

การใช้ระบบทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นเอง สำหรับทำนายค่าซีบีอาร์ของดินลูกรัง Utilisation of In-house Built Dynamic Plate Load Test System for Predicting CBR of Lateritic Soil

เอกพล สุวรรณรัตน์¹ และปานุ พร้อมพุทธานุกร^{1*}
Ekkaphon Suwannarut¹ and Panu Promputthangoon^{1*}

บทคัดย่อ

สำหรับงานวิศวกรรมโยธา ดินเป็นทั้งวัสดุโครงสร้างและฐานราก ก่อนจะนำดินไปใช้งาน ต้องมีการเก็บตัวอย่างดิน ทดสอบ และแบ่งประเภทเพื่อทราบคุณสมบัติต่าง ๆ จากนั้นจึงวิเคราะห์ คุณสมบัติเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบว่าจะนำไปใช้ทำอะไร นอกจากนั้นต้องการวิธีสำหรับติดตามและควบคุมคุณภาพของดินบดอัดในสนาม สำหรับประเทศไทย วิธีแทนที่ด้วยทรายคือวิธีที่นิยมมากที่สุด แต่วิธีนี้ใช้เวลาและมีค่าใช้จ่ายสูง บางประเทศจึงหันไปใช้วิธีนิวเคลียร์ ซึ่งต้องใช้เทคนิคขั้นสูงสำหรับการทดสอบ วิธีการทดสอบแผ่นเพลทจะถูกนำมาใช้ถ้าต้องการทราบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุก (ซีบีอาร์) และโมดูลัส รูปแบบของวิธีทดสอบโดยแผ่นเพลทคล้ายกันกับวิธีแทนที่ด้วยทรายในแง่ของ ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการใช้ระบบทดสอบ แผ่นเพลทแบบพลศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาเอง ขั้นตอนแรกของการวิจัย คือ จัดเก็บตัวอย่างดินลูกรัง จำนวน 3 ตัวอย่าง นำตัวอย่างไปทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติทั่วไป ความหนาแน่น และ ค่าซีบีอาร์ จากนั้นจึงเตรียมตัวอย่างให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ แล้วจึงทดสอบซีบีอาร์โดยใช้ระบบทดสอบแผ่นเพลทแบบพลศาสตร์เพื่อให้ทราบค่าแรงกระทำและการทรุดตัว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าซีบีอาร์สูงขึ้น ค่าแรงกระทำก็จะสูงขึ้นตามกันไปด้วย เช่น แรงกระทำที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างที่มีค่าซีบีอาร์ร้อยละ 1.30 3.48 และ 7.61 คือ 20.72 25.41 และ 29.86 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าการทดสอบแผ่นเพลทแบบพลศาสตร์ที่ พัฒนาโดยงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เพื่อทำนายค่าซีบีอาร์ในสนาม ซึ่งส่งผลให้ค่าทดสอบถูกลง

คำสำคัญ: ความหนาแน่น ซีบีอาร์ การทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ ดินลูกรัง

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* Corresponding author e-mail: panupptk@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i1.263496>

Received: 27 May 2024, Revised: 30 August 2024, Accepted: 2 September 2024

Abstract

In some of civil engineering projects, soil is mainly employed as both structure and foundation; these include roads, dams, and runways. Before being utilised, a soil must be collected, tested, and classified in order to obtain properties. Then, the results are further analysed so that we know what we could do with the soil. In the field, we need a method to monitor and control the quality of compacted soil. In Thailand, the sand cone method is most common. Because of its time-consuming nature and high cost, many countries now opt for the nuclear method; however, it requires rigorous techniques for operation. The plate bearing test will be employed if bearing capacity and modulus values are required. Similar to the density test situation, the method takes long time and quite expensive. Thus, this research attempted to overcome those procedures by implementing own dynamic plate bearing test system. First, a total of three lateritic soils were collected; basic property, density, and CBR (California Bearing Ratio) tests were then carried out in a laboratory. Next, samples were prepared having similar properties obtained from the laboratory results; and, the dynamic plate bearing test was then carried out, obtaining both applied forces and their corresponding settlements. The results reveal that the higher the CBR the greater the applied force, i.e., the applied forces for the CBRs of 1.30, 3.48, and 7.61% were 20.72, 25.41, and 29.86 kN, respectively. This may suggest that the dynamic plate bearing test system developed by the authors could be employed for predicting the CBR in the field resulting in cheaper operation.

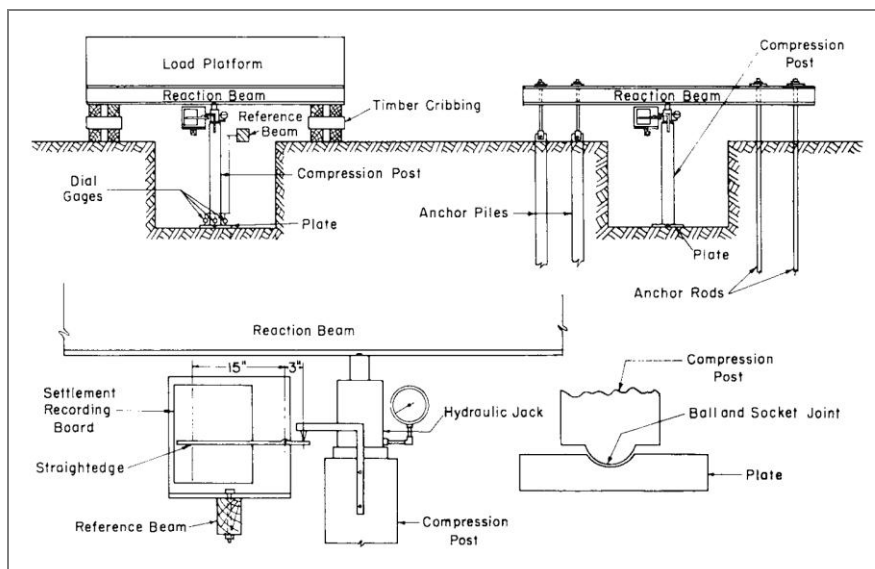
Keywords: Density, CBR, Dynamic plate bearing test, Lateritic soil

