ 20

- ในสัดส่วนผสมทราย 1 เท่าของปูนซีเมนต์และเถ้าขาน้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 10 และ 30 จะกำลังต้านทานแรงอัดใกล้เคียงกับการใช้เถ้าขาน้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0

- ในสัดส่วนผสมทราย 1.5 เท่าของปูนซีเมนต์ปริมาณเถ้าขาน้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 30 มีกำลังต้านทานแรงอัดมากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10

- ในสัดส่วนผสมทราย 2 เท่าและมีเถ้าขาน้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10 และ 20 มีกำลังกำลังต้านทานแรงอัดใกล้เคียงกัน ซึ่งในสัดส่วน 30 และ 40 มีการกำลังต้านทานแรงอัดน้อยลงมาก

ดังนั้นสัดส่วนที่เลือกใช้ในการทดลองคือใช้เถ้าขาน้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ทราย 2 เท่าของปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการทำงานเนื่องจากเถ้าขาน้อยเป็นวัสดุที่ยังไม่จำหน่ายแพร่หลายในท้องตลาด ยากต่อการนำมาใช้และก่อนนำมาใช้มีค่าขนส่ง ค่าบด เตรียมวัสดุให้ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 จึงเลือกสัดส่วนที่ใช้เถ้าขาน้อยน้อยที่สุด

ชุดเครื่องผลิตเนื้อโฟมเหลวประกอบด้วย เครื่องอัดอากาศหรือปั๊มลม ต่อเข้ากับเครื่องผลิตโฟมเหลวทรงรูป ซึ่งสามารถตั้งความดันภายในถังได้ เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญที่สุดในระบบเซลล์ูล่า ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดเครื่องผลิตโฟมเหลว

ในการวิเคราะห์นี้จึงได้เลือกใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Plaxis 2D ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FS) ขึ้นอยู่กับความสำคัญของงาน ความครบถ้วนของข้อมูล และความแม่นยำในการวิเคราะห์ ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต้องมากกว่า 1.3 ซึ่งถือได้ว่ามีความเหมาะสมสำหรับงานดินถมที่ไม่สูงมาก น้ำหนักบรรทุกทุกคำนวณจากการสมมุติให้รถหกล้อเรียงต่อกัน มีระยะห่างคันหน้าและคันหลัง 2 เมตร กำหนดให้รถบรรทุกหกล้อยาวประมาณ 8 เมตร ตามกฎหมายอนุญาตให้รถหกล้อบรรทุกของได้ไม่เกิน 15 ตัน (150 กิโลนิวตัน) รวมน้ำหนักรถ ถนนกว้าง 3 เมตร ดังนั้นพื้นที่ถนนรับน้ำหนักรถบรรทุก 1 คันเท่ากับ $10 \times 3 = 30$ ตารางเมตร สมมุติน้ำหนักรถ 3 ตันและน้ำหนักบรรทุก 15 ตัน รวมเป็น 18 ตัน หรือ 180 กิโลนิวตัน ดังนั้นหน่วยน้ำหนักลงผิวทางโดยประมาณ $180/30 = 6$ กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

2.4 แบบจำลอง

โดยปกติแล้ววิธีขีดจำกัดสมดุล (Limit Equilibrium) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาดอย่างแพร่หลาย โดยสมมุติระยะนาบิบัติเคลื่อนไหวเป็นส่วนโค้งวงกลมและแบ่งพื้นที่นี้ออกเป็นชั้นๆ แล้วคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยนำค่าความแข็งแรง (Strength) ของดินชั้นนั้นๆ หาค่าด้วยหน่วยแรงที่เกิดขึ้น (Stress) แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ ไม่สามารถคำนวณการเคลื่อนที่หรือการเสียรูปของเชิงลาดได้ และระยะนาบิบัติไม่สอดคล้องกับการเสียรูป ดังนั้นในการวิเคราะห์นี้จึงได้เลือกใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Plaxis 2D (Demo version) ในขั้นตอนวิเคราะห์ประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดสภาพเริ่มต้น (Initial state) ขั้นตอนที่ 2 คำนวณการเสียรูปและหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธี Phi-C reduction

ในการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้แบบจำลอง Soft Soil จำลองดินอ่อน ดินเดิม ดินที่ไม่บดอัด และใช้ Mohr-Coulomb ในกรณีดินบดอัด เช่น ชั้นทาง เป็นต้น การประมวลผลใช้โปรแกรม Plaxis 2D ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลดังแสดงในตารางที่ 4

