การปรับปรุงคุณภาพดินทรายโดยใช้เถ้าก้นเตาและปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุถมและวัสดุงานทาง

Improvement of sand with bottom ash and cement as back fill materials and pavement

วุฒิกรณ์ โสพรรณรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

**Corresponding author; E-mail address: new.wuttikorn@gmail.com*

บทคัดย่อ

เถ้าก้นเตาเป็นของเสียที่เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อใช้เป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ก่อให้เกิดปัญหาการสูญเสียพื้นที่กองทิ้งและมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นถึงการใช้ประโยชน์โดยนำเสนอการปรับปรุงคุณภาพดินทรายโดยใช้เถ้าก้นเตาและปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุถมและวัสดุงานทาง การศึกษาประกอบไปด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (M_r) และการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้คลื่นสั่นสะเทือน Free-Free Resonance (FRR) สามารถนำมาใช้ในการประเมินกำลังของดินทรายปรับปรุงคุณภาพได้และสามารถใช้ในการหาคุณสมบัติด้านโมดูลัสสั่นสะเทือนและอัตราส่วนปัวส์ซอง ผลการทดสอบพบว่าความเร็วคลื่น P-wave *และ* S-wave รวมไปถึงค่าโมดูลัสสั่นสะเทือนมีความสอดคล้องกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณการแทนที่ดินทรายด้วยเถ้าก้นเตาปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ที่ทุกสัดส่วนซีเมนต์และระยะเวลาบ่มมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) *ค่า* California bearing ratio (CBR) และค่าโมดูลัสคืนตัว (M_r) มีค่าสูงสุดที่สัดส่วนนี้ ดินทรายปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าก้นเตาและซีเมนต์สามารถจำแนกได้เป็นชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ทล.-ม. 204/2556 กรมทางหลวง ประเทศไทย

คำสำคัญ: เถ้าก้นเตา, กำลังรับแรงอัด, โมดูลัสคืนตัว

Abstract

Bottom ash is a waste generated from coal burning to used as power for electricity generation causing problems of waste area disposal and pollution to the environment. This research is for realizing the benefits by proposing to improve the quality of sandy soils by using bottom ash and cement as a backfill materials and pavement materials. Experiments consisted of unconfined compressive strength (UCS), California bearing ratio (CBR), resilient modulus (Mr), and non-destructive testing using vibration waves free-free resonance test (FRR) can used to assess the strength of sandy soil, improve the quality and can used to determine the properties of seismic modulus and Poisson's ratio. The test results show that the P-wave and S-wave velocity, including the seismic modulus, are consistent with the compressive strength test results. Results show that 30% bottom ash content replacement sandy soil provided maximum strength, resilient modulus and California bearing ratio. Sandy soil, improved by bottom ash and cement, was classified as "Soil cement base" according to standard, DH-S. 204/2556, Department of highway, Thailand

Keywords*:* Bottom ash, Unconfined compressive strength, Resilient modulus, Poisson' Ratio, SEM, XRD

1. คำนำ

เถ้าถ่านหิน เป็นของเสียที่เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อใช้เป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงประมาณวันละ 40,000 ตัน ซึ่งก่อให้เกิดเถ้าถ่านหินประมาณวันละ 10,*000* ตัน ในจำนวนนี้ประกอบไปด้วย เถ้าลอย (*Fly Ash)* คิดเป็นร้อยละ 80 ในปัจจุบันมีมูลค่าทางเศรษฐกิจเนื่องจากถูกใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ยังมีเถ้าก้นเตา *(Bottom Ash)* คิดเป็นร้อยละ 20 ซึ่งปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากเถ้าชนิดนี้มีปริมาณน้อยทำให้มีการกองทิ้งเถ้าก้นเตา ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งหากสามารถพัฒนาใช้ประโยชน์จากเถ้าก้น นอกจากจะลดผลกระทบดังกล่าวยังเป็นการเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์อีกด้วย

ในหลายปีที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านศึกษาความเหมาะสมในการใช้ประโยชน์เถ้าถ่านหินสำหรับงาน (*Singh* และคณะ 2015*; Kanirajand* และคณะ 2004*; Kumar* และ *Stewart* 2003*; Pandian* 2004*; Havanagi* และคณะ 2011*; Muhunthan* และคณะ 2004*; Kim* และคณะ 2005) จากการศึกษาเหล่านี้พบว่าเถ้าถ่านหินเหมาะสำหรับการใช้เป็นวัสดุถมกลับ (*Backfill Materials)* หรือวัสดุถมคันทาง *(Embankment*