บทนำ

การบดอัดดินเป็นการลดปริมาณอากาศในดินให้น้อยลงส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการบดอัดดินมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ดินมีความหนาแน่นเพียงพอที่สามารถรับน้ำหนักจากสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ได้ เช่น น้ำหนักอาคาร และน้ำหนักรถบรรทุก เป็นต้น โดยที่ชั้นดินไม่เกิดการทรุดตัวมากเกินไป และเกิดความเสียหายที่จะส่งผลต่อโครงสร้างของอาคารและสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ เมื่อมีการบดอัดดินในสนาม จำเป็นต้องมีกระบวนการตรวจสอบความหนาแน่นของชั้นดินที่ผ่านการบดอัด เพื่อให้แน่ใจว่าชั้นดินที่ทำการบดอัดหรือดินที่รับน้ำหนักของโครงสร้างจะมีความหนาแน่นเพียงพอที่สามารถรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย วิธีการมาตรฐานการทดสอบความหนาแน่นดินบดอัดในประเทศไทย คือ ASTM D1556 (2024) โดยใช้การชูดหลุมขนาดเล็กแล้วแทนที่ด้วยทรายมาตรฐาน เมื่อทราบมวลดินที่ชูดขึ้นมา ปริมาตรของดินดังกล่าว และคุณสมบัติของทรายที่แทนที่ในหลุม ก็จะสามารถคำนวณความหนาแน่นดังกล่าวได้ กระบวนการนี้ใช้เวลา เนื่องจากต้องนำ

ตัวอย่างดินไปหาปริมาณความชื้น ดังนั้นในหลายประเทศจึงนิยมใช้วิธีนิวเคลียร์ตามมาตรฐาน ASTM D6938 (2023) ซึ่งอาศัยการปล่อยรังสีแกมมาผ่านชั้นดิน ในขณะที่เดียวกันก็วัดระยะเวลาที่รังสีดังกล่าวเดินทางถึงตัวรับสัญญาณ ทำให้ทราบผลการทดสอบในทันที วิธีนี้ดีกว่า ASTM D1556 (2024) เกือบทุกประการ ยกเว้นต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างสูงเกี่ยวกับการใช้งานและการจัดเก็บเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วไหลของรังสี

นอกจากการพิจารณาผลการทดสอบความหนาแน่นในสนาม บางกรณีอาจต้องทำการทดสอบซีบีอาร์ของชั้นดินโดยตรง เช่น การออกแบบฐานรากตื้น ปัจจุบันประเทศไทยนิยมตรวจสอบค่าซีบีอาร์ของชั้นดินโดยใช้วิธีแผ่นเพลทรับน้ำหนักบรรทุก ดังภาพที่ 1 ซึ่งเป็นการทดสอบโดยการกดแผ่นเหล็กลงบนดินที่ต้องการทดสอบ เช่น ที่ระดับฐานรากที่จะทำการก่อสร้าง โดยการทดสอบแบบเพลทรับน้ำหนักบรรทุก เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดทับกับการทรุดตัว การทดสอบต้องใช้เวลาในการทดสอบและมีค่าใช้จ่ายสูง เช่น การติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบ การตรวจวัดผลการทดสอบ การให้น้ำหนักต่อแผ่นเหล็กเพื่อถ่ายทอดไปยังชั้นดิน รวมทั้งการวิเคราะห์และรายงานผล



ภาพที่ 1 รูปแบบทั่วไปสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแผ่นรับน้ำหนักบรรทุก
ที่มา: ASTM E1194-94 (1994)

โดยปกติผลการทดสอบเพลทอาจนำไปคำนวณค่าซีบีอาร์ของดินฐานราก ซึ่งทำได้โดยการเอาแรงกระทำที่ทำให้ชั้นดินทรุดตัวถึงระดับที่ต้องการหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลท แต่โครงสร้างถนนและสนามบินมักใช้ตัวแปรอีกประเภทที่สำคัญสำหรับการออกแบบ คือ โมดูลัสแรงต้านทานของดิน (modulus of subgrade reaction: k) กรณีอ้างอิงมาตรฐาน AASHTO T222-81 (2021) ค่าดังกล่าวอาจคำนวณได้จากสมการ (1) และต้องปรับแก้จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสนาม (ชนิดา และคณะ, 2564)

$$k = k'_u \left[\frac{d}{d_s} + \frac{b}{1905} \left(1 - \frac{d}{d_s} \right) \right] \quad (1)$$

เมื่อ k'_u = โมดูลัสแรงต้านทานของดิน (ในสนาม) (อาจคำนวณได้จากสมการที่เสนอโดย Tamrakar *et al.* (2022)

d = ค่าทรุดตัวจากการทดสอบอัดตัวคาน้ำเมื่อรับความเค้น 69 กิโลปาสกาล (มิลลิเมตร) (เมื่อความชื้นเท่ากับความชื้นในสนาม)

d_s = ค่าทรุดตัวจากการทดสอบอัดตัวคาน้ำเมื่อรับความเค้น 69 กิโลปาสกาล (มิลลิเมตร) (เมื่อดินอิ่มตัว)

b = ความหนาชั้นดินที่ทดสอบ (มิลลิเมตร)

