

# การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ดินลูกรังประเภทกรวดสำหรับวัสดุงานทาง

## The Granular Lateritic soil replaced by Bottom Ash for Highway Materials

พสิษฐ์ ตันดูลยกุล<sup>1,\*</sup> และ วีรยา นิมอ้อย<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Pasit Tandulyakul<sup>1,\*</sup> and Weeraya Chimoye<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

\*Corresponding Author E-mail: Pasit.tan@hotmail.com

Received: April 28, 2021 Revised: May 19, 2021 Accepted: May 21, 2021

### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาการนำเถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้ามาใช้ในการแทนที่ดินลูกรังเพื่อเป็นวัสดุทดแทนวัสดุธรรมชาติสำหรับใช้เป็นวัสดุงานทาง โดยใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ผ่านตะแกรง 1 นิ้ว โดยนำมาแทนที่ดินลูกรังที่มีการคัดขนาดตามมาตรฐานวัสดุชั้นรองพื้นทาง ทล.-ม. 205/2532 Type A และ Type C ของกรมทางหลวง อยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 60 โดยมวลดินลูกรังแห้ง จากผลการศึกษาคูณสมบัติการบดอัดของดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาพบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับคุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนัก พบว่าค่า CBR มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 30 หลังจากนั้นค่า ซี บี อาร์ มีค่าสูงขึ้น หากเทียบกับมาตรฐานวัสดุรวมชั้นรองพื้นทาง พบว่าการบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสมมีค่า CBR ผ่านมาตรฐาน และการบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม+2% มีค่า CBR ผ่านมาตรฐานเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตาอยู่ในช่วง ร้อยละ 40 – 60 แต่ไม่ได้ช่วยปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง

**คำสำคัญ:** ดินลูกรัง เถ้าก้นเตา วัสดุงานทาง CBR

### Abstract

The purpose of the study is to investigate the potential of using coal bottom ash (BA) as an aggregate material for subbases in road pavements. The bottom ash from MaeMoh passing 1” sieve was used to replace the Lateritic soil that was sieved into Type A and Type C according to the standard of Department of Highways (DOH), Thailand in the range of 10 – 60% of mass of dry lateritic soil. It is found that the maximum dry density of soil-BA mixtures decreased with increasing BA contents whereas the optimum water content increased. The CBR at optimum water content and optimum water content+2% of both types

of lateritic soil replace with BA decrease with the percentage of replacement up 30% and the CBR increase later. Compare with the DOH standard, the lateritic soil replaced with BA in the range of 40 – 60% pass the standard for subbase material.