Materials) การจะเพิ่มกำลังรับแรงแบกทานเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุชั้นพื้นทางหรือรองพื้นทางต้องมีการผสมกับวัสดุอื่นหรือสารผสมเพิ่ม *Cadersa* และคณะ (*2014*) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาพบว่าที่ปริมาณเถ้าก้นเตาร้อยละ 30 มีค่า *CBR* สูงสุด แต่ในปัจจุบันปริมาณดินลูกรังมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ บางกรณีต้องนำดินลูกรังมาจากแหล่งอื่นที่อยู่ห่างไกลส่งผลต่อต้นทุนในการก่อสร้าง ผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญของดินทรายเป็นวัสดุทางเลือก จึงศึกษาดินทรายแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มทดสอบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับใช้งานวิศวกรรมทาง

2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้ 1) เพื่อหาปริมาณการแทนที่ดินทรายด้วยเถ้าก้นเตาและเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุทาง 2) ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของดินทรายแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา ได้แก่ *Unconfined Compressive Strength Test, Resilient Modulus Test* และ *Free-free resonance (FRR)*

3. ตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ *Unconfined Compressive Strength, Resilient Modulus* และ *Free-free resonance (FRR)* ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตาดังแสดงในตารางที่ 1 ผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับดินทรายที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยใช้ปริมาณความชื้นที่ *12* เปอร์เซ็นต์ เมื่อผสมเสร็จนำไปใส่แบบหล่อตัวอย่าง *PVC* โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 มิลลิเมตรและความสูง 100 มิลลิเมตร แล้วจึงนำตัวอย่างมาทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องด้วยการห่อพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้อสูญหายและใช้ระยะเวลาบ่ม *7, 28, 60* และ 90 วัน ตามลำดับ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ *California Bearing Ratio* ตามมาตรฐาน *ASTM D1883* แบบหล่อที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 7 นิ้ว ประกอบเข้ากับ *Base plate* และ *Spacer* (*Ø 6* นิ้ว หนา *2* นิ้ว) โดยใช้ปริมาณความชื้นและส่วนผสมเช่นเดียวกับการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ทำการบดอัดทั้งหมด 5 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่างทดสอบ เมื่อทำการบดอัดเสร็จนำตัวอย่างทดสอบพร้อมแบบหล่อใส่ถุงพลาสติกทำการบ่มที่ระยะเวลา 7, *28, 60* และ 90 วัน เมื่อครบระยะเวลาบ่มให้นำ *Surcharge Load* ซึ่งมีน้ำหนัก 10 ปอนด์วางทับบนตัวอย่างทดสอบก่อนนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 96 ชั่วโมง แล้วทำการทดสอบ *California Bearing Ratio*

3.2 วิธีการทดสอบ

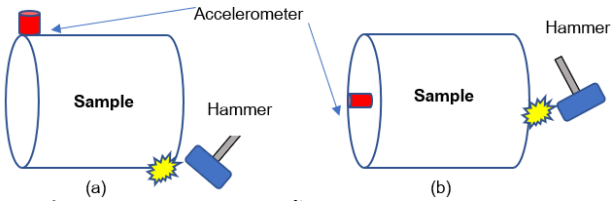
3.2.1 การทดสอบกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด *Unconfined Compressive Strength (ASTM D2166)* ขั้นตอนการทดสอบนำตัวอย่างทรายปรับปรุงคุณภาพที่ระยะเวลาบ่ม 7, *14, 28, 60* และ 90 วัน จำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสม ทำการกดตัวอย่างโดยการเพิ่มน้ำหนักในแนวดิ่งควบคุมการเคลื่อนตัว *(Strain Control)* 2 มิลลิเมตรต่อนาที การทดสอบจะดำเนินจนกว่าตัวอย่างจะเกิดการวิบัติ *(Failure)* บันทึกค่าแรงกดและอัตราการยุบตัว