กรณีอ้างอิงถึงมาตรฐานของ DIN 18134 (2012) อาจคำนวณค่าโมดูลัสแรงต้านทานของดินจากสมการ (2) ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่ามาตรฐาน AASHTO T222-81 (2021) (ซึ่งต้องมีการปรับแก้) ในขณะที่มาตรฐาน ASTM D1196 (2021) ไม่ได้กำหนดค่าการทรุดตัวที่ 1.25 มิลลิเมตร สำหรับการคำนวณเหมือนกับมาตรฐานของ DIN 18134 (2012) แต่กำหนดค่าการทรุดตัวสูงสุดเป็นตัวหารดังสมการ (3)

$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (2)$$

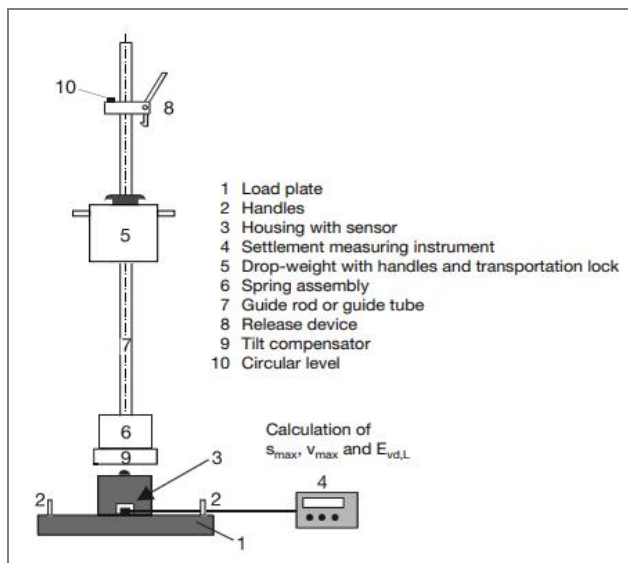
เมื่อ P = ความเค้นที่ทำให้เกิดการทรุดตัว 1.25 มิลลิเมตร

Δ = 1.25 มิลลิเมตร

$$k = \frac{P}{\Delta_{\max}} \quad (3)$$

เมื่อ $\Delta_{\max}$ = ค่าการทรุดตัวสูงสุด (มิลลิเมตร)

การทดสอบเพลทรับน้ำหนักบรรทุก ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์และชุดให้น้ำหนักกระทำจัดเตรียมพื้นที่ และต้องการเวลาพอสมควร ต่อมาได้มีการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ (dynamic plate load test) โดยอ้างอิงกับมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับ เช่น ASTM E2835-21 (2021) ASTM D1195-93 (1993) และ ASTM E1194-94 (1994) ส่งผลให้การทดสอบทำได้รวดเร็วกว่าเดิม ค่าใช้จ่ายต่ำกว่า และสามารถทราบผลการทดสอบได้ทันที (เปรียบเทียบกับ การทดสอบความหนาแน่นโดยใช้โคนและการใช้รังสีแกมมา) แต่เนื่องจากชุดทดสอบดังกล่าวมีราคาสูง และต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ภาณุ และคณะ (2561) จึงมีแนวคิดในการพัฒนาชุดทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ขึ้นมาใช้เองโดยอ้างอิงข้อมูลจากภาพที่ 2 และการพัฒนาอยู่บนพื้นฐานที่ว่าชุดทดสอบสามารถใช้งานได้จริงและมีราคาถูกกว่าของต่างประเทศ นอกจากนั้นกระบวนการออกแบบและพัฒนา ยังสามารถต่อยอดเพื่อไปพัฒนาชุดทดสอบอย่างอื่นได้อีกด้วย



ภาพที่ 2 องค์ประกอบของชุดทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์

ที่มา: Road and Transportation Research Association (RTSA) (2012)

จากที่กล่าวมา วัตถุประสงค์หลักของการทดสอบเพลททั้งแบบสถิตและแบบพลศาสตร์ คือ ซีบีอาร์และโมดูลัสแรงต้านทานดิน ซึ่งจะถูกนำไปใช้เพื่อออกแบบโครงสร้างถนนหรือโครงสร้างที่ใช้ดิน เป็นส่วนที่รับน้ำหนักโดยตรง การศึกษานี้นำเสนอการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ เพื่อทำนายค่าซีบีอาร์ ซึ่งจะส่งผลให้การควบคุมคุณภาพการบดอัดดินในสนาม มีความรวดเร็วมากขึ้น ค่าใช้จ่ายน้อยลง และให้เป็นแนวคิดสำหรับการนำชุดอุปกรณ์ไปทดสอบประเภทอื่นต่อไป

