

การเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพการบดอัดในพื้นที่ขนาดเล็ก โดยการวิเคราะห์พลังงานการบดอัดในห้องปฏิบัติการ และในสนาม Optimizing Field Compaction Quality in Small-Scale Areas through Laboratory and Field Compaction Energy Analysis

กนกพร กุสดิษฐ์¹ ช่อธรรม ศรีนิล^{2,*} และ ณัฐพล กองสุวรรณ³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: chortham.sr@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ทางเท้าเป็นโครงสร้างที่ต้องคำนึงถึงความสะดวกและความปลอดภัยของผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันอาจเกิดขึ้นตามระยะเวลาอันเนื่องมาจากการรั่วซึมของน้ำ การเกิดโพรงในดิน และการบดอัดวัสดุฐานที่ไม่ได้คุณภาพ ปัจจุบันมีการศึกษาการส่งผ่านพลังงานการบดอัดเพื่อควบคุมคุณภาพการบดอัดในสนามสำหรับเครื่องจักรขนาดใหญ่ แต่ในพื้นที่ขนาดเล็ก ผู้ก่อสร้างมักใช้เครื่องตบหน้าดินขนาดเล็กแบบควบคุมมือและอาศัยประสบการณ์ส่วนตัวในการบดอัด การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพการบดอัดในสนาม โดยวิเคราะห์พลังงานการบดอัดทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม เพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่ใช้ในชั้นทางของทางเท้า รวมถึงเสนอแนวทางการใช้พลังงานการบดอัดเชิงปริมาตรในการควบคุมประสิทธิภาพการบดอัดของเครื่องจักรที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยในอนาคตควรมีการพัฒนาสมการอย่างง่ายที่เชื่อมโยงพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกับพลังงานที่ส่งผ่านไปยังดิน เพื่อลดความซับซ้อนของการคำนวณและเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพการบดอัดในสนาม

คำสำคัญ: การบดอัด, พลังงานการบดอัด, การทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน, ทางเท้า

Abstract

Sidewalks must consider user convenience and safety, but differential settlement may occur due to water infiltration, cavity, and inadequate base compaction. Studies on energy transfer during compaction focus on large machinery, while small-scale areas rely on manual compactors and experience. This study aims to improve field compaction quality control by analyzing compaction energy in laboratory and field settings to determine optimal conditions for sidewalk materials. It proposes using volumetric compaction energy to assess different compactors.

Future work should develop a simplified equation linking machine parameters to transmitted soil energy, reducing computational complexity and enhancing quality control.