**Keywords:** Lateritic Soil, Bottom Ash, Highway Material, CBR

**1. บทนำ**

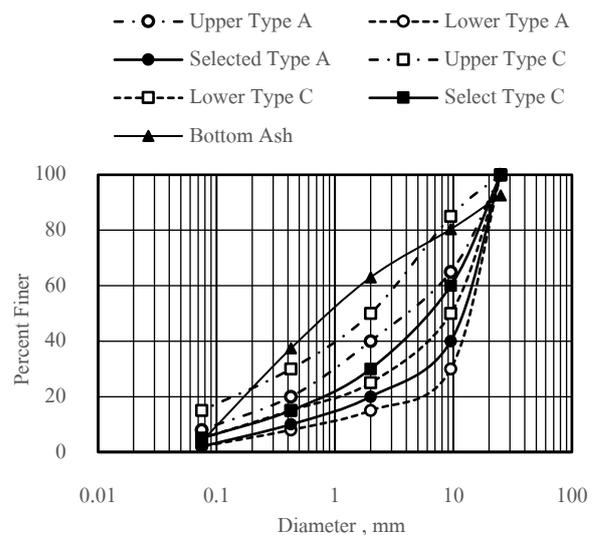
เถ้าก้นเตา เป็นวัสดุผลพลอยได้จำนวนมากที่เหลือจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหิน ส่วนใหญ่จะถูกนำไปทิ้งโดยการฝังกลบ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายและไม่ได้ใช้วัสดุให้เกิดประโยชน์ เนื่องจากเถ้าก้นเตามีอนุภาคไม่เป็นรูปทรงกลม มีความพรุนสูง ค่อนข้างชื้นและทำปฏิกิริยาซึมน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอย ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาที่จะนำเถ้าก้นเตามาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต [1] แต่เนื่องจากเถ้าก้นเตามีเม็ดหยาบต้องมีการบดให้ละเอียดมากพอจึงจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและต้องทำให้แห้งซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีต [2] แต่ก็ยังใช้แทนที่ได้น้อย จึงทำให้ไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายนัก ในทางวิศวกรรมโยธาวัสดุธรรมชาติคือ ดินลูกรังก็เป็นวัสดุก่อสร้างหลักสำหรับงานทาง และเนื่องจากระบบการขนส่งทางบก คือ ถนน เป็นระบบการขนส่งหลักของประเทศไทย จึงจำเป็นต้องใช้ดินลูกรังจำนวนมาก ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการนำวัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม เช่น เถ้าไม้เบญจพรรณ เถ้าแกลบ หรือนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ เช่น รีไซเคิลแอสฟัลต์ รีไซเคิลคอนกรีต โดยนำมาแทนที่ดินลูกรัง หรือนำมาปรับปรุงคุณภาพดินจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก รวมถึงมีศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาในวัสดุงานทางด้วย [3, 4, 5, 6, 7 และ 8] แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริง เถ้าก้นเตาจึงยังเป็นวัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมที่ต้องกำจัดทิ้ง จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาแทนที่ดินลูกรัง Type A และ Type C ซึ่งเป็นดินประเภทกรวด โดยมีร้อยละการแทนที่ของเถ้าก้นเตาโดยมวลร้อยละ 10 – 60 เพื่อให้ครอบคลุมทั้งในแง่ของการใช้เถ้าก้นเตาเพื่อลดปริมาณการ

ใช้วัสดุธรรมชาติ หรือการใช้เถ้าก้นเตาในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง

**2. วัสดุและวิธีการวิจัย**

**2.1 ตัวอย่างดินลูกรังและเถ้าก้นเตา**

ดินลูกรังที่ใช้มีค่าขีดจำกัดเหลว (LL) เท่ากับ 29.5 ซึ่งน้อยกว่า 35 ขีดจำกัดพลาสติก (PL) เท่ากับ 20.8 และดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับ 8.7 ซึ่งน้อยกว่า 11 แสดงว่าผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง ทล.-ม. 205/2532 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.82 โดยมีการคัดขนาดให้เป็นไปตามมาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง Type A และ Type C ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งร้อยละการกระจายขนาดที่เลือกจะใกล้เคียงกับ โดยเมื่อจำแนกดินตามระบบ USCS พบว่า ดิน Type A เป็นดินประเภท GP (Poorly Graded Gravel) และดิน Type C เป็นประเภท GW-GC (Well-graded gravel with clay)



**รูปที่ 1** การกระจายขนาดของดินลูกรังและเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะไม่มีความเป็นพลาสติก เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและไม่มีความเหนียว มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.7 เมื่อนำไปทดสอบการกระจายของขนาดผล พบว่าเถ้าก้นเตามีขนาดในช่วงที่เป็นทรายเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 1 จึงเลือกใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงขนาด 1 นิ้ว เนื่องจากต้องการใช้เถ้าก้นเตาในสภาพธรรมชาติเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเตรียมเถ้าก้นเตาหากมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง เมื่อจำแนกตามระบบ USCS พบว่าเถ้าก้นเตาเป็นประเภท SP (Poorly Graded Sand)

เมื่อนำเถ้าก้นเตาแทนที่ดินลูกรังพบว่าค่าขีดจำกัดเหลวและค่าดัชนีพลาสติกลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตา เนื่องจากเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียวทำให้ดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตามีค่าดัชนีพลาสติกลดลง [7]