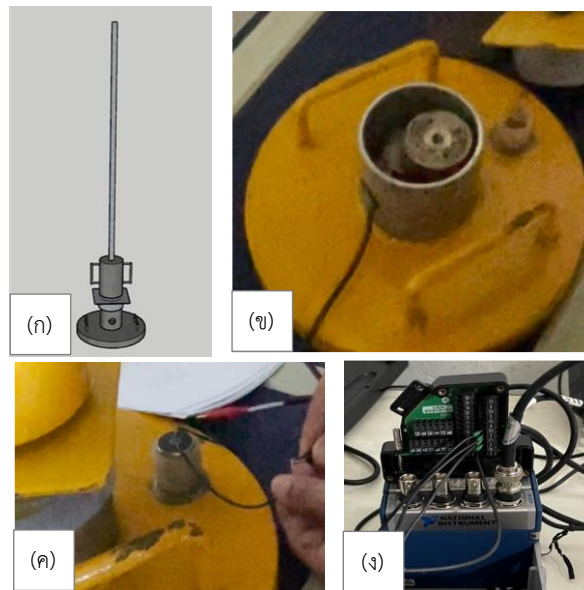
วิธีดำเนินการวิจัย

การทำวิจัยการศึกษานี้ประกอบด้วย 3 กระบวนการ คือ 1) การออกแบบระบบทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E2385-21 (2021) 2) การจัดหาวัสดุดินเพื่อทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานรวมทั้งความหนาแน่นและค่าซีบีอาร์ และ 3) การเตรียมตัวอย่างดินในโมลด์ให้สอดคล้องกับกระบวนการ 2) เพื่อทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์

โดยภาพรวมของระบบที่พัฒนาขึ้นมา ดังภาพที่ 3 (ก) ชุดเพลทและตุ้มให้น้ำหนักกระทำ โดยตัวตุ้มมีมวล 10.15 กิโลกรัม แผ่นเพลทมีมวล 19.05 กิโลกรัม และมวลรวมทั้งหมดคือ 32.75 กิโลกรัม การวัดแรงกระทำและการหลุดตัว ใช้เซ็นเซอร์วัดแรงกระทำและเซ็นเซอร์วัดความเร็ว ดังภาพที่ 3 (ข) และ (ค) ตามลำดับ ซึ่งต่อสัญญาณเข้ากับระบบเก็บรวบรวมข้อมูล ดังภาพที่ 3 (ง) น้ำหนักของลูกตุ้มและแผ่นเพลทถูกออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM E1194-94 (1994)

การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน (ภาพที่ 4) เช่น การกระจายตัวของมวลดิน ความถ่วงจำเพาะ และปริมาณดินเหนียว จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทั้งหมด คือ 3 ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่าง 1 และ 2 ได้จากตำบลแค และตำบลนาหว้า อำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา ส่วนตัวอย่าง 3 คือ การผสมกันระหว่างตัวอย่าง 1 และ 2 (ร้อยละ 50 + ร้อยละ 50) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เห็น

ความแตกต่างของคุณสมบัติต่าง ๆ ในขณะทำการทดสอบความหนาแน่นของดินซึ่งถือเป็นคุณสมบัติสำคัญสำหรับการควบคุมการบดอัดดินในสนาม (ภาพที่ 5) ผลที่ได้จากการทดสอบ คือ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ทำให้ดินมีความหนาแน่นสูงสุด ภาพที่ 6 แสดงกระบวนการทดสอบค่าซีบีอาร์ซึ่งแสดงกำลังรับน้ำหนักแรงกดทะลุของตัวอย่างดิน (ซีบีอาร์) โดยใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบความหนาแน่น ค่าซีบีอาร์เป็นคุณสมบัติสำคัญสำหรับโครงสร้างที่ใช้ดินเป็นวัสดุหลักและฐานราก เช่น ถนนและพื้นทางสำหรับการขึ้นลงของเครื่องบิน โดยทั่วไปโครงสร้างดังกล่าวต้องสัมผัสกับน้ำไม่ทางใดก็ทางหนึ่ง (เช่น น้ำฝน และคลองข้างทาง) ดังนั้นการทดสอบจึงต้องมีการทำให้ตัวอย่างดินจมน้ำเพื่อจำลองสภาพความเป็นจริง



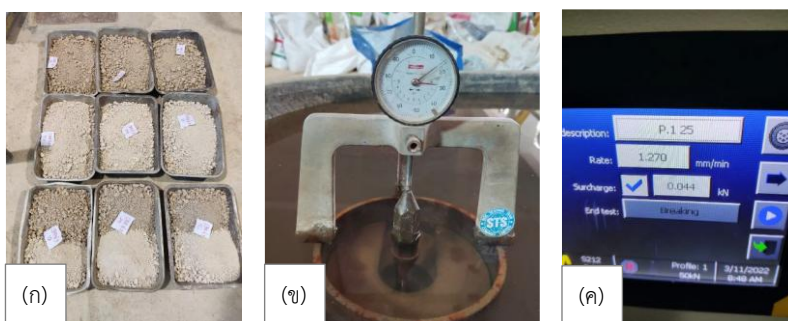
ภาพที่ 3 ชุดอุปกรณ์ทดสอบเพลมัทแบบพลศาสตร์ ประกอบด้วย แผ่นเพลมัทและตุ้มน้ำหนัก (ก) การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรงกระทำ (ข) การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็ว (การทรุดตัว) (ค) และระบบเก็บรวบรวมข้อมูล (ง)



ภาพที่ 4 การเตรียมตัวอย่างดินที่ 1 2 และ 3 (ก) การวิเคราะห์การกระจายขนาดมวลดิน (ข) และการหาสัดส่วนของขนาดมวลดิน (ค)



ภาพที่ 5 การทดสอบความหนาแน่นของดิน โดยผสมน้ำกับดินเพื่อช่วยการบดอัด (ก) อุปกรณ์การบดอัดดินในโมลต์ (ข) และตัวอย่างดินที่ผ่านการบดอัด (ค)



ภาพที่ 6 การทดสอบซีปียอร์ โดยการเตรียมส่วนผสมตัวอย่างดิน (ก) การแช่ตัวอย่างดินในน้ำ (ข) และการอ่านค่าซีปียอร์ (ค)

