

## คุณสมบัติของดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาสำหรับวัสดุงานทาง

### Properties of lateritic soil replaced by bottom ash for highway material

อรทิมา จันทร์สิงห์<sup>1</sup> และ วีรยา ฉิมอ้อย<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

Email address: [ontichajunsing@gmail.com](mailto:ontichajunsing@gmail.com)<sup>1</sup>, [sweeraya@engr.tu.ac.th](mailto:sweeraya@engr.tu.ac.th)<sup>2</sup>

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการนำเถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าในการแทนที่ดินลูกรังสำหรับชั้นรองพื้นทางหรือชั้นพื้นทาง โดยคัดขนาดดินลูกรังตามมาตรฐานรองพื้นทาง ทล.-ม. 205/2532 Type B และ Type D และเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี จังหวัดระยอง สัดส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาของ Type B ที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 และของ Type D ที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยศึกษาคุณสมบัติด้านกายภาพ การบดอัด กำลังรับน้ำหนักด้วยการทดสอบ California Bearing Ratio และกำลังรับแรงเฉือนตรงด้วยการทดสอบ Direct Shear สำหรับคุณสมบัติการบดอัดพบว่าคุณสมบัติความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตามีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตามากขึ้น แต่ค่าความชื้นเหมาะสมเพิ่มขึ้น สำหรับดินทั้งสองชนิด และผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนัก พบว่าเมื่อผสมเถ้าก้นเตาที่สัดส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 ของดิน Type B และที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 50 ของดิน Type D จะให้ค่า CBR สูงสุด โดยมีค่าผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง และการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตามีผลทำให้ค่ามุมเสียดทานภายในและแรงยึดเหนี่ยวมีค่าลดลงไม่มากนักตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าเถ้าก้นเตาสามารถนำมาใช้แทนที่ดินลูกรังสำหรับวัสดุงานทาง

คำสำคัญ: ดินลูกรัง, เถ้าก้นเตา, วัสดุงานทาง, ค่าCBR, การบดอัด

#### Abstract

This research aims to study the use of bottom ash which is a by-product from power generation process as a replacement of lateritic soil for base or sub-base. The grain size distributions of lateritic soil were selected as Type B and C based on the subbase standard of Highway Department. The bottom ash was obtained from BLCP power plant, Rayong. The bottom ash replacement ratio is 10, 20, 30, 40 and 50 percent for Type B and that of 10, 20, 30, 40, 50 and 60 percent for Type D. The physical properties, compaction properties and strength using California Bearing Ratio test and Direct Shear test of lateritic soil and lateritic soil replaced with bottom ash were investigated. It is found that the maximum dry density decreased with the

increasing of the replacement ratio whereas the optimum water content increased with the increasing of the replacement ratio for both types of soil. For the results of CBR test, it was found that when lateritic soil replaced by bottom ash at 30 percent for type B and 50 percent for type D showed the highest CBR values which passed the subbase condition. Moreover, the bottom ash has little effect on internal friction angle and cohesion, both values slightly decreased with the increasing of replacement ratio. It can be concluded that bottom ash can be used as replacement of lateritic soil for highway material.

Keywords: Lateritic Soil, Bottom ash, Highway material, CBR, Compaction

#### 1. คำนำ

เนื่องจากเถ้าลอย เถ้าก้นเตา และยิปซั่ม เป็นผลผลิตจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหิน ซึ่งในปัจจุบันเถ้าลอยสามารถนำมาแทนที่ซีเมนต์ในงานคอนกรีต สำหรับเถ้าก้นเตายังไม่เป็นที่นิยมใช้ด้วยขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ มีความชื้นและความพรุนสูง ซึ่งจะถูกนำไปทิ้งโดยการฝังกลบหรือถ้าจะนำมาใช้งานจะต้องผ่านกระบวนการบดให้ละเอียด ซึ่งทั้งสองกระบวนการทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น แต่ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ยังมีโครงสร้างที่ใช้วัสดุธรรมชาติในก่อสร้าง เช่น คันทาง เขื่อนดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานถนน ในการก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงนั้นต้องใช้วัสดุ หิน ททรายหรือดินลูกรัง ในส่วนโครงสร้างชั้นทางเป็นจำนวนมาก ซึ่งเถ้าก้นเตามีการกระจายขนาดอยู่ในช่วงที่เป็นทราย จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้แทนที่วัสดุธรรมชาติในโครงสร้างชั้นทาง เป็นแนวทางในการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งและเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

