



การประเมินความเสียหายของถนนจากการทดสอบด้วยเครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์

DAMAGE EVALUATION OF ROAD BY USING NUCLEAR GAUGE

กมลทิพย์ ประคำมินทร์^{1*} และพงศกร พรณรัตน์ศิลป์²

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* Corresponding author, Email: kamontip.p@kkumail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวคิดในการประยุกต์ใช้เครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์ (Nuclear Gauge) มาใช้ในการประเมินความเสียหายของถนน โดยใช้ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้จากเครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์เป็นเกณฑ์ประเมินความเสียหายและกำหนดกิจกรรมในการซ่อมบำรุงรักษาถนน งานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยทำการสร้างกล่องทดสอบเพื่อจำลองสภาพ โครงสร้างถนน โดยมีวัสดุในรูปแบบแตกต่างกันและเปรียบเทียบการใช้เครื่องมืออ่านค่าด้วยวิธีหักเหกลับของรังสี (Backscatter, BS) และวิธีส่งผ่านโดยตรงของรังสี (Direct Transmission, DT) เพื่อจะได้ใช้เป็นแนวทางในการศึกษาในสนาม จากการศึกษาพบว่าการอ่านค่าด้วยวิธีหักเหกลับของรังสีมีความถูกต้องและแม่นยำเช่นเดียวกับวิธีส่งผ่านโดยตรงของรังสี และการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งผ่านวัสดุชนิดเดียวและผ่านวัสดุสองชั้นที่ต่างประเภทกัน ให้ค่าความหนาแน่นแห้งที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประเภท ความหนา และความแข็งแรงของวัสดุ สำหรับส่วนที่สองเป็นการศึกษาในสนามถนนกรณีศึกษาเพื่อเก็บข้อมูลค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้จากเครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์ร่วมกับค่าการแอ่นตัว (Deflection, DEF) ที่ได้จากข้อมูลเครื่องมือประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยค้อนน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) เป็นค่าอ้างอิงในการศึกษาในสนาม จากการศึกษาพบว่า ช่วงถนนที่มีค่า FWD มาก โครงสร้างถนนมีความแข็งแรงน้อย ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้จะมีค่าน้อย และช่วงถนนที่มีค่า FWD น้อย โครงสร้างถนนมีความแข็งแรงดี ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้จะมีค่ามาก จึงสรุปได้ว่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้สอดคล้องตามค่า FWD แบบแปรผกผันซึ่งกันและกัน ดังนั้นผลการศึกษานี้สามารถใช้ค่าความหนาแน่นแห้งเป็นแนวทางสำหรับการประเมินความเสียหายของถนนเบื้องต้นได้

คำสำคัญ: เครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์; การแอ่นตัว; เครื่องมือประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยค้อนน้ำหนักกระแทก; วิธีหักเหกลับของรังสี; วิธีส่งผ่านโดยตรงของรังสี

ABSTRACT

This research presents the concept to apply nuclear gauge in assessing road damage by using dry density from the nuclear gauge as a criterion for damage evaluation and determining maintenance activities for roads. The study is divided into two parts. The first part of the study is in laboratory testing by testing box. The objective of phase first is to simulate several forms of road structures using different materials and compare using backscatter (BS) and direct transmission (DT) methods to evaluate their

Kamontip Prakhamin^{1*} and Pongsakorn Punrattanasin²

^{1*} Graduate Student in Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Khon Khon University, Thailand.

² Associate Professor in Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Khon Khon University, Thailand.

accuracy and consistency. The result showed that backscatter method provided equally accurate and precise density readings likewise the direct transmission method. Additionally, the dry density readings varied depending on the type, thickness, and strength of the materials used, as well as whether they were single-layer or multi-layered. The second part of the study involved field testing on road case study to collect dry density readings from the nuclear gauge, as well as deflection (DEF) values obtained from the falling weight deflectometer (FWD). These data were used as reference values for studying the road sections. According to the result, the higher FWD values had lower structural strength and lower dry density readings, while those with lower FWD values had better structural strength and higher dry density readings. Thus, it can be concluded that the dry density readings obtained from the nuclear gauge correlate with the variable FWD values. Therefore, the study suggests that dry density readings can be used as a preliminary assessment tool for evaluating road damage.

KEYWORDS: Nuclear Gauge; Deflection; Falling Weight Deflectometer; Backscatter Method; Direct Transmission Method

1. บทนำ

ด้วยประเทศไทยมีหน่วยงานที่ดำเนินงานด้านงานถนนประกอบด้วย กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท กรมโยธาธิการและผังเมือง และหน่วยงานท้องถิ่น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในขอบเขตของกรมทางหลวงชนบทซึ่งมีการศึกษาเกี่ยวกับการก่อสร้างถนนและการบำรุงรักษาทาง หนึ่งในภารกิจของกรมทางหลวงชนบท คือ การสำรวจเก็บข้อมูลความเสียหายของถนน อาทิเช่น ค่าดัชนีความเรียบขรุขระสากล (International Roughness Index, IRI) การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) ซึ่งจะแสดงค่าการแอ่นตัว (Deflection, DEF) ของโครงสร้างทาง [1] เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้ถูกจัดทำเป็นฐานข้อมูลของกรมทางหลวงชนบท ซึ่งจะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถกำหนดและวางแผนในการเลือกวิธีการที่จะซ่อมบำรุงถนนโครงข่ายได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลค่า FWD เป็นค่าอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย โดยงานวิจัยที่ผ่านมา Ainalem Nega และคณะ (2016) [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์แรงกระแทกของเครื่องมือ FWD ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์แรงกระแทกของการทดสอบ FWD สามารถคาดการณ์ความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างทางถนนเป็นไปในทิศทางที่ถูกต้องและสอดคล้องกับการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และจากงานวิจัยของ ชีรภัทร์ ศิริรัตนันตร และคณะ (2563) [3] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) จากผลการศึกษาพบว่าค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD สูงกว่าการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ประมาณ 10 เท่า