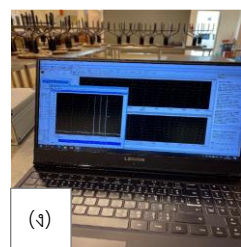
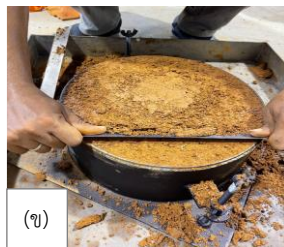
ส่วนสำคัญสำหรับการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทดสอบเพลาแบบพลศาสตร์ คือ ตัวอย่างต้องมีคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับผลการทดสอบความหนาแน่น (มีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับค่าพลังงานบดอัดเทียบเท่ากัน) ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้แผ่นเหล็กกลมรับน้ำหนักขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงออกแบบอุปกรณ์ทดสอบการบดอัดของดินใหม่ เพื่อบดอัดและทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน โดยอ้างอิงมาตรฐานการบดอัดดิน ASTM D6938 (2023) แต่ปรับเปลี่ยนมาใช้โมลต์ที่มีความสูง 125 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 315 มิลลิเมตร เพื่อให้ผิวดินที่บดอัดแล้วมีความกว้างมากพอที่จะสามารถบดอัดและทดสอบด้วยแผ่นเหล็กกลมรับน้ำหนักดินตัวอย่างได้ จากนั้นจึงคำนวณปรับเพิ่มจำนวนครั้งในการบดอัดด้วยค้อนบดอัดดินตามปริมาตรของโมลต์ที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้ดินตัวอย่างได้รับพลังงานเทียบเคียงกับมาตรฐานเดียวกัน

ตามมาตรฐาน ASTM D698-12 (2021) จำนวนครั้งการบดอัดแต่ละชั้น คือ 25 ใช้ค้อนบดอัดดินมีมวล 5.5 ปอนด์ (lb) ยกสูง 1 ฟุต (ft) เป็นจำนวน 3 ชั้น (layers) ในโมลต์ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว (in) สูง 4.6 นิ้ว ดังนั้นปริมาตรของโมลต์ คือ 0.03333 ลูกบาศก์ฟุต (ft^3) และจะได้พลังงานที่ใช้ในการบดอัดรวม = $(1 \text{ ฟุต} \times 5.5 \text{ ปอนด์} \times 25 \text{ ครั้ง (blows)} \times 3 \text{ ชั้น}) / 0.03333$ ลูกบาศก์ฟุต = $12,376$ ฟุต.ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต (ft-lb/ft^3) หรือ ฟุต.ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุตต่อชั้น

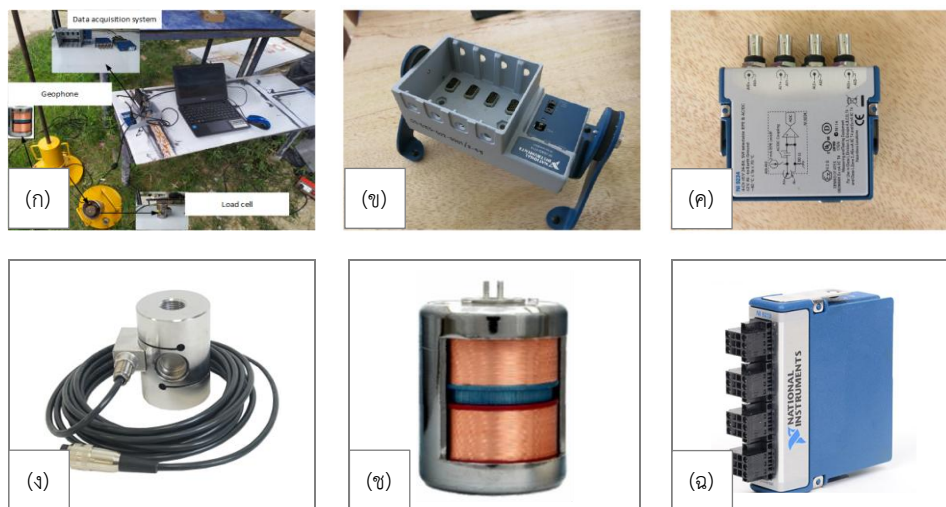
โมลด์ที่ออกแบบใหม่เพื่อใช้ทดสอบนี้ จะต้องบดอัดในแต่ละชั้นด้วยค้อนบดอัดดินมีขนาดมวล 5.5 ปอนด์ ยกสูง 1 ฟุต เป็นจำนวน 3 ชั้น และโมลด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 315 มิลลิเมตร สูง 125 มิลลิเมตร ดังนั้น ปริมาตรของโมลด์ คือ 0.34375 ลูกบาศก์ฟุต และจะได้พลังงานที่ใช้ในการบดในแต่ละครั้ง = (1 ฟุต x 5.5 ปอนด์)/0.34375 ลูกบาศก์ฟุต = 16 ฟุต.ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุตต่อการบดอัด 1 ครั้ง ดังนั้นพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ในการบดอัดดินตัวอย่างทั้งหมดเท่ากับ $4,125.33/16 = 257.83$ ครั้ง หากเลือกใช้การบดอัดทั้งหมดที่ 258 ครั้ง จะได้การบดอัดชั้นละ 86 ครั้ง (258/3) จะได้พลังงานการบดอัดดินตัวอย่างทั้งหมดเท่ากับ (1 ฟุต x 5.5 ปอนด์ x 258 ครั้ง x 3 ชั้น)/0.34375 ลูกบาศก์ฟุต = 12,384 ฟุต.ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต ซึ่งหากเทียบกับการทดสอบตามมาตรฐานแล้วจะให้ค่าพลังงานการบดอัดมากกว่าเพียงร้อยละ 0.06 เท่านั้น (ถือว่ายอมรับได้) ดังตารางที่ 1 แสดงการเตรียมตัวอย่างดินในโมลด์เพื่อการทดสอบเพลาแบบพลศาสตร์ การตรวจสอบและการบันทึกผลการทดสอบทำได้โดยการใช้เซ็นเซอร์วัดแรงกระทำและความเร็ว (การทรุดตัว) ซึ่งต่อเข้ากับระบบเก็บรวบรวมข้อมูลและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อสังเกตและบันทึกสัญญาณสำหรับกราฟวิเคราะห์ผลในขั้นต่อไป ดังภาพที่ 7 ในขณะทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ครบชุด สำหรับการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 8