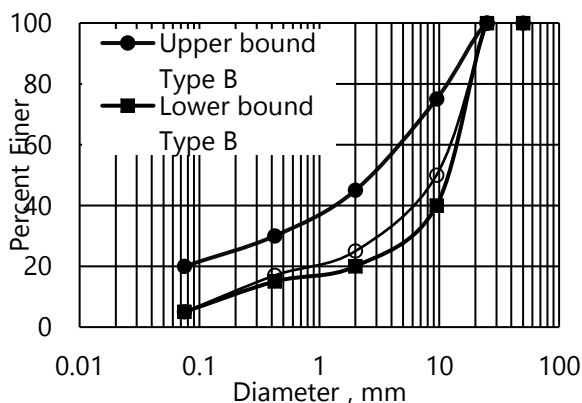
ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยถึงความเป็นไปได้ในการนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นวัสดุในชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางอยู่พอสมควรทั้งการใช้เฉพาะเถ้าก้นเตา (Cabrera, et al., 2014) หรือศึกษาโดยมีวัสดุผสมเพิ่มเช่น หินฝุ่น ซีเมนต์ปูนขาว (ชูศักดิ์, 2556) หรือนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นวัสดุเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังหรือดินเหนียว (กิตติศักดิ์ และ ประทีป, 2556, Balachowski and Sikora, 2013, Cabrera, et al., 2018, ปณิตาภา และ จุฑามาศ, 2561) แต่กียังไม่มีการนำเถ้าก้นเตามาใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงต้องการศึกษาหา

ศึกษาการใช้เถ้ากั้นเตาเป็นสารผสมเพิ่มในการแทนที่หรือปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในโครงการก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง (subbase) หรือชั้นพื้นทาง (base) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เถ้ากั้นเตาในสภาพธรรมชาติในการแทนที่ดินลูกรัง Type B และ Type D ตามมาตรฐานรองพื้นทางวัสดุผสมรวมกรมทางหลวง ทล.-ม. 205/2532 เพื่อเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางหรือชั้นพื้นทาง โดยพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติด้านการบดอัด (Compaction Test) คุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนักด้วยการทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) และคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนด้วยการทดสอบ Direct Shear Test

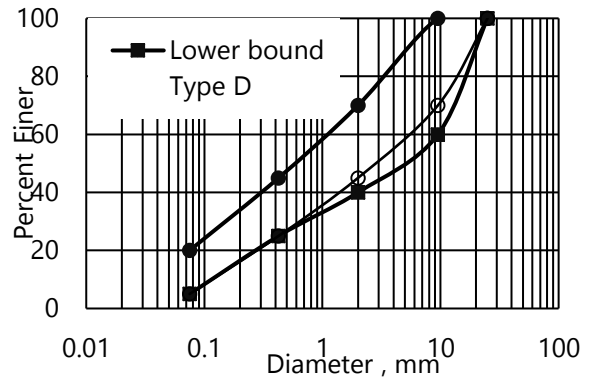
## 2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษาวิจัย

### 2.1 ดินลูกรังและเถ้ากั้นเตา

ตัวอย่างดินลูกรังนำมาจากแหล่งลูกรังจังหวัดสระบุรีมีค่า Liquid Limit เท่ากับร้อยละ 29.5, Plastic Limit เท่ากับร้อยละ 20.76, Plasticity Index เท่ากับร้อยละ 8.74 โดยค่า Liquid Limit และ Plasticity Index ผ่านมาตรฐานรองพื้นทางวัสดุผสมรวม โดยจากมาตรฐาน Liquid Limit ของดิน ไม่เกินร้อยละ 35 และ Plasticity Index ไม่เกินร้อยละ 11 และหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.86 ในงานวิจัยนี้ทำการคัดขนาดดินลูกรังให้เป็นไปตามมาตรฐานรองพื้นทางวัสดุผสมรวมกรมทางหลวง ทล.-ม. 205/2532 Type B และ Type D ดังแสดงในรูปที่ 1 และ รูปที่ 2 ตามลำดับ และจากคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังนำมาวิเคราะห์จำแนกดินด้วยระบบ ASSHTO ( ASTM D-3282 ) พบว่าเป็นดินประเภท A-2-4 ทั้งดิน Type B และ Type D และจำแนกด้วยระบบ USCS (ASTM D-2487) พบว่าดิน Type B เป็นประเภททรวดที่มีขนาดละเอียดและมีดินเหนียว GP-GC (Poorly Graded Gravel with Clay) และ Type D เป็นประเภททรายขนาดละเอียดและมีดินเหนียว SP-SC (Poorly graded sand with clay)



