



ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นแห้งของวัสดุชนิดต่าง ๆ จากการอ่านค่าโดยเครื่องมือวัดนิวเคลียร์เกจ
ในงานก่อสร้างทางหลวง

FACTORS AFFECTING THE DRY DENSITY OF MATERIALS USING
NUCLEAR DENSITY GAUGES IN HIGHWAY CONSTRUCTION

สราวุธ หมอดี้^{1*} และ พงศกร พรหมรัตนศิลป์²

¹นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*Corresponding author, Email: sarawut_mo@kkumail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นแห้งจากเครื่องมือวัดนิวเคลียร์เกจในงานก่อสร้างทางหลวงบนวัสดุชั้นโครงสร้างทาง 3 ชนิด คือ ดินถมคันทาง, ลูกกรังรองพื้นทางและหินคลุกพื้นทาง โดยการอ่านค่าด้วยวิธีนิวเคลียร์แบบกระเจิงกลับและแบบส่งผ่านโดยตรง มีการอ่านค่าที่ระยะเวลา 15 วินาที, 1 นาทีและ 4 นาที เพื่อศึกษาว่าเวลาอ่านค่าเข้าเร็วมีผลต่อความถูกต้องหรือไม่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาความหนาแน่นแห้งด้วยวิธีแทนที่ด้วยทราย สำหรับวัสดุชั้นโครงสร้างทางทั้งสามชนิดจะทำการทดสอบจำนวนชั้นละ 60 จุดทดสอบ รวมทั้งสิ้น 180 จุดทดสอบ จากการทดสอบพบว่าค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดนิวเคลียร์เกจมีแนวโน้มให้ค่ามากกว่าค่าที่ได้จากวิธีแทนที่ด้วยทรายเหมือนกันในชั้นโครงสร้างทางทั้ง 3 ชนิด ส่วนระยะเวลาในการอ่านค่าเร็วไม่มีผลต่อค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือ ส่วนขนาดผลของมวลรวมหรือขนาดของวัสดุมีผลต่อการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดนิวเคลียร์เกจ จากการศึกษาพบความสัมพันธ์ระหว่างการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดนิวเคลียร์เกจและวิธีแทนที่ด้วยทรายมีความสัมพันธ์เชิงเส้น และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี จึงมีความมั่นใจในความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของเครื่องมือ หากจะนำเครื่องมือวัดนิวเคลียร์เกจมาใช้งานจำเป็นต้องมีการสอบเทียบกับวิธีแทนที่ด้วยทรายก่อน พบข้อได้เปรียบของเครื่องมือที่เหนือกว่าการทดสอบด้วยวิธีแทนที่ด้วยทรายคือเรื่องระยะเวลาการทดสอบที่รวดเร็วและถูกต้อง ซึ่งสอดคล้องกับการก่อสร้างในปัจจุบันที่ต้องการความรวดเร็วที่ต้องมาพร้อมกับคุณภาพ

คำสำคัญ: ดินถมคันทาง; ลูกกรังรองพื้นทาง; หินคลุกพื้นทาง; ความแน่นในสนาม; เครื่องมือวัดนิวเคลียร์เกจ; วิธีแทนที่ด้วยทราย

ABSTRACT

This research studied the factors affecting the dry density measurement read from nuclear density gauge in highway construction work. The pavement structure of this study included earth embankment, soil aggregate subbase, and crushed rock soil aggregate type base. This study also compared backscatter and direct transmission methods with sand replacement method. Both the

backscatter and the direct transmission methods were read at 15 seconds, 1 minute, and 4 minutes from the nuclear density gauge. With a total of 180 test points, 60 test points were collected from each pavement material. According to the results, the dry density values measured from the nuclear density gauge were much higher than the obtained values from the sand replacement method, which these results were found to be similar among the three pavement materials. The reading time did not affect the values which were measured from the nuclear density gauge. However, it was found that the dry density values varied with grain sizes. A linear relation and a good coefficient (R^2) were found between the nuclear methods and the sand replacement method. These hence ensured, the accuracy of the instrument. From the present study, the nuclear method showed the advantages of speed and repeatability, which can serve the current constructions which require fast construction that come with high quality. Nonetheless, the nuclear gauge equipment, must be calibrated with a reliable method for the confidence of users.

KEYWORDS: earth embankment; soil aggregate subbase; crushed rock soil aggregate type base; field compacted; nuclear methods; sand replacement method

1. บทนำ

ในการก่อสร้างทางจะต้องควบคุมคุณภาพตั้งแต่ขบวนการคัดเลือกวัสดุต้องมีมาตรฐานตรงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง การบดอัดต้องได้ความแน่นตามมาตรฐาน การตรวจสอบค่าความแน่นในสนามของกรมทางหลวง ประเทศไทย กำหนดความหนาแน่นแห้งในสนามต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดของค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ การทดสอบความแน่นในสนามที่แพร่หลายและเป็นที่ยอมรับสำหรับการตรวจรับงานส่วนใหญ่จะใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D1556 วิธีการแทนที่ด้วยทราย (Sand replacement method, SRM) แต่มีข้อจำกัดคือ วิธีทำงานหลายขั้นตอน ไม่สามารถดำเนินการได้ตลอดสายทาง ผลการทดสอบออกช้า การก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง และยังมีวิธีนิวเคลียร์ (Nuclear method) ได้มีการนำมาใช้ในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกตั้งแต่ปี ค.ศ.1950 ตามมาตรฐาน ASTM D6938, D2950 โดยงานวิจัยที่ผ่านมา S.Altun et al. [1] ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์การบดอัดชั้นรองพื้นทางในสนาม จากการทดสอบได้สรุปผลความสัมพันธ์ระหว่าง 2 วิธีการเป็นสมการคือ $\gamma_{ds(a)} = (0.894)\gamma_{ds(t)} + (0.241)$ และ การประเมินค่าผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการทดสอบแบบวิธีนิวเคลียร์นั้นค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือ ($R^2 = 0.924$) ในงานวิจัยของ M.A.Ismail [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำวิธีนิวเคลียร์มาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างถนน ในรัฐยะโฮร์ ประเทศมาเลเซีย โดยสรุปว่า เป็นเทคนิคการทดสอบที่รวดเร็วและง่ายในการวัดค่าความหนาแน่น ค่าความชื้นในสนาม, ลดความผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์, เป็นวิธีการทดสอบที่ไม่ทำลาย (Non-destructive), ทำซ้ำได้ (Repeatable) สามารถดำเนินงานก่อสร้างได้ต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดเครื่องจักร จากงานทบทวนวรรณกรรมของ K.W.McLain et al. [3] ได้ศึกษาสังเคราะห์และวิเคราะห์เชิงวิพากษ์บทความและงานวิจัยที่ผ่านมามีจำนวน 39 งานวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับการบดอัดและการทดสอบความแน่นด้วยวิธีการต่าง ๆ รวมทั้งด้วยวิธีนิวเคลียร์ พบว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มุ่งเน้นไปที่การทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นพิเศษและเกือบจะไร้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้เกี่ยวกับพารามิเตอร์ประสิทธิภาพของการทดสอบภาคสนาม เช่น การทำซ้ำและเวลาในการทำการทดสอบภาคสนาม เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการวิจัยที่มีวิธีการทดสอบที่หลากหลายในสภาพดินชุดเดียวกัน

