การประยุกต์ใช้เถ้าหนักเป็นวัสดุในงานทาง

Application of bottom ash as pavement material

ศักดา หล้าใจ[1] พิทยา แจ่มสว่าง[2*]

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพฯ
[2]ศาตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพฯ
*Corresponding author; E-mail address: pitthaya_kmutnb@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะโรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหินที่ต้องใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหินเป็นจำนวนมาก วัสดุพลอยได้จากการใช้ถ่านหิน คือเถ้าถ่านหิน ปริมาณเถ้าถ่านหินที่เหลือจากกระบวนการเผาถ่านหินเกิดเป็นเถ้าหนัก 20 – 25 % ต่อปี โดยปัจจุบันเถ้าหนักยังไม่สามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุ เหลือทิ้งต้องกำจัดด้วยการฝังกลบ หากสามารถนำเถ้าหนักไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในงานวิศวกรรมโยธาได้ ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าหนัก และลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้ง การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวัสดุที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้มากพอที่จะสามารถใช้เป็นวัสดุในงานทางได้ ถือเป็นหนึ่งทางเลือกในงานวิจัยนี้ จึงศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าหนัก และปูนซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุในงานทางการศึกษาประกอบไปด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (STS) และการทดสอบกำลังรับแรงแบกทาน (CBR) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าหนักปริมาณ 20 % ที่ทุกอัตราส่วนซีเมนต์ และอายุการบ่มมีความเหมาะสมมากที่สุด สามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับในชั้นพื้นทางได้

คำสำคัญ: เถ้าหนัก, การปรับปรุงคุณภาพ, วัสดุเหลือทิ้ง

Abstract

Nowadays, Thailand has an increasing electricity demand and coal-fired power plants require a lot of coal-fired fuel. The material obtained from coal is called coal ash. The coal ash from the power generates 20–25% bottom ash per year. Bottom ash is a waste material managed by landfills. If bottom ash can be applied to engineering work, it will increase its value and reduce its environmental impact. Ground improvement with materials that can be increased strength enough to be used as the pavement is one option. Then, this study shows the improvement in laterite when replaced with bottom ash and treated with cement. Experiments consisted of unconfined compressive strength (UCS), splitting tensile strength (STT), and California bearing ratio (CBR). The result of this study shows that 20% of bottom ash content is appropriate for all cement content and curing time. Moreover, it can be applied as a material for soil-cement base pavement

Keywords: Bottom ash, Ground improvement, Waste material

1. บทนำ

ในบางพื้นที่ของประเทศไทยมีปัญหาขาดแคลนแหล่งดินที่มีคุณภาพมากพอที่จะมาใช้เป็นวัสดุในการทางให้ตรงตามมาตรฐานจึงจำเป็นต้องนำดินที่มีคุณภาพจากแหล่งดินที่ไกลออกไปทำให้เกิดค่าใช้จ่าย และเกิดต้นทุนที่เพิ่มมากขึ้นในบางพื้นที่ที่อยู่ใกล้กับโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สามารถสร้างถนนโดยใช้เถ้าหนักแทนที่ดินบางส่วน และผสมซีเมนต์เพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มกำลังให้เทียบเท่ามาตรฐานของวัสดุที่นำมาใช้ในงานทางที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และลดปัญหาขยะเถ้าหนักที่จะต้องถูกกำจัดโดยการฝังกลบส่งผลต่อปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้าหนักมีลักษณะพื้นผิวแบบขรุขระ มีเหลี่ยมคม และมีขนาดใหญ่กว่าเถ้าลอยในสภาพแห้งจะบินเป็นฝุ่นไม่มีคุณสมบัติการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาคซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้วัสดุได้ในการก่อสร้างถนนด้วยการขัดกันของอนุภาค [1] นอกจากนี้การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการแทนที่ซีเมนต์ที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่อมีปริมาณน้ำที่เพียงพอเถ้าหนักที่เป็นวัสดุที่มีซิลิก้า และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบทางเคมีเช่นเดียวกับเถ้าลอย แม้ว่าพื้นที่ผิวจะมีน้อยเกินกว่าที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก แต่ก็มีบางส่วนที่มีอนุภาคขนาดเล็กมากและมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต กับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานเพิ่มความแข็งแรงระหว่างอนุภาคได้มากขึ้นอีกเมื่อมีระยะเวลาผ่านไป [2]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่ศึกษาอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมของดินซีเมนต์ และเถ้าหนัก เพื่อใช้ในงานวิศวกรรมทาง โดยพิจารณาถึงกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (STS) และการทดสอบกำลังรับแรงแบกทาน (CBR)

2. แนวทางการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

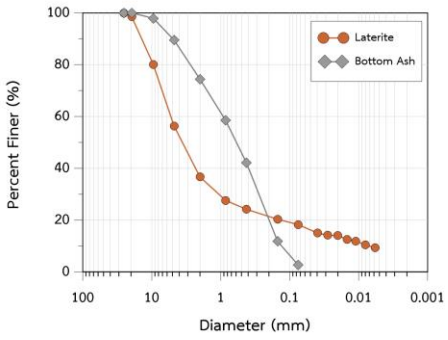
วัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ดินลูกรังทั่วไปในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทยที่จะนำมาใช้พิจารณาเป็นวัสดุในการก่อสร้างในงานทางโดยคุณสมบัติแสดงตามตางรางที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าหนักที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติ	ดินลูกรัง	เถ้าหนัก
Specific Gravity	2.67	3.1
Maximum Dry Density (g/cm3)	2.02	1.78
Optimum Moisture Content (%)	9.1	17.19
Coefficient of Uniformity, Cu	68.75	6.07
Coefficient of Curvature, C_c	2.75	0.62
Liquid Limit (%)	27	-
Plastic Limit (%)	12	-
Plastic Index (%)	15	-
Unified Soil Classification	SC	-

(ก) ดินลูกรัง (ข) เถ้าหนัก

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 2 การรกระจายตัวของขนาดคณะของดินลูกรัง และเถ้าหนัก

2.2 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้าหนักเป็นวัสดุในงานทาง โดยวัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือดินลูกรัง ในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุจะใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วน 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์ และเถ้าหนักที่ใช้ นำมาจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่อัตราส่วน 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับน้ำหนักวัสดุแห้ง ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของวัสดุในงานวิจัย และอายุบ่ม

ซีเมนต์ (%)	เถ้าหนัก (%)	อายุวันบ่ม (วัน)
0	0	7, 28, 60
	10	
	20	
	30	
	40	
	50	
1	0	7, 28, 60
	10	
	20	
	30	
	40	
	50	
3	0	7, 28, 60
	10	
	20	
	30	
	40	
	50	
5	0	7, 28, 60
	10	
	20	
	30	
	40	
	50	
7	0	7, 28, 60
	10	
	20	
	30	
	40	
	50	

2.3 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

2.3.1 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) และการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (STT)

ในการเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ และเถ้าหนักทำการผสมดินลูกรังปูนซีเมนต์ และเถ้าหนักให้เข้ากัน แล้วใส่น้ำลงไปตามอัตราส่วนที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 เมื่อผสมตัวอย่างเรียบร้อยให้นำใส่ในโมลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร และสูง 10.7 เซนติเมตรแล้วจึงใช้ค้อนหนัก 44.5 นิวตัน ในการบดอัดเป็นชั้นจำนวน 5 ชั้น ชั้นละ

25 ครั้ง จากนั้นทำการดันตัวอย่างออกจากโมลโดยใช้ไฮโดรลิค และนำตัวอย่างมาห่อด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียปริมาณความชื้นในตัวอย่าง และทำการบ่มตัวอย่าง เป็นเวลา 7, 28 และ 60 วัน

2.3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการทดสอบกำลังรับแรงแบกทาน

ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงแบกทานจะผสมตัวอย่างใส่โมลทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 นิ้ว และมีความสูง 7 นิ้ว ประกอบเข้ากับฐาน และSpacer ที่มีความสูง 2 นิ้ว ใช้กระดาษกรองปูทับบน Spacer เพื่อป้องกันไม่ให้ดินไปเกาะติดกับแผ่นเหล็ก ตามมาตรฐาน ASTM D1883 แล้วจึงใช้ค้อนหนัก 44.5 นิวตันในการบดอัดทั้งหมด 5 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่างการทดสอบ เมื่อทำการบดอัดตามจำนวนชั้น และจำนวนครั้งเรียบร้อยแล้วจึงถอด Spacer ออก แล้วทำการปาดหน้าดินที่เกินขอบโมลให้เรียบสม่ำเสมอ จากนั้นนำโมล และดินไปชั่งน้ำหนักเพื่อจะหาค่าความหนาแน่นเปียก (Wet Density) เมื่อชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้ว ในการบ่มตัวอย่างจะใช้พลาสติกหุ้มโมลโดยรอบตามระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน

2.4 การทดสอบ

2.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS)

ในการออกแบบดินซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุในงานทางค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณาในการคัดเลือกวัสดุและกำหนดมาตรฐานในการใช้เป็นชั้นพื้นทางต่างๆ โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2166 ใน 1 อัตราส่วนผสมที่กำหนดไว้จะเตรียมตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยจะทำการเก็บปริมาณความชื้นของตัวอย่างเมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จเป็นปริมาณความชื้นก่อนบ่มตัวอย่างและเมื่อครบอายุบ่มก่อนที่จะนำไปติดตั้งในเครื่อง Automatic Loading machine โดยตัวอย่างจะถูกบ่มด้วยการห่อพลาสติกเพื่อกันการสูญหายของความชื้นที่อายุการบ่ม 7, 28 และ60 วัน เมื่อครบอายุการบ่มตัวอย่างจะถูกกดด้วยแรงแนวดิ่งแกนเดียวด้วยอัตราการกดที่คงที่ 2 มิลลิเมตร ต่อนาที และวัดการเสียรูปในแนวดิ่งด้วย เครื่องมือวัดระยะทรุดตัวในแนวดิ่ง (LVDT) ที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร โดยจะทำการทดสอบ และบันทึกค่าจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ และค่าทั้งหมดจะถูกนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) เพื่อที่จะหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (q_u) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50})