รูปที่ 1 การกระจายขนาดของเม็ดดินวัสดุรองพื้นทาง Type B ตามมาตรฐานรองพื้นทางวัสดุผสมรวมกรมทางหลวง ทล.-ม. 205/2532



รูปที่ 2 การกระจายขนาดของเม็ดดินวัสดุรองพื้นทาง Type D ตามมาตรฐานรองพื้นทางวัสดุผสมรวมกรมทางหลวง ทล.-ม. 205/2532

### ตารางที่ 1 ค่าร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวลที่เลือก	
	Type B	Type D
1"	100	100
3/8"	70	50
เบอร์ 10	45	25
เบอร์ 40	25	17
เบอร์ 200	5	5

ตัวอย่างเถ้ากั้นเตา จากโรงไฟฟ้า BLCF จังหวัดระยอง ประเทศไทย นำมาทดสอบการกระจายขนาดพบว่าโดยส่วนใหญ่ผ่านตะแกรงขนาด 1 นิ้ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เถ้ากั้นเตาที่มีขนาดผ่านตะแกรง 1 นิ้ว เนื่องจากต้องการใช้เถ้ากั้นเตาในสภาพธรรมชาติให้มากที่สุด เถ้ากั้นเตามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.03 และไม่มีความเป็นพลาสติก ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังและเถ้ากั้นเตาโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) แสดงในตารางที่ 2 พบว่าเถ้ากั้นเตาและดินลูกรังมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกอนออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ และมีแคลเซียมออกไซด์น้อยมาก

### ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังและเถ้ากั้นเตา

Oxide	ปริมาณ (ร้อยละ)	
	เถ้ากั้นเตา	ดินลูกรัง
SiO <sub>2</sub>	59.50	79.00
CaO	2.92	0.39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.07	6.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.70	10.90
SO <sub>3</sub>	0.18	-
MgO	0.80	0.45
K <sub>2</sub> O	1.56	1.41
Na <sub>2</sub> O	0.40	-

## 2.2 วิธีการศึกษาและการทดสอบ

### 2.2.1 การเตรียมตัวอย่างดินลูกรังและเถ้าก้นเตาสำหรับการทดสอบการบดอัดและการทดสอบ CBR

เตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านการบดอัดโดยการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test , ASTM D-1557) สำหรับดินลูกรังคำนวณปริมาณดินจากร้อยละผ่านตะแกรงแต่ละที่กำหนดในตารางที่ 1 นำมาผสมให้เข้ากันก่อน รูปที่ 3 แสดงดินลูกรังที่คัดขนาดตามมาตรฐาน Type B และ Type D แล้วจึงเติมน้ำแล้วบดอัดตามการทดสอบมาตรฐาน ในกรณีผสมเถ้าก้นเตาคำนวณปริมาณดินลดลงตามร้อยละการแทนที่ของเถ้าก้นเตาผสมให้เข้ากัน แล้วจึงใส่เถ้าก้นเตาตามปริมาณร้อยละการแทนที่ที่กำหนดในแต่ละกรณีผสมให้เข้ากับดินก่อน แล้วจึงค่อย ๆ เติมน้ำผสมให้เข้ากัน แล้วจึงบดอัดตามการทดสอบมาตรฐาน เนื่องจากเถ้าก้นเตาไม่มีความไวในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นการบดอัดจึงไม่ได้กำหนดเวลา เมื่อได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ( $\rho_{dmax}$ ) และปริมาณความชื้นเหมาะสม ( $W_{opt}$ ) ของแต่ละกรณีแล้ว นำมาเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ CBR ตามมาตรฐาน ASTM D-1883-99 โดยควบคุมความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด และมีความชื้นที่เหมาะสม และทดสอบเฉพาะกรณีไม่เข้าน้ำ