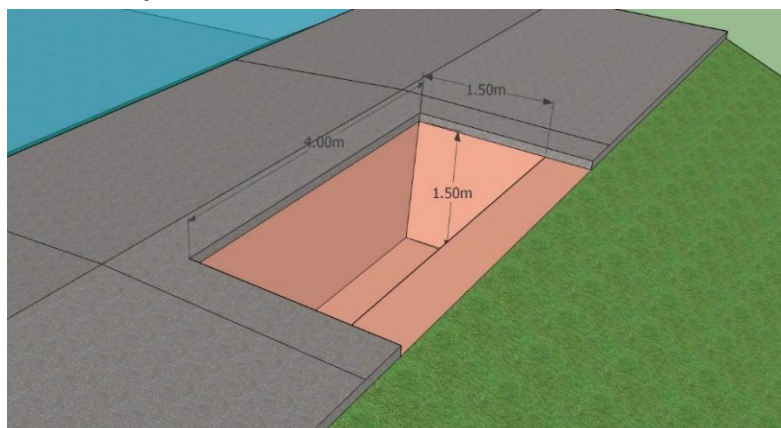
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองของดิน Soft Soil แบบ Mohr-Coulomb

วัสดุ (Materials)	γ (กิโลนิวตัน ต่อลูกบาศก์ เมตร)	E (กิโล ปาสคาล)	U	C (กิโล ปาสคาล)	ϕ (deg)	λ	κ
ดินบดอัดชั้นทาง (Embankment)	20	7,500	0.30	8	29		
ดินเดิมในคลอง (Canal fill)	15	2,400	0.25	4	23		
ดินเดิม (Weathered crust)	17	2,500	0.25	10	23		
ดินเหนียวอ่อน (Soft clay)	15	2,400	0.25	4	23	0.11	0.056
ดินเหนียวอ่อนปานกลาง (Medium stiff clay)	18	5,000	0.25	10	25	0.11	0.056
ดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)	19	9,000	0.25	30	26	0.085	0.017
คอนกรีตมวลเบา (CLC)	12	7,400,000	0.20	4900	30		

แบบจำลองมีจำนวน 380 โหนด และ 240 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์เล็กสุดขนาด 0.5 เมตร บนพื้นที่ใกล้ผิวทาง และขนาดใหญ่สุด 6.0 เมตรในพื้นที่ที่ไม่ส่งต่อการวิเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญ

2.5 แปลงทดลอง

แปลงทดลองคือถนนขอยปุ้เส็งเจริญสุข เขตพื้นที่ ตำบลศาลากลาง อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี เป็นถนนที่สร้างเสร็จและเปิดใช้งานเมื่อปี 2540 ปัจจุบันผิวจราจรบางช่วงของถนนพังตามแนวยาว ถนน ขอบถนนทรุดเนื่องจากพื้นที่ต่ำ เกิดปัญหาน้ำท่วมทุกปีในหน้าฝน ถนนมี 2 ช่องจราจร มีความกว้างช่องจราจรละ 3.00 เมตร จำลองแทนที่ชั้นดินด้วยคอนกรีตมวลเบาขนาด 1.50x 1.50 x 4.00 เมตร ในช่องจราจรฝั่งติดคลอง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขนาดบ่อเทคอนกรีตมวลเบาในแปลงทดลอง

3. อภิปรายผลการวิจัย

3.1 การผสมคอนกรีตมวลเบา

เมื่อออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าตามมาตรฐาน ASTM C796-97 สัดส่วนเถ้าขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ทราบ 2 เท่าของปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.58 กำหนดความหนาแน่นของสารสร้างฟองโฟม 65 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราน้ำยาโฟมเหลวต่อ น้ำ 1 ต่อ 40 ลิตร จะได้วัสดุผสมวัสดุสำหรับผสมคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC ดังตาราง 4 คอนกรีตมวล เบานี้มีความหนาแน่นแห้ง 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะนำไปแทนที่ชั้นทางบดอัดที่มีความ หนาแน่น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยประมาณ คอนกรีตมวลเบาเหลวที่ได้จากการผสมใน ตาราง ที่ 4 แสดงในรูปที่ 5

ตารางที่ 4 ส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC

ปริมาตรคอนกรีต (ลบ.ม.)	ซีเมนต์ (กก.)	เถ้าขานอ้อย (กก.)	ทราย (กก.)	น้ำ ลิตร	โฟม ลิตร	นน. เปียก กก./ลบ.ม.	นน. แห้ง กก./ลบ.ม.
1	360	40	800	197	0.844	1431	1200