สำหรับกรมทางหลวง ประเทศไทย ได้นำวิธีนิวเคลียร์มาใช้เมื่อปี พ.ศ.2555 แต่กีดขวางการนำมาใช้งานต่อเนื่อง สาเหตุจากจำนวนเครื่องมือที่มีอยู่, การขออนุญาตใช้งานเครื่องมือที่มีรังสี, ความไม่มั่นใจในผลที่ได้จากการอ่านว่ามีความถูกต้องแม่นยำเพียงใด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นแห้งของวัสดุโครงสร้าง

ทางชนิดต่าง ๆ ในสนามจากเครื่องวัดนิวเคลียร์เกจและศึกษาความถูกต้อง แม่นยำ เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการใช้งานสำหรับควบคุมงานก่อสร้างทางในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแน่นในสนามจากเครื่องมือวัดนิวเคลียร์เกจ (Nuclear density gauge, NDG) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแทนที่ด้วยทราย ในโครงสร้างทาง 3 ประเภท คือ ดินถมคันทาง (Earth embankment), ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) และชั้นพื้นทาง (Base)

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุในงานก่อสร้างทางที่มีความแตกต่างกัน 3 ชนิด ตามรูปที่ 1 - 3 คือ 1) ดินถมคันทางเป็นดินปนทรายสีน้ำตาล แห้ง บ.หนองแขวงม่วง ต.กุดโดน อ.ห้วยเม็ก จ.กาฬสินธุ์ คุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ทล.-ม.102/2532 มาตรฐานดินถมคันทาง [4], 2) รองพื้นทางเป็นวัสดุลูกรังสีน้ำตาล แห้ง บ.กุดโดน ต.กุดโดน อ.ห้วยเม็ก จ.กาฬสินธุ์ คุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ทล.-ม.205/2532 มาตรฐานวัสดุรองพื้นทางมวลรวม [4] และ 3) พื้นทางเป็นวัสดุหินคลุก แห้ง โรงโม่หินด้อยตั้ง ต.อุทัยสวัสดิ์ อ.นาแก จ.หนองบัวลำภู คุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ทล.-ม.201/2544 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก [4] เครื่องนิวเคลียร์เกจที่ใช้ในงานวิจัยจำนวน 1 เครื่อง ตามรูปที่ 4 ยี่ห้อ Troxler รุ่น 3440 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถวัดความหนาแน่น, การอัดแน่นและวัดความชื้นของวัสดุ มีลักษณะการทำงานได้ 2 โหมด คือ แบบกระเจิงกลับ (Backscatter, BS) และแบบส่งผ่านโดยตรง (Direct transmission, DT)



รูปที่ 1 ดินถมคันทาง



รูปที่ 2 ลูกรังรองพื้นทาง



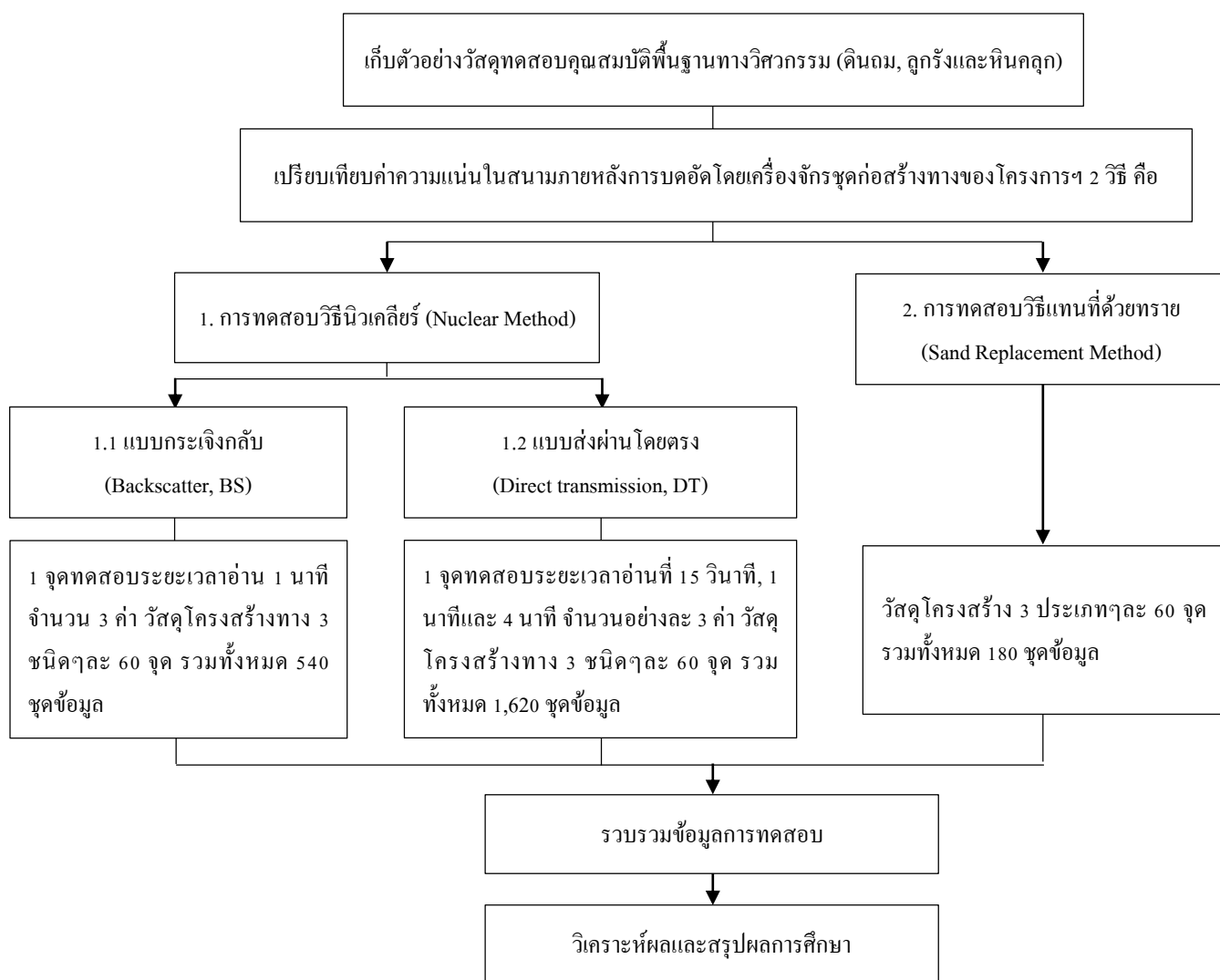
รูปที่ 3 หินคลุกพื้นทาง



รูปที่ 4 เครื่องนิวเคลียร์เกจและอุปกรณ์

3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุทั้งสามชนิด ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุ (Grain size analysis) การทดสอบหา Atterberg's Limits เพื่อจำแนกประเภทของวัสดุโดยวิธี AASHTO และโดยวิธี USCS การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) สำหรับดินถมคันทาง และการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor) สำหรับลูกรังรองพื้นทาง, หินคลุกพื้นทางเพื่อหาความหนาแน่นแห้ง (Dry density), ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC)