ก) Type B



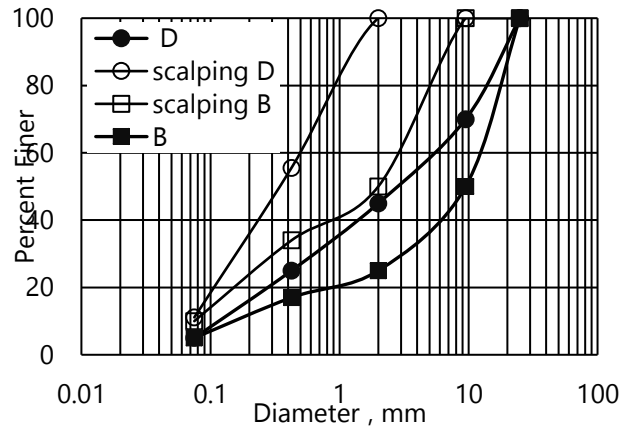
ข) Type D

รูปที่ 3 ตัวอย่างดินลูกรังที่คัดขนาดตามมาตรฐาน Type B และ Type D

### 2.2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test)

เนื่องจากลักษณะของดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดเม็ดใหญ่โดยมีขนาดใหญ่สุดผ่านตะแกรง 1 นิ้ว ซึ่งตามมาตรฐานการทดสอบ Direct Shear ASTM D3080 นั้นกำหนดให้ความสูงของ mold ที่ใช้ในการทดสอบต้องไม่น้อยกว่า 6 เท่าของขนาดใหญ่สุดของเม็ดดิน แต่ความสูงของ mold ที่มีในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ดังนั้นการเตรียมตัวอย่างจึงต้องใช้หลักการ Scalping โดยให้มีการกระจายขนาดเช่นเดียวกับวัสดุต้นแบบ (parallel gradation method) (Verdugo and Hoz, 2006) สำหรับดินลูกรัง Type B กำหนดให้ขนาดสูงสุดผ่านตะแกรง 3/8 นิ้ว และดินลูกรัง Type D กำหนดให้ขนาดสูงสุดผ่านตะแกรงเบอร์ 10 รูปที่ 4 แสดงการกระจายขนาดของดินลูกรัง Type B และ Type D ต้นแบบและจากการ scalping สำหรับเถ้าก้นเตาใช้การกระจายเช่นเดียวกับแต่ละชนิดของดินลูกรังที่จะนำไปแทนที่ โดยเมื่อเตรียมดินที่ผ่านตะแกรงตามที่กำหนด และผสมน้ำตามความชื้นที่กำหนด ทำการบดอัดใน mold โดยควบคุมให้ได้ความหนาแน่นแห้งไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่น

แห้งสูงสุด และความชื้นที่เหมาะสม แล้วนำไปทดสอบโดยกำหนดหน่วยแรงตั้งฉากที่ 25.6 kPa, 51.1 kPa และ 102.3 kPa อัตราเร็วในการเลื่อนตัวอย่างเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยเงื่อนไขการแทนที่เถ้าก้นเตาในการทดสอบ direct shear เป็นร้อยละ 20, 40, และ 50 สำหรับดิน Type B และร้อยละ 20, 40 และ 60 สำหรับดิน Type D

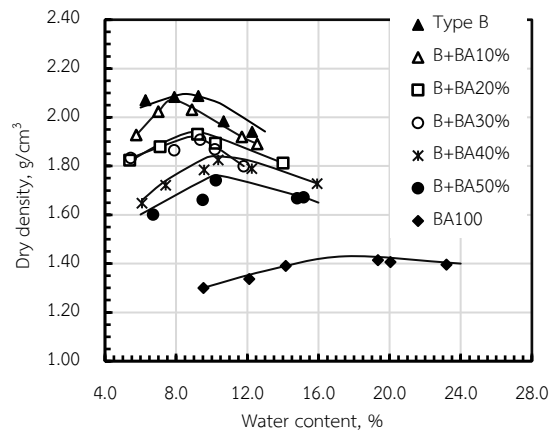


รูปที่ 4 การกระจายขนาดของดินลูกรังต้นแบบเทียบกับการ scalping

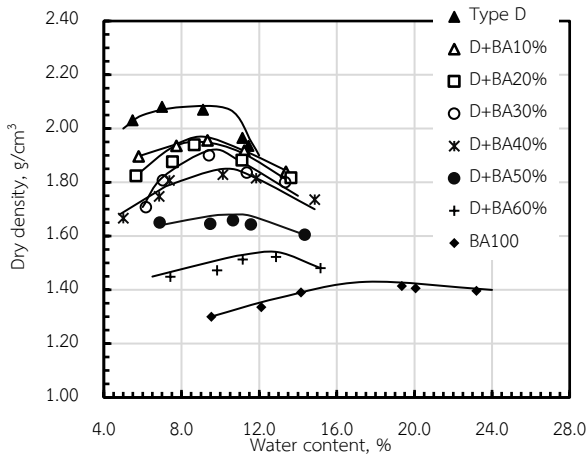
## 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