3.2.2 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ เป็นการทดสอบคุณสมบัติวัสดุที่สามารถคืนตัวได้เมื่อมีแรงมากระทำซ้ำ ๆ ตามมาตรฐาน *ASSHTO T307* นำตัวอย่างทรายปรับปรุงคุณภาพที่ระยะเวลาบ่ม *7, 14, 28, 60* และ 90 วัน จำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสมเข้าเครื่องทดสอบ ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสามแกนและติดตั้งอุปกรณ์ *LVDT* จำนวน 2 ตำแหน่ง สำหรับวัดค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบ การให้แรงกับตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการให้แรงแบบคลื่น *(Pulse)* กระทำซ้ำเป็นรอบ และในแต่ละรอบตัวอย่างทดสอบจะได้รับแรงกระทำเป็นระยะเวลา 0.1 วินาที สลับกับช่วงเวลาที่ไม่ได้รับแรงเป็นเวลา 0.9 วินาที ในแต่ละตัวอย่างทดสอบจะได้รับการทดสอบทั้งสิ้น 16 ลำดับการทดสอบ โดยเรียงลำดับจาก 0 ถึง 15 ในลำดับที่ 0 ซึ่งแบ่งเป็นการ *Pre-load* ตัวอย่าง โดยใช้ค่า 1000 รอบการทดสอบ แล้วจึงเริ่มการทดสอบในลำดับที่ 1 ถึง 15 ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงค่า *Confining Pressure, Deviator Stress* และ *Contact Load* ตามลำดับการทดสอบ

3.2.3 การทดสอบคลื่นสั่นสะเทือนด้วยวิธี *FFR* ตามมาตรฐาน *ASTM C215-02* เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยการหาความถี่แบบสั่นพ้อง (*Resonant frequency*) ซึ่งเกิดขึ้นภายในตัวอย่างเพื่อนำไปหาความเร็วคลื่นในวัสดุ ความถี่แบบสั่นพ้องสามารถทดสอบได้ 2 ชนิดคือ *Transverse* ใช้ในการคำนวนหา *S-wave* และ *Longitudinal* ใช้สำหรับการหา *P-wave* ดังสมการที่ *1* และ *2* ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบจะมีลักษณะที่แตกต่างออกไป สำหรับ *Transverse* แสดงดังภาพที่ 1*(a)* และ *Longitudinal* แสดงดังภาพที่ 2*(b)* และก่อนติดตั้ง *Accelerometer* จะต้องทำการทาจาระบีเพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างตัวส่งผ่านคลื่นกับตัวอย่างดินซีเมนต์อย่างแนบสนิท หลังจากนั้นทำการเคาะตัวอย่างจำนวน 50 ครั้ง ต่อรูปแบบการทดสอบ

$$V_s = 2Lf_T \quad (1)$$

$$V_p = 2Lf_L \quad (2)$$



ภาพที่ 1 แสดงถึงรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบสำหรับความถี่สั่นพ้อง *(a) Transverse (b) Longitudinal*

3.2.4 การทดสอบ California Bearing Ratio เป็นการทดสอบกำลังการรับน้ำหนักของดินทรายปรับปรุงคุณภาพ เมื่อระยะเวลาบ่มและระยะเวลาแช่น้ำครบตามกำหนด (จำนวน 1 ตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสม) โดยการกดท่อนเหล็กกลมตันมาตรฐาน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว ด้วยอัตราคงที่ 0.05 นิ้วต่อนาที พร้อมกับอ่านค่าน้ำหนักการกดที่

การยุบตัวที่ 0, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.150, 0.200, 0.250, 0.300, 0.400 และ 0.500 นิ้ว แล้วนำไปหาอัตราส่วนเปรียบเทียบกับค่าหน่วยน้ำหนักมาตรฐาน (Standard unit load) ที่ได้จากการทดสอบด้วย Piston ขนาดเดียวกันบนหินคลุกที่บดอัดแน่นที่ความลึกของการยุบตัวเท่ากัน