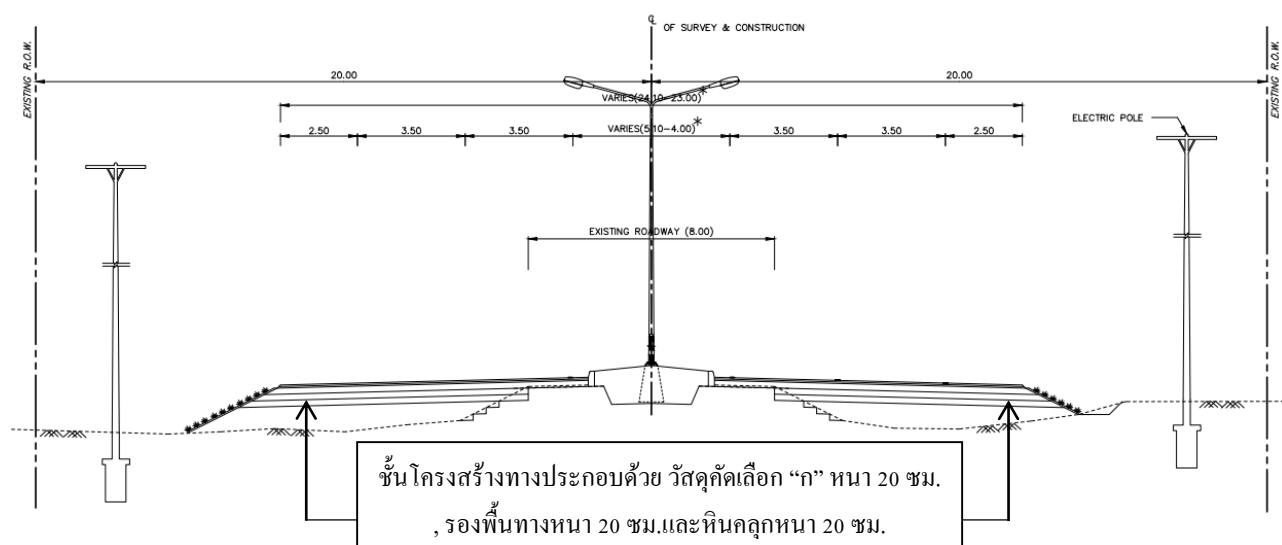
รูปที่ 5 แผนภาพขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบในสนามได้รับการอนุเคราะห์ให้ดำเนินการที่โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 2039 อ.ห้วยเม็ก จ. กาฬสินธุ์ ระหว่าง กม.55+000 - กม.58+500 ระยะทาง 3.00 กม. ตามรูปตัดชั้นโครงสร้างทางรูปที่ 6 การทดสอบความแน่นจะทดสอบที่จุดเดียวกันทั้ง 2 วิธี มีลำดับขั้นตอนการทดสอบด้วยเริ่มจากลำดับที่ 1. วิธีนิวเคลียร์ซึ่งจะทดสอบ 2 แบบคือ วิธีการวัดแบบ

กระเจิงกลับ (BS) และวิธีการวัดแบบส่งผ่านโดยตรง (DT) ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.607/2555 [4] ลำดับที่ 2. วิธีแทนที่ด้วยทราย (SRM) ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.603/2517 [4] ชั้นโครงสร้างทาง 3 ชั้น ๆ ละ 60 จุดทดสอบ รายละเอียดการทดสอบมีดังต่อไปนี้

3.2.1 วิธีการวัดแบบกระเจิงกลับ (Backscatter, BS)

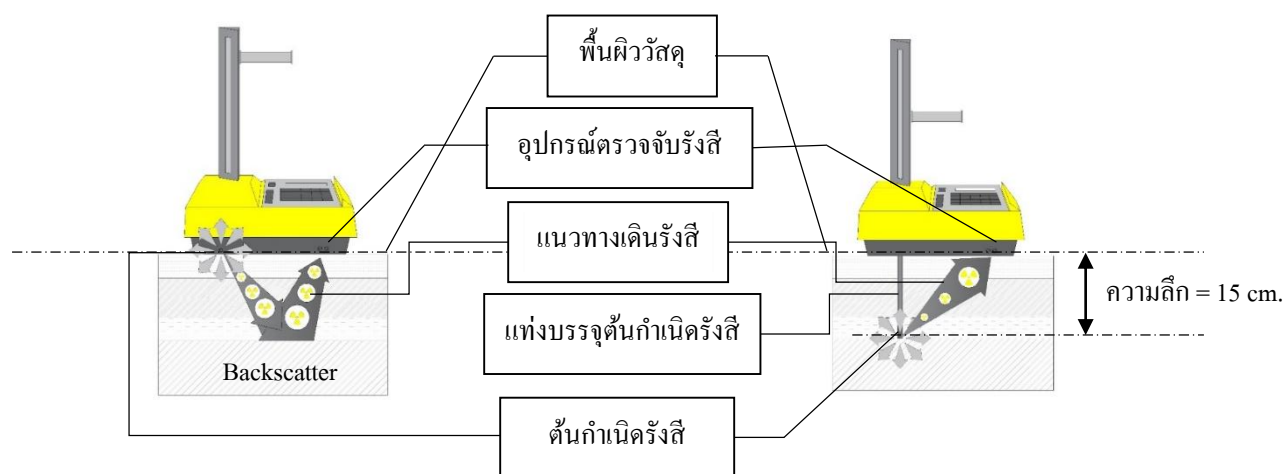
เมื่อทำการบดอัดในชั้นโครงสร้างทางที่จะทำการทดสอบนั้น ๆ แล้วเสร็จ จะเริ่มทำการทดสอบด้วยวิธีนิวเคลียร์ก่อน ตามข้อกำหนดการใช้งานเครื่องนิวเคลียร์เกดต้องทำ Standard count ทุกวันก่อนเริ่มงาน โดย Density standard count (DS) มีค่า DS1 และ DS2 ผิดไม่เกิน $\pm 1.3\%$ ของค่าเฉลี่ย ค่า Moisture standard count (MS) มีค่าไม่เกิน $\pm 1.0\%$ ของค่าเฉลี่ย ในการวัดด้วยวิธีนิวเคลียร์นั้นจะเริ่มด้วยการวัดแบบกระเจิงกลับ (BS) ซึ่งเป็นการวัดการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา โดยแหล่งกำเนิดรังสีและอุปกรณ์ตรวจจับรังสีอยู่ที่ระดับผิวหน้าชั้นวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 7 (a) การตรวจนับรังสีเป็นการอ่านค่าของ Detector จากการสะท้อนกลับ (Scatter of reflect) จนถึงระยะเวลาที่กำหนด 1 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการอ่านค่าจากเครื่องวัดนิวเคลียร์เกด [5] ซึ่งจะอ่านค่าความหนาแน่นเปียก, ความหนาแน่นแห้งและค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น แล้วทำการวางสลับทิศทาง ตั้งฉากกับแนวเดิมให้ครบจำนวน 3 ค่าต่อ 1 จุดสาเหตุของการเลือกอ่านค่า 3 ค่าแบบวางสลับทิศทางเพราะการวัดแบบกระเจิงกลับอาจมีผลกระทบจากวัสดุใดเกินขนาดในแนวทางการเดินของรังสีอาจจะทำให้ค่าที่ได้มีความผิดพลาดมาก หากอ่านค่าเพียงครั้งเดียว เมื่อดำเนินการบันทึกค่าแล้วจึงทำการวัดแบบส่งผ่านโดยตรงต่อไป



รูปที่ 6 หน้าตัดชั้นโครงสร้างทางของโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 2039 (กรมทางหลวง, 2562)

3.2.2 วิธีการวัดแบบส่งผ่านโดยตรง (Direct transmission, DT)

