

เครื่องมือต้นแบบทดสอบการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติ Prototype of Semi-Automatic Deflectometer Equipment for Asphalt Roads

พุทธพล ทองอินทร์คำ¹ และ จักรกฤษ อ่อนชื่นจิตร²

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันหน่วยงานหลักด้านการทางในประเทศได้หันไปใช้เครื่องมือวัดค่ากำลังรับน้ำหนักผิวทางจากต่างประเทศที่มีเทคโนโลยีทันสมัยแต่มีราคาแพง ทำให้หน่วยงานท้องถิ่นซึ่งมีงบประมาณจำกัดไม่สามารถจัดหาเครื่องมือดังกล่าวมาใช้งานได้ งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาเครื่องมือต้นแบบทดสอบกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยาง โดยการพัฒนาเครื่องเบนเคลแมนบีม (BB) ที่หน่วยงานท้องถิ่นส่วนใหญ่มีอยู่แล้วให้สามารถอ่านค่าวัดได้รวดเร็วขึ้น และใช้ต้นทุนต่ำ และมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์รับได้ ผลการศึกษาทำให้สามารถพัฒนาเครื่องมือต้นแบบที่มีต้นทุนต่ำกว่า 300,000 บาท/เครื่อง โดยมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ ชุดโครงเครื่องมือแบบใหม่ และส่วนที่ 2 คือ กล้องควบคุมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนควบที่เซนเซอร์สามารถอ่านค่าแองการยุบตัวของผิวทางแบบกึ่งอัตโนมัติได้ถึง 4 จุด และอ่านค่าอุณหภูมิที่ผิวและกึ่งกลางชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต ค่าทั้งหมดแสดงผลโดยทันทีและส่งข้อมูลผ่านสัญญาณไร้สายไปยังคอมพิวเตอร์พกพา ผลการสอบเทียบพบว่าค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.95 และมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย 13.78 ไมครอน และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการเปลี่ยนตำแหน่งเซนเซอร์ 15 ไมครอน ในขณะที่ค่าการทรุดตัวจริงของผิวทางสามารถปรับแก้ได้ง่ายในโปรแกรมคำนวณทั่วไปโดยอาศัยสมการปรับแก้ที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้

คำสำคัญ: เบนเคลแมนบีมกึ่งอัตโนมัติ, ถนนลาดยางท้องถิ่น, การทรุดตัวที่ผิวทาง

¹ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

Nowadays the main authorities of highway in the country are using high technology equipment for evaluation of pavement bearing capacity. It is impossible for local authorities to afford these expensive equipment. This research aims to develop a prototype of deflectometer equipment for asphalt roads based on the Benkelman Beam which is already available in most of those local authorities. Goals of the development are to get a better BB in terms of testing time, low-price and reliability. At the outcome, the research team is able to develop the prototype with price lower than 300,000 THB/equipment. It comprises of two main units, a new design frame and a control box with electronic assembly which contains sensors for measuring 4 surface deflection points and probes for measuring surface and mid-depth temperatures of asphalt layer. All the measurement results will be real-time and wirelessly delivered to a notebook computer. It has been found from the calibration that the R^2 is greater than 0.95 and the average standard deviation is 13.78 microns. The standard deviation of changing sensors configuration is about 15 microns. Moreover, all the real surface deflection values can be simply calculated by a spreadsheet program using correction equations proposed in this paper.

Keywords: semi-automatic Benkelman beam, local asphalt road, surface deflection.

1. บทนำ

โครงข่ายถนนลาดยางหรือแอสฟัลต์คอนกรีตได้ถูกสร้างขึ้นเป็นจำนวนมากโดยงบประมาณของรัฐโดยเฉพาะในท้องถิ่นต่าง ๆ เนื่องจากความเหมาะสมในหลายด้าน โดยเฉพาะสามารถใช้งบประมาณก่อสร้างที่ต่ำ และความสะดวกในการบำรุงรักษาซ่อมแซมในภายหลัง นอกจากนี้ถนนลาดยางยังมีความได้เปรียบในแง่ของคุณภาพการให้บริการในการขับขี่