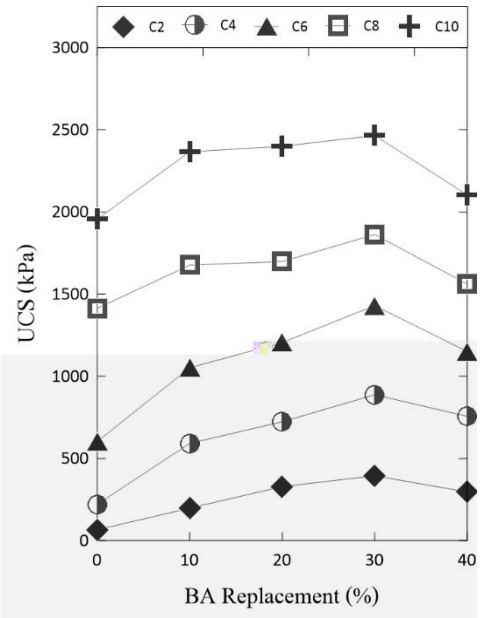
ตารางที่ 1 แสดงถึงปริมาณซีเมนต์และเถ้าก้นเตาในงานวิจัย

ปูนซีเมนต์ (%)	เถ้าก้นเตา (%)	ทราย (%)
2,4,6,8,10	0	100
	10	90
	20	80
	30	70
	40	60
	50	50

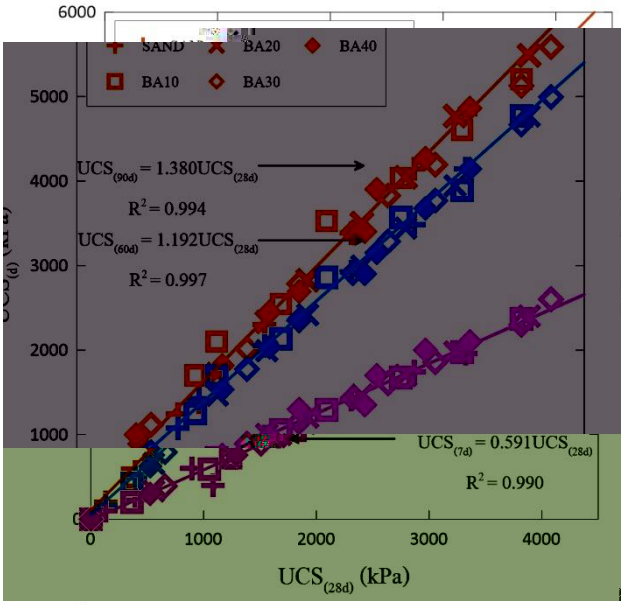
4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

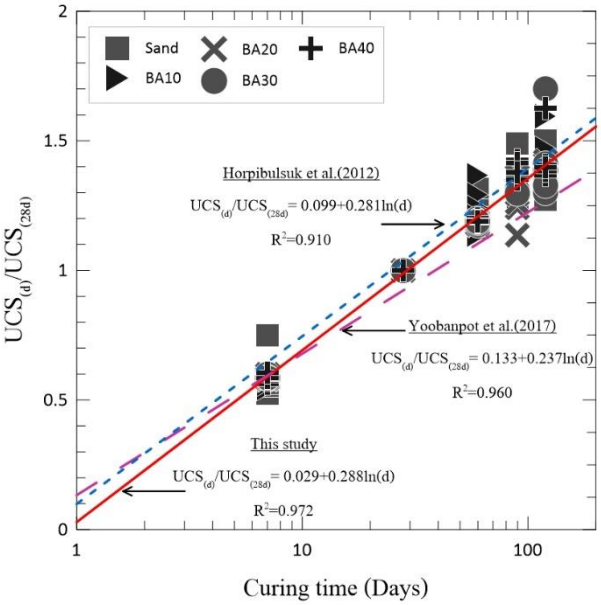
4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินทรายปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้าก้นเตาแสดงดังภาพที่ 2 พบว่าค่ากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์และเถ้าก้นที่เพิ่มขึ้น และค่ากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดจะสูงสุดที่ปริมาณการแทนที่เถ้าก้นเตา 30 เปอร์เซ็นต์ (BA30) และจะลดลงตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นในทุกส่วนผสมซีเมนต์ การเพิ่มขึ้นของเถ้าก้นเตาเป็นการปรับปรุงคุณภาพเชิงกลของดินจะทำให้ดินมีขนาดคละที่ดี เพิ่มความหนาแน่นให้ดินมากขึ้น Rifa'i และคณะ (2009)