ตารางที่ 1 รายละเอียดการเตรียมโมลด์และพลังงานบดอัดสำหรับการทดสอบเทียบกับ ASTM D698-12 (2021)

	ปริมาตรโมลด์ (ลูกบาศก์ฟุต)	น้ำหนักตัม (ปอนด์)	ระยะยก (ฟุต)	จำนวน ชั้น	ครั้ง ต่อชั้น	พลังงานรวม (ฟุต. ปอนด์ต่อ ลูกบาศก์ฟุต)	พลังงานต่อชั้น (ฟุต. ปอนด์ต่อ ลูกบาศก์ฟุต)
ASTM D 698	0.03333	5.5	1	3	25	12,376	4,125.33
การศึกษานี้	0.34375	5.5	1	3	258	12,384	4,128.00



ภาพที่ 7 การทดสอบเพลาแบบพลศาสตร์ โดยการเตรียมตัวอย่างดิน (ก) การแต่งตัวอย่างดิน (ข) การทดสอบให้น้ำหนักกระทำต่อตัวอย่างดิน (ค) และการอ่านและบันทึกค่าผลการทดสอบเพื่อการวิเคราะห์เพิ่มเติม (ง)



ภาพที่ 8 อุปกรณ์และการจัดเตรียมเพื่อทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ ประกอบด้วย การติดตั้งชุดอุปกรณ์เพื่อทดสอบและการต่อเซ็นเซอร์เข้ากับคอมพิวเตอร์ (ก) ระบบเก็บรวบรวมข้อมูล (ข) โมดูลวัดค่าความเร็ว (ค) โมดูลวัดแรงกระทำ (ง) เซ็นเซอร์วัดแรงกระทำ (จ) และ SM-24 geophone สำหรับวัดความเร็ว (ฉ)

ผลการวิจัย

การทำวิจัยเกี่ยวกับดินที่เกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรมโยธาจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติพื้นฐานก่อน เช่น ต้องสามารถบอกได้ว่าตัวอย่างดินถูกแบ่งให้อยู่ในประเภทใด สำหรับงานวิศวกรรมโยธาทั่วไป วิธี unified soil classification system (USCS) คือ มาตรฐานสำหรับแบ่งประเภทดิน จากการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของมวลดิน พบว่าตัวอย่างที่ 1 2 และ 3 คือ ดินประเภททรายปนดินเหนียว และกรวดเล็กน้อย ทรายปนดินเหนียวกับตะกอนและกรวด และกรวดปนดินเหนียวและทราย ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 ซึ่งยังได้แสดงค่าความถ่วงจำเพาะสำหรับทั้ง 3 ตัวอย่างดิน ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าทั่วไปสำหรับดินประเภทนี้

ตารางที่ 2 ค่าความถ่วงจำเพาะและผลการแบ่งประเภทดินโดยวิธี USCS

มวลดิน	ความถ่วงจำเพาะ	ประเภทดินโดยวิธี USCS
ตัวอย่างที่ 1	2.65	ทรายปนดินเหนียวและกรวดเล็กน้อย
ตัวอย่างที่ 2	2.58	ทรายปนดินเหนียวกับตะกอนและกรวด
ตัวอย่างที่ 3	2.58	กรวดปนดินเหนียวและทราย

การทดสอบความหนาแน่นของดินพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ความหนาแน่นสูงสุดสำหรับตัวอย่างดินที่ 1 2 และ 3 คือ ร้อยละ 11.20 11.00 และ 11.70 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณน้ำดังกล่าวถูกนำไปเตรียมตัวอย่างดินทั้งสำหรับการทดสอบซีบีอาร์และเพลทแบบพลศาสตร์ โดยผลการทดสอบทั้งสองแสดงดังตารางที่ 3 และผลการทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความหนาแน่นและซีบีอาร์

