

การประเมินเชิงปฐพีวิศวกรรมและสถิติของดินทรายปนตะกอนบดอัด สำหรับชั้นรองพื้นทางถนนชนบท

Geotechnical and Statistical Assessment of Compacted Silty Sand for Rural Road Subbase Applications

เทวกุล จันทร์ขามป้อม^{1*}

Tewakun Chankampom^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น,
ขอนแก่น, 40000, ประเทศไทย

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan,
Khon Kaen Campus, Khon Kaen, 40000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: tawakun.ch@rmu.ac.th

รับบทความ (Received) : April 28, 2026 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : June 17, 2026 /ตอบรับบทความ (Accepted) : June 26, 2026

บทคัดย่อ

การบดอัดดินเป็นกระบวนการสำคัญในงานก่อสร้างถนน เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อความมั่นคง ความสามารถในการรับน้ำหนัก และอายุการใช้งานของโครงสร้างทาง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมของดินทรายปนตะกอนบดอัดสำหรับใช้เป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท โดยบูรณาการการวิเคราะห์เชิงปฐพีวิศวกรรมและการวิเคราะห์เชิงสถิติ ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้จากการทดสอบคุณสมบัติดินและการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามด้วยวิธีการร่ายทรายจากพื้นที่ที่ศึกษาในจังหวัดปทุมธานี จำนวน 20 ชุดข้อมูล ผลการจำแนกดินพบว่า ดินในพื้นที่เป็นดินทรายปนตะกอน (Silty Sand: SM) ตามระบบ USCS มีค่าขีดจำกัดเหลวเท่ากับ 49.16 ค่าขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 45.27 ค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับ 3.89 และค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินอยู่ในช่วง 2.65–2.75 ซึ่งสะท้อนว่าดินมีความเป็นพลาสติกต่ำและมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางเมื่อมีการควบคุมความชื้นและการบดอัดอย่างเหมาะสม ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นแห้งในสนามพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์มีค่าเฉลี่ย 93.46% และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 6.61% แสดงถึงคุณภาพการบดอัดโดยรวมที่อยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่ยังคงมีความแปรปรวนบางส่วนในกระบวนการก่อสร้าง นอกจากนี้ การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มทดสอบ A และ B ด้วยวิธี Welch's t-test พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยกลุ่ม A ให้ค่าการบดอัดสูงกว่ากลุ่ม B และช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของผลต่างค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.41 ถึง 13.56 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ดินทรายปนตะกอนในพื้นที่ศึกษามีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางถนนชนบทได้ในเชิงเบื้องต้น อย่างไรก็ตาม ควรมีการควบคุมความชื้น การบดอัด และกระบวนการทดสอบภาคสนามอย่างเข้มงวด เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอและความน่าเชื่อถือของคุณภาพงานก่อสร้างถนนในระยะยาว

คำสำคัญ : ดินทรายปนตะกอน ชั้นรองพื้นทาง การบดอัดดิน ความหนาแน่นแห้งในสนาม วิธีการร่ายทราย

Abstract

Soil compaction is a critical process in road construction because it directly affects structural stability, load-bearing capacity, and long-term pavement performance. This study aimed to assess the suitability of compacted silty sand for use as a rural road subbase through an integrated geotechnical and statistical approach. The dataset was obtained from soil property testing and field dry density testing using the sand cone method in a case study area in Pathum Thani Province, Thailand, comprising 20 field test samples. Soil classification results indicated that the material was silty sand (SM) according to the Unified Soil Classification System (USCS), with a liquid limit of 49.16, a plastic limit of 45.27, a plasticity index of 3.89, and a specific gravity ranging from 2.65 to 2.75. These properties indicate low plasticity and suggest that the soil has potential for subbase application when moisture content and compaction are properly controlled. Statistical analysis of the field dry density results showed that the average relative compaction was 93.46%, with a coefficient of variation of 6.61%, indicating generally acceptable compaction quality with some variability in field performance. Furthermore, comparison between test groups A and B using Welch's t-test revealed a statistically significant difference, with Group A exhibiting higher compaction performance than Group B. The 95% confidence interval for the mean difference ranged from 8.41 to 13.56. The findings suggest that the studied silty sand has preliminary potential for use as a rural road subbase material; however, stricter control of moisture content, compaction procedures, and field-testing practices is necessary to improve consistency and reliability in construction quality.

Keywords: Silty Sand, Road Subbase, Soil Compaction, Field Dry Density, Sand Cone Method