Keywords: Compaction, Compaction Energy, Differential Settlement, Sidewalk

1. บทนำ

ทางเท้าเป็นสิ่งก่อสร้างเพื่ออำนวยความสะดวกสำหรับคนเดินเท้าซึ่งต้องคำนึงถึงความสะดวกสบาย และความปลอดภัยของผู้ใช้งานเป็นหลัก เช่น สภาพพื้นผิว ความสม่ำเสมอของพื้นผิว เป็นต้น จากการสังเกตสภาพของทางเท้าโดยทั่วไปพบว่า เมื่อผ่านการใช้งานตามระยะเวลา และการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศต่างๆ ทางเท้าจะเกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างผิวทาง และความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ทางเท้า (รูปที่ 1) ซึ่งสาเหตุการทรุดตัวนั้นอาจเกิดจากการรั่วซึมของน้ำในพื้นที่ [1] การเกิดโพรงในดิน และการบดอัดดินใต้ผิวพื้นทางเดินที่ไม่ได้คุณภาพ หรือไม่สามารถควบคุมความหนาแน่นแห้งของการบดอัด และปริมาณความชื้นในการบดอัดให้ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดในการบดอัดของดินชนิดต่าง ๆ การบดอัดดิน คือการให้แรงทางกลกับดินทำให้เม็ดดินอยู่ชิดกันมากที่สุดเมื่อปริมาณความชื้นในดินคงที่ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการก่อสร้างโครงสร้างดิน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ลดการทรุดตัวในอนาคต เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดิน และลดความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดินซึ่งสามารถป้องกันการไหลของน้ำผ่านโครงสร้างดิน [2] ดังนั้นการบดอัดดินซึ่งเป็นเทคนิคการก่อสร้างที่ทำได้สะดวก และค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดิน และช่วยลดความเสียหายของโครงสร้างดินได้หากผู้ก่อสร้างสามารถควบคุมเงื่อนไขการบดอัดในสนาม เช่น ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัด ความชื้นของดินขณะบดอัด และระดับพลังงานการบดอัด ตามที่กำหนดจากห้องปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปัจจัยที่ใช้ในการควบคุมเพื่อให้การส่งผ่านของพลังงานบดอัดจากเครื่องบดอัดไปยังวัสดุชั้นทางอย่างมีประสิทธิภาพในการบดอัดในสนามประกอบด้วย จำนวนการวิ่งผ่านของรถบดอัด, ความหนาของชั้นวัสดุที่ถูกบดในแต่ละครั้ง ความถี่ของเครื่องจักรบดอัดแบบสันสะเทือน และความเร็วในการบดอัด [3] ซึ่งในปัจจุบันมีการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับการส่งผ่านของพลังงานไปยังดินเพื่อควบคุมคุณภาพการบดอัดในสนามของเครื่องจักรบดอัดดินขนาดใหญ่ [4] เช่น การศึกษาอิทธิพลของความเร็ว และจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดต่อความแน่นแข็งในสนามของวัสดุชั้นดินลูกรังที่เหมาะสมในทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ในงานทาง [5] และการพัฒนาดัชนีการสอบตรวจสอบคุณภาพการบดอัดแบบสันสะเทือนของคอนกรีตบดอัดขณะก่อสร้างแบบทันทีโดยใช้หน่วยพลังงานการบดอัด ซึ่งประกอบด้วยหน่วยพลังงานการบดอัดเชิงปริมาตร และหน่วยพลังงานการบดอัดเชิงพื้นที่ เปรียบเทียบกับการหาค่าความหนาแน่นในสนามด้วยวิธีนิวเคลียร์เพื่อใช้ควบคุมคุณภาพการบดอัดในสนาม [6-7] เป็นต้น อย่างไรก็ตามในพื้นที่จำกัดขนาดเล็ก เช่น ทางเท้า ผู้ก่อสร้างมักใช้เครื่องตบหน้าดินผิวเรียบขนาดเล็กทำงานด้วยมือแบบสันสะเทือนในการปรับพื้นผิวดิน และบดอัดแน่น ซึ่งแม้ปัจจุบันจะมีการออกมาตรฐานถนน ทางเดิน และทางเท้า เช่น กรมส่งเสริมการปกครองส่วนท้องถิ่น กระทรวงมหาดไทย [8] ได้กำหนดมาตรฐานขนาดของวัสดุ คือดินลูกรังหรือหินคลุก และความแน่นของการบดอัดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแน่นแบบมาตรฐาน (AASHTO T99) [9] และแนวทางการออกแบบทางเดินทางเท้าในต่างประเทศ [10-11] เป็นต้น อย่างไรก็ตามผู้ก่อสร้างส่วนมากยังคงอาศัยประสบการณ์ของผู้ก่อสร้างเองในการบดอัดชั้นดินด้วยเครื่องตบหน้าดินผิวเรียบขนาดเล็กทำงานด้วยมือแบบสันสะเทือน โดยขาดการควบคุมมาตรฐานของวัสดุที่นำมาใช้ ความหนาแน่นแห้ง และความชื้นของดินขณะบดอัด

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ 1) ศึกษาการควบคุมเงื่อนไขการบดอัดดินในพื้นที่ขนาดเล็กด้วยเครื่องตบหน้าดินผิวเรียบสันสะเทือนแบบบังคับมือ สำหรับวัสดุมวลรวมที่นิยมใช้เป็นชั้นทางในงานบดอัดทางเท้า คือ ดินในที่ หวายหยาบ และหินคลุกโดยวิเคราะห์เปรียบเทียบพลังงานการบดอัดแบบพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ และ 2) เสนอแนวทางในการควบคุมการบดอัดดินในสนามของวัสดุแต่ละชนิดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยกำหนดจำนวนเที่ยวการบดอัด และปริมาณความชื้นของการบดอัดที่เหมาะสม



รูปที่ 1 ลักษณะความเสียหายของผิวทางเท้าที่เกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน

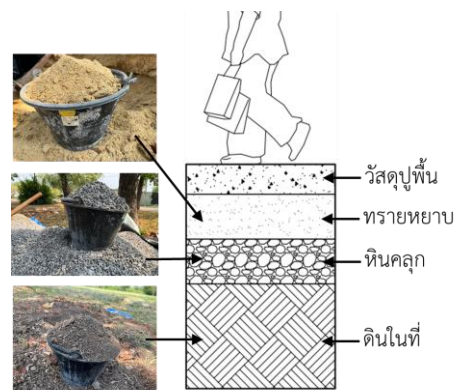
2. วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

2.1 วัสดุบดอัดฐานทางเท้า

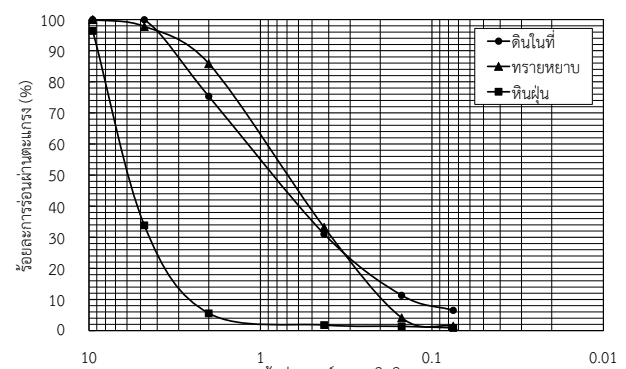
วัสดุที่ใช้ในการศึกษาเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นชั้นฐานทางเท้า ประกอบด้วย ดินในที่ หวายหยาบ และหินคลุก ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจากการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรง (AASHTO T27) [12] มีขนาดผลแสดงดังรูปที่ 3