2.4.2 การทดสอบกำรังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (STS)

ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงของดินในปัจจุบันส่วนใหญ่พบว่าการทดสอบกำลังรับแรงดึงด้วยวิธีทางอ้อมเป็นที่นิยมมากที่สุดโดยการทดสอบการรับแรงดึงแบบผ่าซีกเป็นที่ยอมรับในการประเมินความสามรถในการรับแรงดึงของวัสดุในงานทาง และเป็นไปตามมาตรฐาน ASTMD 3967-05 ใน1 อัตราส่วนผสมที่กำหนดไว้จะเตรียมตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างจะถูกบ่มด้วยการห่อพลาสติกเพื่อกันการสูญหายของความชื้นที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน เมื่อครบอายุการบ่มตัวอย่างจะถูกนำไปติดตั้ง ที่เครื่อง Automatic Loading machine ในแนวนอน และกดลงด้วยแรงแนวดิ่งแกนเดียวด้วยอัตราการกดที่คงที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยจะทำการทดสอบ และบันทึกค่าจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ เพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ตัวอย่างสามารถรับได้ (q_t)

(ก) การทดสอบการรับกำลังอัด (ข) การทดสอบการรับกำลังดึง

รูปที่ 3 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

2.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงแบกทาน

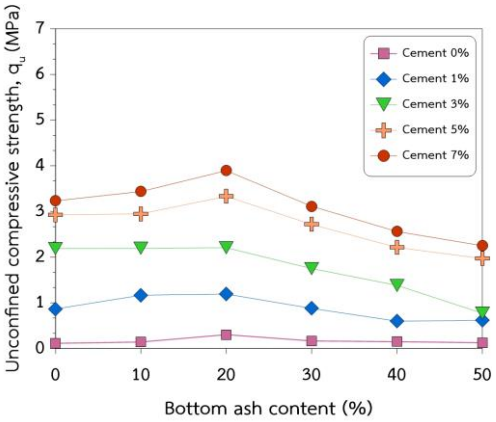
ในการทดสอบการรับกำลังแบกทานของดิน California Bearing Ratio (CBR) เป็นการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกบดอัดตามมาตรฐานแล้วโดยค่าที่ได้จากการทดสอบจะออกมาในรูปแบบของ %CBR และจะถูกนำไปใช้เป็นคุณสมบัติในมาตรฐานในงานทางต่าง ๆ สำหรับงานชั้นคันทาง ชั้นรองพื้นทาง และชั้นพื้นทาง โดยการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1883-16 ทำการศึกษาในตัวอย่างที่มีอายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 120 วัน ใน 1 อัตราส่วนผสมต่อ 1 ตัวอย่าง เมื่อครบอายุการบ่มจะนำตัวอย่างแช่น้ำเป็นเวลา 4 วัน แบบวิธี Soaked CBR test และ Surcharge ที่มีน้ำหนัก 10 ปอนด์วางบนตัวอย่าง เมื่อครบกำหนดจึง นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้วจึงนำไปวางที่เครื่องกดทดสอบซึ่งมีหัวกด (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว จากนั้นทำการกดน้ำหนักในแนวดิ่งด้วยอัตรา 1.27 มิลลิเมตร ต่อนาที และวัดการเสียรูป ในแนวดิ่งด้วย เครื่องมือวัดระยะทรุดตัวในแนวดิ่ง (LVDT) ที่มี ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร โดยจะทำการทดสอบและบันทึกค่าให้มีค่ายุบตัวที่ 0, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.150, 0.200, 0.250, 0.300, 0.400 และ 0.500 นิ้ว จากนั้นจะคำนวณเพื่อหาค่า %CBR และนำไปเทียบมาตรฐานต่อไป

3. การทดสอบและการวิเคราะห์

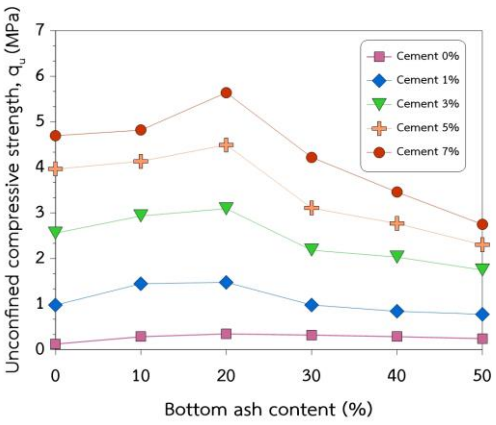
3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด

รูปที่ 4 ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด ปริมาณซีเมนต์ และปริมาณเถ้าหนักที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพโดยที่รูป 4-ก, 4-ข และ 4-ค เป็นกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในทุกอายุการบ่มเมื่อเทียบระหว่างดินลูกรังที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงคุณภาพจะมีความสามารถในการรับกำลังอัดได้น้อยกว่าดินลูกรังที่ถูกปรับปรุงคุณภาพโดยที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเถ้าหนักแทนที่ดินลูกรังมากขึ้นสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดได้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่การแทนที่เถ้าหนัก 20 % เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานของอนุภาคที่มีความเป็นเหลี่ยมคมของเถ้าหนักที่ถูกผสมกับดินทำให้มี

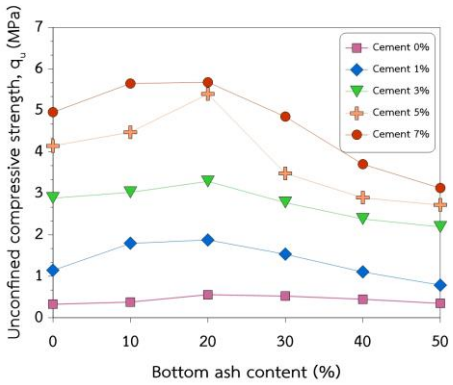
กำลังในการต้านแรงเฉือนที่มากขึ้น [3] ในทางกลับกันเมื่อแทนที่เถ้าหนักมากกว่า 20 % กลับส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกอายุการบ่มเนื่องจากเถ้าหนักมีความถ่วงจำเพาะต่ำ และมีความพรุนต่อพื้นที่ผิวสัมผัสสูง จึงทำให้มีความทนภายใต้สภาวะรับน้ำหนักได้ต่ำ [4] เมื่อมีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าหนักมากเกินไปจึงทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เป็นสาเหตุให้ที่การแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าหนักที่ 50 % มีความสามารถในการรับแรงอัดในน้อยกว่าดินลูกรังที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพทุกอายุการบ่ม นอกจากนี้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดต่ออายุบ่มพบว่า เมื่อมีระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างมากขึ้นกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์สามารถทำให้แรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคมีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 4-ก กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่อายุการบ่ม 7 วัน



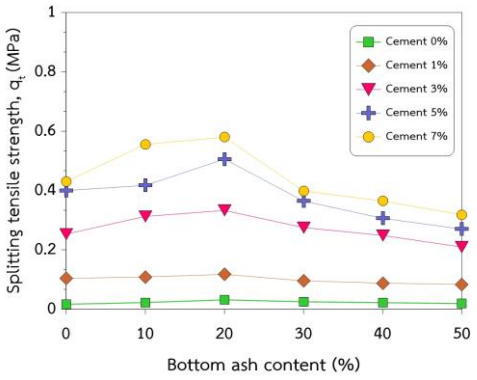
รูปที่ 4-ข กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่อายุการบ่ม 28 วัน



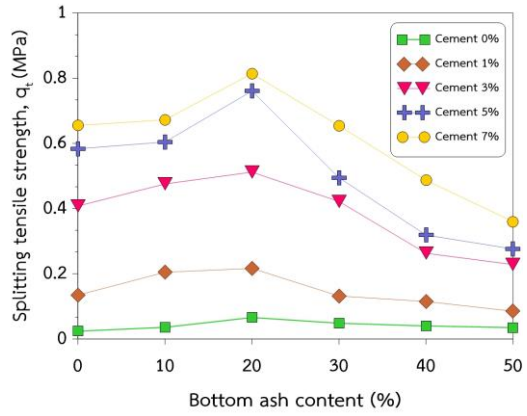
รูปที่ 4-ค กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่อายุการบ่ม 60 วัน