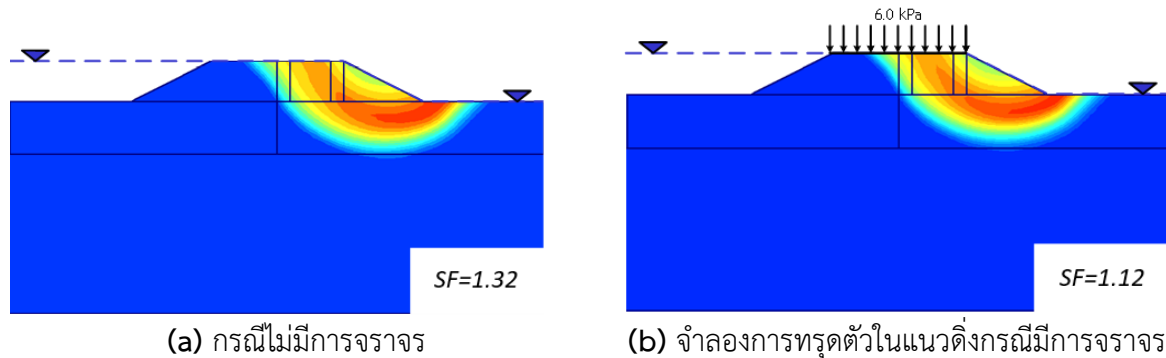


รูปที่ 5 ลักษณะคอนกรีตมวลเบาเหลว

3.2 การจำลองเสถียรภาพของแปลงทดลอง

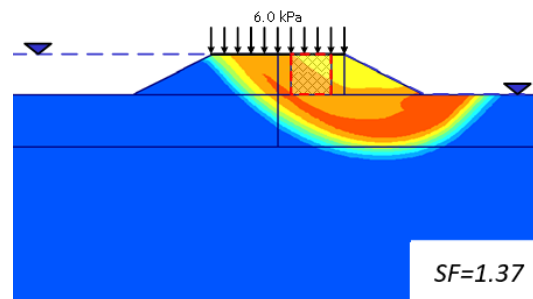
การจำลองเสถียรภาพจะจำลองในขณะที่แปลงทดลองมีน้ำสูง 1.50 เมตร หนึ่งฝั่งซึ่งเป็นระดับ ความสูงเท่าผิวจราจรถนนพอดิ อีกฝั่งจำลองให้ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้ดินฝั่งนั้นคายน้ำออกจาก ช่องว่างไม่ทันในขณะที่ไม่มีแรงดันด้านข้างของน้ำมาพยุงถนนดังแสดงในรูปที่ 5 (a) จะเห็นว่าความเสี่ยงใน การเกิดการทรุดตัวในแนวตั้งของลาดดินเกิดขึ้นสูงสุดบริเวณท้องคลองหากแต่ยังมีอัตราส่วนปลอดภัย 1.32 ซึ่งยังไม่เสี่ยงพังทลาย หากแต่เมื่อมีน้ำหนักสัญจรบนท้องถนน 6.0 กิโลปาสคาล ดังรูปที่ 5 (b) พฤติกรรม

การพังทลายของแปลงทดลองคล้ายกับการไม่มีน้ำหนักสัญญาณแต่อัตราส่วนปลอดภัย 1.12 ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการพังทลาย



รูปที่ 5 จำลองการทรุดตัวในแนวตั้งของแปลงทดลอง

(a) กรณีไม่มีการจราจรบนถนนหลังระดับน้ำลด (b) มีการจราจรบนถนนหลังระดับน้ำลด



รูปที่ 6 จำลองการทรุดตัวในแนวตั้งของแปลงทดลองกรณีแทนที่ชั้นทางด้วยคอนกรีตมวลเบา

เมื่อแทนที่ดินชั้นทางบดอัดด้วยคอนกรีตมวลเบาในแปลงทดลอง พฤติกรรมการทรุดตัวในแนวตั้งเกิดสูงสุดที่ท้องคลองเช่นเดิมหากแต่เสถียรภาพลาดดิน 1.37 ซึ่งมีความปลอดภัยเพียงพอต่อการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากแรงกระทำซึ่งเป็นน้ำหนักวัสดุชั้นทางในลาดดินถูกแทนที่ด้วยวัสดุมวลเบา ทั้งนี้เมื่อแทนที่แล้วน้ำหนักกระทำลดลงประมาณร้อยละ 40-60 ส่งผลให้มีเสถียรภาพมากขึ้น