2.2 เครื่องจักรบดอัดทางเท้า

เครื่องจักรที่ใช้ในการบดอัดชั้นฐานทางเท้าในสนาม คือเครื่องตบหน้าดินผิวเรียบขนาดเล็กทำงานด้วยมือแบบสันสะเทือน (รูปที่ 4ก) ทำงานด้วยระบบส่งกำลังมูลี่ และสายพาน ขนาดความกว้างและยาวของแผ่นตบ 400 มม. x 500 มม. ซึ่งเป็นขนาดทั่วไปของเครื่องมือที่ใช้สำหรับการบดอัดดินในพื้นที่ที่มีขนาดจำกัด น้ำหนักรวมเครื่องยนต์ 70 กิโลกรัม แรงม้าเครื่องยนต์ขนาด 5.5 แรงม้า วัสดุรองรับการสันสะเทือน 7 ตัน มีความเร็วในการสันสะเทือน 5,000 ครั้งต่อนาที ความเร็วในการเคลื่อนที่แนะนำอยู่ในช่วง 15-20 เมตรต่อนาที จากการทดลองการบดอัดวัสดุพบว่า เครื่องสามารถส่งพลังงานการบดอัดได้ดีในความหนาของชั้นบดอัดไม่เกิน 7.5 เซนติเมตร



รูปที่ 2 วัสดุชั้นฐานทางเท้า ประกอบด้วย ดินในที่ หวายหยาบ และหินคลุก



รูปที่ 3 ขนาดผลของดินทดสอบ ประกอบด้วย ดินในที่ หวายหยาบ และหินคลุก

2.3 อุปกรณ์การทดสอบการหาความหนาแน่นแห้งของดินบดอัด

การศึกษานี้ใช้การทดสอบการบดอัดดินแบบพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ (รูปที่ 4ข) และการทดสอบหาความหนาแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทรายแทนที่ (AASHTO T191) [13] ในการหาความหนาแน่นของวัสดุบดอัดในห้องปฏิบัติการ และในสนาม ตามลำดับที่ระดับพลังงานการบดอัดต่างๆ



รูปที่ 4 อุปกรณ์การบดอัดดิน ก) เครื่องตบหน้าดินผิวเรียบขนาดเล็กทำงานด้วยมือแบบสันสะเทือน และ ข) การบดอัดดินแบบพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน และผลการทดสอบ

ขั้นตอนการดำเนินงานการศึกษาพลังงานการบดอัดของวัสดุบดอัดฐานทางเท้า คือ ดินในที่ ทรายหยาบ และหินคลุก ประกอบด้วย 1) การทดสอบการส่งผ่านพลังงานของการบดอัดดินแบบพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาเส้นโค้งการบดอัดของวัสดุแต่ละชนิดที่พลังงานการบดอัดต่างๆ และ 2) การทดสอบความหนาแน่นของดินในแปลงสนามทดสอบขณะบดอัด การทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการ และในสนามจะถูกนำมาวิเคราะห์พลังงานการบดอัดในห้องปฏิบัติการ และในสนามเพื่อเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพการบดอัดในพื้นที่ขนาดเล็กต่อไป

3.1 การทดสอบการส่งผ่านพลังงานของการบดอัดดินแบบพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ

ในการศึกษานี้พิจารณาการศึกษาการส่งผ่านของพลังงานในการบดอัดแบบพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการตั้งแต่ดินที่มีสถานะเริ่มต้นซึ่งเป็นดินหลวม (ระดับพลังงานน้อยกว่าระดับพลังงานตามมาตรฐานวิธีการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (AASHTO T99)) [9] จนถึงสถานะของดินแน่น (ระดับพลังงานตามมาตรฐานวิธีการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (AASHTO T180)) [14] เมื่อหน่วยพลังงานในการบดอัดดินเชิงปริมาตรของการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน และสูงกว่ามาตรฐาน คือ 594 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร และ 2,695 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยหน่วยพลังงานในการบดอัดดินเชิงปริมาตร (E_c) ในหน่วยกิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$E_c = \frac{mghN_BN_L}{V} \quad (1)$$

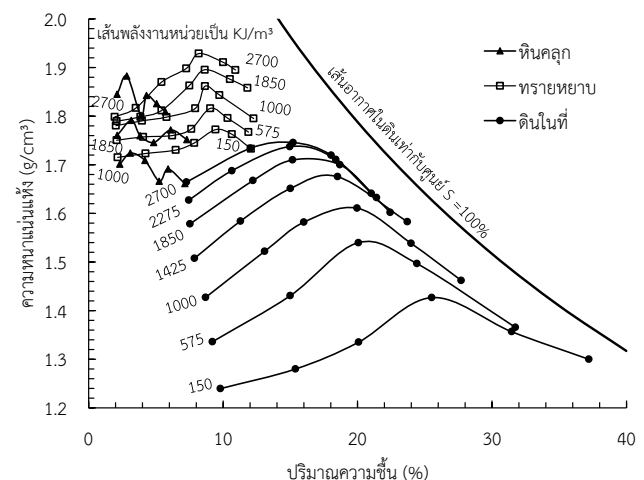
เมื่อ m คือ มวลของค้อนบดอัด (กิโลกรัม), g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตร/วินาที²), h คือ ระยะตกกระแทกของค้อนบดอัด (เมตร), N_B คือ จำนวนการตกกระแทกของค้อนใน 1 ชั้นการบดอัด (ครั้ง/ชั้น), N_L คือ จำนวนชั้นการบดอัด และ V คือ ปริมาตรของแบบบดอัด (ลูกบาศก์เมตร) เจื่อนไขการบดอัดที่ใช้ในการศึกษา และหน่วยพลังงานในการบดอัดดินเชิงปริมาตรที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เจื่อนไขการบดอัดดินแบบพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ และหน่วยพลังงานบดอัดเชิงปริมาตร