หลังจากทำการวัดแบบกระเจิงกลับแล้วในจุดเดียวกันจะทำการทดสอบแบบส่งผ่านโดยตรง (DT) ซึ่งเป็นการวัดการลดความเข้มของรังสีแกมมา (Gamma radiation) โดยต้นกำเนิดรังสี (Radiation source) อยู่ในระดับความลึกที่กำหนดคือ 15 ซม. ส่วนอุปกรณ์ตรวจจับรังสี (Detector) อยู่ที่ผิวหน้าของชั้นวัสดุทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 7 (b) ระยะเวลาในการอ่านค่าที่ 15 วินาที, 1 นาที และที่ 4 นาที (จำนวน 3 ครั้งต่อ 1 จุด) อ่านค่าความหนาแน่นเปียก, ความหนาแน่นแห้งและค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น



(a) การทดสอบด้วยวิธีนิวเคลียร์แบบ BS

(b) การทดสอบด้วยวิธีนิวเคลียร์แบบ DT

รูปที่ 7 การทดสอบด้วยวิธีนิวเคลียร์

3.2.3 วิธีแทนที่ด้วยทราย (Sand replacement method, SRM)

เมื่อทำการทดสอบวิธีนิวเคลียร์แล้วเสร็จ ในจุดเดียวกันทำการทดสอบด้วยวิธีแทนที่ด้วยทรายตามมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท.603/2517 [4] และหาความชื้นด้วยวิธีอบในเตาอบตาม ASTM D2216-98 ดำเนินการตามลำดับขั้นตอนดังกล่าวในข้อ 3.2.1 - 3.2.3 จนครบทั้ง 3 ชั้น โครงสร้างทาง ซึ่งจะใช้ผลการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งนี้เป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับ 2 วิธีที่กล่าวมา

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ ดินถมคันทาง, ลูกกรงรองพื้นทางและหินคลุกพื้นทาง มีช่วงการกระจายของเม็ดวัสดุ และคุณสมบัติพื้นฐานเป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวง [4] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบของวัสดุทั้ง 3 ประเภท

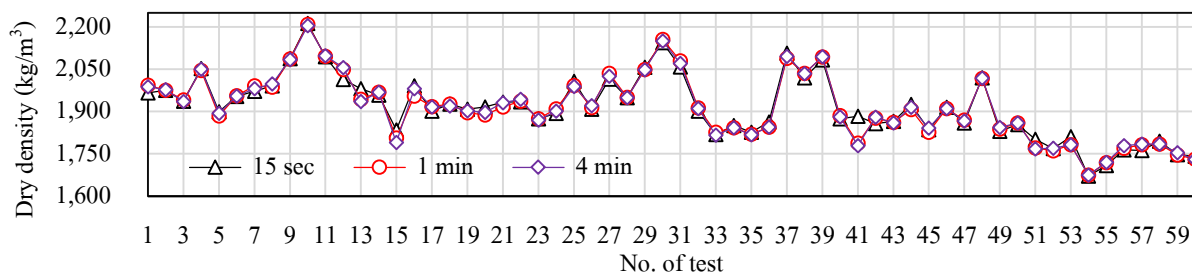
คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม	ดินถมคันทาง (Earth embankment)	ลูกรังรองพื้นทาง (Subbase)	หินคลุกพื้นทาง (Base)
Liquid Limit (LL) (%)	21.5	21.9	21.0
Plasticity Index (PI) (%)	7.7	6.0	5.5
% Passing Sieve No.4	100	25.4	33.8
% Passing Sieve No.10	99.9	17.8	22.4
% Passing Sieve No.40	96.0	13.6	15.5
% Passing Sieve No.200	34.9	7.9	9.6
AASHTO Classification	A-2-4	A-1-a	A-1-a
USCS Classification	SM	GW-GM	GW-GM
Optimum Moisture Content (%)	10.4	7.2	6.4
Maximum Dry Density (kg/m ³)	1,908	2,238	2,285

4.2 ผลการทดสอบในสนามด้วยวิธีนิวเคลียร์และวิธีแทนที่ด้วยทราย

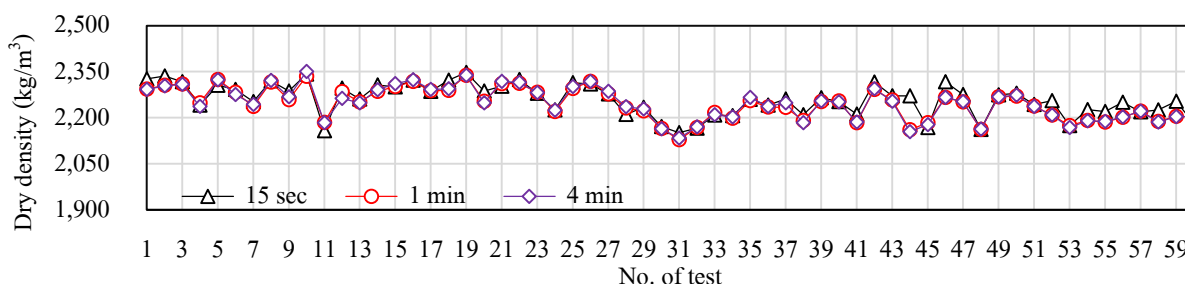
สำหรับการวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการอ่านค่าจากเครื่องนิวเคลียร์แยกประกอบไปด้วย 1. ระยะเวลาการอ่านที่แตกต่างกัน 2. วิธีการวัดค่าความหนาแน่นแห้งต่างกันของวิธีนิวเคลียร์แบบกระเจิงกลับ (BS) และแบบส่งผ่านโดยตรง (DT) 3. วัสดุโครงสร้างทางต่างชนิดกัน สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

4.2.1 ความหนาแน่นแห้งวิธีนิวเคลียร์แบบส่งผ่านโดยตรง (DT) อ่านค่าที่ระยะเวลาต่าง ๆ

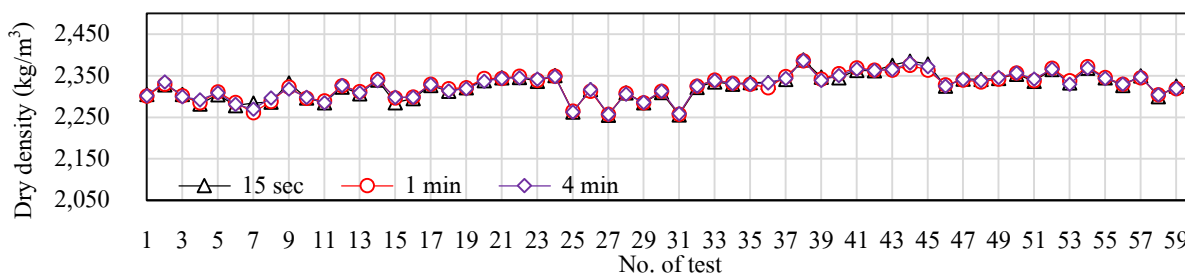
เครื่องนิวเคลียร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้มีระยะเวลาการอ่านค่า 3 ระยะเวลาคือที่ 15 วินาที, 1 นาทีและที่ 4 นาที การจะเลือกใช้ระยะเวลาอ่านที่เหมาะสมจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่จะมีผลต่อค่าความหนาแน่นแห้ง ซึ่งจากการทดสอบจะทำการจับเวลาระหว่างการทดสอบในแต่ละวิธีการเพื่อตรวจสอบเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มต้นจนจบกระบวนการทั้งวิธีนิวเคลียร์และวิธีแทนที่ด้วยทราย จากการจับเวลาพบว่าวิธีนิวเคลียร์ใช้เวลา 5 นาทีต่อจุด (สำหรับการอ่านค่าที่ 1 นาทีวิธีการแบบ DT) และวิธีแทนที่ด้วยทรายใช้เวลา 30 นาทีต่อจุด จากการทดสอบความหนาแน่นแห้ง 60 จุด อ่านค่าที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในแต่ละวัสดุมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์โดยให้จำนวนจุดทดสอบเป็นแกนนอน (แกน x) และความหนาแน่นแห้งที่อ่านจากระยะเวลาต่าง ๆ เป็นแกนตั้ง (แกน y) ดังรูปที่ 8, 9 และ 10 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งที่ระยะเวลาต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อนำข้อมูลค่าความหนาแน่นแห้งทั้ง 60 จุดที่อ่านค่าที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในแต่ละวัสดุชั้นโครงสร้างทางมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างโดยเปรียบเทียบทุกระยะเวลาการอ่านกับระยะเวลาที่ 4 นาที (เปรียบเทียบกับ 4 นาทีเพราะในงานวิจัยที่ผ่านมา [5] มีข้อสรุปว่าระยะเวลาการอ่านที่นานขึ้นจะทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งในสนามของดินถมคันทางที่ระยะเวลาการอ่านแตกต่างกัน



รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งในสนามของลูกรังรองพื้นทางที่ระยะเวลาการอ่านแตกต่างกัน

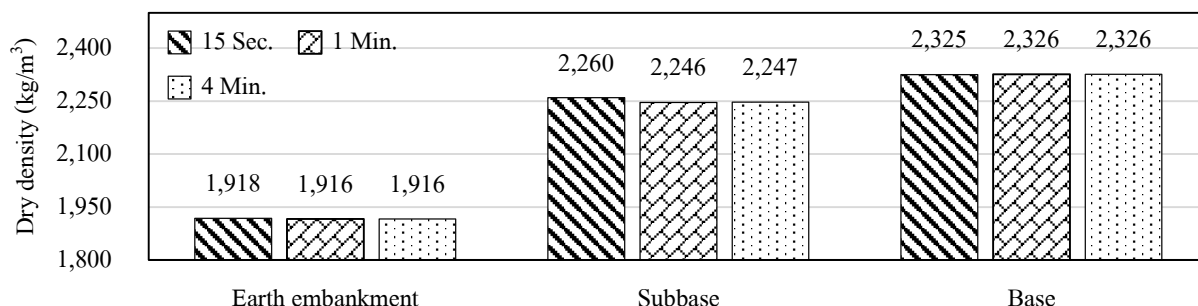


รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งในสนามของหินคลุกพื้นทางที่ระยะเวลาการอ่านแตกต่างกัน

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของในแต่ละวิธีการทดสอบและวัสดุชั้นโครงสร้างทางแต่ละชนิด

ค่าความหนาแน่นแห้งจาก ระยะเวลาการอ่านแบบต่าง ๆ ใน วัสดุแต่ละชนิด	ดินถมคันทาง (Earth embankment)		ลูกรังรองพื้นทาง (Subbase)		หินคลุกพื้นทาง (Base)	
	ค่าเฉลี่ย 60 จุด (kg/m ³)	ความต่าง (%)	ค่าเฉลี่ย 60 จุด (kg/m ³)	ความต่าง (%)	ค่าเฉลี่ย 60 จุด (kg/m ³)	ความต่าง (%)
ระยะเวลาการอ่านที่ 15 วินาที	1,918.40	+0.103	2,259.53	+0.542	2,325.45	-0.010
ระยะเวลาการอ่านที่ 1 นาที	1,915.95	-0.024	2,246.45	-0.040	2,325.60	-0.004
ระยะเวลาการอ่านที่ 4 นาที*	1,916.42	-	2,247.35	0.000	2,325.68	-

*ค่าที่ใช้อ้างอิงในการเปรียบเทียบ

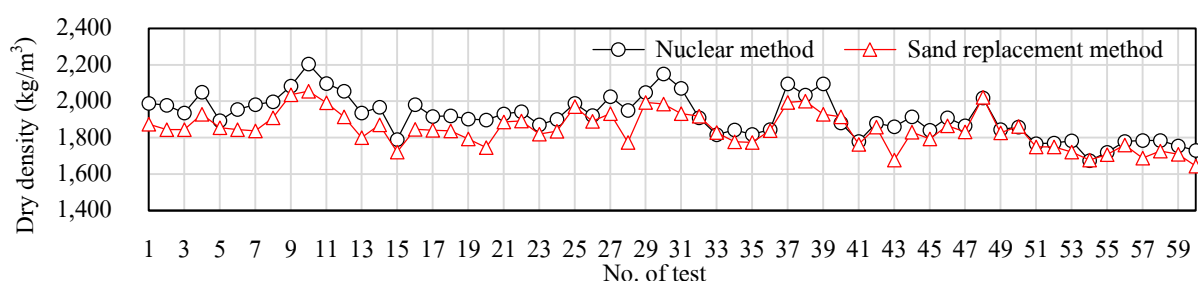


รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยที่ระยะเวลาการอ่านต่าง ๆ ของวัสดุชั้นโครงสร้างทาง 3 ชนิด

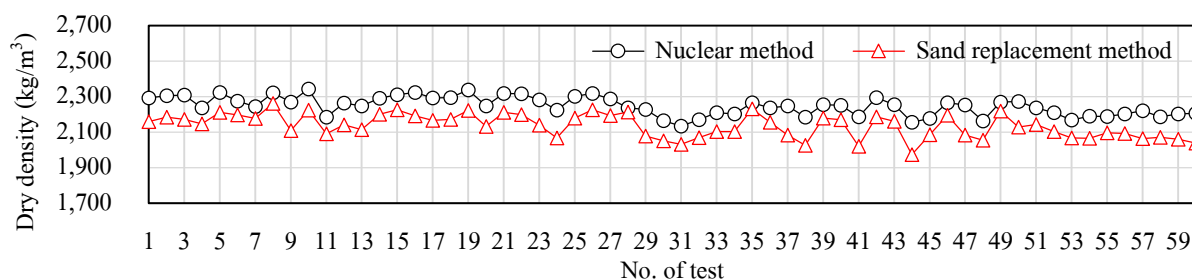
เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 2 มาเขียนกราฟตามรูปที่ 11 โดยให้ระยะเวลาการอ่านในแต่ละประเภทวัสดุเป็นแกนนอน (แกน x) และค่าความหนาแน่นแห้งเป็นแกนตั้ง (แกน y) พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งในแต่ละระยะเวลาการอ่านที่ 15 วินาที, 1 นาทีและที่ 4 นาทีในแต่ละวัสดุไม่แตกต่างกันมากหรือแทบไม่มีผลกระทบจากระยะในการอ่านค่า แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้สรุปผลการทดสอบว่าระยะเวลาการอ่านที่นานขึ้นจะทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น [5] ดังนั้นในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างวิธีนิวเคลียร์และวิธีแทนที่ด้วยทรายจึงเลือกระยะเวลาที่ 4 นาทีมาเปรียบเทียบเพื่อสรุปความสัมพันธ์ในข้อถัดไป

4.2.2 ความหนาแน่นแห้งเปรียบเทียบระหว่างวิธีนิวเคลียร์แบบส่งผ่านโดยตรง (DT) และวิธีแทนที่ด้วยทราย (SRM)