4. สรุปผล

การวิจัยนี้ได้ทดลองเพื่อคัดเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าเป็นหลัก และนำส่วนผสมดังกล่าวมาสร้างคอนกรีตมวลเบาแทนที่ดินชั้นทางเพื่อเพิ่มเสถียรภาพลาดถนนผลการวิจัยพบว่า

1. การใช้เถ้าขานอ้อยแทนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดแตกต่างกันไปตามอัตราส่วนการทดแทนและอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ ส่วนผสมที่มีการทดแทนร้อยละ 0 มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด เมื่อผสมทรายกับซีเมนต์ในอัตราส่วน 0.5 การเปลี่ยนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10, 20 และ 40 ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงอัดลดลง สิ่งที่น่าสนใจคือเมื่อทรายมีค่ามากกว่าซีเมนต์ 1.5

เท่า และถ้าชานอ้อยเข้ามาแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 30 กำลังต้านทานแรงอัดมากกว่าการทดแทนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนผสมที่มีทรายเป็น 2 เท่าของปริมาณซีเมนต์

2. การจำลองการศึกษาเสถียรภาพของถนนทดลองที่มีระดับน้ำ 1.50 เมตรด้านหนึ่ง เท่ากับความสูงของพื้นผิวถนน ระดับน้ำที่ลดลงอย่างรวดเร็วฝั่งตรงข้ามทำให้เกิดความไม่มั่นคงของดินเนื่องจากการซึมน้ำไม่เพียงพอและขาดแรงดันน้ำด้านข้าง การแทนที่ดินอัดแน่นผิวถนนด้วยคอนกรีตมวลเบา แสดงให้เห็นการทรุดตัวในแนวตั้งที่กันคลองสูงที่สุด แต่พบว่ามีความปลอดภัย 1.37 ถือว่ามีความปลอดภัยเพียงพอต่อการใช้งาน

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยประจำปี 2560 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่อนุเคราะห์สถานที่วิจัย ขอขอบคุณเทศบาลตำบลศาลากลาง อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี ในการอนุเคราะห์ให้สร้างแปลงทดลองในพื้นที่

6. เอกสารอ้างอิง

สำเร็จ รักซ้อน, ฉัตรชัย เขียวหิรัญ, & นิโรจน์ เงินพรหม. (2551). การใช้เถ้าทิ้งจากผลผลิตอุตสาหกรรม

และเกษตรกรรมเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. ทุนวิจัยสำนักงาน

คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.), 118 หน้า.

Andreão, P. V., Suleiman, A. R., Cordeiro, G. C., & Nehdi, M. L. (2019). Sustainable use of sugarcane bagasse ash in cement-based materials. *Green Materials*, 7(2), 61-70.

<https://doi.org/10.1680/JGRMA.18.00016>

ASTM International. (2005). **ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards, 04.02, 88-92.

<https://doi.org/10.1520/C0136-06>

ASTM International. (2017). **ASTM C796-97: Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam**. Annual Book of ASTM Standards, 04.02. <https://doi.org/10.1520/C0796-97>

Brindhalakshmi, M. L., Kayalvizhi, T., & Gunasekar, S. (2019). Potential utilization of sugarcane bagasse ash (SCBA) in concrete—an experimental review. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 1(6), 475-479.

<https://doi.org/10.34256/irjmtcon67>

- Dawson, E., Motamed, F., Nesarajah, S., & Roth, W. (2000). Geotechnical stability analysis by strength reduction. In **Slope Stability 2000** (pp. 99-113).
[https://doi.org/10.1061/40512\(289\)8](https://doi.org/10.1061/40512(289)8)
- Farah, K., Ltifi, M., & Hassis, H. (2011). Reliability analysis of slope stability using stochastic finite element method. **Procedia Engineering**, **10**, 1402-1407.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.233>
- Janghathaikul, D., & Gheewala, S. H. (2006). Bagasse-A sustainable energy resource from sugar mills. **Asian Journal on Energy and Environment**, **7**(3), 356-366.
- Rukzon, S., & Chindaprasirt, P. (2012). Use of bagasse ash in high-strength concrete. **Materials and Design**, **34**, 45-50.
- Zareei, S. A., Ameri, F., & Bahrami, N. (2018). Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, **184**, 258-268. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.06.153>