บทนำ

การบดอัดดินเป็นกระบวนการพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะงานคันทาง งานชั้นรองพื้นทาง และงานโครงสร้างดิน เนื่องจากการบดอัดที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความหนาแน่นแห้ง ลดปริมาณช่องว่าง ลดการทรุดตัว และปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุให้เหมาะสมต่อการรับน้ำหนักในระยะยาว พารามิเตอร์จากการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ เช่น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่เหมาะสม จึงถูกใช้เป็นฐานสำคัญในการควบคุมคุณภาพงานบดอัดในสนามอย่างแพร่หลาย [1] สำหรับงานถนนชั้นรองพื้นทางมีบทบาทสำคัญในการกระจายแรงจากชั้นผิวทางและเพิ่มความมั่นคงให้กับโครงสร้างทาง หากวัสดุมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอหรือมีการบดอัดไม่เพียงพออาจนำไปสู่การทรุดตัวไม่เท่ากัน การแตกร้าว และการเสื่อมสภาพก่อนอายุการใช้งานที่คาดหวังได้ การประเมินวัสดุรองพื้นทางจึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะชนิดของดินเท่านั้น แต่ควรพิจารณาร่วมกับคุณภาพการบดอัดจริงในสนาม [1], [2] ในทางปฏิบัติการควบคุมคุณภาพงานบดอัดในสนามยังคงอาศัยการทดสอบความหนาแน่นแห้งเป็นหลัก โดยเฉพาะวิธีกรวยทรายซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานที่นิยมใช้ในงานสนาม เนื่องจากใช้งานง่าย ต้นทุนไม่สูง และสามารถเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจากห้องปฏิบัติการได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยได้รายงานว่าวิธีกรวยทรายอาจได้รับอิทธิพลจากรูปร่างและขนาดของหลุมทดสอบ รวมถึงเงื่อนไขของวัสดุที่ใช้เติมหลุม ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าความหนาแน่นที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อน [3] นอกจากนี้ข้อจำกัดของวิธีทดสอบแล้ว คุณสมบัติของวัสดุเองยังเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพของการบดอัด โดยเฉพาะดินทรายปนตะกอนซึ่งพบได้บ่อยในงานถนนและงานถม ดินชนิดนี้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุวิศวกรรมได้ หากมีการควบคุมความชื้นและพลังงานบดอัดอย่างเหมาะสม งานศึกษาก่อนหน้าพบว่าระดับการบดอัดมีอิทธิพลโดยตรงต่อพฤติกรรมเชิงกลของ silty sand ทั้งด้านความแข็งแรงและการเปลี่ยนรูป [4] และการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของวัสดุละเอียด

ร่วมกับสภาพการบดอัดยังส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ ในช่วงหลังมีการนำเทคนิคการประเมินคุณภาพขั้นสูง เช่น การวิเคราะห์ข้อมูลและแบบจำลองเชิงอัจฉริยะ มาใช้เพื่อประเมินความสม่ำเสมอของการบดอัดชั้นทางมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในโครงการถนนชนบทและโครงการก่อสร้างทั่วไป การทดสอบภาคสนามแบบดั้งเดิมยังคงมีบทบาทสำคัญในการยอมรับงาน ดังนั้นการศึกษาที่เชื่อมโยงคุณสมบัติทางปฐพีวิศวกรรมของดินเข้ากับผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนาม และวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอย่างเป็นระบบ จึงยังมีความจำเป็นอย่างยิ่งในเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติ [5], [6] จากข้อมูลกรณีศึกษาที่ดินในพื้นที่จัดอยู่ในกลุ่มดินทรายปนตะกอน การวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินความเหมาะสมของดินทรายปนตะกอนบดอัดสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท โดยบูรณาการการวิเคราะห์เชิงปฐพีวิศวกรรมและการวิเคราะห์เชิงสถิติ [7] เพื่ออธิบายทั้งศักยภาพของวัสดุและความสม่ำเสมอของผลการบดอัดในสนามซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างทาง

1. วัตถุประสงค์การวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางปฐพีวิศวกรรมของดินทรายปนตะกอนในพื้นที่กรณีศึกษา และประเมินความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบทตลอดจนประเมินคุณภาพการบดอัดจากผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามด้วยวิธีการทราย

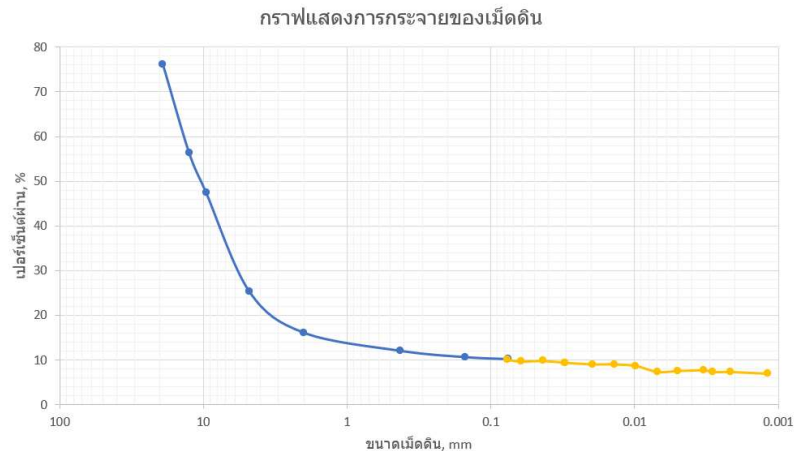
2. สมมติฐานการวิจัย

- 1) ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามของดินทรายปนตะกอนมีค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์อยู่ในระดับที่สะท้อนถึงคุณภาพการบดอัดที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท
- 2) ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามมีความแปรปรวนในระดับที่สามารถใช้ประเมินความสม่ำเสมอของกระบวนการบดอัดในพื้นที่ศึกษาได้
- 3) กลุ่มทดสอบในสนามมีผลการบดอัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างของสภาพการปฏิบัติงานหรือความสม่ำเสมอของกระบวนการก่อสร้างในแต่ละกลุ่ม

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนาม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมของดินทรายปนตะกอนบดอัดสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบทด้วยการบูรณาการการประเมินเชิงปฐพีวิศวกรรมและการวิเคราะห์เชิงสถิติ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการประเมินงานบดอัดดินที่ให้ความสำคัญทั้งกับคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ความสามารถในการบดอัด และความสม่ำเสมอของผลการควบคุมคุณภาพในสนาม