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังและเถ้าก้นเตาโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) แสดงในตารางที่ 1 พบว่าดินลูกรังมีองค์ประกอบหลัก คือ  $\text{SiO}_2$  ในขณะที่เถ้าก้นเตามีองค์ประกอบหลักคือ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งใกล้เคียงกับเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ แต่มีความไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าเนื่องจากเถ้าลอยมีขนาดใหญ่และมีความพรุนสูง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังและเถ้าก้นเตา

สารประกอบ ออกไซด์	ปริมาณ (ร้อยละ)	
	เถ้าก้นเตา	ดินลูกรัง
$\text{SiO}_2$	59.50	79.00
$\text{CaO}$	2.92	0.39
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6.07	6.29
$\text{Al}_2\text{O}_3$	25.70	10.90
$\text{MgO}$	0.80	0.45
$\text{K}_2\text{O}$	1.56	1.41

## 2.2 การทดสอบการบดอัดและการทดสอบ CBR

เมื่อคัดขนาดดินลูกรังตามมาตรฐาน Type A และ Type C แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2 นำไปทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test, ASTM D-

1557) สำหรับตัวอย่างที่มีการแทนที่เถ้าก้นเตา คำนวณปริมาณดินลดลงตามร้อยละการแทนที่ของเถ้าก้นเตา แล้วใส่เถ้าก้นเตาตามปริมาณร้อยละการแทนที่ที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ในแต่ละกรณี ผสมให้เข้ากับดินก่อน ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นค่อย ๆ เติมน้ำผสมให้เข้ากัน แล้วจึงบดอัดตามมาตรฐาน เนื่องจากเถ้าก้นเตาไม่มีความไวในการเกิดปฏิกิริยา จึงไม่ได้กำหนดเวลาในการบดอัด เมื่อได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ( $\rho_{dmax}$ ) และปริมาณความชื้นเหมาะสม ( $W_{opt}$ ) ของแต่ละกรณีแล้ว นำมาเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ CBR ตามมาตรฐาน ASTM D-1883-99 โดยควบคุมความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดและมีความชื้นที่ความชื้นเหมาะสม และความชื้นเหมาะสม+2% และทดสอบกรณีไม่แช่น้ำ สำหรับการทดสอบแบบแช่น้ำทดสอบเฉพาะบางกรณีที่มีค่า CBR กรณีไม่แช่น้ำผ่านมาตรฐาน โดยการทดสอบ CBR ในแต่ละกรณีทำการทดสอบอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง



ก) ดินลูกรัง Type A



ข) ดินลูกรัง Type C



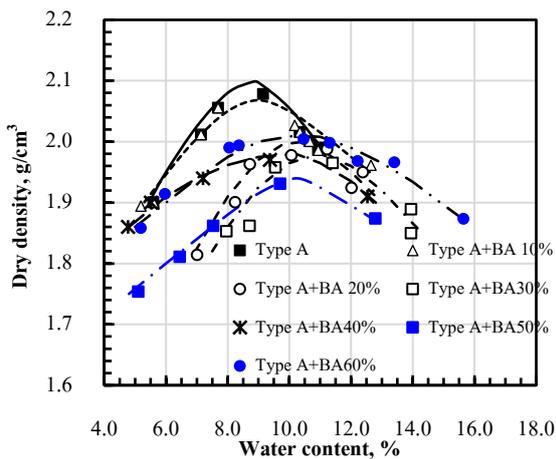
ค) ดินลูกรัง Type C ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 40

รูปที่ 2 ดินลูกรังและดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตา

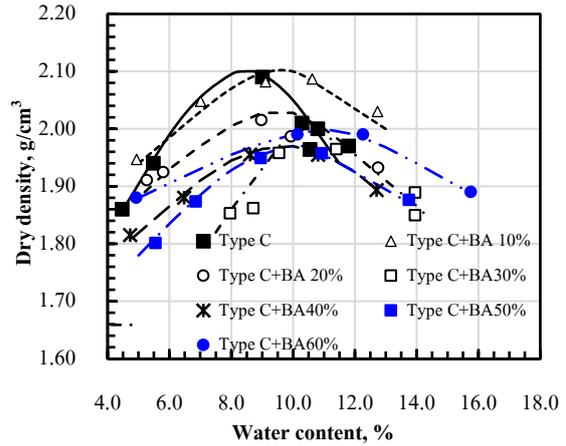
### 3. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