### 3.1 ผลของปริมาณเถ้าก้นเตาต่อคุณสมบัติด้านการบดอัด

นำเถ้าก้นเตา ดินลูกรัง Type B , Type D , ดิน Type B และ Type D ผสมเถ้าก้นเตา มาทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Compaction) พบว่าดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาทั้ง 2 ประเภทสามารถบดอัดได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 5 และ รูปที่ 6 ตามลำดับ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังทั้ง 2 ประเภท มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ดินด้วยเถ้าก้นเตาดังแสดงในตารางที่ 3 เนื่องจากเถ้าก้นเตาที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าดิน เมื่อเข้าไปแทนที่ดินจึงทำให้ความหนาแน่นน้อยลง แต่ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าก้นเตาที่มีความพรุนมาก ดูดซับน้ำได้ดีกว่าดินลูกรัง จึงทำให้ความชื้นเหมาะสมมีค่ามากขึ้นตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น (Balachowski and Sikora, 2013)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของ ดินลูกรัง Type B ผสมเถ้าก้นเตา



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของ ดินลูกรัง Type D ผสมเถ้ากันเตา

ตารางที่ 3 ความหนาแน่นแห้งสูงสุด และความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังผสมเถ้ากันเตา

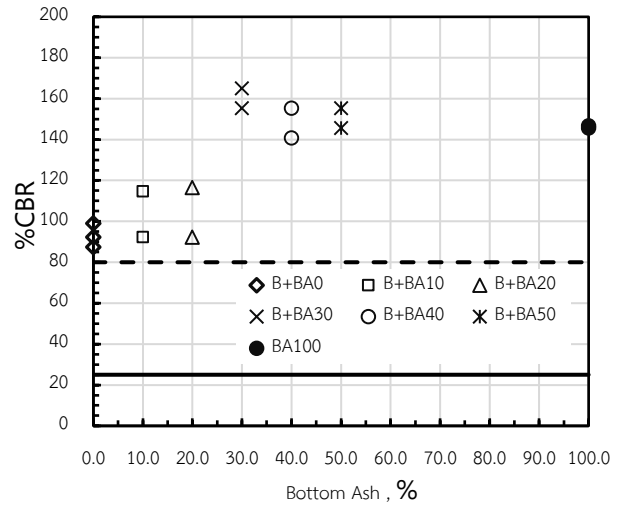
% Bottom Ash	Type B		Type D		Bottom Ash	
	$\rho_{drymax}$ g/cm <sup>3</sup>	$w_{opt}$ %	$\rho_{drymax}$ g/cm <sup>3</sup>	$w_{opt}$ %	$\rho_{drymax}$ g/cm <sup>3</sup>	$w_{opt}$ %
0	2.10	8.7	2.08	10.0	1.43	17.5
10	2.07	8.0	1.97	9.0		
20	1.94	8.9	1.95	9.1		
30	1.92	9.0	1.92	9.5		
40	1.84	10.5	1.85	10.0		
50	1.75	11.0	1.68	10.5		
60	-	-	1.54	13.0		