กรณี	เจื่อนไขการบดอัด					
	m (กิโลกรัม)	h (เมตร)	N_L (ชั้น)	V (ลูกบาศก์เมตร)*	N_B (ครั้ง/ชั้น)	E_c (กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร)
1	4.54	0.457	5	0.0021	56	2700
2	4.54	0.457	5	0.0021	47	2275
3	4.54	0.457	5	0.0021	38	1850
4	4.54	0.457	5	0.0021	29	1425
5	4.54	0.457	5	0.0021	21	1000
6	2.50	0.305	5	0.0021	33	594
7	2.50	0.305	5	0.0021	8	150

หมายเหตุ: * ในการทดสอบใช้แบบบดอัดที่มีความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบ 116 มิลลิเมตร และ 152 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ดำเนินการบดอัดดินแบบพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการของวัสดุดินในที่ ทรายหยาบ และหินคลุก ที่ระดับพลังงานต่างๆ และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และปริมาณความชื้นบดอัดที่ระดับพลังงานต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5 โดยจากเส้นโค้งการบดอัดสามารถสรุปร้อยละปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ระดับพลังงาน 594 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร และ 2695 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเทียบเท่ากับหน่วยพลังงานในการบดอัดดินเชิงปริมาตรของการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน และสูงกว่ามาตรฐาน ดังตารางที่ 2



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และปริมาณความชื้นบดอัดที่ระดับพลังงานต่างๆ ของวัสดุฐานทางเท้าจากการทดสอบการบดอัดดินแบบพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุบดอัดในห้องปฏิบัติการที่ระดับพลังงานต่างๆ

ชนิดของดิน	ระดับพลังงาน 594 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร		ระดับพลังงาน 2695 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร	
	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
ดินในที่	20.0	1.540	14.5	1.750
ทราย	9.0	1.815	8.2	1.930
หินคลุก	-	-	3.0	1.880

3.2 การสร้างแปลงทดสอบ และแนวทางการทดสอบความหนาแน่นของดินในสนาม

การสร้างแปลงทดสอบ การเตรียมดินก่อนการบดอัด และแนวทางการทดสอบความหนาแน่นของดินในสนามมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 การเตรียมแปลงทดสอบ และการบดอัดดินในสนาม

3.2.1 การเตรียมแปลงทดสอบ

เตรียมแปลงทดสอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 0.5 เมตร และยาว 4 เมตร และขุดหน้าดินที่มีวัชพืชออกลึกประมาณ 15 เซนติเมตร จำนวน 2 แปลง โดยแปลงที่ 1 ใช้สำหรับศึกษาการบดอัดในสนามของดินในที่ และทรายหยาบ และแปลงที่ 2 ใช้สำหรับศึกษาการบดอัดในสนามของดินในที่ และหินคลุก

3.2.2 การเตรียมดินบดอัด

เตรียมดินบดอัดในที่โดยขุดพลิกดินเดิม ตากให้แห้งในอากาศ และตีให้แตก่วน โดยให้ความหนาแน่นของชั้นดินที่เตรียมสำหรับบดอัด 7.5 เซนติเมตร เนื่องจากได้มีการทดสอบในสนามแล้วว่าเครื่องตบดินผิวเรียบแบบสันสะท้อนที่ใช้ซึ่งเป็นขนาดทั่วไปที่ใช้สำหรับการบดอัดดินในพื้นที่ที่มีขนาดจำกัด สามารถส่งพลังงานการบดอัดได้ดีในความหนาดังกล่าว ถ้าความหนาแน่นดินบนอัดมากเกินไปจะทำให้เครื่องตบดินส่งผ่านพลังไปไม่ถึงตลอดความลึก