#### 3.1 คุณสมบัติด้านการบดอัด

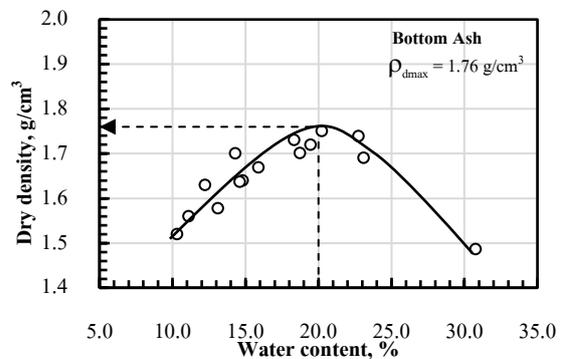
เมื่อนำดินลูกรังที่คัดขนาดตามมาตรฐาน Type A และ Type C และดินลูกรังทั้งสองประเภทแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตามาทดสอบคุณสมบัติด้านการบดอัด โดยดัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Compaction) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้นของดินตามมาตรฐานทั้ง 2 ประเภทแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ จากความสัมพันธ์พบว่า ดินลูกรัง Type A และ Type C สามารถบดอัดได้ดีกว่าเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา โดยเส้นโค้งของการบดอัดสำหรับดินลูกรังล้วนมีความชันมากกว่าดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา โดยเฉพาะเมื่อมีการแทนที่เถ้าก้นเตามากขึ้นทำให้เส้นโค้งการบดอัดมีลักษณะแบนแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งเปลี่ยนแปลงได้ไม่มากนักสำหรับเถ้าก้นเตาเมื่อทดสอบการบดอัดพบว่าค่าความหนาแน่นสูงสุดต่ำกว่าดินลูกรัง และมีปริมาณความชื้นเหมาะสมสูงกว่าดินลูกรัง ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลูกรัง เถ้าก้นเตาและดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 ความหนาแน่นแห้งและความชื้นของดินลูกรัง Type A และดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา



รูปที่ 4 ความหนาแน่นแห้งและความชื้นของดินลูกรัง Type C และดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา

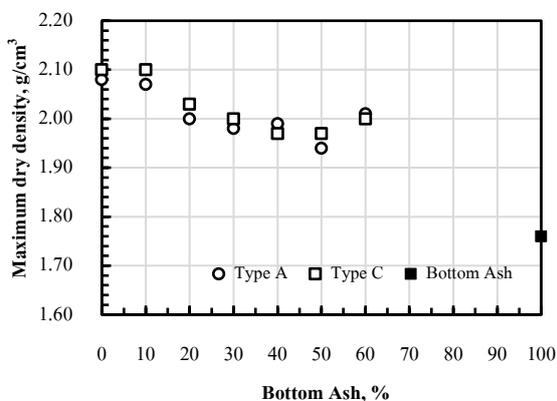


รูปที่ 5 ความหนาแน่นแห้งและความชื้นของเถ้าก้นเตา

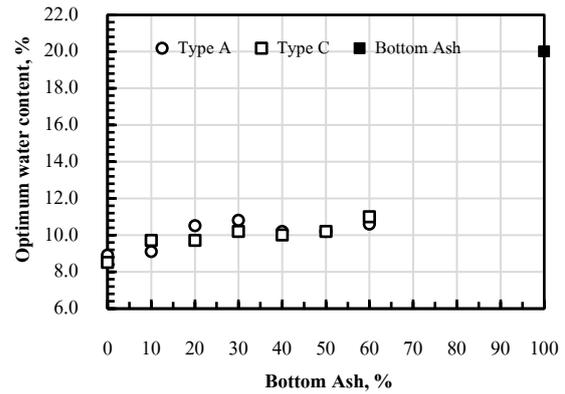
การแทนที่เถ้าก้นเตามีผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงตามร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังมีค่าเพิ่มขึ้นตามร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นสำหรับดินลูกรังทั้งสองประเภท เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนและมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าดินเมื่อเข้าไปแทนที่ดินลูกรังจึงทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6 ในขณะที่เถ้าก้นเตาสามารถดูดซึมน้ำได้ดีทำให้ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่ามากขึ้นตามร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น [9] ดังแสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นเหมาะสมของดินลูกรัง เถ้าก้นเตา และดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา

ชนิดของวัสดุ กัลดเลือก	% BA	ความ หนาแน่น แห้งสูงสุด (g/cm <sup>3</sup> )	ความชื้น เหมาะสม (%)
Type A	0	2.08	8.9
Type A + BA(10)	10	2.07	9.1
Type A + BA(20)	20	2.00	10.5
Type A + BA(30)	30	1.98	10.8
Type A + BA(40)	40	1.99	10.2
Type A + BA(50)	50	1.94	10.2
Type A + BA(60)	60	2.01	10.6
Type C	0	2.10	8.5
Type C + BA(10)	10	2.10	9.7
Type C + BA(20)	20	2.03	9.7
Type C + BA(30)	30	2.00	10.2
Type C + BA(40)	40	1.97	10.0
Type C + BA(50)	50	1.97	10.2
Type C + BA(60)	60	2.00	11.0
เถ้าก้นเตา		1.76	20.0



รูปที่ 6 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตา

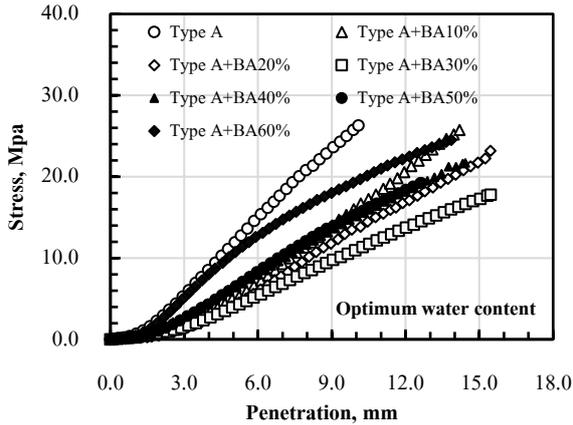


รูปที่ 7 ความชื้นเหมาะสมกับร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตา

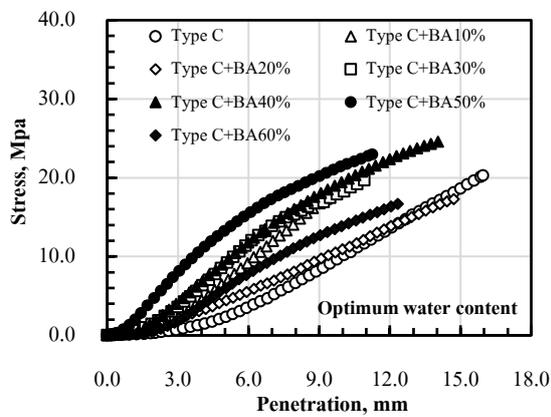
### 3.2 ค่า CBR

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมของดินลูกรัง Type A และดินลูกรัง Type A แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตากรณีความชื้นเหมาะสม พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้นทำให้ความชันลดลง ซึ่งแสดงว่ากำลังรับน้ำหนักของดินลูกรังมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 30 หลังจากนั้นกำลังรับน้ำหนักดีขึ้น โดยเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 60 มีความชันของหน่วยแรงใกล้เคียงกับดินลูกรัง Type A ส่วนดินลูกรัง Type C กำลังรับน้ำหนักของดินก่อนข้างต่ำ เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาทำให้กำลังรับน้ำหนักดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งแสดงว่าอิทธิพลของเถ้าก้นเตาขึ้นอยู่กับกำลังรับน้ำหนักของดินลูกรังเริ่มต้น หากกำลังรับน้ำหนักของดินลูกรังเองมีค่าสูง การแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาไม่ได้ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนัก แต่หากดินลูกรังเริ่มต้นมีกำลังรับน้ำหนักที่ไม่ดีนัก เถ้าก้นเตาสามารถปรับปรุงคุณภาพด้านกำลังรับน้ำหนักได้ [9]