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีประยุกต์ใช้ประโยชน์จากเครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์ (Nuclear Gauge) [4] ซึ่งในประเทศไทยมีการใช้งานเครื่องมือนี้อย่างแพร่หลายในกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท โดยปกติแล้วเครื่องมือนี้จะถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้าง โดยนำมาใช้เพื่อวัดความชื้นและความแน่นของแต่ละชั้นโครงสร้างถนนว่ามีค่ามาตรฐานหรือไม่ ดังนั้นเครื่องมือนี้จะถูกใช้ในขั้นตอนการควบคุมคุณภาพงานระหว่างการก่อสร้างเท่านั้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา Siew-Ann Tan และ Tien-Fang Fwa (2003) [5] ได้เสนอแนวคิดในการประยุกต์ใช้เครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์เป็นเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ โดยได้ศึกษาการวัดค่าความแน่นของแท่งตัวอย่างที่มีรูปทรงทรงกระบอกโดยพิจารณาตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างแท่งกำเนิดและตัวตรวจวัดรังสี ผลจากการศึกษาพบว่า ระยะห่างระหว่างแท่งกำเนิดและตัวตรวจวัดรังสีที่เหมาะสมในการใช้งานอยู่ในช่วง 280 มม. ถึง 450 มม. และ Mohd Azmi Ismail (2017) [6] ได้นำเสนอเทคนิคเชิงนิวเคลียร์ในงานก่อสร้างถนน จากผลการวิจัยพบว่ามีความแม่นยำสะดวกรวดเร็ว นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการแบบไม่ทำลาย (Non-destructive) และสามารถทำซ้ำได้ ในงานวิจัยของ สราวุธ หมอดี (2564) [7]

ได้ศึกษาเวลาในการอ่านค่าของเครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์ การอ่านค่าและเร็วมีผลต่อความถูกต้องหรือไม่ จากการศึกษาระยะเวลาในการอ่านค่าเร็วไม่มีผลต่อค่าที่อ่านได้ และงานวิจัยของ Auckpath Sawangsuriya และคณะ (2009) [8] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีแทนที่ด้วยทราย เครื่องวัดนิวเคลียร์ และ Soil Density Gauge (SDG) จากการศึกษาพบว่า SDG ให้ค่าต่ำกว่าสำหรับพื้นทางหินคลุก แต่ได้ค่าสูงกว่าสำหรับทรายถมคันทาง จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่ผ่านนั้นได้ทำการศึกษาเครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์ในมิติของการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างและทดสอบการใช้เครื่องมือแต่ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในมิติอื่นๆ และการทดสอบ FWD ยังไม่มีการศึกษาควบคู่กับเครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้เครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์มาใช้ในการประเมินความเสียหายของถนนโดยใช้ค่า FWD เป็นค่าอ้างอิงในการศึกษา เพื่อให้ได้มาซึ่งเกณฑ์กำหนดกิจกรรมในการซ่อมบำรุงรักษาถนนและใช้เป็นแนวทางในการเลือกวิธีซ่อมบำรุงรักษาถนน เช่นเดียวกับข้อมูลความเสียหายของถนนที่ได้จากเครื่องมือ FWD ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์กำหนดปัจจัยประกอบกิจกรรมซ่อมบำรุงของกรมทางหลวงชนบท [1]

ปัจจัย	กิจกรรม			
	บำรุงปกติ	บำรุงตามเวลา		บำรุงพิเศษ
		ฉาบผิว	เสริมผิวทาง	ซ่อมสร้าง
FWD (mm.)	ค่า < 0.30	$0.30 \leq \text{FWD} \leq 0.50$	$0.50 \leq \text{FWD} \leq 0.70$	$\text{FWD} > 0.70$

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สร้างกล่องทดสอบขนาด $25 \times 40 \times 20$ ซม. ซึ่งจะทำให้การจำลองลักษณะโครงสร้างถนนในรูปแบบแตกต่างกัน โดยมีส่วนประกอบของชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางของถนน โดยชั้นผิวทางวัสดุที่ใช้คือ วัสดุผสมเสร็จ (Premix) ชนิดผสมร้อน ที่ได้จากการผสมร้อนระหว่างวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement, AC) ซึ่งวัสดุมวลรวมที่ใช้คือ หินขนาด 3/8 นิ้ว และวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้คือ ยาง AC 60-70 และ สำหรับชั้นพื้นทางเป็นวัสดุดินซีเมนต์ (Soil Cement) ใช้วัสดุผสมระหว่างดินลูกรังและปูนซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้คือ 5% ของน้ำหนักวัสดุ ดังรูปที่ 1ก-1จ เครื่องมือที่ใช้คือ เครื่องมือทดสอบหาค่าความแน่นโดยใช้เครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์ (Nuclear Gauge) ยี่ห้อ Troxler รุ่น 3440 ดังรูปที่ 1ข ทำการทดสอบโดย 2 วิธี คือวิธีหักเหกลับของรังสี (Backscatter, BS) และวิธีส่งผ่านโดยตรงของรังสี (Direct Transmission, DT) และใช้เวลาในการอ่านค่าที่ 15 วินาที



(ก) ก่อสร้างทดสอบ



(ข) หินขนาด 3/8 นิ้ว



(ค) วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์



(ง) ดินลูกรัง



(จ) ปูนซีเมนต์

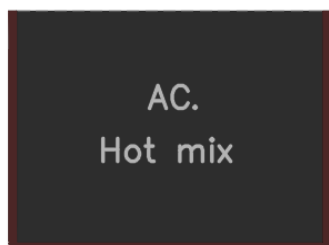


(ฉ) เครื่องวัดเชิงมุมเคลียร์

รูปที่ 1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินวิจัย

2.2 ขั้นตอนการศึกษา

2.2.1 การศึกษาในส่วนแรกเป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยจำลองสภาพโครงสร้างถนนรูปแบบแตกต่างกัน จำนวน 5 รูปแบบ มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งผ่านวัสดุที่ต่างชนิดกัน และเปรียบเทียบการอ่านค่าด้วยวิธี BS และวิธี DT โดยได้ทำการสร้างกล่องทดสอบจำนวน 5 กล่อง ได้แก่ กล่องที่ 1 คือการจำลองลักษณะผิวทางแบบ Hotmix กล่องที่ 2 คือการจำลองชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement) กล่องที่ 3 คือการจำลองลักษณะถนนที่มีผิวทางหนา 5 ซม. และชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement) หนา 15 ซม. สำหรับกล่องที่ 1-3 เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้ของวัสดุแต่ละชนิด ดังรูปที่ 2-4 กล่องที่ 4 คือการจำลองสภาพถนนที่มีลักษณะความเสียหายในชั้นพื้นทางให้มีลักษณะที่เป็นโพรงขนาดประมาณ 10 ซม. เพื่อทดสอบว่าค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้มีผลเป็นอย่างไร ดังรูปที่ 5 สำหรับกล่องที่ 5 คือการจำลองลักษณะถนน 5 รูปแบบ โดยมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของผิวทางเพิ่มขึ้นทีละ 1 ซม. แล้วทำการอ่านค่าความหนาแน่นแห้ง เพื่อทดสอบว่าการอ่านค่าผ่านความหนาของผิวทางที่เพิ่มขึ้นมีผลอย่างไร ดังรูปที่ 6ก-6จ จำนวนครั้งในการอ่านค่าจะกระทำซ้ำเพื่อให้เกิดความมั่นใจและแม่นยำของข้อมูล โดยกล่องที่ 1-4 จะอ่านค่าด้วยวิธี BS ที่พื้นผิววัสดุ จำนวน 20 ครั้ง และด้วยวิธี DT จำนวน 4 ตำแหน่ง คือที่ระดับความลึก 5 ซม. 10 ซม. 15 ซม. และ 17.5 ซม. จำนวน 20 ครั้ง/ตำแหน่ง และกล่องที่ 5 อ่านค่าด้วยวิธี BS ที่พื้นผิววัสดุ จำนวน 20 ครั้ง และ ด้วยวิธี DT ที่ระดับความลึก 15 ซม. จำนวน 20 ครั้ง/ชั้นความหนาของผิวทางที่เพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ซม. และเมื่อทำการทดสอบในส่วนแรกเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะนำผลจากการทดสอบมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาในสนามต่อไป