3.2.3 ความชื้นการบดอัด

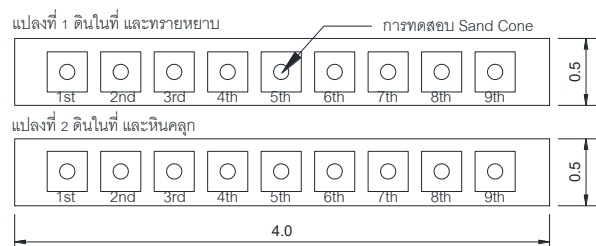
พรมน้ำลงดินให้สม่ำเสมอ และคลุกเคล้าดินให้เข้ากันทั้งแปลงทดสอบตามปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจากการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ โดยในการศึกษานี้กำหนดปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินในที่ คือ 20% อย่างไรก็ตามในการทดสอบทางผู้ศึกษาได้ใช้ปริมาณน้ำที่มากกว่าปริมาณที่เหมาะสมประมาณ 5% ทั้งนี้เนื่องจากขณะบดอัดตามจำนวนเที่ยวความชื้นจะค่อยๆลดลงตามเวลา และผู้ศึกษาต้องหยุดการบดอัดและดำเนินการทดสอบความหนาแน่นในสนามเป็นช่วงๆ

3.2.4 การบดอัดและตรวจสอบความหนาแน่นในสนาม

ใช้เครื่องตบดินแบบเรียบบดอัดดินในอัตราเร็วคงที่ในช่วง 8-16 เมตร/วินาที ขึ้นกับชนิดของดิน โดยในครั้งที่ 1 ให้บดอัดดินประมาณ 1 - 2 เที่ยว ขึ้นกับความสามารถในการแน่นตัวของดินแต่ละชนิด แล้วจึงทำการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นของดินในสนามในตำแหน่งที่ 1 โดยวิธีการแทนที่ด้วยทราย และตรวจสอบปริมาณความชื้นของดินขณะบดอัด

3.2.5 การทดสอบเพื่อหาจำนวนเที่ยวบดอัดที่เหมาะสม

เมื่อทดลองหาความหนาแน่นของดินในสนามครั้งที่ 1 แล้วเสร็จให้ทำการบดอัดดินด้วยเครื่องตบดินแบบเรียบให้ถึงจำนวนเที่ยวที่กำหนด และทำการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นของดินในสนามในตำแหน่งต่อไป แสดงดังแผนภาพการทดสอบในรูปที่ 7 โดยทำการบดอัดดิน และทดสอบความหนาแน่นในสนามจนกว่าความหนาแน่นของดินในสนามจะเพิ่มขึ้นน้อย หรือคงที่จึงหยุดทดสอบ โดยระหว่างการทดสอบอาจมีการพรมน้ำเพิ่มเติมหากสังเกตว่าดินบดอัดมีลักษณะที่แห้งเกินไปแล้วทำให้ดินแตกขณะบดอัด



รูปที่ 7 ผังการทดสอบความหนาแน่นของดินในสนาม

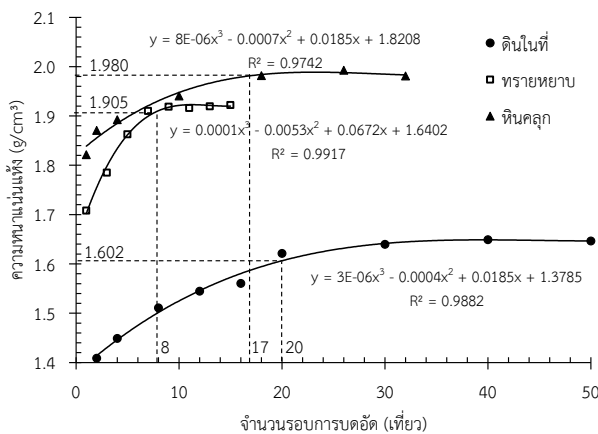
3.2.6 การทดสอบการบดอัดในดินชนิดต่างๆ

เมื่อทำการทดสอบดินในที่ของแต่ละแปลงเรียบร้อยแล้วให้เพิ่มชั้นการบดอัดชั้นที่สองเป็นทรายหยาบสำหรับแปลงที่ 1 และ หินคลุกสำหรับแปลงที่ 2 บนชั้นดินบดอัดในที่จากขั้นตอนการทดสอบก่อนหน้า โดยปริมาณความชื้นเหมาะสมที่เลือกใช้ของทรายหยาบ และหินคลุก คือ 9% และ 5% ตามลำดับ และดำเนินการตามข้อ 3.2.3 ถึง ข้อ 3.2.5

4. การวิเคราะห์พลังงานการบดอัดในห้องปฏิบัติการ และในสนาม

4.1 การวิเคราะห์จำนวนเที่ยวการบดอัด และความหนาแน่นของดินบดอัดในสนาม

จากการทดสอบความหนาแน่นของดินบดอัดในสนามที่จำนวนเที่ยวการบดอัดที่พิจารณา จึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งในสนาม และจำนวนเที่ยวการบดอัดของดินในทรายหยาบ (บดอัดบนชั้นดินบดอัดในที่) และหินคลุก (บดอัดบนชั้นดินบดอัดในที่) ได้แสดงดังรูปที่ 8 เมื่อสร้างเส้นแนวโน้ม และสมการของความสัมพันธ์สามารถคาดการณ์จำนวนเที่ยวการบดอัดด้วยเครื่องตบดินผิวเรียบแบบสันสะท้อนที่ใช้ซึ่งเป็นขนาดทั่วไปที่ใช้สำหรับการบดอัดดินในพื้นที่ที่มีขนาดจำกัดของวัสดุแต่ละชนิดที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ที่สามารถบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห้งที่สูงที่สุดแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งสามารถใช้เส้นแนวโน้มในการคาดการณ์จำนวนเที่ยวการบดอัดของวัสดุที่นิยมใช้ในการสร้างชั้นพื้นทางของทางเท้านี้ เป็นแนวทางในการบดอัดในสนามเบื้องต้นได้ โดยทรายหยาบใช้จำนวนเที่ยวในการบดอัดน้อยที่สุด