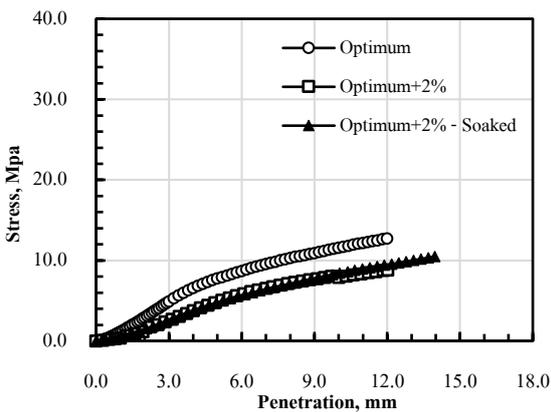
กรณีบดอัดที่ความชื้นเหมาะสม+2% พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมเป็นไปในลักษณะเดียวกับกรณีบดอัดที่ความชื้นเหมาะสม แต่ค่ากำลังรับน้ำหนักมีค่าลดลงเนื่องจากความชื้นเริ่มต้นในการบดอัดเพิ่มขึ้น สำหรับเถ้าก้นเตาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมที่ความชื้นเหมาะสมมีกำลังรับน้ำหนักดีกว่าเมื่อบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม+2% แต่อย่างไรก็ดีเมื่อเห็นว่าเถ้าก้นเตามีกำลังรับน้ำหนักใกล้เคียงกับกรณีไม่แช่น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมของดินลูกรัง Type A แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา

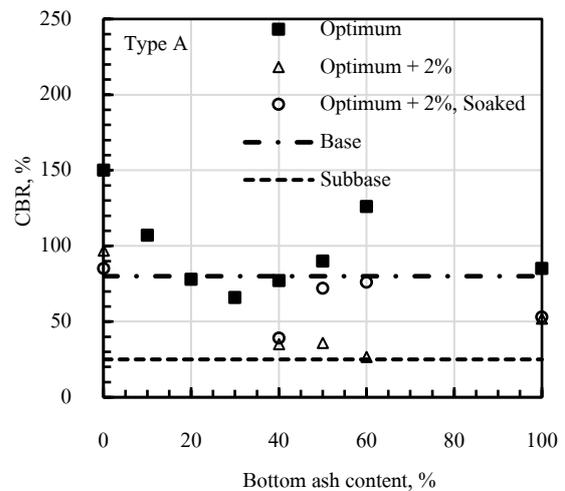


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมของดินลูกรัง Type C แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมของเถ้าก้นเตา

จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจมสามารถหาค่า CBR ของดินลูกรัง เถ้าก้นเตา และดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาได้ ดังแสดงในตารางที่ 3 จากตารางพบว่าสำหรับดินลูกรัง Type A เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาแล้วทำให้ค่า CBR ลดลง เมื่อร้อยละของการแทนที่น้อยกว่า 30 หลังจากนั้นค่า CBR จะมีค่าเพิ่มขึ้น กรณีบดอัดที่ความชื้นเหมาะสม แต่สำหรับกรณีบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม +2% ค่า CBR มีค่าน้อยกว่ากรณีบดอัดที่ความชื้นเหมาะสม เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นในการบดอัดเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักลดลง และค่า CBR ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อร้อยละการแทนที่ตั้งแต่ร้อยละ 40 - 60 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานรองพื้นทางที่กำหนดค่า CBR ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า ดินลูกรัง Type A แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาที่ร้อยละ 40 - 60 มีค่า CBR ผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง โดยมีค่า CBR มากกว่าร้อยละ 25 แม้ว่า จะบดอัดที่ความชื้นเหมาะสม+2% โดยหากสามารถควบคุมความชื้นในการบดอัดให้อยู่ในช่วงความชื้นเหมาะสมที่ร้อยละการแทนที่ 50 และ 60 มีค่า CBR ที่สามารถผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางได้ โดยมีค่า CBR มากกว่าร้อยละ 80 (ดังแสดงในรูปที่ 11) ดังนั้นสำหรับดินลูกรังตามมาตรฐาน Type A ซึ่งเป็นดินลูกรังที่มีมาตรฐานดีสามารถใช้เถ้าก้นเตามาแทนที่เพื่อลดปริมาณการใช้วัสดุธรรมชาติสำหรับชั้นรองพื้นทางได้