รูปที่ 2 จำลองผิวทางแบบ Hot mix



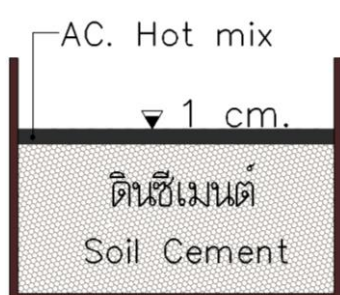
รูปที่ 3 จำลองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement)



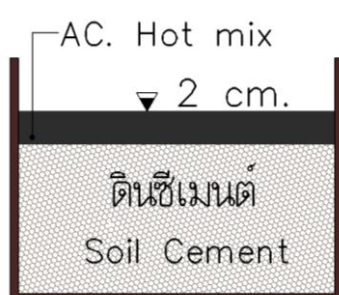
รูปที่ 4 จำลองถนนจริง



รูปที่ 5 จำลองถนนที่เสียหาย



(ก) ผิวทางหนา 1 ซม.



(ข) ผิวทางหนา 2 ซม.



(ค) ผิวทางหนา 3 ซม.



(ง) ผิวทางหนา 4 ซม.



(จ) ผิวทางหนา 5 ซม.

รูปที่ 6 จำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาของผิวทาง

2.2.2 การศึกษาในส่วนที่สองเป็นการศึกษาในสนามโดยเลือกถนนของกรมทางหลวงชนบทในพื้นที่จังหวัดมุกดาหาร คือ ถนนสาย มห. 2001 แยกทางหลวงหมายเลข 12 - บ้านดงมอน อ.เมือง จ.มุกดาหาร เป็นถนนกรณีศึกษาโดยมีระยะทางทั้งสิ้น 13.482 กม. ดังรูปที่ 7 ซึ่งชั้นพื้นทางของถนนสายนี้ก่อสร้างด้วยดินซีเมนต์ (Soil Cement) ในการศึกษาจะทำการเก็บข้อมูลค่าความหนาแน่นแห้งร่วมกับข้อมูลความเสียหายถนนโครงข่ายของกรมทางหลวงชนบทคือข้อมูลค่า FWD ซึ่งข้อมูลค่า FWD นี้ต้องส่งออกข้อมูลจากระบบฐานข้อมูลกรมทางหลวงชนบทที่มีชื่อว่าระบบ PMMS ดังรูปที่ 8 และได้แบ่งการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งตามช่วงข้อมูลค่า FWD ออกเป็น 4 ช่วง ดังนี้ ช่วงค่า FWD น้อยกว่า 0.30 มม., ช่วงค่า FWD ระหว่าง 0.30 - 0.50 มม., ช่วงค่า FWD ระหว่าง 0.50 - 0.70 มม. และช่วงค่า FWD มากกว่า 0.70 มม. ซึ่งจะอ่านค่าช่วงละ 30 จุด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความหลากหลายและมีความน่าเชื่อถือของข้อมูล การศึกษาในส่วนนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้ สอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่า FWD หรือไม่อย่างไรและจะได้นำผลการศึกษาไปสรุปและวิเคราะห์เพื่อสร้างตัวกำหนดเกณฑ์การซ่อมบำรุงรักษาถนน



รูปที่ 7 ตำแหน่งที่ตั้งถนนสายมห.2001



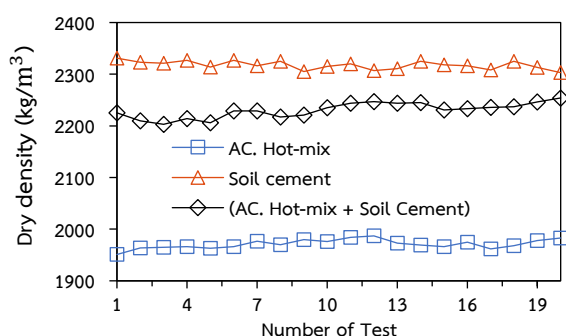
รหัสสายทาง	ชื่อสายทาง	ระยะทาง	รายละเอียด			
			PCU	RCI	IRI	FWD
มท.2001	แยกทางหลวงหมายเลข 12 (กม.ที่ 777+200) - บ้านดงมอน	13.482	1,860	3.00	3.42	0.55
มท.3002	แยกทางหลวงหมายเลข 212 (กม.ที่ 441+400) - บ้านหนองสูง	28.017	2,062	2.00	3.18	0.41
มท.3003	แยกทางหลวงหมายเลข 212 (กม.ที่ 408+890) - บ้านนาโปใหญ่	10.944	1,360	1.00	2.91	0.14
มท.5004	แยกทางหลวงชนบท มท.3003 (กม.ที่ 2+975) - บ้านนิคมทหารผ่านศึก	20.407	698	2.00	3.17	0.33
มท.4005	แยกทางหลวงหมายเลข 2034 - บ้านโคกพัฒนา	9.850	-	-	-	-

รูปที่ 8 ระบบ PMMS ของกรมทางหลวงชนบท

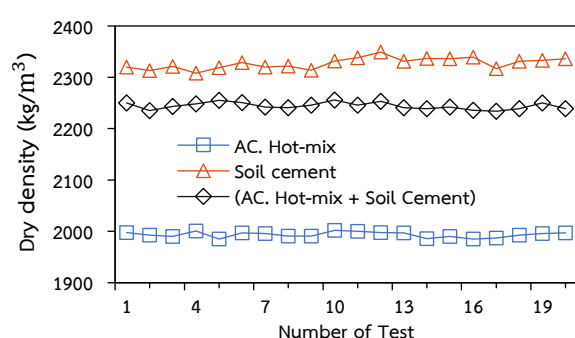
3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการศึกษาในกล้องทดสอบ