### 3.2 ผลของปริมาณเถ้ากันเตาต่อคุณสมบัติด้านการรับกำลัง

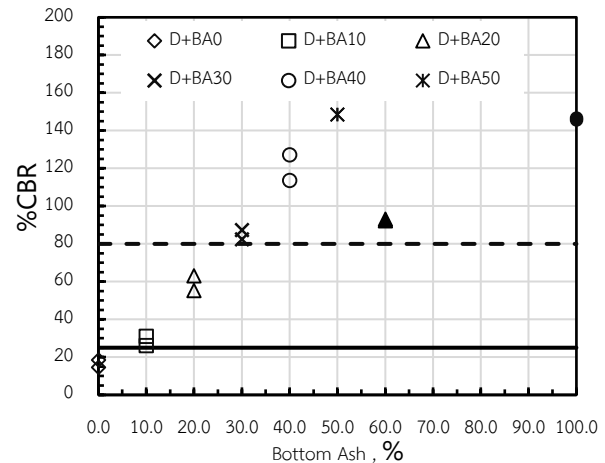
จากการเตรียมตัวอย่างดินลูกรัง เถ้ากันเตา และดินลูกรังทั้ง 2 ประเภท ผสมกับเถ้ากันเตา สำหรับทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนัก พบว่าเมื่อดินลูกรังถูกแทนที่ด้วยเถ้ากันเตา ทำให้คุณสมบัติด้านการรับกำลังดีขึ้น จนถึงจุดหนึ่ง หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง โดยมีแนวโน้มลดลงไปเทียบเท่ากับค่า CBR ของเถ้ากันเตา ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 โดยอัตราส่วนการแทนที่ที่ให้ค่า CBR สูงสุดของดินลูกรัง Type B คือร้อยละ 30 และสำหรับดินลูกรัง Type D คือ ร้อยละ 50

ดินลูกรัง Type B เป็นดินประเภทรวด ค่า CBR ของดินลูกรัง Type B เมื่อแทนที่ด้วยเถ้ากันเตาในปริมาณน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 20) ค่า CBR ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้ากันเตาเพิ่มขึ้นได้ค่า CBR เพิ่มขึ้น โดยค่า CBR ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อปริมาณเถ้ากันเตามากขึ้น และมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่า CBR ของเถ้ากันเตา สำหรับดินลูกรัง Type D เป็นดินประเภทดินทรายทำให้ค่า CBR ของดินลูกรัง Type D มีค่าต่ำเมื่อแทนที่ด้วยเถ้ากันเตา ค่า CBR มีค่าสูงขึ้นจนถึงร้อยละการแทนที่ร้อยละ 50 หลังจากนั้นค่า CBR มีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าเถ้ากันเตาสามารถปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังทั้ง 2 ประเภทได้ แต่ต้องผสมในอัตราส่วนที่

เหมาะสมเพื่อให้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางหรือชั้นพื้นทางได้ (ปณิตากา และ จุฑามาศ, 2561) ซึ่งตามมาตราฐานรองพื้นทางวัสดุผสมรวมกรมทางหลวง ทล.-ม. 205/2532 ได้กำหนดค่า CBR ขั้นต่ำสำหรับวัสดุผสมรวมที่จะสามารถนำมาทำเป็นโครงสร้างชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางได้ที่ CBR เท่ากับ 80% และ 25% ตามลำดับ ดังนั้นสำหรับดินลูกรังทั้งสองประเภทสามารถใช้เถ้ากันเตาในการแทนที่ได้ในช่วงร้อยละ 30 - 50



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และร้อยละเถ้ากันเตา ที่ความชื้นเหมาะสมของดิน Type B ผสมเถ้ากันเตา



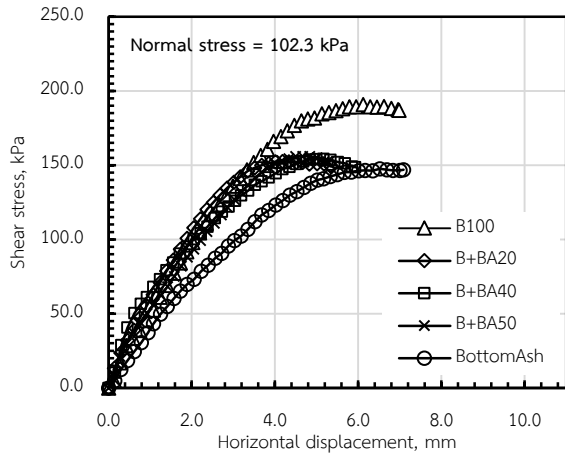
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และร้อยละเถ้ากันเตา ที่ความชื้นเหมาะสมของดิน Type D ผสมเถ้ากันเตา