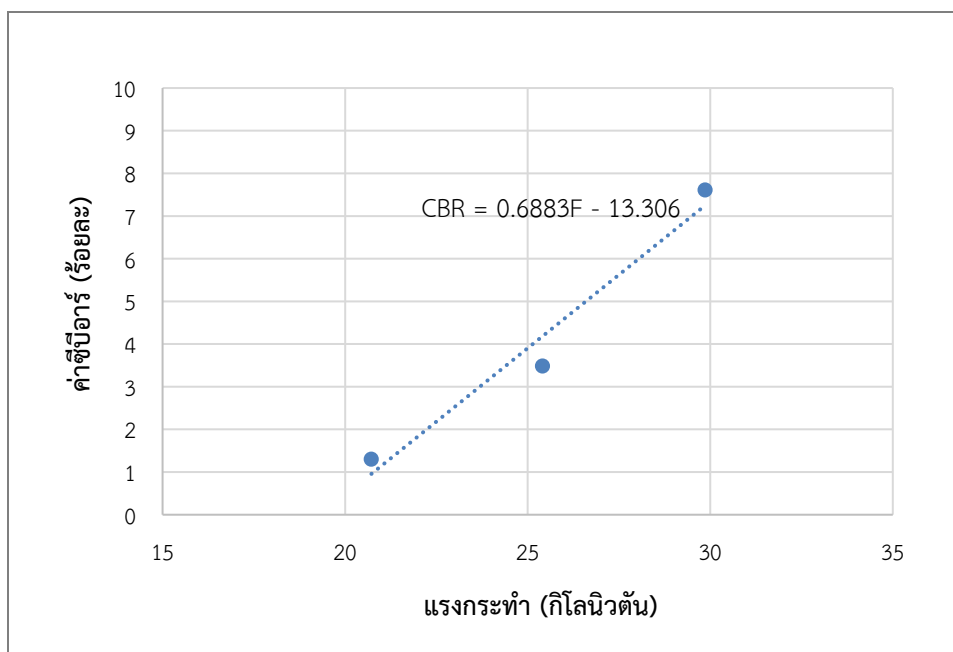
มวลดิน	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ซีบีอาร์ (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	1.53	1.30
ตัวอย่างที่ 2	1.51	3.48
ตัวอย่างที่ 3	1.54	7.61

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเพลาแบบพลศาสตร์

มวลดิน	ซีบีอาร์ (ร้อยละ)	การทรุดตัว (มิลลิเมตร)	แรงกระทำ (กิโลนิวตัน)
ตัวอย่างที่ 1	1.30	1.24	20.72
ตัวอย่างที่ 2	3.48	1.27	25.41
ตัวอย่างที่ 3	7.61	1.02	29.86

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4 โดยการนำค่าแรงกระทำและค่าซีบีอาร์ไปสร้างความสัมพันธ์โดยใช้กราฟ จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 9 และสามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังสมการ (4)

$$\text{ซีบีอาร์ (ร้อยละ)} = 0.6883F - 13.306 \quad (4)$$



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับแรงกระทำ

การอภิปรายผลการวิจัย

คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินทั้ง 3 ตัวอย่างในงานวิจัยนี้ เช่น ความถ่วงจำเพาะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงอาจนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ ซึ่งพบว่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย คือ 2.60 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานพบว่ามีความใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวและดินทราย (เมื่อพิจารณาถึงแร่ที่เป็นองค์ประกอบของดินทั้งสอง) โดยปกติ คือ 2.70 และ 2.65 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจะต่ำกว่า แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เน้นเรื่องพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งสนใจเฉพาะพฤติกรรมของมวลดิน แต่สำหรับกรณีงานวิจัยที่ต้องศึกษาถึงชั้นพฤติกรรมของแรงองค์ประกอบมวลดิน การทดสอบเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะจะต้องมีความละเอียดมากกว่านี้

เนื่องจากตัวอย่างดินทั้ง 3 ตัวอย่าง มีคุณสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกัน เมื่อนำไปทดสอบความหนาแน่นพบว่าต้องการปริมาณน้ำเหมาะสมที่ทำให้ดินหนาแน่นสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันมาก เช่น ปริมาณน้ำเหมาะสมที่สุดสำหรับตัวอย่างที่ 1 2 และ 3 คือ ร้อยละ 11.20 11.00 และ 11.70 ตามลำดับ เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างทั้งสามมีความใกล้เคียงกันนั่นเอง ส่งผลให้การทดสอบความหนาแน่นให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกันด้วย

อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบซีปอาร์แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกันอย่างชัดเจนสำหรับตัวอย่างดินทั้ง 3 ตัวอย่าง กล่าวคือ ค่าซีปอาร์สำหรับตัวอย่างที่ 1 2 และ 3 คือ ร้อยละ 1.30 3.48 และ 7.61 ตามลำดับ เหตุผลของความแตกต่างกันของค่าซีปอาร์ (ทั้งที่ตัวอย่างดินมีคุณสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกัน) มีอยู่ด้วยกันหลายประการ เช่น แร่ธาตุในตัวอย่างดินอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อต้องจมน้ำ การกระจายตัวของน้ำหนักกระทำเนื่องจากก้อนไม่เท่ากันทั้งหน้าตัดโมลต์ และการตกแตงผิวหน้าตัวอย่างดินก่อนให้แรงกระทำ สำหรับกรณีทั่วไป การทดสอบซีปอาร์ควรดำเนินการอย่างน้อย 2 ครั้ง ถ้าผลการทดสอบทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าซีปอาร์อาจหาได้โดยการเฉลี่ยจากค่าทั้งสอง แต่ถ้าผลทดสอบทั้ง 2 ครั้ง แตกต่างกันมาก (เช่น ร้อยละ 4 และ 20) ควรทำการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อยืนยันกระบวนการทดสอบ

ถึงแม้ว่าค่าซีปอาร์จาก 3 ตัวอย่างดินจะแตกต่างกันพอสมควร แต่เมื่อพิจารณาตารางที่ 3 พบว่าค่าซีปอาร์จะแปรเปลี่ยนไปตามแรงกระทำที่วัดได้จากการทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ ดังแสดงในภาพที่ 9 และแสดงแนวโน้มดังกล่าวได้เป็นสมการเส้นตรงดังสมการ (4) ผลจากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าชุดอุปกรณ์ทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์มีศักยภาพสำหรับการประยุกต์นำไปทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินในสนามได้ ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายสำหรับโครงการลดลง ลดระยะเวลาก่อสร้าง และเป็นต้นแบบสำหรับงานวิจัยอื่น ๆ ในทำนองเดียวกัน