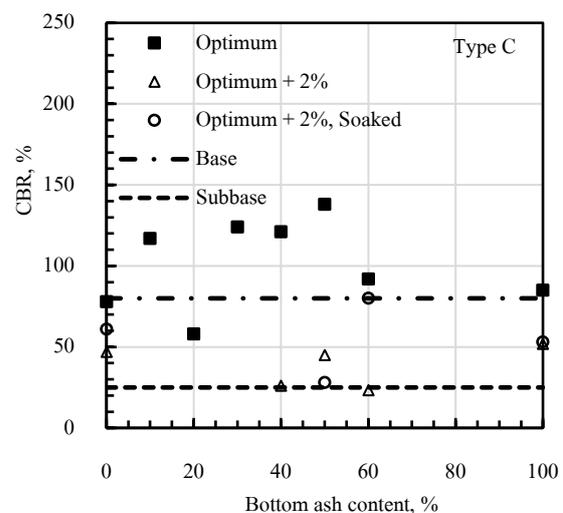
รูปที่ 11 ค่า CBR ของดินลูกรัง Type A กับร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตา

ตารางที่ 3 ค่า CBR ของดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา

Type	อัตราส่วน แทนที่ เถ้าก้นเตา	ค่า CBR, %		
		Unsoaked $W_{opt}$	Unsoaked $W_{opt}+2\%$	Soaked $W_{opt}+2\%$
A	0	150	97	85
	10	107	-	-
	20	78	-	-
	30	66	-	-
	40	77	35	39
	50	90	36	72
	60	126	27	76
C	0	78	47	61
	10	117	-	-
	20	58	-	-
	30	124	-	-
	40	121	26	-
	50	138	45	28
	60	92	23	80
BA	100	85	52	53

สำหรับดินลูกรัง Type C ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาแสดงในรูปที่ 12 พบว่า ค่า CBR ของดินลูกรัง Type C เมื่อพิจารณากรณีความชื้นเหมาะสมและกรณีความชื้นเหมาะสม+2% ค่า CBR เพิ่มขึ้นตามร้อยละเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตามากกว่าร้อยละ 30 และมีค่าลดลงเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 60 โดยมีค่า CBR ใกล้เคียงกับค่า CBR ของเถ้าก้นเตาด้าน เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาในสัดส่วนที่เหมาะสม เถ้าก้นเตาซึ่งมีการกระจายขนาดเป็นทรายสามารถเข้าไปแทรกกระหว่างช่องว่างระหว่างกรวดของดินลูกรัง นอกจากนี้เถ้าก้นเตามีความเปราะเมื่อถูกบดอัดทำให้มีการแตกหัก ทำให้การกระจายขนาดของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาละเอียดขึ้น ทำให้ดินแน่นขึ้นมีอัตราส่วนช่องว่างน้อยลง [9] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตามากเกินไป ทำให้อัตราส่วนของอนุภาคในช่วงขนาดของทรายมีค่ามากกว่าทำให้ค่า CBR ลดลง

กรณีของดินลูกรัง Type C เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาในช่วงร้อยละ 10 – 50 มีค่า CBR มากกว่าร้อยละ 25 ผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง แต่หากสามารถควบคุมความชื้นของการบดอัดในช่วงความชื้นเหมาะสม จะมีค่า CBR มากกว่าร้อยละ 80 สามารถผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางได้ที่ร้อยละการแทนที่ 30 – 60 ดังแสดงในรูปที่ 12 สำหรับดินลูกรังที่มีกำลังรับน้ำหนักต่ำ เถ้าก้นเตาสามารถปรับปรุงคุณภาพด้านกำลังรับน้ำหนักได้ในอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสม [10]