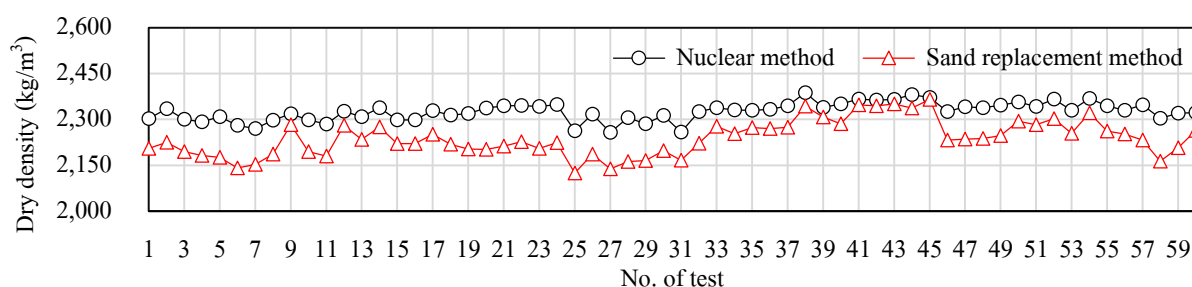
นำค่าความหนาแน่นแห้งจากวิธีนิวเคลียร์แบบส่งผ่านโดยตรงระยะเวลาการอ่านที่ 4 นาทีและวิธีแทนที่ด้วยทราย ที่ระดับความลึกเดียวกัน (15 ซม.) ในแต่ละวัสดุมาเขียนกราฟ ดังรูปที่ 12, 13 และ 14 ให้จำนวนจุดทดสอบเป็นแกนนอน (แกน x) และค่าความหนาแน่นแห้งเป็นแกนตั้ง (แกน y) พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งโดยวิธีนิวเคลียร์แบบส่งผ่านโดยตรงและโดยวิธีแทนที่ด้วยทรายในแต่ละวัสดุได้ค่าดังนี้ 1. ดินถมคันทางวิธีนิวเคลียร์แบบ DT อยู่ระหว่าง 1,674 - 2,205 กก./ลบ.ม. มีค่าเฉลี่ย 1,917 กก./ลบ.ม. วิธีแทนที่ด้วยทรายอยู่ระหว่าง 1,644 - 2,055 กก./ลบ.ม. มีค่าเฉลี่ย 1,846 กก./ลบ.ม. ความต่างระหว่าง 2 วิธีเท่ากับ 3.84 เปอร์เซ็นต์ 2. ลูกกรงรองพื้นทางวิธีนิวเคลียร์แบบ DT อยู่ระหว่าง 2,134 - 2,342 กก./ลบ.ม. มีค่าเฉลี่ย 2,247 กก./ลบ.ม. วิธีแทนที่ด้วยทรายอยู่ระหว่าง 1,974 - 2,261 กก./ลบ.ม. มีค่าเฉลี่ย 2,135 กก./ลบ.ม. ความต่างระหว่าง 2 วิธีเท่ากับ 5.25 เปอร์เซ็นต์ และ 3. หินคลุกพื้นทางวิธีนิวเคลียร์แบบ DT อยู่ระหว่าง 2,257 - 2,387 กก./ลบ.ม. มีค่าเฉลี่ย 2,326 กก./ลบ.ม. วิธีแทนที่ด้วยทรายอยู่ระหว่าง 2,124 - 2,365 กก./ลบ.ม. มีค่าเฉลี่ย 2,238 กก./ลบ.ม. ความต่างระหว่าง 2 วิธีเท่ากับ 3.93 เปอร์เซ็นต์ จากกราฟทั้ง 3 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟที่ได้ค่าความหนาแน่นแห้งจากวิธีนิวเคลียร์จะมีค่ามากกว่าวิธีแทนที่ด้วยทรายและเป็นไปในทิศทางเดียวกันในวัสดุทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 12 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งของดินถมคันทางระหว่างวิธีนิวเคลียร์แบบ DT และวิธีแทนที่ด้วยทราย

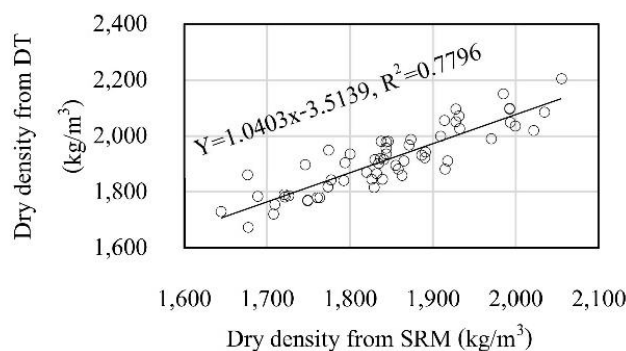


รูปที่ 13 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งของลูกรังรองพื้นทางระหว่างวิธีนิวเคลียร์แบบ DT และวิธีแทนที่ด้วยทราย

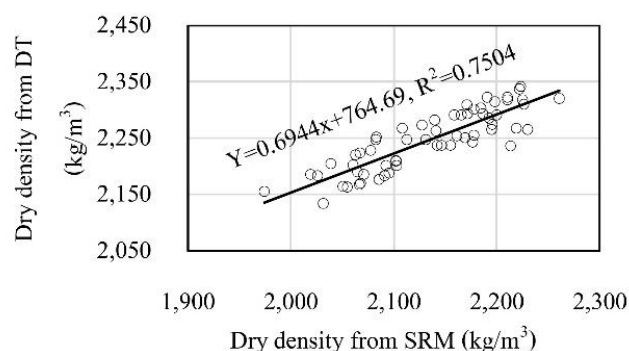


รูปที่ 14 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งของหินคลุกพื้นทางระหว่างวิธีนิวเคลียร์แบบ DT และวิธีแทนที่ด้วยทราย

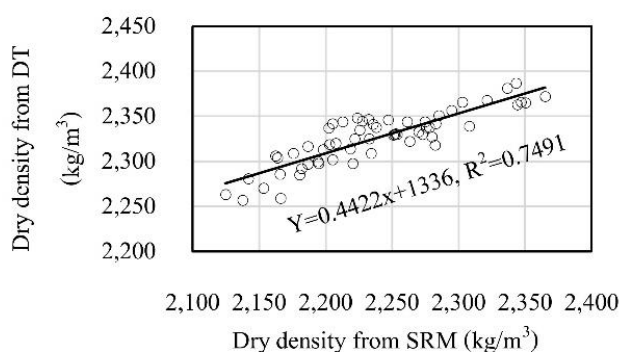
นำค่าความหนาแน่นแห้งวิธีนิวเคลียร์แบบส่งผ่านโดยตรงกับความหนาแน่นแห้งวิธีแทนที่ด้วยทรายชั้นโครงสร้างทางละ 60 จุด เขียนกราฟการกระจายตัว (Scatter diagram) โดยให้วิธีนิวเคลียร์เป็นแกนตั้ง (แกน y) และวิธีแทนที่ด้วยทรายเป็นแกนนอน (แกน x) ดังรูปที่ 15, 16 และ 17 จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งทั้ง 2 วิธีการพบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) สำหรับดินถมคันทาง, ลูกรังรองพื้นทางและหินคลุกพื้นทาง เท่ากับ 0.7796, 0.7504 และ 0.7491 ตามลำดับ จากค่า R^2 ถือว่าอยู่ในระดับดี (อิงเกณฑ์ของ Hinkle D.E. 1998) ขนาดของมวลรวมที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการอ่านค่าจากเครื่องนิวเคลียร์เกจสอดคล้องกับการทดสอบของ Gabr et. al. (1995) [6]