4.1 พื้นที่ศึกษา การวิจัยนี้ดำเนินการในพื้นที่กรณีศึกษาก่อสร้างถนนชนบทแห่งหนึ่งในจังหวัดปทุมธานี โดยเลือกพื้นที่ที่มีลักษณะดินและสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกับพื้นที่ก่อสร้างถนนทั่วไป เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถสะท้อนพฤติกรรมของวัสดุในสภาพการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม ก่อนดำเนินการทดสอบภาคสนาม ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจและวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของดินในพื้นที่ศึกษา เพื่อประเมินความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทาง การทดสอบที่ดำเนินการประกอบด้วย การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินด้วยตะแกรงมาตรฐาน การทดสอบด้วยไฮโดรมิเตอร์ การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน และการประเมินค่าขีดจำกัดลอว์เพอร์รี่ [5] แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กราฟแสดงการกระจายของขนาดเม็ดดิน

จากรูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์พบว่า ดินในพื้นที่ศึกษาจัดอยู่ในกลุ่มดินทรายปนตะกอน (Silty Sand: SM) ตามระบบ USCS โดยมีค่าขีดจำกัดเหลว (LL) เท่ากับ 49.16 ค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL) เท่ากับ 45.27 และค่าดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับ 3.89 ซึ่งสะท้อนว่าดินมีความเป็นพลาสติกต่ำ นอกจากนี้ ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินอยู่ในช่วง 2.65–2.75 เมื่อพิจารณาการจำแนกประเภทตามระบบ AASHTO ดินดังกล่าวสามารถจัดอยู่ในกลุ่ม A-2-5 ซึ่งเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มสามารถจะนำไปใช้เป็นชั้นรองพื้นทางได้หากมีการควบคุมความชื้นและการบดอัดอย่างเหมาะสมเข้มงวด อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของวัสดุรองพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง พบว่าวัสดุมีคุณสมบัติด้านขนาดเม็ดและความคล้อยอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้หรือปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานทางวิศวกรรมได้ เพื่อแสดงข้อมูลพื้นฐานของดินในพื้นที่ศึกษา แสดงข้อมูลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลการจำแนกประเภทดินและสมบัติพื้นฐานที่ใช้ประกอบการวิจัย

รายการ	ค่า
ประเภทดินตาม USCS	SM (Silty Sand)
ประเภทดินตาม AASHTO	A-2-5
ค่าขีดจำกัดเหลว (LL)	49.16
ค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL)	45.27
ค่าดัชนีพลาสติก (PI)	3.89
ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Gs)	2.65–2.75

4.2 การเก็บข้อมูล หลังจากประเมินสมบัติเบื้องต้นของดินแล้วผู้วิจัยได้เตรียมพื้นที่ทดลองโดยทำความสะอาดบริเวณทดสอบและจัดเตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็น ได้แก่ กรวยทราย เครื่องชั่งน้ำหนัก และอุปกรณ์สำหรับวัดความชื้นของดิน เพื่อให้การเก็บข้อมูลภาคสนามเป็นไปอย่างถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการปฏิบัติงาน การเก็บข้อมูลภาคสนามดำเนินการโดยชุดดินในบริเวณที่กำหนดให้เป็นหลุมทดสอบตามขนาดที่เหมาะสม จากนั้นเก็บตัวอย่างดินแยกจากหลุมที่ชุด

ออกมาเพื่อนำไปชั่งน้ำหนัก และใช้เป็นข้อมูลสำหรับคำนวณค่าความหนาแน่นแห้งในสนามในลำดับต่อไป ข้อมูลที่เก็บจากภาคสนามประกอบด้วยน้ำหนักดินเปียก ปริมาตรของหลุมทดสอบ และค่าความชื้นของดิน ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนาม สำหรับการวิจัยครั้งนี้ ได้เก็บข้อมูลผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 ชุดข้อมูล โดยกำหนดค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 1.80 g/cm^3 เป็นค่าอ้างอิงในการประเมินคุณภาพการบดอัดของแต่ละจุดทดสอบ เพื่อสรุปขอบเขตข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของข้อมูลภาคสนามที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

รายการ	รายละเอียด
วิธีทดสอบภาคสนาม	การทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามด้วยวิธีกรวยทราย
จำนวนชุดข้อมูล	20 ชุดข้อมูล
ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ	1.80 g/cm^3
ตัวแปรหลักที่ใช้วิเคราะห์	ความหนาแน่นแห้งในสนาม, ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์

ในการศึกษานี้การเก็บข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 ชุดเป็นข้อมูลที่ได้จากโครงการก่อสร้างงานถนนเดียวกัน โดยเก็บตามตำแหน่งและระยะทางที่กำหนดตามแนวทางการตรวจสอบงานภาคสนามของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง สำหรับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ ผู้วิจัยได้จัดกลุ่มข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ A และ B ตามชุดข้อมูลที่บันทึกไว้ในการตรวจสอบภาคสนาม เพื่อใช้พิจารณาความแตกต่างของผลการบดอัดระหว่างชุดข้อมูล อย่างไรก็ตามการแบ่งกลุ่มดังกล่าวเป็นการจัดกลุ่มเพื่อการวิเคราะห์ทางสถิติภายในชุดข้อมูลจากโครงการก่อสร้างงานถนนเดียวกัน มิได้หมายถึงการเปรียบเทียบวัสดุต่างชนิดหรือพื้นที่ก่อสร้างคนละโครงการ