เนื่องจากเป็นโครงสร้างผิวทางที่ไม่มีรอยต่อ มีสีเข้มไม่สะท้อนแสงมาก และมีความนุ่มนวลในการขับขี่ เป็นต้น ในขณะที่การบริหารจัดการให้สามารถใช้งานโครงข่ายถนนลาดยางให้เต็มประสิทธิภาพนั้นต้องอาศัยการออกแบบที่ดี การก่อสร้างที่เป็นไปตามมาตรฐาน การควบคุมน้ำหนักบรรทุก และการประเมินสภาพผิวทางทั้งในแง่ความปลอดภัยและกำลังรับน้ำหนักซึ่งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปตลอดอายุการใช้งาน ทั้งนี้ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันได้มีความพยายาม

ในการคิดค้นพัฒนาเครื่องมือและวิธีการในการประเมินหาค่ารับน้ำหนักของถนนลาดยางอย่างต่อเนื่อง ทั้งการทดสอบแบบทำลายและไม่ทำลาย (destructive and non-destructive) ซึ่งในระยะหลังการวิจัยพัฒนาเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลายได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากสะท้อนสภาพที่แท้จริงของโครงสร้างผิวทางได้มากกว่าการทดสอบแบบทำลายที่ส่วนใหญ่ทำในห้องปฏิบัติการ

เครื่องมือการทดสอบแบบไม่ทำลายยุคแรกๆ ที่ถูกนำมาใช้ในหน่วยงานด้านการทางอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ได้แก่ เบนเคลแมนบีม (Benkelman Beam, BB) ซึ่งมีราคาประมาณ 150,000 – 300,000 บาท/เครื่อง จัดเป็นเครื่องมือทดสอบแบบสถิตหรือกึ่งสถิตที่ทำหน้าที่วัดค่ายุบตัวของถนนลาดยางจากน้ำหนักลงเพลามาตรฐานของรถบรรทุก และมีกระบวนการวิเคราะห์ผลทดสอบเพื่อคำนวณหาอายุการใช้งานคงเหลือและความหนาชั้นทางเสริมความแข็งแรงที่ต้องการรองรับปริมาณการจราจรในขณะนั้นจนตลอดอายุการออกแบบ แต่ต่อมาหน่วยงานหลักในประเทศด้านการทางก็ยกเลิกการใช้เบนเคลแมนบีมเนื่องจากสาเหตุหลายประการ [1] เช่น ผลทดสอบที่ไม่แน่นอน ความล่าช้าในการทดสอบ กีดขวางการจราจร และอันตรายกับผู้ปฏิบัติงาน เป็นต้น และมีการทดแทนด้วยเครื่องมือทดสอบที่ใช้เทคโนโลยีสูงกว่า เช่น เครื่องวัดค่าความยุบตัวจากตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) ซึ่งมีความแม่นยำกว่า รวดเร็วกว่า ไม่

ต้องใช้รถบรรทุกซึ่งกีดขวางการจราจร และปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงานมากกว่า [2] เหมาะกับการทดสอบถนนสายหลักที่มีปริมาณการจราจรสูงเป็นอย่างยิ่ง แต่เครื่อง FWD นี้ยังมีราคาสูงอยู่มาก ประมาณ 15,000,000 – 20,000,000 บาท/เครื่อง จึงทำให้มีใช้ในเพียงบางหน่วยงานหลักด้านการจราจรของประเทศไทยเท่านั้น และแทบจะไม่มีทางเป็นไปได้ในอนาคตอันใกล้ที่จะสามารถจัดสรรงบประมาณให้หน่วยงานท้องถิ่นได้จัดหาเครื่องมือดังกล่าวไว้ใช้งานประเมินสายทาง