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งในสนาม และจำนวนเที่ยวการบดอัดของดินในทรายหยาบ และหินคลุก

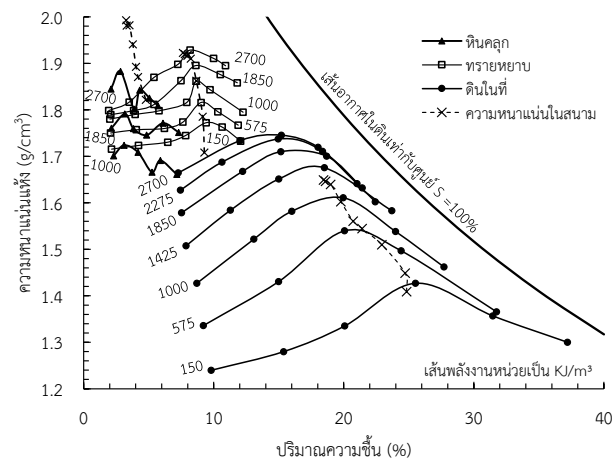
ตารางที่ 3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุบดอัดในห้องปฏิบัติการที่ระดับพลังงานต่างๆ

ชนิดของดิน	จำนวนเที่ยวการคาดการณ์	ความหนาแน่นแห้งคาดการณ์
ดินในที่	20	1.602
ทรายหยาบ	8	1.905
หินคลุก	17	1.980

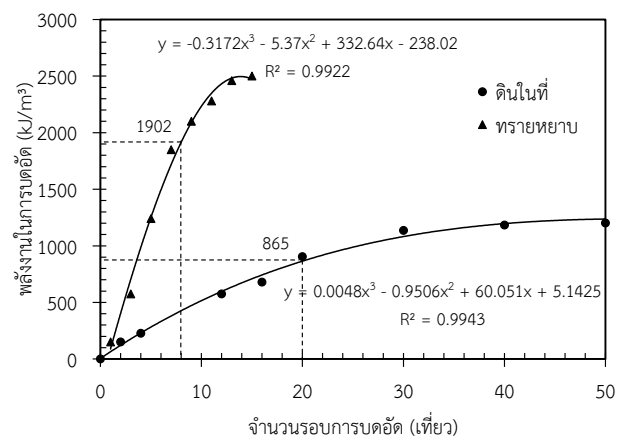
เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และปริมาณความชื้นที่ตรวจสอบระหว่างบดอัดในสนามไปพิจารณาในเส้นโค้งการบดอัดที่ระดับพลังงานต่างๆจากห้องปฏิบัติการ (รูปที่ 9) ทำให้ผู้ก่อสร้างสามารถพิจารณาและควบคุมความชื้นขณะบดอัดให้อยู่ในเงื่อนไขที่เหมาะสมของงานก่อสร้างนั้นๆ ที่สอดคล้องกับพลังงานบดอัดในขณะนั้น เช่นโครงสร้างดินที่มีโอกาสสัมผัสกับน้ำควรควบคุมให้การบดอัดอยู่ในช่วงความชื้นการบดอัดที่มากกว่าหรือเท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสม ไม่ใช่เพียงการควบคุมความหนาแน่นแห้งเพียงปัจจัยเดียว นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าความชื้นของการบดอัดที่ตรวจพบในสนามที่ค่อยๆลดลงเนื่องจากการระเหยของน้ำในดิน ยังอยู่ในช่วงของความชื้นการบดอัดที่เหมาะสมในระดับพลังงานนั้นๆ ซึ่งให้เห็นว่าการใส่ปริมาณน้ำในการบดอัดที่มากกว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมประมาณ 3-5% จะ

ช่วยให้ดินสามารถบดอัดได้แน่นเต็มที่ในระหว่างที่ค่อยๆเพิ่มพลังงานการบดอัด หรือจำนวนเที่ยวการบดอัด

เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการใช้ผลการวิเคราะห์ข้างต้นในการควบคุมคุณภาพการบดอัด จึงได้ทำการทดสอบการบดอัดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห้งในสนามที่ต้องการ โดยยกตัวอย่างกรณีการบดอัดทรายหยาบให้มีค่าความหนาแน่นแห้งในสนามที่ต้องการ 1.91 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อพิจารณาเส้นโค้งการบดอัด (รูปที่ 5) จะสามารถทราบปริมาณน้ำที่เหมาะสม ที่ความหนาแน่นแห้งที่กำหนด ที่ระดับพลังงานหนึ่งคือ 8% และเมื่อพิจารณาจากเส้นแนวโน้มซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนรอบการบดอัด พบว่าต้องใช้การบดอัด 8 รอบ เมื่อทำการบดอัดในสนามที่ปริมาณความชื้นการบดอัดดิน 8% โดยควบคุมความชื้นดิน และความเร็วในการบดอัด จากการทดสอบพบว่าความหนาแน่นแห้งที่ได้ในสนามมีค่า 1.905 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าความหนาแน่นจากการคาดการณ์ในเส้นแนวโน้ม 0.3% ซึ่งนับว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และปริมาณความชื้น 8.30 % ซึ่งอยู่ในช่วงปริมาณความชื้นที่เหมาะสม