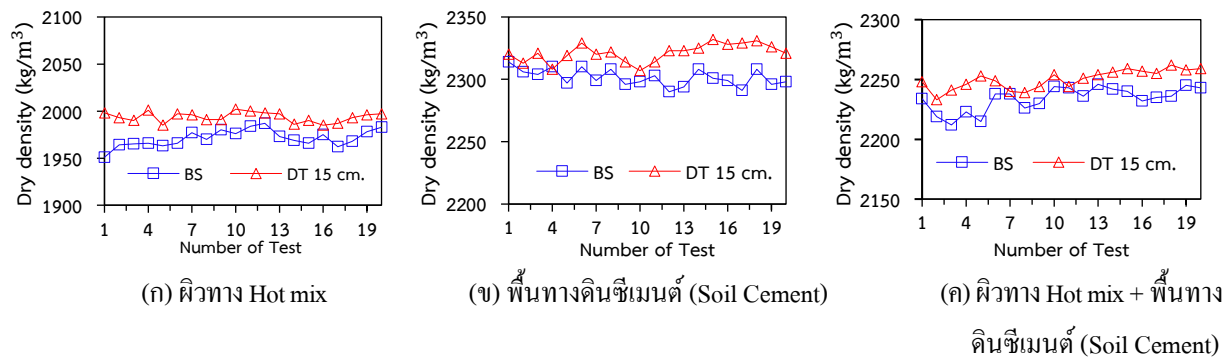
ผลการทดสอบกล้องที่ 1- 3 โดยการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งด้วยวิธี BS ที่ระดับพื้นผิวซึ่งมีรัศมีครอบคลุมประมาณ 15 ซม. และการอ่านค่าด้วยวิธี DT ที่ระดับความลึก 15 ซม. มีผลเป็นไปตามรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลจากรูปที่ 9 และ รูปที่ 10 พบว่า กล้องที่ 2 พื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement) เป็นวัสดุที่อ่านค่าความหนาแน่นแห้งได้มากที่สุด มีค่าที่อ่านด้วยวิธี BS อยู่ระหว่าง 2,290 - 2,314 กก./ลบ.ม. และค่าที่อ่านด้วยวิธี DT อยู่ระหว่าง 2,307 - 2,332 กก./ลบ.ม. รองลงมาคือ กล้องที่ 3 กล้องที่มีชั้นผิวทางและชั้นพื้นทาง มีค่าที่อ่านด้วยวิธี BS อยู่ระหว่าง 2,212 - 2,246 กก./ลบ.ม. และค่าที่อ่านด้วยวิธี DT อยู่ระหว่าง 2,233 - 2,262 กก./ลบ.ม. และกล้องที่ 1 ผิวทาง Hot mix เป็นวัสดุที่อ่านค่าความหนาแน่นแห้งได้น้อยที่สุด มีค่าที่อ่านด้วยวิธี BS อยู่ระหว่าง 1,960 - 1,998 กก./ลบ.ม. และค่าที่อ่านด้วยวิธี DT อยู่ระหว่าง 1,999 - 2,014 กก./ลบ.ม. และเมื่อเปรียบเทียบวิธีการอ่านค่าระหว่าง BS และ DT ของวัสดุ 3 ชนิด มีผลเป็นไปตามรูปที่ 11ก-11ค และสามารถสรุปค่าความต่างในการอ่านค่าหนาแน่นแห้งเฉลี่ยทั้งสองวิธีได้ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 9 อ่านค่าด้วยวิธี Backscatter



รูปที่ 10 อ่านค่าด้วยวิธี Direct Transmission (15 ซม.)



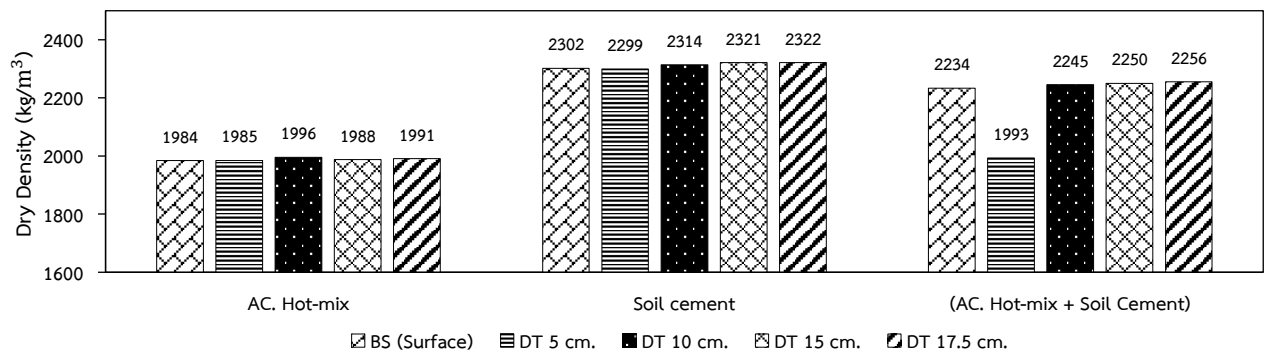
รูปที่ 11 เปรียบเทียบการอ่านค่าด้วยวิธี BS และ DT 15 ซม. ของวัสดุ 3 ชนิด

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย ด้วยวิธี BS และ DT(15 ซม.) ของวัสดุแต่ละชนิด

วัสดุ	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นแห้ง (กก./ลบ.ม.)		%ความแตกต่างระหว่าง BS และ DT
	BS (Surface)	DT 15 ซม.	
(AC. Hot-mix)	1986	2008	- 1.10
(Soil Cement)	2302	2321	- 0.82
(AC. Hot-mix + Soil Cement)	2234	2250	- 0.71

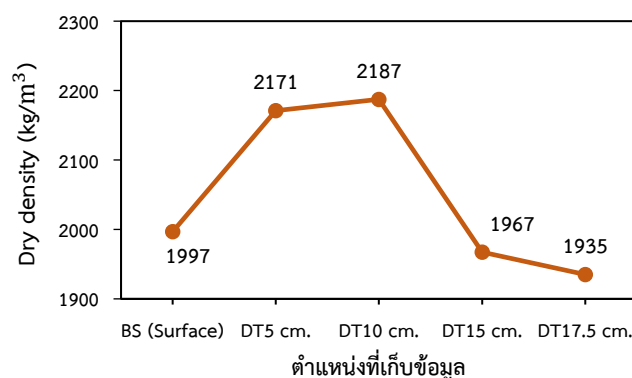
จากตารางที่ 2 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันของค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้ระหว่างวัสดุแต่ละชนิด มีดังนี้ วัสดุ AC. Hot-mix (กล่องที่ 1) อ่านค่าด้วยวิธี BS มีค่าน้อยกว่า วิธี DT (15 ซม.) คิดเป็น 1.10%, วัสดุ Soil cement (กล่องที่ 2) อ่านค่าด้วยวิธี BS มีค่าน้อยกว่า วิธี DT (15 ซม.) คิดเป็น 0.82% และ AC. Hot-mix + Soil Cement (กล่องที่ 3) อ่านค่าด้วยวิธี BS มีค่าน้อยกว่า วิธี DT (15 ซม.) คิดเป็น 0.71% ดังนั้นการอ่านค่าด้วยวิธี BS มีความแม่นยำเช่นเดียวกับวิธี DT