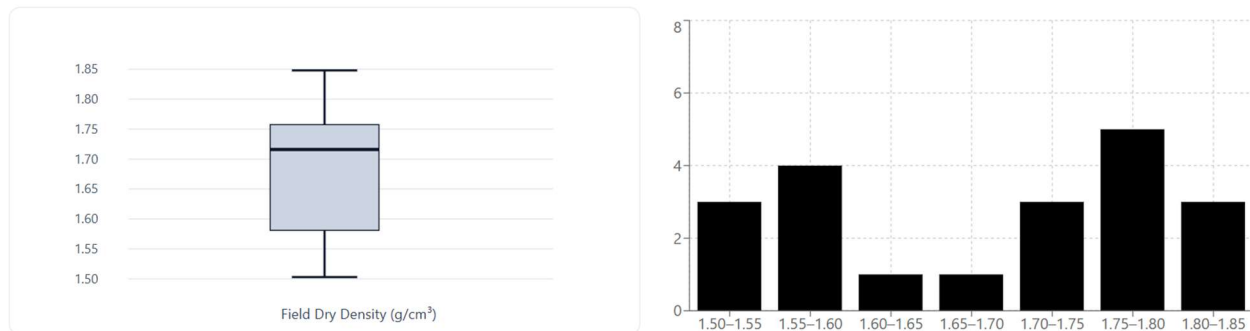
4.3 การทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนาม การประเมินความหนาแน่นแห้งของดินในสนามดำเนินการด้วยวิธีกรวยทราย (Sand Cone Method) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ทรายมาตรฐานในการหาปริมาตรของหลุมทดสอบ หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลน้ำหนักดินเปียก น้ำหนักดินแห้ง และปริมาตรหลุมมาคำนวณหาความหนาแน่นแห้งในสนาม วิธีดังกล่าวเป็นเครื่องมือสำคัญในการตรวจสอบคุณภาพการบดอัดดินในงานก่อสร้างถนน เนื่องจากสามารถประเมินระดับความแน่นของวัสดุในสภาพจริงได้โดยตรง ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 ครั้ง แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นแห้งที่วัดได้มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง $1.503\text{--}1.848 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างของระดับการบดอัดในแต่ละจุดทดสอบแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 ครั้ง

ครั้งที่ทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ (g/cm^3)	ความหนาแน่นแห้งในสนาม (g/cm^3)
1	1.8	1.753
2	1.8	1.827
3	1.8	1.581
4	1.8	1.710
5	1.8	1.742
6	1.8	1.797

ครั้งที่ทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ (g/cm^3)	ความหนาแน่นแห้งในสนาม (g/cm^3)
7	1.8	1.722
8	1.8	1.563
9	1.8	1.761
10	1.8	1.592
11	1.8	1.581
12	1.8	1.752
13	1.8	1.531
14	1.8	1.522
15	1.8	1.503
16	1.8	1.813
17	1.8	1.607
18	1.8	1.754
19	1.8	1.677
20	1.8	1.848

ผู้วิจัยได้พิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลความหนาแน่นแห้งในสนามด้วยแผนภาพ Boxplot และ Histogram เพื่อใช้ตรวจสอบแนวโน้มของข้อมูลและประเมินความสม่ำเสมอของผลการทดสอบเบื้องต้น



รูปที่ 2 ค่าการกระจายตัวของความหนาแน่นแห้งในสนามจากผลการทดสอบ

จากรูปที่ 2 แผนภาพกล่องแสดงค่าการกระจายตัวของความหนาแน่นแห้งในสนามจากผลการทดสอบจำนวน 20 จุด โดยค่ามัธยฐานอยู่ใกล้เคียง 1.72 g/cm^3 และข้อมูลส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ในช่วงระหว่างควอไทล์สะท้อนให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของผลการทดสอบในระดับหนึ่ง แม้ว่าจะพบความแตกต่างของค่าความหนาแน่นในบางจุดทดสอบ ส่วนฮิสโตแกรมแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นแห้งในสนามมีการกระจายตัวอยู่ในช่วงประมาณ $1.50\text{--}1.85 \text{ g/cm}^3$ โดยค่าที่พบมากกระจุกตัวในช่วงประมาณ $1.70\text{--}1.75 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งสะท้อนว่าผลการทดสอบส่วนใหญ่อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน และสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินคุณภาพและความสม่ำเสมอของการบดอัดดินในสนามได้

4.4 การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ ภายหลังจากได้ค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนามจากการทดสอบด้วยวิธีกรวยทรายแล้ว ผู้วิจัยได้นำค่าดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ (Relative Compaction) เพื่อประเมินระดับความแน่นของดินในสนามเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์คำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งในสนาม (γ_{field}) และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ (γ_{max}) ดังสมการที่ (1)

$$Relative\ Compaction\ (\%) = \frac{\gamma_{max}}{\gamma_{field}} \times 100$$

เมื่อ

γ_{field} = ค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนาม (g/cm^3)

γ_{max} = ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ (g/cm^3)

ในการวิจัยครั้งนี้กำหนดให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ $1.80\ g/cm^3$ สำหรับทุกจุดทดสอบ และนำค่าความหนาแน่นแห้งในสนามของแต่ละจุดมาคำนวณเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ เพื่อใช้เป็นดัชนีสำหรับประเมินคุณภาพงานบดอัดในสนาม ตัวอย่างเช่น หากค่าความหนาแน่นแห้งในสนามของจุดทดสอบหนึ่งมีค่าเท่ากับ $1.753\ g/cm^3$ ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์จะคำนวณได้ดังนี้

$$Relative\ Compaction = \left(\frac{1.753}{1.80} \right) \times 100 = 97.39$$

การคำนวณในลักษณะเดียวกันนี้ถูกนำไปใช้กับข้อมูลภาคสนามทั้งหมดจำนวน 20 ชุดข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบระดับการบดอัดของแต่ละจุดทดสอบ และใช้ประกอบการพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท เพื่อให้เห็นผลการคำนวณอย่างชัดเจน ตารางที่ 4 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งในสนามและค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ของแต่ละจุดทดสอบ

ตารางที่ 4 ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ของผลการทดสอบภาคสนาม