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และปริมาณความชื้นในสนามบนเส้นโค้งการบดอัดที่ระดับพลังงานต่างๆจากห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวการบดอัดในสนาม กับหน่วยพลังงานการบดอัดเชิงปริมาตรจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของดินบดอัดในสนาม และพลังงานการ บดอัดแบบพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ

เมื่อพิจารณาผลทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามที่จำนวน
เที่ยวการบดอัดต่างๆ กับเส้นโค้งการบดอัดที่ระดับพลังงานการบดอัดต่างๆ
ในห้องปฏิบัติการ จึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวการบด
อัดในสนาม กับหน่วยพลังงานการบดอัดเชิงปริมาตรจากการทดสอบใน
ห้องปฏิบัติการที่ทำให้เกิดความหนาแน่นแห้ง และปริมาณความชื้นการบด
อัดในสนามเดียวกันของดินในที่ และทรายหยาบ แสดงดังรูปที่ 10

จากการศึกษาก่อนหน้า Liu, et al. (2015) ได้เสนอสมการในการ
คำนวณหน่วยพลังงานการบดอัด (Unit Compaction Energy, UCE) จาก
เครื่องมือการบดอัดแบบสันสะเทือน โดยเมื่อกำหนดความสูงของชั้นการบด
อัด และความเร็วของการบดอัดแล้ว สามารถใช้คุณสมบัติของเครื่องจักรบด
อัด ซึ่งประกอบไปด้วย ความกว้างของรถบดอัด ขนาดการเคลื่อนตัวใน
แนวดิ่งของเครื่องบดอัด แรงของตัวสันสะเทือนในรัศมี แรงที่ทำให้เกิดการ
สันสะเทือนในแนวดิ่ง ความถี่ของการสันสะเทือน และการลดทอนของ
พลังงานการสันสะเทือนในชั้นบดอัด ดังนั้นเมื่อต้องการบดอัดวัสดุที่นิยมใช้
ในชั้นฐานของทางเท้าโดยเปลี่ยนเครื่องมือการบดอัดที่มีคุณสมบัติต่าง
ออกไป สามารถกำหนดเงื่อนไขความหนาแน่นแห้งของดินบดอัด และ
ความชื้นการบดอัดเพื่อกำหนดหน่วยพลังงานการบดอัดเชิงปริมาตรจากเส้น
โค้งการบดอัดที่ระดับชั้นพลังงานต่างๆ ได้โดยการเทียบอัตราส่วนระหว่างชั้น
พลังงาน และนำพลังงานดังกล่าวมาคำนวณหาจำนวนเที่ยวการบดอัดเพื่อ
ควบคุมคุณภาพการบดอัดของเครื่องจักรนั้นๆ ที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป
ได้ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้กรณีที่มีการเปลี่ยนเครื่องจักรการทำงานที่มี
คุณสมบัติแตกต่างกันได้ อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ของคุณสมบัติเครื่องจักร
บดอัด โดยเฉพาะเครื่องตบหน้าดินผิวเรียบขนาดเล็กทำงานด้วยมือแบบ
สันสะเทือน มักมีพารามิเตอร์ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นการพัฒนสมการอย่างง่าย
เพื่อเชื่อมโยงพารามิเตอร์พื้นฐานของเครื่องจักร กับพลังงานที่ส่งผ่านจาก
เครื่องจักรไปยังดินโดยใช้ความหนาแน่นในสนาม และข้อมูลเส้นโค้งการบด
อัดที่ระดับพลังงานต่างๆ จะสามารถช่วยลดความซับซ้อนของการคำนวณ
ดังกล่าวได้

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพการ
บดอัดดินในพื้นที่ขนาดเล็ก โดยเฉพาะการใช้เครื่องตบหน้าดินผิวเรียบแบบ
สันสะเทือนที่ทำงานด้วยมือ ซึ่งมักอาศัยประสบการณ์ของผู้ก่อสร้าง
มากกว่าการควบคุมตามมาตรฐาน การศึกษานี้วิเคราะห์พลังงานการบดอัด
ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม เพื่อกำหนดแนวทางควบคุมเงื่อนไขการ
บดอัดของวัสดุที่นิยมใช้ในชั้นฐานของทางเท้า ได้แก่ ดินในที่ ทรายหยาบ
และหินคลุก ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง
ความหนาแน่นแห้งของดินและจำนวนเที่ยวการบดอัด เพื่อใช้คาดการณ์
จำนวนเที่ยวการบดอัดที่เหมาะสมสำหรับวัสดุต่างๆ นอกจากนี้ยังพบว่า
ความชื้นที่สูงกว่าค่าที่เหมาะสมเล็กน้อยสามารถช่วยให้ดินบดอัดได้แน่น
เต็มทีเมื่อพลังงานการบดอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการระเหยของความชื้นขณะ