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในการอ่านค่าความหนาแน่นแห้ง ด้วยวิธี BS และ วิธี DT ของวัสดุกล่องที่ 1-3 ณ ตำแหน่งต่างๆ มีผลเป็นตามรูปที่ 12 ซึ่งจะพบว่ากล่องทดสอบที่มีวัสดุชนิดเดียวคือกล่องที่ 1 และ 2 นั้น การเก็บข้อมูลด้วยวิธี DT ที่ระดับความลึก 5 ซม. 10 ซม. 15 ซม. และ 17.5 ซม. ได้ค่าความหนาแน่นแห้งไม่แตกต่างกัน และการเก็บข้อมูลด้วยวิธี BS ที่ระดับพื้นผิว ได้ค่าน้อยกว่าวิธี DT สำหรับกล่องทดสอบที่มีวัสดุ 2 ชั้นต่างชนิดกันคือกล่องที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการอ่านค่าด้วยวิธี DT ที่ระดับความลึก 5 ซม. ให้ผลแตกต่างจากการอ่านค่าที่ระดับความลึก 10 ซม. 15 ซม. และ 17.5 ซม. เนื่องจากที่ระดับความลึก 5 ซม. เป็นการอ่านค่าที่ผ่านวัสดุชนิดเดียวคือ AC. Hot-mix และวิธี DT ที่ระดับความลึก 10 ซม. 15 ซม. และ 17.5 ซม. เป็นการอ่านค่าที่ผ่านวัสดุ 2 ชนิด โดยผ่านชั้น AC. Hot-mix 5 ซม. ชั้นดินซีเมนต์ 5 ซม. ผ่านชั้น AC. Hot-mix 5 ซม. ชั้นดินซีเมนต์ 10 ซม. และ ผ่านชั้น AC. Hot-mix 5 ซม. ชั้นดินซีเมนต์ 12.5 ซม. ตามลำดับ และการอ่านค่าด้วยวิธี BS ที่ระดับพื้นผิวซึ่งมีรัศมีครอบคลุมการอ่านค่าประมาณ 15 ซม. โดยจะผ่านวัสดุ 2 ชนิดคือ Hot-mix 5 ซม. ชั้นดินซีเมนต์ 10 ซม. ซึ่งค่าที่อ่านได้มีค่าน้อยกว่าวิธี DT เช่นเดียวกันกับกล่องทดสอบที่ 1 และ 2



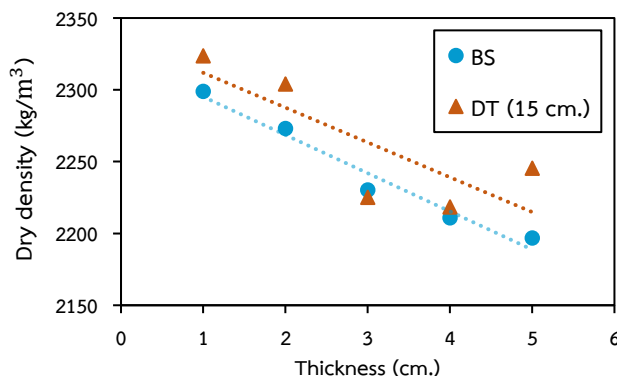
รูปที่ 12 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย ณ ตำแหน่งการเก็บข้อมูลต่างๆกัน ของวัสดุ 3 ชนิด

ผลการศึกษาล่องที่ 4 เป็นการจำลองถนนที่มีความเสียหายในชั้นโครงสร้าง มีผลทดสอบเป็นไปตามรูปที่ 13 ซึ่งจะพบว่าการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งที่ DT 5 ซม. และ DT 10 ซม. ค่าที่ได้จะมีค่ามากกว่าตำแหน่งอื่นและการอ่านวิธี BS ที่พื้นผิววัสดุ วิธี DT 15 ซม. และ DT 17.5 ซม. ได้ค่าความหนาแน่นแห้งน้อยกว่าตำแหน่ง DT 5 ซม. และ DT 10 ซม. จึงสามารถอนุมานได้ว่า ณ ตำแหน่ง DT 5 ซม. และ DT 10 ซม. เป็นการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งที่ไม่ผ่านโพรงที่ได้ทำการจำลองไว้ และ ณ ตำแหน่ง BS ที่พื้นผิววัสดุ DT 15 ซม. และ DT 17.5 ซม. เป็นการอ่านค่าผ่านโพรงที่ได้จำลองไว้เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบ ตำแหน่ง BS ที่พื้นผิววัสดุ และ DT 15 ซม. จะพบว่าการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นผลการศึกษาล่องที่ 4 สามารถนำไปอ้างอิงในการเก็บข้อมูลในสนามได้ โดยเมื่อทำการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งในสนามบริเวณที่มีความเสียหายในชั้นโครงสร้างพื้นทาง ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้จะน้อยผิดปกติโดยสามารถสังเกตได้



รูปที่ 13 ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยที่อ่านได้จากการจำลองถนนที่มีความเสียหาย

ผลการศึกษาล่องที่ 5 เป็นการจำลองลักษณะถนนที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของผิวทางเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ซม. และทำการอ่านค่าด้วยวิธี BS ที่ระดับพื้นผิวซึ่งมีรัศมีครอบคลุมประมาณ 15 ซม. และการอ่านค่าด้วยวิธี DT ที่ระดับความลึก 15 ซม. โดยระดับความลึก 15 ซม. จะคงที่เสมอแต่รัศมีการอ่านค่าผ่านวัสดุ 2 ชนิด จะเปลี่ยนแปลงตามความหนาของชั้นผิวทางที่เพิ่มขึ้นทุก 1 ซม. ผลทดสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 14 ซึ่งพบว่าความหนาของผิวทางและค่าความหนาแน่นแห้งมีลักษณะความสัมพันธ์ลดลงเป็นเส้นตรง โดยจะสังเกตได้จากเส้นแนวโน้มของทั้งสองวิธี ซึ่งเมื่อความหนาของผิวทางหนาเพิ่มขึ้นทุกๆ 1 ซม. ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้จะลดลง ดังนั้นการอ่านค่าผ่านวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้ลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาและประเภทของวัสดุ



รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นแห้งกับความหนาผิวทาง

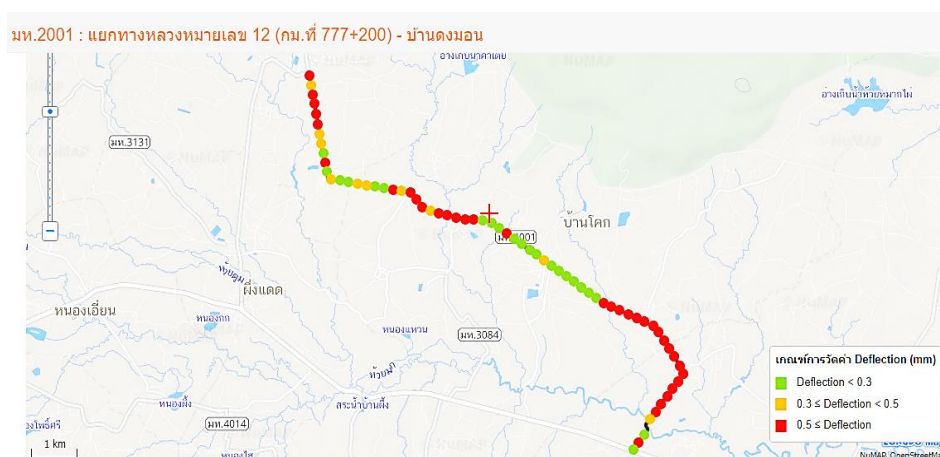
จากผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการจากกล่องทดสอบพบว่า จากการเปรียบเทียบข้อมูลการอ่านด้วยวิธี BS และ DT พบว่าวิธี BS อ่านได้มีความแม่นยำเช่นเดียวกับวิธี DT ซึ่งจะเห็นได้จากค่าเฉลี่ยความหนาแน่นแห้งของวัสดุแต่ละประเภท มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันระหว่างการอ่านค่าด้วยวิธี BS และ DT (15 ซม.) อยู่ที่ประมาณ 1% ดังนั้นเพื่อความรวดเร็วในการเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาในสนามสามารถใช้วิธีอ่านค่าด้วยวิธี BS ได้เนื่องจากมีความแม่นยำและข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่วัดความหนาแน่นแห้งโดยไม่ทำลายโครงสร้างถนน

3.2 ผลการศึกษาในสนาม

ข้อมูลที่ได้จากระบบ PMMS มีผลปรากฏดังรูปที่ 15 ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลค่า FWD ของถนนสายมท.2001 มีค่าตั้งแต่ 0.20 - 0.90 มม. ซึ่งถือว่ามีความหลากหลายของข้อมูลที่จะทำการศึกษา และจากรูปที่ 16 จะปรากฏค่า FWD บนแผนที่สายทางมท.2001 โดยมีการแบ่งช่วงข้อมูล FWD เป็นสี่ตามค่าการแอ่นตัวเพื่อให้เห็นความชัดเจนมากขึ้น สำหรับการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งในช่วงค่า FWD น้อยกว่า 0.30 มม. จะดำเนินการช่วง กม. 5+000 - 6+000 ช่วงถนนที่มีค่า FWD 0.30 - 0.50 มม. จะดำเนินการในช่วง กม. 0+000 - 1+000, กม.6+000 - 7+000 และ กม.10+000 - 12+000 ช่วงถนนที่มีค่า FWD 0.50 - 0.70 มม. จะดำเนินการในช่วง กม.4+000 - 5+000, กม.9+000 - 10+000 และ กม.13+000 - 13+482 และช่วงถนนที่มีค่า FWD มากกว่า 0.70 มม. จะดำเนินการช่วง กม.1+000 - 4+000 และ กม.12+000 -13+000

สำนัก	หน่วยงาน	สายทาง	km_start	km_end	ค่าfwd
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	0	1000	0.4533
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	1000	2000	0.94806
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	2000	3000	0.9435
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	3000	4000	0.90464
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	4000	5000	0.53345
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	5000	6000	0.22055
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	6000	7000	0.329583
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	7000	8000	
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	8000	9000	
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	9000	10000	0.51052
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	10000	11000	0.32685
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	11000	12000	0.361683
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	12000	13000	0.71814
สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์)	มท:มุกดาหาร	มท.2001	13000	13482	0.6025

รูปที่ 15 ข้อมูลค่า FWD สายมท.2001 ที่ได้จากระบบ PMMS



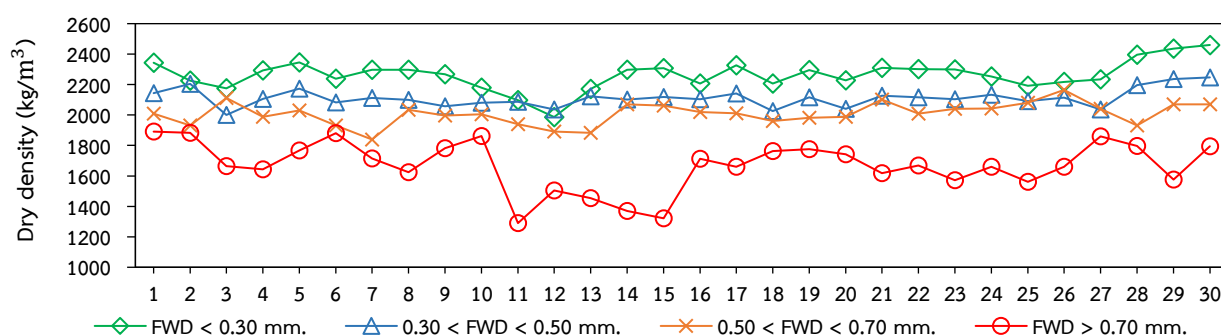
รูปที่ 16 ข้อมูลค่า FWD บนแผนที่สายทางมท.2001

ผลจากการเก็บข้อมูลในสนามด้วยวิธี BS ตามช่วงข้อมูลค่า FWD ทั้ง 4 ช่วงข้อมูล ดังรูปที่ 17ก-17ง จะเห็นว่ารูปที่ 17ก และ 17ง สามารถใช้สายตาประเมินสภาพโครงสร้างถนนได้อย่างชัดเจน ส่วนรูปที่ 17ข และ 17ค จะเห็นว่าไม่สามารถประเมินโครงสร้างถนนด้วยสายตาได้ ดังนั้นเครื่องมือนี้จะสามารถช่วยประเมินสภาพโครงสร้างถนนได้ด้วยการอ่านค่าความหนาแน่นแข็ง ซึ่งจากการศึกษาด้วยการอ่านค่าวิธี BS ตามช่วงค่า FWD ช่วงละ 30 จุด ได้ผลการเปรียบเทียบข้อมูลค่าความหนาแน่นแข็งดังรูปที่ 18 ซึ่งจะเห็นการเปรียบเทียบได้ชัดเจนว่า ช่วงค่า FWD น้อย จะได้ค่าความหนาแน่นแข็งมาก และช่วงค่า FWD มาก จะได้ค่าความหนาแน่นแข็งน้อย



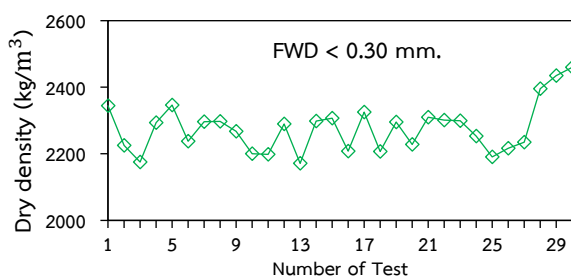
(ก) FWD น้อยกว่า 0.30 มม. (ข) FWD 0.30-0.50 มม. (ค) FWD 0.50-0.70 มม. (ง) FWD มากกว่า 0.70 มม.