ครั้งที่ ทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ (g/cm^3)	ความหนาแน่นแห้งในสนาม (g/cm^3)	ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัด สัมพัทธ์ (%)
1	1.80	1.753	97.39
2	1.80	1.827	101.50
3	1.80	1.581	87.83
4	1.80	1.710	95.00
5	1.80	1.742	96.78
6	1.80	1.797	99.83
7	1.80	1.722	95.67
8	1.80	1.563	86.83
9	1.80	1.761	97.83
10	1.80	1.592	88.44

11	1.80	1.581	87.83
12	1.80	1.752	97.33
13	1.80	1.531	85.06
14	1.80	1.522	84.56
15	1.80	1.503	83.50
16	1.80	1.813	100.72
17	1.80	1.607	89.28
18	1.80	1.754	97.44
19	1.80	1.677	93.17
20	1.80	1.848	102.67

จากผลการคำนวณพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์มีค่ากระจายอยู่ในช่วงประมาณ 83.50–102.67% ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของระดับการบดอัดในแต่ละจุดทดสอบ ทั้งนี้ค่าที่สูงกว่า 100% อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการทดสอบภาคสนาม ความแตกต่างของสภาพวัสดุในแต่ละจุด หรือความไม่สอดคล้องระหว่างค่ามาตรฐานในห้องปฏิบัติการกับสภาพจริงในสนาม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติมด้วยวิธีทางสถิติเพื่อประเมินแนวโน้มรวมและความสม่ำเสมอของผลการทดสอบอย่างเป็นระบบ

4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติหลังการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ของข้อมูลทุกชุดแล้ว ผู้วิจัยได้นำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนาและสถิติเชิงอนุมาน เพื่อประเมินแนวโน้มของข้อมูล ระดับความแปรปรวน และความแตกต่างของผลการทดสอบระหว่างกลุ่มตัวอย่างในสนาม โดยสถิติเชิงพรรณนาที่ใช้ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่ามัธยฐาน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation: CV) เพื่ออธิบายลักษณะการกระจายตัวและระดับความสม่ำเสมอของผลการบดอัดในสนาม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนใช้เป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินระดับความผันแปรของข้อมูลเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล จากสมการที่ (2)

$$CV(\%) = \left(\frac{SD}{\bar{X}} \right) \times 100$$

เมื่อ

SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

$\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

นอกจากนี้ผู้วิจัยใช้แผนภาพ Boxplot และ Histogram เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเชิงภาพ โดย Boxplot ใช้ในการพิจารณาค่ามัธยฐาน ช่วงระหว่างควอไทล์ และแนวโน้มของค่าที่อาจแตกต่างจากข้อมูลส่วนใหญ่ ขณะที่ Histogram ใช้ในการพิจารณาความถี่ของข้อมูลในแต่ละช่วงค่า เพื่อประเมินว่าข้อมูลมีการกระจุกตัวในช่วงใดและมีความสม่ำเสมอเพียงใด สำหรับการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ระหว่างกลุ่มตัวอย่าง A และ B ผู้วิจัยเลือกใช้ Welch's t-test เนื่องจากเป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลเพียงสองกลุ่ม และเป็นวิธีที่เหมาะสมในกรณีที่ข้อมูลอาจมีความแปรปรวนไม่เท่ากันระหว่างกลุ่ม โดยรายงานผลร่วมกับช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของผลต่างค่าเฉลี่ย เพื่อแสดงทิศทางและขนาดของความแตกต่างอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังประเมินขนาดอิทธิพล (effect size) ด้วยค่า Cohen's d เพื่อสะท้อนความสำคัญเชิงปฏิบัติของ

ความแตกต่างที่พบ ไม่ได้พิจารณาเฉพาะนัยสำคัญทางสถิติเท่านั้น [7], [8] โดยทั้งนี้การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A และ B ใน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่าผลการบดอัดจากชุดข้อมูลภาคสนามภายในโครงการก่อสร้างงานถนนเดียวกันว่ามีความ แตกต่างกันหรือไม่ เพื่อใช้ในการตีความผลการเปรียบเทียบที่มุ่งเน้นในเชิงความสม่ำเสมอของข้อมูลและกระบวนการควบคุม คุณภาพมากกว่าการสรุปว่าความแตกต่างดังกล่าวเกิดจากปัจจัยภาคสนามอื่นๆ ใดโดยตรง

ผลการวิจัย

5.1 ผลการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ ผลการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์จากข้อมูลการ ทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 ชุดข้อมูล พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์มีค่าตั้งแต่ 83.503% ถึง 102.689% และมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 93.46% ซึ่งสะท้อนว่าการบดอัดดินในพื้นที่ศึกษาโดยรวมอยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่ยังคงมี ความแตกต่างของระดับการบดอัดระหว่างจุดทดสอบอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณารายจุด พบว่ามีบางตำแหน่งที่ค่าเปอร์เซ็นต์การบด อัดสัมพัทธ์มากกว่า 100% ได้แก่ จุดทดสอบที่ 2, 16 และ 20 ขณะที่บางตำแหน่งมีค่าต่ำกว่า 90% หลายจุด เช่น จุดทดสอบที่ 3, 8, 10, 11, 13, 14, 15 และ 17 ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่า แม้ว่าค่าเฉลี่ยรวมของโครงการจะอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ในระดับรายจุด ยังคงมีความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพการบดอัด ซึ่งควรได้รับการพิจารณาควบคู่กับผลเชิงสถิติในขั้นตอนต่อไป แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์