ภาพที่ 2 กำลังรับแรงอัดของดินทรายปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้าก้นเตา อายุการบ่ม 7 วัน





ภาพที่ 3(a) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มต่าง ๆ เทียบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม *28* วัน *(b)* สมการความสัมพันธ์การพัฒนากำลังต่ออายุการบ่ม

ภาพที่ 3*(a)* แสดงถึงการพัฒนากำลังของดินทรายปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้าก้นที่อายุการบ่ม 7 60 และ 90 วัน โดยเปรียบเทียบกับค่าของดินทรายปรับปรุงคุณภาพที่อายุการบ่ม 28 วัน จากการศึกษาสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ที่อายุการบ่มต่าง ๆ เทียบกับค่า ที่อายุการบ่ม 28 วันได้ในรูปแบบของระบบสมการเชิงเส้นซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า ของดินทรายปรับปรุงคุณภาพจะมีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงถึงอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มต่าง ๆ ได้ดังแสดงในภาพที่ 3*(b)* แม้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะมีความแตกต่างกันอันเนื่องมาจากปริมาณซีเมนต์หรือเถ้าก้นที่ใช้ในแต่ละสัดส่วน แต่ยังสามารถเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังอัดกับระยะเวลาการบ่มใน

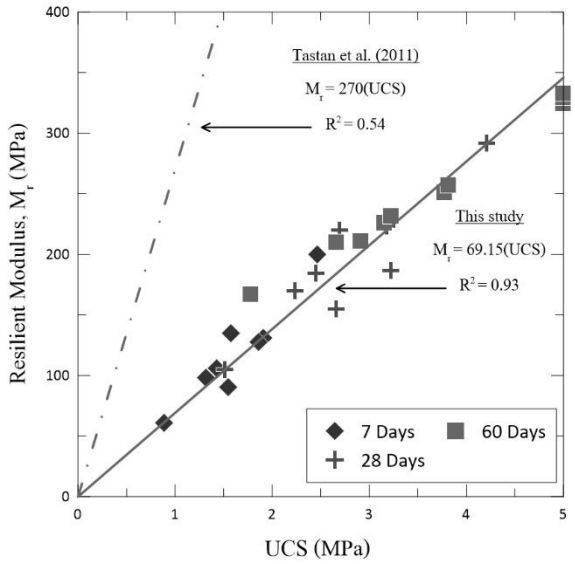
ลักษณะ มาตราส่วนลอการิทึม (*Logarithmic scale)* เพื่อที่จะสามารถอธิบายพฤติกรรมเป็นแบบเส้นตรงได้ดังภาพที่3*(b)* สามารถเสนอเป็นสมการที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของดินทรายปรับปรุงคุณภาพสำหรับงานวิจัยนี้ ที่ระยะเวลาการบ่มใดๆเมื่อทราบค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่ม *28* วัน โดยความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 3

$$\frac{UCS_{(d)}}{UCS_{(28d)}} = 0.029 + 0.277\ln(d) \quad R^2 = 0.97 \qquad (3)$$

โดยที่ $UCS_{(d)}$ คือ กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่มใด ๆ (*kPa*)
$UCS_{(28)}$ คือ กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (*kPa*)
d คือ ระยะเวลาการบ่ม (วัน)

4.2 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว

ค่าโมดูลัสคืนตัว (*M_r*) ตัวของวัสดุ เป็นคุณสมบัติที่วัสดุสามารถคืนตัวได้เมื่อมีแรงมากระทำซ้ำ ๆ โดยลักษณะของวัสดุเมื่อถูกแรงกระทำซ้ำ ๆ เช่น แรงที่เกิดขึ้นบนชั้นโครงสร้างทางเมื่อมีการจราจรวิ่งผ่าน จะเกิดการคืนตัวแต่ไม่สมบูรณ์กล่าวได้ว่าการยืดตัวของวัสดุนั้นจะมีส่วนที่ยืดถาวร (Permanent deformation) ค่าโมดูลัสคืนตัวนี้สามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นเพิ่มที่กระทำในแต่ละรอบ (Deviator Stress, σ_D) และความเครียดที่สามารถคืนกลับได้ตามแนวแกน (Recoverable Axial Strain, ϵ_r)