รูปที่ 17 รูปถ่ายการเก็บข้อมูลตามช่วงค่า FWD 4 ช่วง

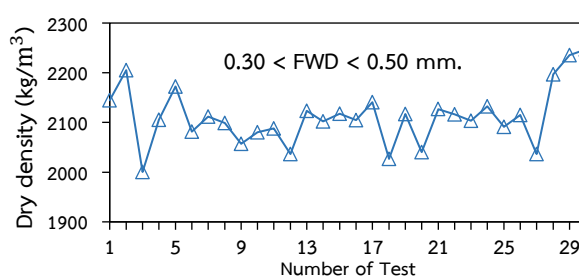


รูปที่ 18 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้ตามช่วงข้อมูล FWD 4 ช่วง

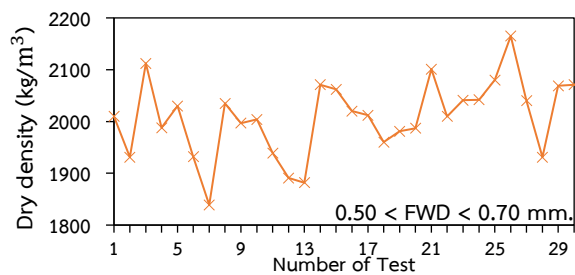
ผลทดสอบจากรูปที่ 19ก-19ง แสดงให้เห็นว่าช่วงถนนที่มีค่า FWD น้อยกว่า 0.30 มม. อ่านค่าความหนาแน่นแห้งได้ตั้งแต่ 2,200 ถึง 2,400 กก./ลบ.ม. ช่วงถนนที่มีค่า FWD 0.30-0.50 มม. อ่านค่าความหนาแน่นแห้งได้ตั้งแต่ 2,000-2,200 กก./ลบ.ม. ช่วงถนนที่มีค่า FWD 0.50-0.70 มม. อ่านค่าความหนาแน่นแห้งได้ตั้งแต่ 1,800-2,100 กก./ลบ.ม. และช่วงถนนที่มีค่า FWD มากกว่า 0.70 มม. อ่านค่าความหนาแน่นแห้งได้ตั้งแต่ 1,300-1,900 กก./ลบ.ม. ดังนั้นเมื่อนำค่าเฉลี่ยความหนาแน่นแห้งมาเปรียบเทียบกับช่วงข้อมูลค่า FWD มีผลเป็นไปตามรูปที่ 19จ จะเห็นว่าค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านลดลงเป็นเส้นตรง ตามช่วงค่า FWD ที่มากขึ้น ดังนั้นข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่า ค่าความหนาแน่นที่อ่านได้ มีความสอดคล้องกับค่า FWD



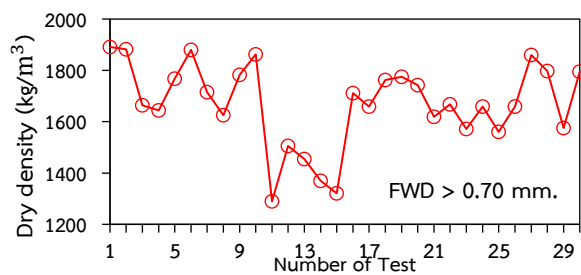
(ก) FWD น้อยกว่า 0.30 มม.



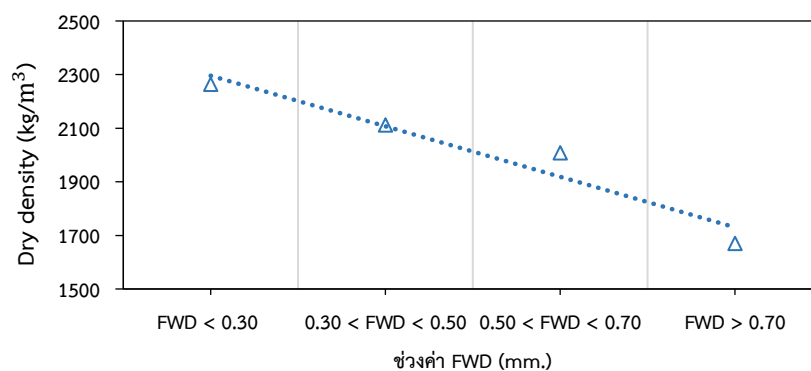
(ข) FWD 0.30-0.50 มม.



(ค) FWD 0.50 – 0.70 มม.



(ง) FWD มากกว่า 0.70 มม.



(จ) ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นแน่นแห้ง ตามช่วงค่าข้อมูล FWD

รูปที่ 19 ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้ตามช่วงข้อมูล FWD 4 ช่วง

เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 19ก – 19ง มาสรุปข้อมูลร่วมกับช่วงค่า FWD และกิจกรรมการซ่อมบำรุงทาง ได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปข้อมูลค่าความหนาแน่นแห้ง ร่วมกับค่า FWD และกิจกรรมซ่อมบำรุงทาง

ปัจจัยกำหนด	กิจกรรม			
	บำรุงปกติ	บำรุงตามเวลา		บำรุงพิเศษ
		ฉาบผิว	เสริมผิว	ซ่อมสร้าง
ค่าการแอ่นตัว จาก FWD (มม.)	FWD < 0.30	0.30 < FWD < 0.50	0.50 < FWD < 0.70	FWD > 0.70
ค่าความหนาแน่นแห้ง (DD) กก./ลบ.ม.	2,171 - 2,460	2,000 - 2,230	1,839 - 2,165	1,290 - 1,891
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นแห้ง (DD) กก./ลบ.ม.	2277	2120	2008	1669