### 3.3 อิทธิพลของเถ้ากันเตาต่อคุณสมบัติด้านการรับแรงเฉือนตรง

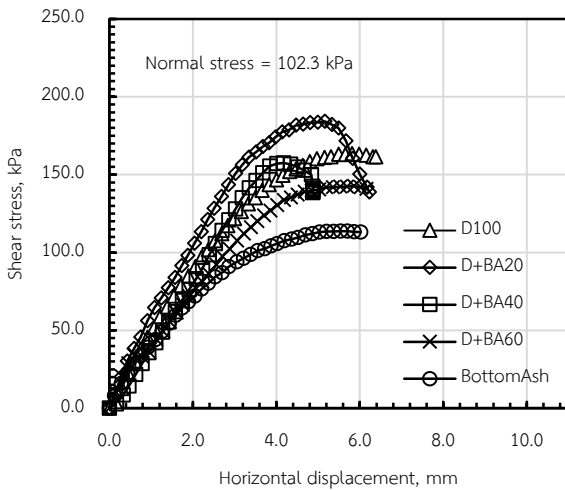
#### 3.3.1 อิทธิพลของเถ้ากันเตาต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือน

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนที่ตามแนวราบจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงของดินลูกรัง Type B และดินลูกรัง Type B แทนที่ด้วยเถ้ากันเตา จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการรับแรงของดินลูกรัง และดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้ากันเตาลักษณะ โดยความสัมพันธ์ไม่ได้แสดงจุดสูงสุดชัดเจน เช่นเดียวกับดินลูกรัง Type D

และดินลูกรัง Type D แทนที่ด้วยดินลูกรังที่มีพฤติกรรมใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress และ normal stress ของตัวอย่างดินลูกรัง Type B ที่ผสมกับเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วนต่าง ๆ



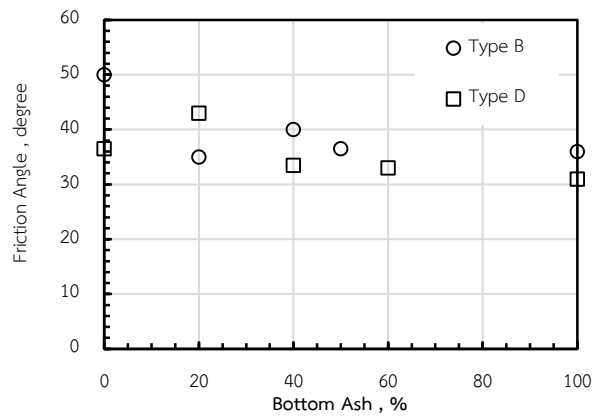
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress และ normal stress ของตัวอย่างดินลูกรัง Type D ที่ผสมกับเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วนต่าง ๆ

### 3.4.2 อิทธิพลของเถ้าก้นเตาต่อค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction Angle, degree)

ค่ามุมเสียดทานภายในของดินลูกรังและดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาทั้งสองประเภทแสดงในตารางที่ 4 สำหรับดินลูกรัง Type B พบว่าการแทนที่เถ้าก้นเตามีผลทำให้ค่ามุมเสียดทานภายในลดลง แต่ปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่ามุมเสียดทานภายในไม่มากนัก โดยมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 40 ดังแสดงในรูปที่ 11 ในขณะที่สำหรับดินลูกรัง Type D พบว่าเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 20 ทำให้ค่ามุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด หลังจากนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาทำให้ค่ามุมเสียดทานลดลง โดยทั้งสองประเภทค่ามุมเสียดทานเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตามีแนวโน้มเท่ากับค่ามุมเสียดทานของเถ้าก้นเตา ดังแสดงในรูปที่ 11

ตารางที่ 4 ค่ามุมเสียดทานภายใน สำหรับเถ้าก้นเตา,ดิน Type B และดิน Type B เมื่อผสมกับเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วนต่าง ๆ

% Bottom Ash	Friction Angle, degree	
	Type B	Type D
0	50.0	36.5
20	35.0	43.0
40	40.0	33.5
50	36.5	-
60	-	33.0
100	36.0	31.0



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในและร้อยละการแทนที่ของเถ้าก้นเตา

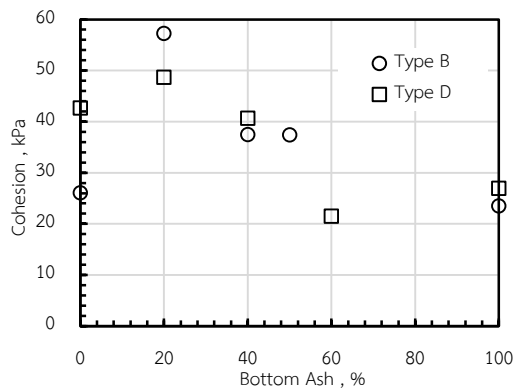
### 3.4.3 อิทธิพลของเถ้าก้นเตาต่อค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion, kPa)

ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดินทั้ง 2 ประเภท แสดงดังตารางที่ 5 สำหรับดินลูกรัง Type B และ Type D เมื่อผสมเถ้าก้นเตาแล้วมีผลทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนการแทนที่ดินด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 20 และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าก้นเตาค่าแรงยึดเหนี่ยวมีแนวโน้มลดลงใกล้เคียงค่าแรงยึดเหนี่ยวของเถ้าก้นเตา ดังแสดงในรูปที่ 12 (ปวเรศ อัครินทร์, 2561)

ตารางที่ 5 ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน สำหรับเถ้าก้นเตา,ดิน Type B และดิน Type B เมื่อผสมกับเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วนต่าง ๆ

% Bottom Ash	Cohesion, kPa	
	Type B	Type D
0	26.1	42.7
20	57.3	48.7
40	37.5	40.7
50	37.4	-
60	-	21.5
100	23.5	27.0





รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินกับร้อยละการแทนที่ของเถ้า  
กันเตา

### บทสรุป

1. เถ้ากันเตาที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติด้านการบดอัดของดินลูกรังที่ทำการคัดขนาดตามมาตรฐานรองพื้นทางวิศวกรรมกรมทางหลวง ทล.-ม. 205/2532 Type B และ Type D ได้ โดยร้อยละการแทนที่เถ้ากันเตาที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง ในขณะที่ความชื้นเหมาะสมเพิ่มขึ้น
2. คุณสมบัติด้านการรับแรงพบว่าเถ้ากันเตามีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด ค่า CBR มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้ากันเตามีค่ามากขึ้น จนสูงสุดที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 สำหรับดินลูกรัง Type B และ ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 50 สำหรับดินลูกรัง Type D ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางได้ และค่า CBR มีแนวโน้มลดลงหลังจากอัตราส่วนดังกล่าวสำหรับดินลูกรังทั้ง 2 ประเภท
3. การผสมเถ้ากันเตามีผลต่อค่ามุมเสียดทานภายใน และค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินไม่มากนัก สำหรับดินลูกรังทั้ง 2 ประเภท ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 2 ค่าจะมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณการแทนที่เถ้ากันเตาเพิ่มขึ้น

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์วัสดุเถ้ากันเตาในการวิจัยทดลอง ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับห้องปฏิบัติการ และ เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำโครงการ และสุดท้ายขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่สนับสนุนทุนการศึกษาของข้าพเจ้า

### เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง “ทล.-ม. 205/2532 มาตรฐานรองพื้นทางวิศวกรรม”  
[ออนไลน์ 7 มิถุนายน 2562],  
[www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs205-32.pdf](http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs205-32.pdf)

กิตติศักดิ์ โชติ และประทีป ดวงเดือน “การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเถ้ากันเตาและปูนขาว” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2556

ชูศักดิ์ ศิริรัตน์ การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเถ้ากันเตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในงานวิศวกรรมธรณีสิ่งแวดลอม งานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 2556

ปณิตาภา พันธุ์อร่าม และจุฑามาศ ยุกครุฑ “การใช้เถ้ากันเตาผสมดินลูกรังสำหรับชั้นรองพื้นทาง” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2561

ปวเรศ เมฆกระจำง และ อัครินทร์ เรืองสมานวงศ์ “พฤติกรรมด้านกำลังของดินลูกรังปรับปรุงด้วยเถ้ากันเตาและเถ้าลอย” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2561

Balachowski and Sikora (2013) ‘Mechanical properties of bottom ash – dredge material mixtures in laboratory tests’ *Studia Geotechnica et Mechanica* 35(3), pp. 3-11.

Cabrera, M., Galvin, A.P., Agrela, F., Carvajal, M.D. and Ayuso, J. (2014) “Characterisation and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures” *Construction and Building Materials*, 58, pp. 234-244.

Cabrera, M., Garcia, J.R., Ayuso, J., Estaire, J., Agrela, F. (2018) “Feasibility of using olive biomass bottom ash in the sub-bases of roads and rural paths” *Construction and Building Materials* 181, pp. 266-275.

Ramon Verdugo and Karem de la Hoz (2006). *Strength and Stiffness of Coarse Granular Soils*. Department of Civil Engineering University of Chile, Santiago, Chile, 16-17 March 2006.