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาระบบทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานเทียบเท่ากับอุปกรณ์ตามมาตรฐานที่วางขายอยู่ต่างประเทศแต่มีราคาถูกกว่า รวมทั้งอาจนำไปต่อยอดพัฒนาต่อยอดเพื่อทดสอบประเภทอื่นได้อีกด้วย เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพและความถูกต้องของชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมา จึงได้นำตัวอย่างดินจำนวน 3 ตัวอย่าง มาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและความหนาแน่น จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทดสอบค่าซีปอาร์และการ

รับน้ำหนักแบบพลศาสตร์ (การทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์) จากผลการศึกษาและทดสอบ สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นมีความใกล้เคียงกันด้วย อย่างไรก็ตามผลการทดสอบเป็นสิ่งที่คาดการณ์ได้

2. ผลการทดสอบค่าซีบีอาร์ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกันพอสมควร ซึ่งพิจารณาจากขั้นตอนและวิธีการทดสอบ พบว่าความแตกต่างดังกล่าวเกิดขึ้นได้เป็นปกติ

3. ความแตกต่างจากข้อ (2) ได้รับการยืนยันจากการทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ที่งานวิจัยนี้ได้พัฒนาขึ้นมา กล่าวคือ ค่าแรงกระทำที่มากขึ้นเกิดขึ้นกับตัวอย่างดินที่มีค่าซีบีอาร์มากกว่า

ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันในเชิงกลศาสตร์ กล่าวคือ ค่าซีบีอาร์ที่มากขึ้นจะทำให้ได้แรงกระทำที่มากขึ้นด้วย ซึ่งตัวเลขเหล่านี้เป็นตัวชี้วัดความถูกต้องของระบบทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมา และเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการพัฒนาระบบต่อไป หรือการประยุกต์นาระบบดังกล่าวไปศึกษาในหัวข้ออื่นที่ใกล้เคียงกันได้ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้พบว่ยังมีส่วนที่ควรปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลการวิจัยที่ถูกต้องมากขึ้น ดังนี้

1. ในการบดอัดดินเพื่อเตรียมทดสอบเพลทแบบพลศาสตร์ หากต้องการให้ผลลัพธ์ในการทดสอบมีความแม่นยำโดยการทดสอบหลายครั้ง ควรเลือกใช้วิธีแบ่งตัวอย่างดินตัวอย่างก่อนทดสอบเป็นหลายชุดเพื่อให้ตัวอย่างทดสอบมีความหลากหลาย ไม่ควรนำดินเดิมมาทดสอบซ้ำ

2. โมลด์ที่ใช้ในการบดอัดดินควรออกแบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้สังเกตว่าหากมีดินเหนียวเป็นส่วนประกอบมากขึ้น การออกแบบโมลด์ให้มีขนาดใกล้เคียงกับแผ่นเพลท อาจได้ผลที่ถูกต้องมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนสำหรับการทำวิจัยนี้จนงานสำเร็จลุล่วงด้วยดี และส่งเสริม สนับสนุน สำหรับการเรียนและทำวิจัยที่มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

- ชนิดา ไสสุขอาด ศิวาเวช ออบมา อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์ และอรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช. (2564). การประเมินเสถียรภาพของฐานรากคันทางโดยวิธี plate bearing test และ dynamic penetration test. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25* (หน้า GTE37-1-GTE37-6). ชลบุรี: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- ภาณุ พร้อมพุทธางกูร ถาวร เกื้อสกุล และดุสิต ชูพันธ์ (2561). การพัฒนาระบบทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินโดยวิธีพลศาสตร์. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

- AASHTO T222-81. (2021). *Standard method of test for nonrepetitive static plate load test of soils and flexible pavement components for use in evaluation and design of airport and highway pavements*. PA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM D1195-93. (1993). *Standard test method for repetitive static plat load tests of soils and flexible pavement components, for use in evaluation and design of airport and highway pavements*. PA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM D1196. (2021). *Standard test method for nonrepetitive static plate tests of soils and flexible pavement components for use in evaluation and design of airport and highway pavements*. PA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM D1556. (2024). *Standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method*. PA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM D6938. (2023). *Standard test method for in-place density and water content of soil and soil-aggregate by nuclear methods*. PA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM D698-12. (2021). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. PA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM E1194-94. (1994). *Standard test method for bearing capacity of soil for static load and spread footings*. PA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM E2835-21. (2021). *Standard test method for measuring deflections using a portable impulse plate load test device*. PA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- DIN 18134. (2012). *Baugrund - versuche and versuchsgeräte - plattendruckversuch, DIN 18134:2012-04*. Berlin: Deutsches Institute fur Normung.
- Road and Transportation Research Association (RTSA). (2012). *Technical testing regulations for soil and rock in road construction, part B 8.3, dynamic plate load testing with the light drop-weight tester TP BF-StB*. KÖln: Working Group Earthworks and Foundations.
- Tamrakar, P., Wayne, M.H., Fountain, G., White, D.J. and Vennapusa, P. (2022). Measurement of modulus of subgrade reaction for geogrid stabilized roadways, In Hoff, I., Mork, H. and Saba, R. (Eds.). *Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, pp. 162-171. Trondheim: CRC Press.