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสคืนตัว

$$M_{(r)} = 69.15UCS \quad R^2 = 0.93 \qquad (4)$$

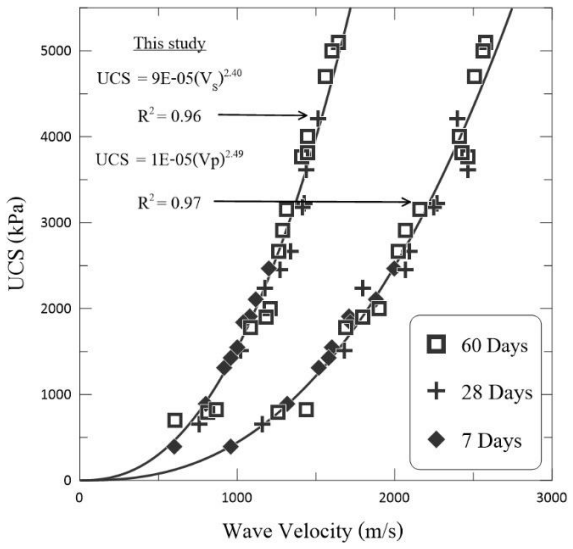
ผลการศึกษาค่าโมดูลัสคืนตัวของดินทรายปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้าก้นเตาเป็นไปตามมาตรฐาน ASSHTO T307-99 โดยทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน พบว่าการพัฒนาค่าโมดูลัสคืนตัวตามปริมาณส่วนผสมและอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นนั้นมีความคล้ายคลึงกับผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (*UCS_d*) กับค่าโมดูลัสคืนตัว (*M_r*) ดังแสดงในภาพที่ 4 จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา Tastan และคณะ (2011); *Kang* และคณะ (2014) ความสัมพันธ์ระหว่าง *UCS_d* กับ *M_r* แสดงอยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษางานวิจัยนี้ แสดงดังสมการที่ 4

4.3 การทดสอบ Free Free resonance

การทดสอบ FRR คือการวัดความถี่ธรรมชาติของการสั่นอิสระของตัวอย่างทดสอบด้วยคลื่น P-wave และ S-wave จากผลการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นกับค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 5 การเพิ่มขึ้นของความเร็วและและกำลังรับแรงอัดมีความสอดคล้องกับอัตราส่วนซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับความเร็วคลื่นที่ได้จากการทดสอบ FFR จะแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการกำลัง (Power function) ดังแสดงในสมการที่ 5 และ 6

$$UCS = 9E\text{-}05V_{(s)}^{2.4} \quad R^2 = 0.96 \qquad (5)$$
$$UCS = 1E\text{-}05V_{(p)}^{2.49} \quad R^2 = 0.97 \qquad (6)$$

โดยที่ *UCS* คือ กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่มใด ๆ (*kPa*)
$V_{(S)}$ คือ ความเร็วคลื่นโซนิคในรูปแบบเฉือน (m/s)
$V_{(p)}$ คือ ความเร็วคลื่นโซนิคในรูปแบบอัด (m/s)



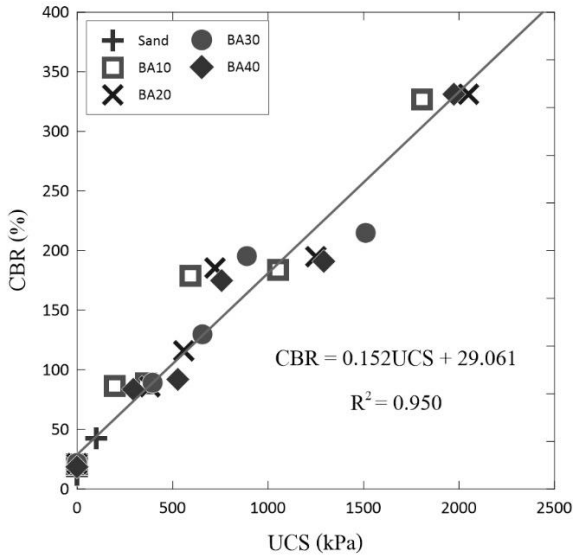
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave กับค่ากำลังรับแรงอัด