ครั้งที่ทดสอบ	กลุ่มที่ทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งในสนาม (g/cm ³)	ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ (%)
1	A	1.753	97.419
2	A	1.827	101.515
3	B	1.581	87.862
4	A	1.710	95.051
5	A	1.742	96.825
6	A	1.797	99.858
7	A	1.722	95.678
8	B	1.563	86.883
9	A	1.761	97.848
10	B	1.592	88.492
11	B	1.581	87.847
12	A	1.752	97.343
13	B	1.531	85.075
14	B	1.522	84.604
15	B	1.503	83.503
16	A	1.813	100.734
17	B	1.607	89.323
18	A	1.754	97.478

19	B	1.677	93.170
20	A	1.848	102.689

5.2 ผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา ผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนาของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเท่ากับ 93.46% ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.38 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 6.176 ค่าความแปรปรวนเท่ากับ 38.14 และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 6.61% ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ที่อยู่ในระดับไม่สูงมากนักสะท้อนว่าข้อมูลมีความแปรปรวนในระดับปานกลาง และแสดงให้เห็นว่ากระบวนการบดอัดในสนามมีความสม่ำเสมอในระดับหนึ่ง แต่ยังไม่เพียงพอที่จะยืนยันได้ว่าคุณภาพงานคงที่ในทุกตำแหน่ง เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าความหนาแน่นแห้งในสนาม พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ในช่วงประมาณ 1.70–1.75 g/cm³ โดยค่ามัธยฐานอยู่ประมาณ 1.72 g/cm³ และช่วงข้อมูลทั้งหมดอยู่ระหว่าง 1.503–1.848 g/cm³ ลักษณะดังกล่าวสะท้อนว่าการทดสอบมีค่ากลางที่ค่อนข้างชัดเจน แต่ยังมีค่าต่ำและค่าสูงบางจุดที่ทำให้การกระจายของข้อมูลค่อนข้างกว้าง แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนาของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์

ตัวแปร	Mean	SE Mean	StDev	Variance	Coef Var (%)
Relative Compaction	93.46	1.38	6.176	38.14	6.61

5.3 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่มและขนาดอิทธิพล ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ระหว่างกลุ่ม A และกลุ่ม B ด้วยวิธี Welch's t-test พบว่า กลุ่ม A มีค่าเฉลี่ยของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์สูงกว่ากลุ่ม B อย่างชัดเจน โดยกลุ่ม A มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 98.41% ขณะที่กลุ่ม B มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 87.42% สะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของคุณภาพการบดอัดในสนามระหว่างสองกลุ่มพื้นที่อย่างเด่นชัด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละกลุ่ม พบว่าข้อมูลภายในแต่ละกลุ่มมีการกระจายตัวในระดับไม่สูงมากนัก จึงสามารถใช้เป็นฐานในการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มได้อย่างเหมาะสม [7], [8] แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มด้วย Welch's t-test

รายการ	กลุ่ม A	กลุ่ม B
จำนวนตัวอย่าง (n)	11	9
ค่าเฉลี่ย RC (%)	98.41	87.42
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	2.450	2.900

จากตารางที่ 7 พบว่า กลุ่ม A มีค่าเฉลี่ยของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์สูงกว่ากลุ่ม B อย่างชัดเจน โดยกลุ่ม A มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 98.41% ขณะที่กลุ่ม B มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 87.42% และเมื่อพิจารณาร่วมกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละกลุ่ม พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลภายในกลุ่มอยู่ในระดับไม่สูงมากนัก สะท้อนว่าค่าที่วัดได้ภายในแต่ละกลุ่มมีความสม่ำเสมอใน

ระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสองกลุ่มยังคงเด่นชัด จึงได้นำข้อมูลดังกล่าวไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Welch's t-test เพื่อยืนยันว่าความแตกต่างที่พบมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบ Welch's t-test

สถิติการเปรียบเทียบ	ค่า
ผลต่างค่าเฉลี่ย (%)	10.986
95% CI ของผลต่างค่าเฉลี่ย	8.410 ถึง 13.561
Welch's (t)	9.029
df	15.768
(p)-value	< 0.001
Cohen's (d)	4.131
การตีความ	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และมีอิทธิพลสูงมาก

ผลการทดสอบในตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่า ผลต่างค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม A และกลุ่ม B เท่ากับ 10.986 จุดร้อยละ และช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 8.410 ถึง 13.561 ซึ่งไม่ครอบคลุมศูนย์ สอดคล้องกับค่า Welch's t เท่ากับ 9.029 และค่า $p < 0.001$ ที่ยืนยันว่าความแตกต่างระหว่างสองกลุ่มมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างชัดเจน นอกจากนี้ค่า Cohen's $d=4.131$ ซึ่งอยู่ในระดับสูงมาก ยังสะท้อนว่าความแตกต่างดังกล่าวมีความสำคัญในเชิงปฏิบัติสำหรับการควบคุมคุณภาพงานบดอัดในสนาม

5.4 การประเมินการผ่านเกณฑ์การบดอัดตามเกณฑ์ 95% เพื่อประเมินผลการบดอัดในมุมมองของการควบคุมคุณภาพงานทาง ผู้วิจัยได้นำค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ขั้นต่ำที่ 95% ของค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการพิจารณายอมรับงานบดอัดสำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทางและชั้นทางรอง [1], [5] ผลการประเมินพบว่า มีจุดทดสอบที่ให้ค่า RC ตั้งแต่ 95% ขึ้นไป จำนวน 11 จุด คิดเป็น 55.00% ของข้อมูลทั้งหมด ขณะที่อีก 9 จุด หรือ 45.00% มีค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ต่ำกว่าเกณฑ์ดังกล่าว ผลนี้สะท้อนว่าแม้ว่าค่าเฉลี่ยรวมจะอยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่เมื่อใช้เกณฑ์ยอมรับรายจุดจะพบว่ากระบวนการบดอัดยังไม่สามารถรักษาคุณภาพให้ผ่านเกณฑ์ได้อย่างสม่ำเสมอทุกตำแหน่ง แสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การประเมินการผ่านเกณฑ์การบดอัดที่ระดับ 95%