3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

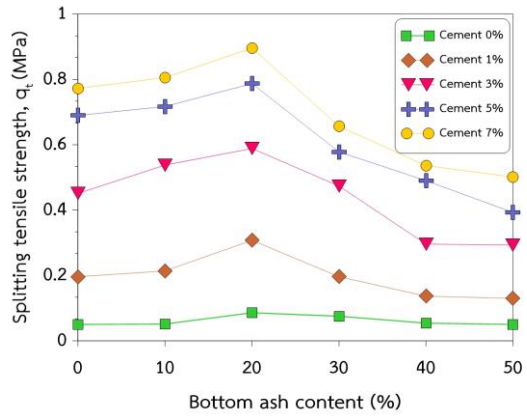
รูปที่ 5 ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกปริมาณซีเมนต์ และปริมาณเถ้าหนักที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพโดยที่ รูป 5-ก, 5-ข และ 5-ค เป็นกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 60 วันตามลำดับ พบว่าพฤติกรรมการรับกำลังดึงเป็นเช่นเดียวกับการรับกำลังอัดกล่าวคือดินลูกรังที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงคุณภาพสามารถรับแรงดึงแบบผ่าซีกได้น้อยกว่าดินลูกรังที่ถูกปรับปรุงคุณภาพโดยที่กำลังรับแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณเถ้าหนักที่เข้าไปแทนที่ดินลูกรังจนกระทั้งเถ้าหนักมีปริมาณมากกว่า 20 % กำลังรังแรงดึงจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีค่าน้อยที่สุดที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักที่ 50 % เนื่องจากในช่วงแรกของการรับกำลังเถ้าหนักที่มีอนุภาคที่มีความเป็นเหลี่ยมมุมส่งผลในเกิดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคเพิ่มมากขึ้นเมื่อนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยการแทนที่ดินลูกรังที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจากคุณสมบัติความเป็นพลาสติก และซีเมนต์ที่ยิ่งเสริมความแข็งแรงในการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน [5] จึงส่งผลให้มีกำลังรับแรงดึงที่มากขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าหนักมากกว่า 20 % กลับมีกำลังรับแรงดึงลดลง เนื่องจากความสามารถในการรับกำลังของเถ้าหนักต่ำจากการที่มีลักษณะอนุภาคที่เปราะ และเถ้าหนักได้แสดงถึงคุณสมบัติมีพฤติกรรมที่เป็นพลาสติกต่ำคล้ายทรายจึงทำให้แรงในการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดน้อยลง นอกจากนี้ในความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกต่ออายุบ่มพบว่าเมื่อมีระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างมากขึ้นกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกจะมากขึ้นเช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 5-ก กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุการบ่ม 7 วัน

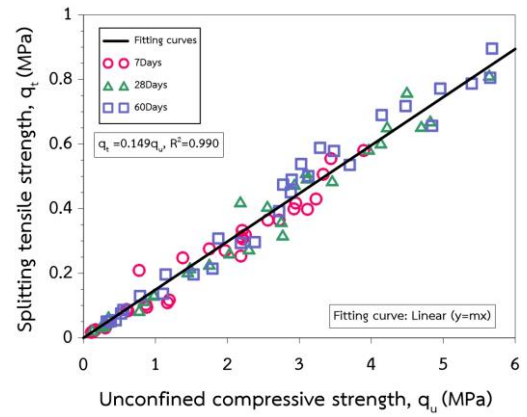


รูปที่ 5-ข กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 5-ค กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุการบ่ม 60 วัน

จากรูปที่ 6 แสดงถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบจำกัด และกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกพบว่าการพัฒนาในด้านกำลังรับแรงอัดเมื่อมีการปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน และอายุการบ่มต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกับการพัฒนาในด้านกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเป็นอย่างมากโดยพัฒนาไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อกำลังรับแรงอัดแบบจำกัดมีค่าเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน นั่นคือกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่าเป็น 14.9 % ของกำลังรับแรงอัดดังที่แสดงในสมการที่ 1



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแบบจำกัด และกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

$$q_t = 0.149\, q_u \quad (1)$$

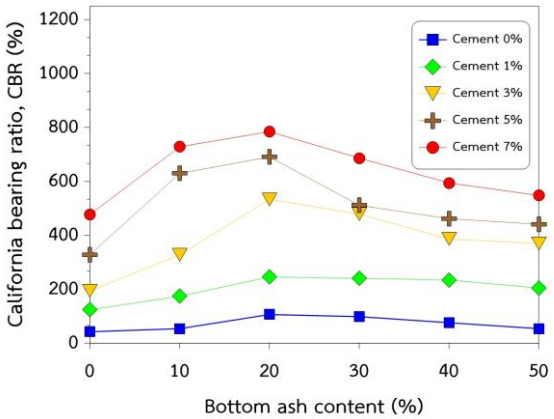
โดยที่

q_t คือ กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

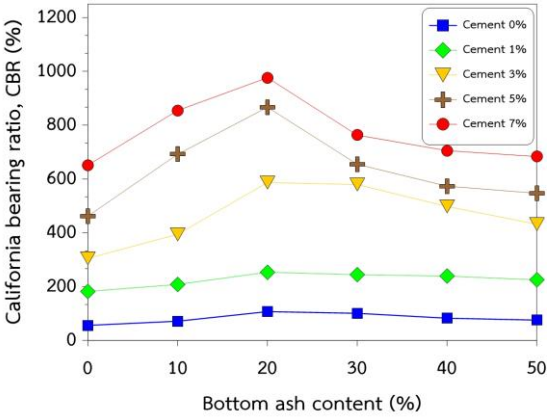
q_u คือ กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด

3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงแบกทาน

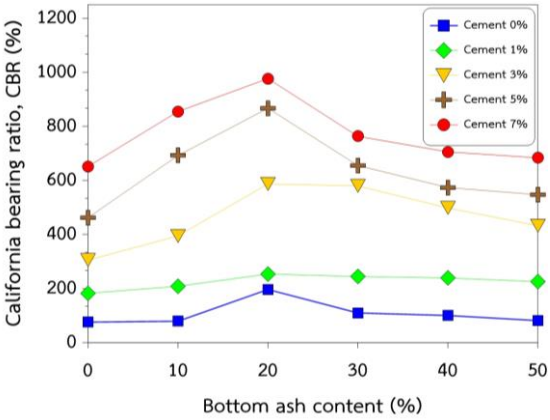
จากรูปที่ 7 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าหนักที่นำไปแทนที่ดินลูกรัง และกำลังรับแรงแบกทานโดยที่รูป 7-ก, 7-ข และ 7-ค เป็นกำลังรับแรงแบกทานที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 60 วันตามลำดับ พบว่าดินลูกรังที่ไม่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าหนักมีความสามารถในการรับแรงแบกทานได้น้อยกว่าดินลูกรังที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าหนักโดยที่แนวโน้มการเพิ่มกำลังรับแรงแบกทานมีความคล้ายคลึงกับกำลังรับแรงอัดเมื่อทำการแทนที่ด้วยเถ้าหนักที่ปริมาณเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังแบกทานเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของเถ้าหนักเมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่แน่นขึ้นอนุภาคของเถ้าหนักเข้าไปแทนที่ช่องว่างทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคที่มากขึ้น [6] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าหนักมากเกินกว่า 20 % ส่งผลให้กำลังรับแรงแบกทานมีค่าลดลงเนื่องจากอนุภาคของเถ้าหนักเริ่มมีมากขึ้นส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดคละการแทนที่ในช่องว่างของเถ้าหนักที่มากไปแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคก็น้อยลงเช่นกันเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงแบกทาน และอายุการบ่มพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มเช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัด เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ และปฏิกิริยาปอซโซลานเล็กน้อยจากเถ้าหนักที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมีความละเอียดมาก



รูปที่ 7-ก กำลังรับแรงแบกทานที่อายุการบ่ม 7 วัน

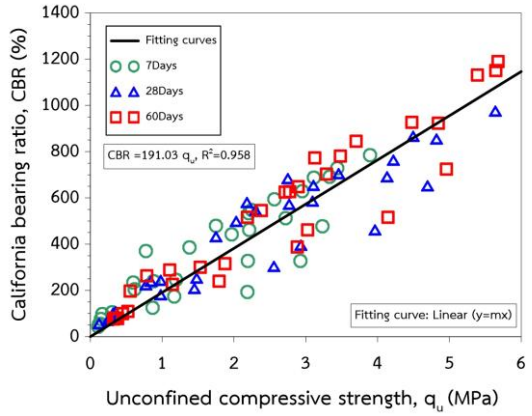


รูปที่ 7-ข กำลังรับแรงแบกทานที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 7-ค กำลังรับแรงแบกทานที่อายุการบ่ม 60 วัน

จากรูปที่ 8 แสดงถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงแบกทาน และกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดพบว่าแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงแบกทานคล้ายคลึงกันกับแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด โดยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการบ่มเช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของกำลังทั้งสองแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงแบกทานมีค่าเป็น 191.03 % ของกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดดังสมการที่ 2



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงแบกทาน และกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด

$$CBR = 191.03\ q_u \quad (2)$$

โดยที่

CBR คือ กำลังรับแรงแบกทาน

q_u คือ กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด

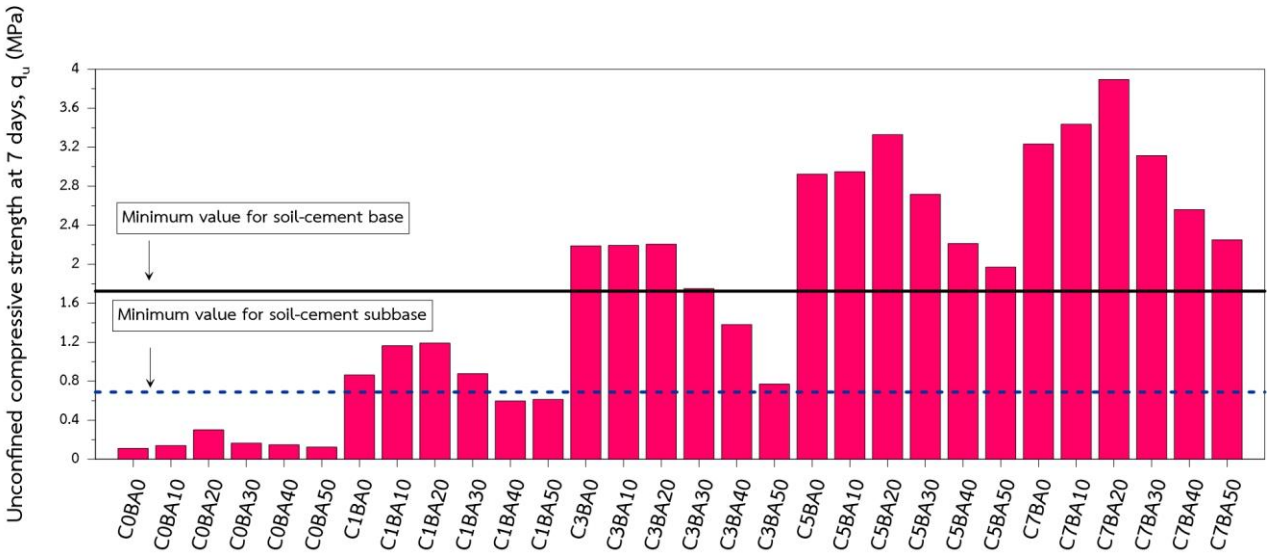
4. การพิจารณาดินซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นผิวทาง

การพิจารณาประยุกต์ใช้วัสดุในงานทางจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติการรับกำลังในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งคุณสมบัติในการรับกำลังของชั้นพื้นทางในแต่ชั้นก็แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐานกรมทางหลวง ประเทศไทย ในการพิจารณาการใช้วัสดุในชั้นพื้นทางชั้นรองพื้นทาง และชั้นวัสดุคัดเลือก ดังตารางที่ 3

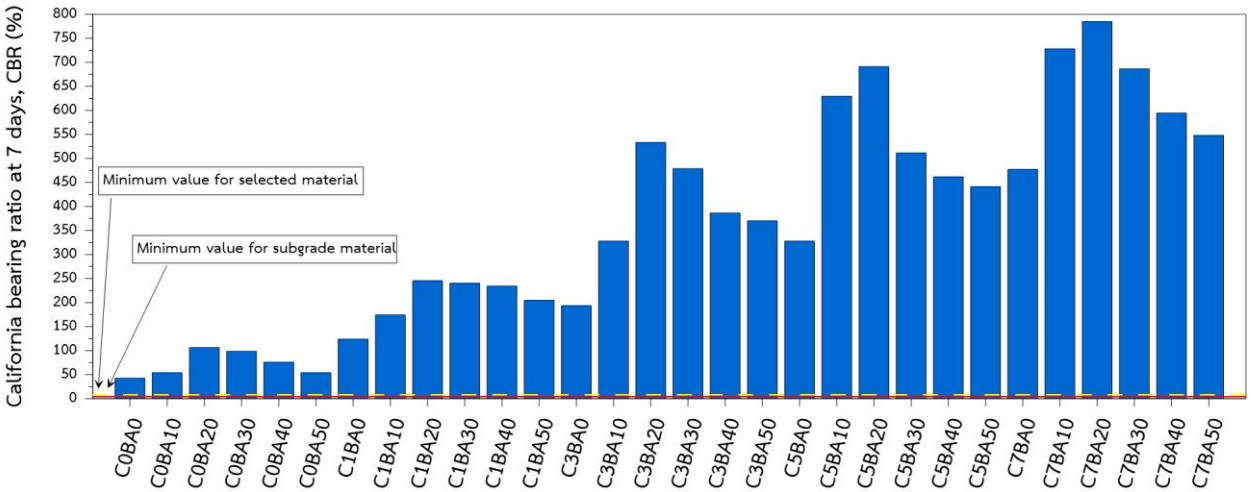
ตารางที่ 3 มาตรฐานชั้นทางกรมทางหลวง และกรมทางหลวงชนบท ประเทศไทย

วัสดุ	กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่ 7 วัน (MPa)	กำลังรับแบกทานที่ 7 วัน (%)
ชั้นพื้นทาง	1.75	
ชั้นรองพื้นทาง	0.7	
ชั้นวัสดุคัดเลือก		8
ชั้นวัสดุถมคันทาง		4