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นแห้งระหว่างวิธีนิวเคลียร์และวิธีแทนที่ด้วยทรายของดินถมคันทาง



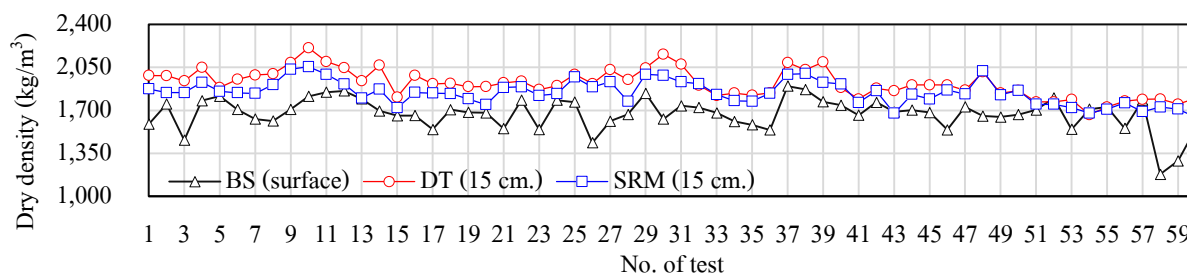
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นแห้งระหว่างวิธีนิวเคลียร์และวิธีแทนที่ด้วยทรายของลูกรังรองพื้นทาง



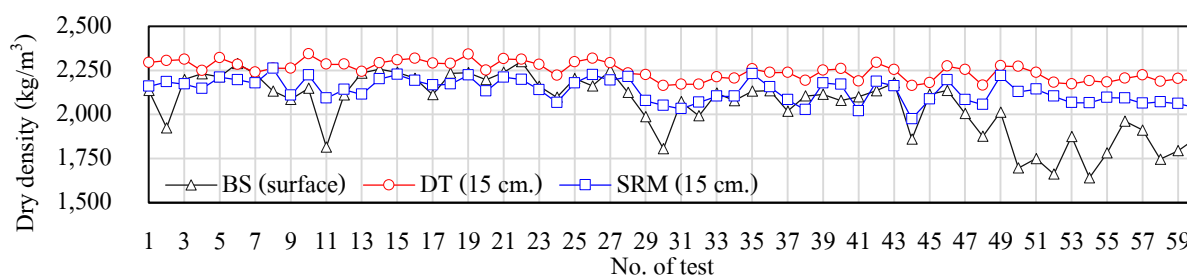
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นแห้งระหว่างวิธีนิวเคลียร์และวิธีแทนที่ด้วยทรายของหินคลุกพื้นทาง

4.2.3 ค่าความหนาแน่นแห้งด้วยวิธีนิวเคลียร์อ่านค่าแบบกระเจิงกลับ (BS) และแบบส่งผ่านโดยตรง (DT) โดยนำไปเปรียบเทียบกับวิธีแทนที่ด้วยทราย (SRM)

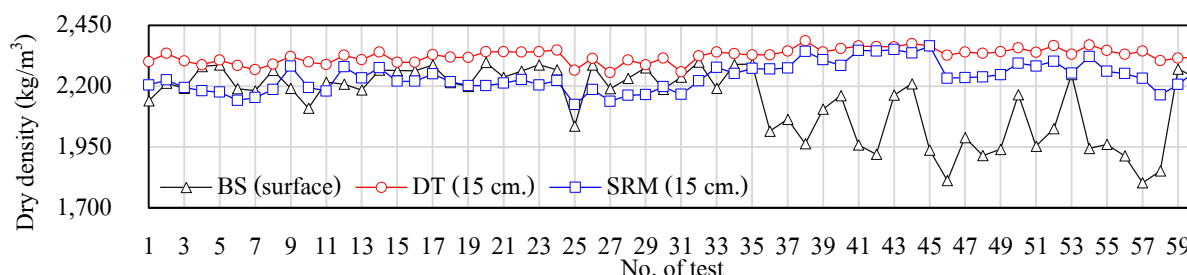
เมื่อนำข้อมูลความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย (จาก 1 จุดที่อ่าน 3 ครั้งใช้เวลา 1 นาที) จากวิธีนิวเคลียร์ทั้งแบบกระเจิงกลับ (BS) และแบบส่งผ่านโดยตรง (DT) ในแต่ละวัสดุชั้นโครงสร้างทาง (จำนวน 60 จุดทดสอบ) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์โดยให้จำนวนจุดทดสอบเป็นแกนนอน (แกน x) และค่าความหนาแน่นแห้งเป็นแกนตั้ง (แกน y) จากกราฟได้แสดงความแตกต่างของค่าที่อ่านได้จากวิธีนิวเคลียร์ทั้ง 2 แบบและเปรียบเทียบกับวิธีแทนที่ด้วยทราย (SRM) ในกราฟเดียวกัน จากกราฟในรูปที่ 18, 19 และ 20 จะเห็นว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ ค่าความหนาแน่นแห้งโดยวิธีนิวเคลียร์แบบส่งผ่านโดยตรง (DT) จะให้ค่าที่อ่านได้มากที่สุด วิธีแทนที่ด้วยทราย (SRM) เป็นลำดับที่ 2 และวิธีนิวเคลียร์แบบกระเจิงกลับ (BS) เป็นลำดับสุดท้าย ความแปรปรวนของค่าที่อ่านได้จากวิธีนิวเคลียร์แบบกระเจิงกลับจะมีมากที่สุด สังเกตได้ชัดเจนจากกราฟรูปที่ 20 ช่วงจุดทดสอบที่ 35 - 58 เนื่องจากการวัดที่ผิวของวัสดุ ค่าความชื้นที่ผิวและขนาดของวัสดุที่ความลึกประมาณ 25 มม.จะมีผลต่อค่าที่อ่านได้มากที่สุด โดยวัสดุทั้งสามชนิดมีผลการทดสอบออกมาในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 18 เปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งในสนามของดินถมคันทางระหว่างวิธี BS, DT และ SRM



รูปที่ 19 เปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งในสนามของลูกรังรองพื้นทางระหว่างวิธี BS, DT และ SRM



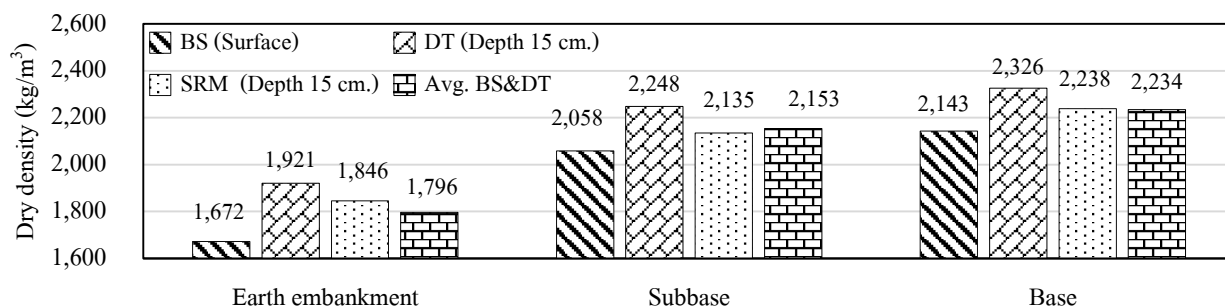
รูปที่ 20 เปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งในสนามของหินคลุกพื้นทางระหว่างวิธี BS, DT และ SRM