เกณฑ์การพิจารณา	จำนวนจุดทดสอบ	ร้อยละ
ผ่านเกณฑ์ (Relative Compaction $\geq$ 95%)	11	55.00
ไม่ผ่านเกณฑ์ (Relative Compaction $<$ 95%)	9	45.00
รวม	20	100.00

5.5 การประเมินความสม่ำเสมอและความเสี่ยงของกระบวนการบดอัดในสนาม ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แม้ค่าเฉลี่ยรวมของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์จะอยู่ที่ 93.46% และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 6.61% ซึ่งสะท้อนว่าการ

บดอัดในสนามโดยรวมอยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่ผลดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะยืนยันได้ว่ากระบวนการบดอัดมีความสม่ำเสมอในทุกตำแหน่งของพื้นที่ศึกษา เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A และ B ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะเห็นได้ชัดว่าคุณภาพการบดอัดยังมีความไม่สม่ำเสมอระหว่างจุดทดสอบและระหว่างกลุ่มพื้นที่ ในเชิงการประเมินความเสี่ยง จุดทดสอบที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ต่ำกว่า 95% อาจสะท้อนถึงความเสี่ยงต่อสมรรถนะของชั้นรองพื้นทางในระยะยาว โดยเฉพาะจุดที่มีค่าต่ำกว่า 90% ซึ่งมีแนวโน้มเกี่ยวข้องกับการรับน้ำหนักที่ลดลง การเปลี่ยนรูปสะสม และการทรุดตัวไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างทาง ทั้งนี้ องค์ประกอบของส่วนละเอียดและระดับการบดอัดเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อ compactability และสมรรถนะของวัสดุชั้นรองพื้นทางโดยตรง [4], [5] ผลการจำแนกระดับความเสี่ยงพบว่าจุดทดสอบ 8 จุด หรือ 40.00% ของข้อมูลทั้งหมด อยู่ในระดับความเสี่ยงสูงจากการมีค่า Relative Compaction ต่ำกว่า 90% ข้อค้นพบดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการประเมินคุณภาพงานบดอัดไม่ควรพิจารณาเฉพาะค่าเฉลี่ยรวมของโครงการ แต่ควรพิจารณาความสม่ำเสมอและความเสี่ยงของผลการทดสอบรายจุดร่วมด้วย [8]

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบความสม่ำเสมอของผลการบดอัดระหว่างกลุ่ม

กลุ่ม	จำนวนตัวอย่าง (N)	ค่าเฉลี่ย Relative Compaction (%)	
A	11	98.405	มีความสม่ำเสมอและอยู่ในระดับยอมรับได้
B	9	87.417	ต่ำกว่าเกณฑ์และมีแนวโน้มต้องปรับปรุง

อภิปรายผล

ดินทรายปนตะกอนในพื้นที่ศึกษามีแนวโน้มแสดงศักยภาพเบื้องต้นสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางถนนชนบท ในเชิงปฐพีวิศวกรรม อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการทดสอบภาคสนามร่วมกับค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ พบว่าศักยภาพของวัสดุเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอที่จะรับประกันคุณภาพของงานก่อสร้าง หากกระบวนการบดอัดในสนามยังขาดความสม่ำเสมอ ทั้งนี้งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบของส่วนละเอียดและระดับการบดอัดมีอิทธิพลโดยตรงต่อพฤติกรรมเชิงกล ความสามารถในการรับน้ำหนัก และความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทาง [4], [5] แม้ว่าค่าเฉลี่ยรวมของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์จะอยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่การที่มีเพียง 55.00% ของจุดทดสอบทั้งหมดผ่านเกณฑ์ 95% แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยรวมอาจไม่สามารถสะท้อนคุณภาพของงานได้ครบถ้วนในเชิงปฏิบัติ กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยอาจดูยอมรับได้ แต่ยังคงมีบางตำแหน่งที่มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานและอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของชั้นรองพื้นทางในระยะยาวได้ นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A และ B ที่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติยังสะท้อนว่าปัจจัยภาคสนามหรือความแตกต่างของกระบวนการปฏิบัติงานมีผลต่อผลการบดอัดอย่างชัดเจน ดังนั้นการควบคุมความชื้น พลังงานบดอัด และความสม่ำเสมอของการดำเนินงานในสนามจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทต่อความสำเร็จของการนำดินชนิดนี้ไปใช้เป็นชั้นรองพื้นทางอย่างแท้จริง ทั้งนี้ แม้ปัจจุบันจะมีแนวทางการประเมินคุณภาพการบดอัดด้วยเทคนิคข้อมูลและแบบจำลองขั้นสูงมากขึ้น แต่การประเมินเชิงภาคสนามแบบดั้งเดิมยังคงมีความสำคัญอย่างมากในงานควบคุมคุณภาพระดับโครงการ [3], [7], [8]

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมของดินทรายปนตะกอนบดอัดสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท โดยอาศัยการวิเคราะห์เชิงปฐพีวิศวกรรมร่วมกับการวิเคราะห์เชิงสถิติจากผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนาม ด้วยวิธีการรวบรวบ ผลการศึกษาพบว่าดินในพื้นที่กรณีศึกษามีแนวโน้มสอดคล้องกับกลุ่มดินทรายปนตะกอน (SM) และมีสมบัติ