รูปที่ 12 ค่า CBR ของดินลูกรัง Type C กับร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตา

#### 4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ดินลูกรังสรุปได้ว่า

1. คุณสมบัติด้านการบดอัด โดยบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาพบว่าดินลูกรัง Type A และ C ที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 0 – 50 ค่าความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น
2. คุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนัก โดยการทดสอบ CBR ของดินลูกรังและดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 – 60 พบว่า สำหรับดินลูกรัง

Type A เมื่อบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม ค่า CBR มีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่เถ้ากั้นเตาที่เพิ่มขึ้นจนถึงอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 หลังจากนั้นค่า CBR มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ดินลูกรัง Type C เมื่อบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม ค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามร้อยละการแทนที่เถ้ากั้นเตาที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่า CBR สูงสุดเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้ากั้นเตาเท่ากับ 50 ในกรณีบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม+2% พบว่าค่า CBR มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม

3. สำหรับดินลูกรังทั้งสองประเภท หากเทียบค่า CBR กับมาตรฐานวัสดุมวลรวมชั้นรองพื้นทาง พบว่าสำหรับดินลูกรัง Type A ร้อยละการแทนที่เถ้ากั้นเตาอยู่ในช่วง ร้อยละ 40 – 60 เช่นเดียวกับดินลูกรัง Type C ทั้งนี้หากต้องการใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ต้องควบคุมความชื้นในการบดอัดให้อยู่ในช่วงความชื้นเหมาะสม โดยสำหรับดินลูกรัง Type A ร้อยละการแทนที่ในช่วงร้อยละ 50 – 60 ส่วนดินลูกรัง Type C ร้อยละการแทนที่ในช่วงร้อยละ 40 – 50

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบพระคุณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์วัสดุเถ้ากั้นเตาในการศึกษาวิจัย และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับห้องปฏิบัติการ และ เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Jaturapitakkul and R. Cheerarot, "Use of Ground Bottom Ash as a Pozzolan Material in Concrete," Research and Development Journal, Vol. 15, No. 2, pp. 1-8, 2003.
- [2] Thailand Concrete Association (TCA), "Manual for using Bottom Ash replacement fine Aggregates of Concrete," 2016.
- [3] M. Cabrera, A.P. Galvin, F. Agrela, M.D. Carvajal and J. Ayuso, "Characterisation and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures", Construction and Building Materials, Vol. 58, pp. 234-244, 2014.
- [4] M. Cabrera, J.R. Garcia, J. Ayuso, J. Estaire and F. Agrela, "Feasibility of using olive biomass bottom ash in the subbases of roads and rural paths" Construction and Building Materials, Vol. 181, pp. 266-275, 2018.
- [5] L. Balachowski and Z. Sikora "Mechanical properties of bottom ash – dredge material mixtures in laboratory tests", Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. 35, No.3, pp. 3-11, 2013.
- [6] K. Chot and P. Daungduen, "Improvement of lateritic soil by bottom ash and lime", Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand, 2013.
- [7] N. Sukbangnop and C. Atsawaratanajinda, "Stabilization of Lateritic Soil by Bottom Ash", Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand, 2019.
- [8] P. Panidapa and C. Yokkhrut, "The use of bottom ash mixed with lateritic soil for subbase", Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand, 2019.
- [9] O. Junsing and W. Chimoye, "Properties of lateritic soil replaced by bottom ash for highway material", The 25<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering, 15 – 17 July 2020, pp. GTE13-1-GTE13-6, 2020.
- [10] T.H.Y. Htun, P. Julnipitawong, W. Chimoye and S. Tangtermsirikul, "Use of Bottom Ash as a Subbase Material for Pavement", The 15th International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing (iSAINLP 2020) and The International Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (AIoT 2020), November 18–20, Bangkok, Thailand, 2020.