4.4 การทดสอบ California Bearing Ratio

ในการออกแบบงานวิศวกรรมทางนิยมใช้การทดสอบ CBR ประเมินความแข็งแรงของวัสดุซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแบกทาน จากผลการศึกษากำลังรับแรงอัดในหัวข้อ 4.1 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่า CBR ดังแสดงในภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับ CBR แสดงอยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้นดังแสดงในสมการที่ 7

$$CBR = 0.152UCS+29.061 \quad R^2=0.93 \qquad (7)$$

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและค่า *CBR* สามารถนำความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ในการทำนายค่า *CBR* ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมในการใช้งานดินทรายปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้าก้นที่อายุการบ่มต่าง ๆ ได้



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและค่า CBR

5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด และ CBR พบว่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินทรายปรับปรุงคุณภาพมีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันที่ปริมาณแทนที่ดินทรายด้วยเถ้าก้นเตา 30 % พบว่าเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงคุณภาพ ปริมาณเถ้าก้นเตาที่มากกว่า 30 % จะส่งผลให้คุณสมบัติต่าง ๆ ลดลง

5.2 จากผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว พบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของดินทรายปรับปรุงคุณภาพมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดในรูปแบบของสมการเชิงเส้น

5.3 จากผลการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Free-free resonance พบว่าค่าความเร็วคลื่น *P-wave* และ *S-wave* ที่ได้จากการทดสอบมีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้นสอดคล้องกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยสามารถหาความสัมพันธ์ได้อยู่ในรูปของสมการกำลัง

เอกสารอ้างอิง

[1] Cadersa, A. S., Seeborun, A. K. and Chan Chim Yuk, A. (2014). "Use of Coal Bottom Ash as Mechanical Stabiliser in Subgrade Soil". Journal of Engineering (United States),

[2] Havanagi, V. G., Sinha, A. K., Mathur, S. (2011). "Design and Stability Analysis of Pond Ash Railway Embankment", In: Indian Geotechnical Society. Indian Geotechnical Conference. Kochchi, India 15-17 December 2011. India.

[3] Horpibulsuk, S., Phojan, W., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A. and Liu, M.D., (2012) "Strength development in blended cement admixed saline clay." Appl. ClaySci., 55: 44–52

[4] Kang X., Kang G.C., Chang K.T. and Ge L. (2014) "Chemically stabilized soft clays for road-base construction" J. Mater. Civ. Eng.

[5] Kaniraj, S. R., Gayathri, V. (2004). "Permeability and Consolidation Characteristics of Compacted Fly Ash", The Journal of Energy Engineering, Vol.130 No.3, pp.18-43.

[6] Kumar, S., Stewart, J. (2003). "Evaluation of Illinois Pulverized Coal Combustion Dry Bottom Ash for Use in Geotechnical Engineering Applications", The Journal of Energy Engineering, Vol.129 No.2, pp.56-45.

[7] Kim, Y.T., B., Prezzi, M., Salgado, R. (2005). "Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.131 No.7, pp.914–924.

[8] Muhunthan, B., Taha, R., Said, J. (2004). "Geotechnical Engineering Properties of Incinerator Ash Mixes", Journal of the Air & Waste Management Association, Vol.54 No.8, pp.985-991.

[9] Pandian, N. S. (2004). "Fly Ash Characterization with Reference to Geotechnical Applications", Journal of Indian Institute of Science, Vol.84 No.6, pp.189- 216.

[10] Rifa'i, N. Yasufuku, K. Omine, and K. Tsuji, "Experimental study of coal ash utilisation for road application on soft soil," in Proceedings of the International Joint Symposium on Geodisaster Prevention and Geoenvironment, Fukuoka, Japan, September 2009.

[11] Singh, R. R., Goyal, N., Kaur, N. (2015). "Fly Ash as an Embankment Material" SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE), Vol.3 No.3, pp.14-16.

[12] Tastan E.O., Edil T.B., Benson C.H. and Aydilek A.H. (2011) "Stabilization of organic soils with fly ash" J. Geotech. Geoenviron. Eng., 137: 819-833

[13] Yoobanpot N., Jamsawang P. and Horpibulsuk S. (2017) "Strength behavior and microstructural characteristics of soft clay stabilized with cement kiln dust and fly ash residue." Appl. Clay Sci., 141: 146-156