พื้นฐานที่สะท้อนศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางใต้เมื่อมีการควบคุมสภาพการก่อสร้างอย่างเหมาะสม ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 จุด พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์มีค่าอยู่ในช่วง 83.503% ถึง 102.689% และมีค่าเฉลี่ยรวม 93.46% ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 6.61% สะท้อนว่ากระบวนการบดอัดโดยรวมอยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่ยังคงมีความแปรปรวนของผลการทดสอบอยู่พอสมควร เมื่อพิจารณาในเชิงเกณฑ์ยอมรับงานพบว่ามี 55.00% ของจุดทดสอบทั้งหมดที่ผ่านเกณฑ์ 95% แสดงว่าคุณภาพการบดอัดยังไม่สม่ำเสมอในทุกตำแหน่งของพื้นที่ศึกษา ผลการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A และ B ด้วย Welch's t-test ยืนยันว่าทั้งสองกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยกลุ่ม A ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงกว่ากลุ่ม B อย่างชัดเจน และมีขนาดอิทธิพลอยู่ในระดับสูงมาก ข้อค้นพบนี้สะท้อนว่านอกจากคุณสมบัติของวัสดุแล้ว ความสม่ำเสมอของกระบวนการปฏิบัติงานในสนามยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของการบดอัดและการใช้งานวัสดุในชั้นรองพื้นทาง โดยสรุปดินทรายปนตะกอนในพื้นที่ศึกษามีศักยภาพเบื้องต้นในการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางถนนชนบทได้ในเชิงเบื้องต้น แต่การใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพและความมั่นคงในระยะยาวจำเป็นต้องอาศัยการควบคุมความชื้น การบดอัด และการตรวจสอบคุณภาพภาคสนามอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดความเสี่ยงต่อปัญหาโครงสร้างทางในอนาคต [3], [4], [5]

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบว่าแม้ว่าดินทรายปนตะกอนในพื้นที่ศึกษามีศักยภาพสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท แต่ผลการทดสอบในสนามยังแสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของระดับการบดอัดในบางตำแหน่ง ดังนั้นในการนำวัสดุชนิดนี้ไปใช้จริง ควรให้ความสำคัญกับการควบคุมความชื้นของดินก่อนและระหว่างการบดอัดอย่างเหมาะสม รวมถึงควบคุมพลังงานบดอัดหรือจำนวนเที่ยวบดอัดให้มีความสม่ำเสมอ เพื่อให้ค่าความหนาแน่นแห้งในสนามเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ ควรเพิ่มความเข้มงวดในการตรวจสอบคุณภาพภาคสนาม โดยเฉพาะในจุดที่มีแนวโน้มให้ค่าการบดอัดต่ำกว่าเกณฑ์หรืออยู่ในกลุ่มความเสี่ยงสูง เนื่องจากจุดดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและความมั่นคงของชั้นรองพื้นทางในระยะยาว การประเมินคุณภาพงานบดอัดจึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะค่าเฉลี่ยรวมของโครงการเท่านั้น แต่ควรพิจารณาร่วมกับผลการทดสอบรายจุด สัดส่วนของจุดที่ผ่านเกณฑ์ และความสม่ำเสมอของกระบวนการก่อสร้างในแต่ละพื้นที่ด้วย สำหรับการศึกษาครั้งต่อไป ควรมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมในประเด็นที่อาจส่งผลกระทบต่อความแปรปรวนของผลการบดอัด เช่น ค่าความชื้นของดินรายจุด จำนวนเที่ยวบดอัด ความหนาของชั้นวัสดุ ตำแหน่งจุดทดสอบ และสภาพการทำงานของเครื่องจักร เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยภาคสนามกับค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น อีกทั้งควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างทดสอบให้มากกว่าเดิม เพื่อยกระดับความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ทางสถิติ และสนับสนุนการพัฒนากระบวนการควบคุมคุณภาพที่เหมาะสมสำหรับงานชั้นรองพื้นทางถนนชนบทในทางปฏิบัติ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Spagnoli G, Shimobe S. An overview on the compaction characteristics of soils by laboratory tests. Engineering Geology. 2020;278:105830. doi:10.1016/j.enggeo.2020.105830.
- [2] Park SS. Evaluation of the sand-cone method for determination of the in-situ density of soil. Géotechnique. 2010;60(9):701-707. doi:10.1680/geot.9.T.004.
- [3] Park SS, Ogunjinmi PD, Lee HI, Woo SW, Lee DE. Effect of wetting conditions on the in situ density of soil using the sand-cone method. Applied Sciences. 2021;11(2):718. doi:10.3390/app11020718.
- [4] Santucci de Magistris F, Silvestri F, Vinale F. The influence of compaction on the mechanical behaviour of a silty sand. Soils and Foundations. 1998;38(4):41-56. doi:10.3208/sandf.38.4_41.

- [5] Bak A, Chmielewski R. The influence of fine fractions content in non-cohesive soils on their compactibility and the CBR value. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2019;25(4):353-361. doi:10.3846/jcem.2019.9687.
- [6] Alramahi B, Fratta D, Alshibli KA. Parameter estimation for evaluation of in situ density and moisture content by using elastic and electromagnetic wave propagation. *Transportation Research Record*. 2008;2045(1):19-28. doi:10.3141/2045-03.
- [7] Wang X, Dong X, Zhang Z, Zhang J, Ma G, Yang X. Compaction quality evaluation of subgrade based on soil characteristics assessment using machine learning. *Transportation Geotechnics*. 2022;32:100703. doi:10.1016/j.trgeo.2021.100703.
- [8] Xu C, Li T, Li X, Yang G. Compaction uniformity evaluation of subgrade in highway based on principal components analysis and back propagation neural networks. *Sustainability*. 2023;15(2):1067. doi:10.3390/su15021067.