เมื่อนำข้อมูลค่าความหนาแน่นแห้งทั้ง 60 จุดในแต่ละวิธีของแต่ละวัสดุชั้นโครงสร้างทางมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างโดยเปรียบเทียบทุกวิธีการทดสอบกับวิธีแทนที่ด้วยทราย (SRM) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของแต่ละวิธีการทดสอบและวัสดุชั้นโครงสร้างทางแต่ละชนิด

ค่าความหนาแน่นแห้งจากวิธีการทดสอบ แบบต่าง ๆ ในวัสดุแต่ละชนิด	ดินถมคันทาง (Earth embankment)		ลูกรังรองพื้นทาง (Subbase)		หินคลุกพื้นทาง (Base)	
	ค่าเฉลี่ย 60 จุด (kg/m ³)	ความต่าง (%)	ค่าเฉลี่ย 60 จุด (kg/m ³)	ความต่าง (%)	ค่าเฉลี่ย 60 จุด (kg/m ³)	ความต่าง (%)
วิธีนิวเคลียร์แบบกระเจิงกลับ (BS)	1,672.19	-9.40	2,058.07	-3.60	2,142.84	-4.25
วิธีนิวเคลียร์แบบส่งผ่านโดยตรง (DT)	1,920.57	+4.06	2,248.14	+5.30	2,325.59	+3.92
วิธีแทนที่ด้วยทราย (SRM)*	1,845.61	-	2,134.97	-	2,237.97	-
ค่าเฉลี่ยระหว่างวิธี BS และ DT	1,796.38	-2.67	2,153.11	+0.85	2,234.22	-0.17

*ค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบ



รูปที่ 21 เปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของวัสดุชั้นโครงสร้างทาง 3 ชั้นจากวิธี BS, DT และ SRM

นำข้อมูลค่าความหนาแน่นเฉลี่ยในแต่ละวัสดุมาเขียนกราฟดังรูปที่ 21 จากกราฟจะพบว่าวิธีนิวเคลียร์แบบกระเจิงกลับ (BS) เป็นการวัดค่าที่ผิวของวัสดุจะครอบคลุมปริมาตรวัสดุทดลองประมาณ 0.0028 ลบ.ม. ค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยจึงน้อยกว่าวิธีนิวเคลียร์แบบส่งผ่านโดยตรง (DT) ซึ่งจะครอบคลุมปริมาตรวัสดุทดลองประมาณ 0.0057 ลบ.ม. และวิธีแทนที่ด้วยทราย (SRM) ซึ่งทั้ง 2 วิธีเป็นการวัดค่าในชั้นวัสดุทดลองที่มีความลึก 15 ซม. ค่าความหนาแน่นแห้งโดยวิธีแทนที่ด้วยทราย (SRM) มีค่าอยู่ระหว่างวิธีนิวเคลียร์ทั้ง 2 แบบในวัสดุทั้ง 3 ชนิด หากเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของวิธีนิวเคลียร์แบบกระเจิงกลับ (BS) และวิธีแบบส่งผ่านโดยตรง (DT) ดังกราฟแท่งที่ 4 ในแต่ละวัสดุในรูปที่ 21 จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับวิธีแทนที่ด้วยทราย (SRM) และค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากกราฟสรุปได้ดังนี้ ดินถมคันทางจะได้ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านวิธีนิวเคลียร์แบบกระเจิงกลับจะมีค่าน้อยกว่าวิธีนิวเคลียร์แบบส่งผ่านโดยตรงคิดเป็น -14.85% และน้อยกว่าวิธีแทนที่ด้วยทราย -10.37% ลูกกรองพื้นทางจะได้ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านแบบกระเจิงกลับจะมีค่าน้อยกว่าแบบส่งผ่านโดยตรงคิดเป็น -9.24% และน้อยกว่าแบบวิธีแทนที่ด้วยทราย -3.74% สำหรับหินคลุกพื้นทางจะได้ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านแบบกระเจิงกลับจะมีค่าน้อยกว่าแบบส่งผ่านโดยตรงคิดเป็น -8.53% และน้อยกว่าแบบวิธีแทนที่ด้วยทราย -4.44%

ข้อเสนอแนะการนำไปใช้งาน เครื่องนิวเคลียร์เกจมีความรวดเร็วในการทำงาน การใช้งานที่ไม่ซับซ้อน ใช้แรงงานน้อยจึงลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดจากมนุษย์และค่าความน่าเชื่อถือ ความแม่นยำของเครื่องนิวเคลียร์เกจที่ได้จากงานวิจัยนี้ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ซึ่งการสร้างความมั่นใจในการใช้งานควรเปรียบเทียบกับวิธีแทนที่ด้วยทรายทุกครั้ง ดังนี้แล้วจึงเหมาะสมในการนำไปใช้ในการควบคุมงานก่อสร้างทางในอนาคต

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาวิจัยที่มีผลต่อการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งจากเครื่องนิวเคลียร์เกจนั้นพบว่าเวลาในการอ่านไม่มีผลกับค่าที่อ่านได้ การเลือกใช้ระยะเวลาที่เหมาะสมแนะนำให้ใช้ที่ 1 นาทีหรือ 4 นาทีตามประเภทและความละเอียดที่ต้องการ การทดสอบด้วยวิธีนิวเคลียร์ที่แตกต่างกัน คือแบบกระเจิงกลับจะให้ค่าน้อยกว่าแบบส่งผ่านโดยตรง ค่าเฉลี่ยของวิธีนิวเคลียร์ทั้ง 2 แบบมีค่าใกล้เคียงกับวิธีแทนที่ด้วยทราย ความแม่นยำและน่าเชื่อถือของค่าที่อ่านได้จากเครื่องนิวเคลียร์เกจจากค่า R^2 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ผลการทดสอบที่ได้มีทิศทางเดียวกันกับวิธีแทนที่ด้วยทราย ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือเพียงเครื่องเดียวในการทดสอบเพราะฉะนั้นการนำไปใช้ในการควบคุมและตรวจสอบในงานก่อสร้างทางควรเทียบกับวิธีแทนที่ด้วยทรายทุกครั้งเพื่อหาความสัมพันธ์และความมั่นใจในการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณ โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 2039 ศูนย์สร้างทางขอนแก่น ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการทดสอบ ส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 6 (ขอนแก่น) ที่อนุเคราะห์เครื่องมือนิวเคลียร์เกจและเจ้าหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับทุนอุดหนุนในการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Altun, A.B. Goktepe and A. Sazer. Investigation of Parameters of Compaction Testing. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2008, 32, pp. 201-209.
- [2] M. S. Islam, N. Sultana and A. Ahmed. Experimental and Numerical Investigations of the Moisture Content and Wet Density of Soil. *Journal of Civil Engineering Research*, 2015, 5(1), pp. 1-9.
- [3] K.W. McClain and D.D. Gransberg. Nuclear Density Gauge Compaction Testing Alternative: Synthesis and Critical analysis. *Journal of Structure Integrity and Maintenance*, 2019, pp. 86-96.
- [4] สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง มาตรฐาน ข้อกำหนดและวิธีการทดลอง กรุงเทพฯ: มปท.
- [5] Patrycja T. P., James M., Liza A. and Scott Z. *Correlation of Nuclear Density Reading with Core Cut from Compacted roadway*. Connecticut Department of Transportation, 2005, No. CT-2242-F-05-5.
- [6] Gabr, M.A., Gray, C.A., Taylor and H.M. *Nuclear Gage Tests on Soils Containing Various Sized Aggregates*. American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication, 1995, 56, pp. 35-47.