เมื่อพิจารณาในชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทางจากมาตรฐานกรมทางหลวง ประเทศไทย พบว่าจะพิจารณาเพียงกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด ในชั้นพื้นทางพบว่าต้องการค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด 1.75 MPa ดังนั้นดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพที่มีกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่ต่ำที่สุดที่สามารถนำวัสดุไปใช้ในชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง [7] ได้คือที่อัตราส่วนผสมซีเมนต์ 3 % และเถ้าหนัก 30 % ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่ 1.75 MPa ส่วนในชั้นรองพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง [8] พบว่าต้องการค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด 0.7 MPa ดังนั้นดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพที่มีกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่ต่ำที่สุดที่สามารถนำวัสดุไปใช้คือที่อัตราส่วนผสมซีเมนต์ 3% และเถ้าหนัก 50% ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 0.771 MPa ดังรูปที่ 9-ก เมื่อพิจารณาในชั้นวัสดุคัดเลือกตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท [9] พบว่าต้องการค่ากำลังรับแรงแบกทาน 8 % กำลังรับแรงแบกทานที่ต่ำที่สุดที่สามารถนำวัสดุไปใช้ในชั้นวัสดุคัดเลือกได้คือที่อัตราส่วนผสมซีเมนต์ 0 % และเถ้าหนัก 50 % มีค่า CBR ที่ 42.45 % ส่วนในชั้นดินถมคันทางพิจารณาตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท [10] พบว่าต้องการค่ากำลังรับแรงแบกทาน 4 % โดยค่าที่ต่ำที่สุดที่สามารถนำวัสดุไปใช้ในชั้นวัสดุคัดเลือกได้คือที่อัตราส่วนผสมซีเมนต์ 0 % และเถ้าหนัก 50 % มีค่า CBR ที่ 42.45 % เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 9-ข



รูปที่ 9-ก กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง ประเทศไทย



รูปที่ 9-ข กำลังรับแรงแบกทานเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท ประเทศไทย

5. บทสรุป

จากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังแทนที่ด้วยซีเมนต์ (0-7%) และเถ้าหนัก (0-50%) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด q_u มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่เถ้าหนักมากขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ 20 % และลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกอัตราส่วนผสมซีเมนต์ และอายุการบ่ม
- กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก q_t มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดโดยมีค่าสูงสุดที่ 20% ในทุกอัตราส่วนผสมซีเมนต์ และอายุการบ่ม
- กำลังรับแรงแบกทาน CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 20 % ในทุกอัตราส่วนผสมซีเมนต์และอายุการบ่ม
- ดินลูกรังเมื่อปรับปรุงคุณภาพแล้วสามารถนำไปใช้ในมาตรฐานดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง เมื่อมีอัตราส่วนผสมซีเมนต์ 3 % และเถ้าหนัก 30%
- ดินลูกรังเมื่อปรับปรุงคุณภาพแล้วสามารถนำไปใช้ในมาตรฐานดินซีเมนต์ชั้นรองพื้นทาง เมื่อมีอัตราส่วนผสมซีเมนต์ 3 % และเถ้าหนัก 50 %
- ดินลูกรังเมื่อปรับปรุงคุณภาพแล้วสามารถนำไปใช้ในมาตรฐานดินซีเมนต์ชั้นวัสดุคัดเลือก เมื่อมีอัตราส่วนผสมซีเมนต์ 0 % และเถ้าหนัก 50 %
- ดินลูกรังเมื่อปรับปรุงคุณภาพแล้วสามารถนำไปใช้ในมาตรฐานดินซีเมนต์ชั้นดินถมคันทางเมื่อมีอัตราส่วนผสมซีเมนต์ 0 % และเถ้าหนัก 50 %

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศาสตราจารย์ พิทยา แจ่มสว่าง ที่ให้คำปรึกษา และแก้ไขในข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้วิจัยตระหนักถึงความทุ่มเทของอาจารย์ และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Zabielska-Adamska and Katarzyna. "Sewage sludge bottom ash characteristics and potential application in road embankment." *Sustainability* 12.1 (2019): 39.

[2] Jaturapitakkul Chai and Raungrut Cheerarot. "Development of bottom ash as pozzolanic material." *Journal of materials in civil engineering* 15.1 (2003): 48-53.

[3] Kim, Hyeong-Ki and Haeng-Ki Lee. "Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete." Construction and building materials 25.2 (2011): 1115-1122.

[4] Jayaranjan, M.L.D., Hullebusch, E.D. and Annachhatre, A.P., 2014. Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash. Rev. Environ. Sci. Biotechnol. Available from: https://doi.org/10.1007/s11157-014-9336-4

[5] Vail, M., et al. "Desiccation cracking behavior of clayey soils treated with bio cement and bottom ash admixture during wetting–drying cycles." *Transportation Research Record* 2674.8 (2020): 441-454.

[6] Jamsawang, P., et al. "Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste." *Construction and building materials* 154 (2017): 61-71.

[7] กรมทางหลวง, มาตรฐานกรมทางที่ ทล.-ม. 204/2556. มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)

[8] กรมทางหลวง, มาตรฐานกรมทางที่ ทล.-ม. 206/2556. มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase)

[9] กรมทางหลวงชนบท, มาตรฐานกรมทางที่ มทช. 204-2545. มาตรฐานวัสดุคัดเลือก

[10] กรมทางหลวงชนบท, มาตรฐานกรมทางที่ มทช. 201-2557. มาตรฐานวัสดุถมคันทาง