บดอัด ผลการทดลองในสนามแสดงให้เห็นว่าการใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จาก
การวิเคราะห์สามารถควบคุมคุณภาพการบดอัดให้สอดคล้องกับค่าที่
ต้องการได้อย่างแม่นยำ การศึกษาข้อเสนอแนะแนวทางการใช้พลังงานการบด
อัดเชิงปริมาตร เพื่อช่วยปรับเทียบจำนวนเที่ยวการบดอัดเมื่อต้องเปลี่ยน
เครื่องจักรบดอัดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเครื่องตบ
หน้าดินขนาดเล็กมักมีพารามิเตอร์ที่แสดงถึงคุณสมบัติของเครื่องจักรบดอัด
ไม่ครบถ้วน ดังนั้นการพัฒนาการศึกษานี้ในอนาคตจึงควรพัฒนาสมการ
อย่างง่ายที่เชื่อมโยงพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกับพลังงานที่ส่งผ่านไปยังดิน
เพื่อช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการคำนวณและเพิ่มประสิทธิภาพ
การควบคุมคุณภาพการบดอัดในสนาม นอกจากนี้แม้ว่าการควบคุม
คุณภาพการบดอัดให้ตรงตามเงื่อนไขการบดอัดในการศึกษานี้จะสามารถ
ช่วยป้องกันการเกิดความเสียหายกับโครงสร้างผิวทางได้ อย่างไรก็ตามใน
การพัฒนาการก่อสร้างขั้นทางใต้ทางเท้าควรพิจารณาร่วมกับปัจจัยอื่นๆ ที่
สามารถทำให้เกิดความเสียหายกับทางเท้าได้ เช่น การรั่วซึมของน้ำจาก
ระบบระบายน้ำในพื้นที่ข้างเคียง ดินบดอัดถูกการกัดเซาะของน้ำ การ
แยกตัวของน้ำในดินและการเคลื่อนที่ของน้ำมายังผิวดินเมื่อได้รับแรง
กระทำ เป็นต้น เพื่อที่จะสามารถพัฒนาแนวทางการแก้ไขปัญหาความ
เสียหายของทางเท้าได้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
(สจล.) สำหรับการเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบในสนาม ตลอดจน
ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา สจล. สำหรับอุปกรณ์การทดสอบใน
ห้องปฏิบัติการและภาคสนาม ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อการดำเนินงานครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Li, X., Cao, L., Li, Z., Li, J., & Lv, X. (2025). Influence of Leakage from Buried Drainage Pipes on Shallow Soil Settlement and Urban Road Collapse. *Natural Hazards Review*, 26(3), 04025017.
- [2] Das, M.B. (2010). *Principle of Geotechnical Engineering (7th Edition)*. Cengage Learning, Stamford, pp.129-132.
- [3] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2013). *Practices for unbound aggregate pavement layers*. The National Academies Press. pp.101-118.
- [4] Yao, Y., & Song, E. (2023). Intelligent compaction methods and quality control. *Smart construction and sustainable cities*, 1(1), pp.2.
- [5] สามารถ พงษ์วิมลสวัสดิ์ (2556). *อิทธิพลของความเร็วและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดต่อความหนาแน่นแห้งในสนามของวัสดุชั้นทางดินลูกรัง*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ไทย.
- [6] Liu, D., Li, Z., & Liu, J. (2015). Experimental study on real-time control of roller compacted concrete dam

- compaction quality using unit compaction energy indices. *Construction and Building Materials*, 96, pp. 567-575.
- [7] Liu, D., Lin, M., & Li, S. (2016). Real-time quality monitoring and control of highway compaction. *Automation in Construction*, 62, pp.114-123.
- [8] กรมส่งเสริมการปกครองส่วนท้องถิ่น. (2548). *มาตรฐานถนนทางเดิน และทางเท้า*. กระทรวงมหาดไทย.
- [9] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2022). *Standard method of test for moisture-density relations of soils using a 2.5-kg (5.5-lb) rammer and a 305-mm (12-in.) drop* (AASHTO T 99-22). AASHTO.
- [10] National Highways. (2020). *CD239: Footway and cycleway pavement design (Design Manual for Roads and Bridges)*. UK Government.
- [11] Pearson, D. (2011). *Deterioration and maintenance of pavements*. ICE Publishing. pp.13-31.
- [12] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2024). *Standard method of test for sieve analysis of fine and coarse aggregates* (AASHTO T 27-24). AASHTO.
- [13] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2022). *Standard method of test for density of soil in-place by the sand-cone method* (AASHTO T 191-14). AASHTO.
- [14] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2022). *Standard method of test for moisture-density relations of soils using a 4.54-kg (10-lb) rammer and a 457-mm (18-in.) drop* (AASHTO T 180-22). AASHTO.