จากตารางที่ 3 พบว่าช่วงค่าความหนาแน่นแห้ง 2,171 – 2,460 กก./ลบ.ม. จะอยู่ในช่วงกิจกรรมซ่อมบำรุงปกติ ช่วงค่าความหนาแน่นแห้ง 2,000 – 2,230 กก./ลบ.ม. จะอยู่ในช่วงกิจกรรมฉาบผิว ช่วงค่าความหนาแน่นแห้ง 1,839 – 2,165 กก./ลบ.ม. จะอยู่ในช่วงกิจกรรมเสริมผิว และช่วงค่าความหนาแน่นแห้ง 1,290 – 1,891 จะอยู่จะอยู่ในช่วงกิจกรรมซ่อมบำรุงพิเศษ เมื่อพิจารณาช่วงค่าความหนาแน่นแห้งของกิจกรรมฉาบผิวและเสริมผิว พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีช่วงค่าบางช่วงอยู่ในช่วงเดียวกัน และอยู่ในกลุ่มกิจกรรมบำรุงตามเวลาเดียวกัน อีกทั้งกิจกรรมฉาบผิวเป็นกิจกรรมที่ไม่นิยมดำเนินการแล้วในปัจจุบัน ดังนั้นสามารถรวมข้อมูลเป็นกิจกรรมเสริมผิวอย่างเดียวและสรุปเกณฑ์กำหนดกิจกรรมซ่อมบำรุงทางที่ได้จากค่าความหนาแน่นแห้งได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปเกณฑ์กำหนดกิจกรรมซ่อมบำรุงทางโดยใช้ค่าความหนาแน่นแห้ง

ค่าความหนาแน่นแห้ง (DD) กก./ลบ.ม.	
$DD > 2,200$	บำรุงปกติ
$1,800 \leq DD \leq 2,200$	เสริมผิวทาง
$DD < 1,800$	ซ่อมสร้าง

4. สรุปผลการศึกษา

4.1 จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ การอ่านค่าความหนาแน่นแห้งผ่านวัสดุต่างชนิดกัน และเปรียบเทียบการอ่านค่าด้วยวิธีหักเหกลับของรังสี (Backscatter, BS) และวิธีส่งผ่านโดยตรงของรังสี (Direct Transmission, DT) พบว่าค่าที่อ่านได้ด้วยวิธี BS มีค่าใกล้เคียงและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับวิธี DT ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีค่าประมาณ 1% ดังนั้นการอ่านค่าด้วยวิธี BS มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือเช่นเดียวกับวิธี DT และจากการอ่านความหนาแน่นแห้งของวัสดุชนิดเดียวพบว่าค่าที่ได้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและประเภทของวัสดุ และการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งที่ผ่านวัสดุสองชนิดแตกต่างกัน โดยผ่านวัสดุจากชั้นพื้นทางและชั้นผิวทางค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของวัสดุสองชนิด เมื่อเปลี่ยนความหนาของชั้นผิวทางค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้จะลดลง เมื่อเพิ่มความหนาของผิวทางทุก 1 ซม. ดังนั้นการอ่านค่าความหนาแน่นแห้งผ่านวัสดุ 2 ชนิดต่างกัน ความหนาของวัสดุที่มีค่าความหนาแน่นแห้งน้อยกว่า มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้ลดลงแปรผกผัน กับความหนาที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออ่านค่าความหนาแน่นแห้งผ่านชั้นโครงสร้างที่มีความเสียหาย ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้จะลดน้อยลงแบบมีนัยสำคัญ

4.2 จากการศึกษาในสนาม ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้โดยอ้างอิงตามช่วงข้อมูลค่า FWD ของถนนทางหลวงชนบทในจังหวัดมุกดาหาร มีความสอดคล้องซึ่งกันและกัน โดยถนนที่มีช่วงค่า FWD มาก ค่าความหนาแน่นแห้งของช่วงนั้นจะน้อย และในทางกลับกันถนนที่มีช่วงค่า FWD น้อย ค่าความหนาแน่นแห้งของช่วงนั้นจะมาก ซึ่งข้อมูลทั้งสองเป็นข้อมูลที่แปรผกผันกัน ดังนั้นจากความสัมพันธ์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันของข้อมูล ค่าความหนาแน่นแห้งที่อ่านได้สามารถนำมาสร้างเป็นเกณฑ์กำหนดวิธีการซ่อมบำรุงและสามารถจัดลำดับความสำคัญเพื่อกำหนดวิธีการและวางแผนในการซ่อมบำรุงรักษาดูแลถนนในเบื้องต้นได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเฉพาะถนนที่มีพื้นทางเป็นดินซีเมนต์ (Soil Cement) ดังนั้นเกณฑ์กำหนดกิจกรรมซ่อมบำรุงทางนี้ จะใช้ได้กับถนนที่มีพื้นทางเป็นดินซีเมนต์ (Soil Cement) เท่านั้น หากถนนสายทางอื่นที่มีชั้นโครงสร้างเป็นพื้นทางหินคลุก หรืออย่างอื่นนอกเหนือจากพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement) จะต้องทำการเก็บข้อมูลและเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD กับค่าความหนาแน่นแห้งให้สอดคล้องกับชั้นโครงสร้างพื้นทางของถนนสายนั้นๆ เพื่อสร้างเกณฑ์กำหนดกิจกรรมซ่อมบำรุงทางก่อนการนำไปใช้งานจริง

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณแนวทางหลวงชนบททุกคณาหาร ที่ให้การอนุเคราะห์สนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้การวิจัย และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับทุนอุดหนุนในการศึกษาวิจัยนี้ รวมทั้งนายโสรัจศักดิ์ นรินทร์ ที่ให้การช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลในสนามและทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวงชนบท. คู่มือบำรุงทางฉบับปรับปรุง, 2561.
- [2] Ainalem, N. *et al.* Dynamic analysis of falling weight deflectometer. *Journal of Traffic and transportation Engineering*, 2016.
- [3] ชีรภัทร์ ศิริรัตนจักร, คณัญญู ถาวร, สุรนนท์ เขียวรงค์, อัครพัฒน์ สว่างสุริย์ และ อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer กับ Light Weight Deflectometer. บทความนำเสนอในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 25, 2563.
- [4] กรมทางหลวงชนบท, มทข. (ท) 501, 14. วิธีการทดสอบหาความหนาแน่นและความชื้นของดินและวัสดุมวลรวมในสนามโดยใช้เครื่องวัดเชิงนิวเคลียร์. สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา มาตรฐานงานทางหลวงชนบท, 2563.
- [5] Siew-AnnTan and Tien-Fang Fwa. Adaptation of a field nuclear gauge for laboratory density measurement. *Journal of NDT & E International*, 2003.
- [6] Mohd Azmi Ismail. Nuclear gauge application in road industry. *Journal of Institute of Physics*, 2017.
- [7] สราวุธ หมอดี. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นแห้งของวัสดุชนิดต่างๆ จากการอ่านค่าโดยเครื่องมือวัดนิวเคลียร์ในงานก่อสร้างทางหลวง. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2564, 32 (2), 91-103.
- [8] Auckpath, S. *et al.* Innovative Tools for Highway Construction Quality Control. *Research and Development journal*, 2009, 20 (3), pp. 36-42.