ทั้งนี้หากพิจารณาเฉพาะการทดสอบการยุบตัวของถนนลาดยางในท้องถิ่นแล้ว ข้อเสียเปรียบของเครื่องมือเบนเคลแมนบีมนั้นอาจจะลดน้อยลงอย่างมาก [1,4] เนื่องจากถนนมีความหนาไม่มาก และปริมาณจราจรไม่สูงนัก แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1,2,3,4] พบว่าเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบดั้งเดิมให้ค่าทดสอบที่มีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากการอ่านค่าด้วยตาเปล่าจากผู้ปฏิบัติการและการอ่านค่าการยุบตัวเพียงจุดเดียวนั้นมีความอ่อนไหวมากเกินไป และไม่สามารถนำผลทดสอบมาวิเคราะห์ต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาเครื่องมือเบนเคลแมนบีมให้สามารถก้าวข้ามปัญหาดังกล่าวได้ เพื่อให้การนำไปใช้งานจริงในการตรวจประเมินถนนลาดยางในท้องถิ่นมีประสิทธิภาพสูงสุด และสามารถนำไปต่อยอดให้เป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับในระดับนานาชาติต่อไป รวมไปถึงเป็นการผลิตเครื่องมือ

ทดสอบแบบใหม่ที่มีต้นทุนต่ำ แต่ยังคงมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ดี ลดการนำเข้าเครื่องมือราคาแพงจากต่างประเทศ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทาง

ดังที่กล่าวข้างต้นว่าการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางนั้น แบ่งตามลักษณะการทดสอบได้ 2 ประเภทคือ การทดสอบแบบทำลาย และแบบไม่ทำลาย โดยในส่วนของ การทดสอบแบบทำลายนั้นจะมีการขุดหรือเจาะเพื่อทดสอบในสนาม หรือนำตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น วิธีการเจาะเก็บก้อนตัวอย่าง (Coring) เป็นต้น แต่วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่สร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างทาง ใช้เวลานาน และได้จุดทดสอบที่เป็นตัวแทนโครงสร้างโดยรวมน้อย ดังนั้นวิธีการแบบทำลายจึงนำมาใช้ในการทดสอบในบางกรณีเท่านั้น ส่วนวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายเป็นวิธีการทดสอบที่นิยมนำมาใช้ในการทดสอบโครงข่ายถนน โดยเฉพาะในสายทางที่จำเป็นต้องทดสอบจำนวนหลายจุด นอกจากนั้น การทดสอบแบบไม่ทำลายยังให้ผลการทดสอบที่มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการทดสอบที่อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง ในการทดสอบแบบไม่ทำลายจะอาศัยผลตอบสนองของผิวทางมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เช่น ค่าการสะท้อนของคลื่น หรือค่าการยุบตัวของผิวทาง เป็นต้น ทั้งนี้เครื่องมือทดสอบแบบไม่

ทำลายสามารถแยกออกเป็นหลายประเภท ได้แก่ [5]

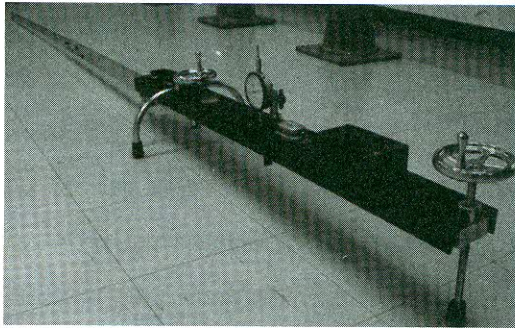
1) เครื่องมือแบบสถิต (static device) ซึ่งใช้น้ำหนักกดทับแบบสถิตหรือกึ่งสถิต เช่น เบนเคลแมนบีม

2) เครื่องมือแบบสั่นสะเทือน (vibratory device) เช่น เครื่อง Dynaflect หรือ Road Rater

3) เครื่องมือแบบใช้แรงกระตุ้น (impulse device) เช่น เครื่องวัดค่าความยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (FWD)

2.2 เครื่องมือเบนเคลแมนบีม (BB)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่าการยุบตัวของผิวทางแบบสถิตโดยมีลักษณะเครื่องมือดั้งเดิมดังรูปที่ 1 ซึ่งมีสัดส่วนระหว่างปลายคานทั้ง 2 ด้านถึงจุดหมุนที่แน่นอน เช่น 4:1 เป็นต้น และใช้เป็นค่าตัวประกอบปรับแก้ค่าการยุบตัวของผิวทางที่อ่านได้จากนาฬิกาวัด (dial gauge) เพื่อความสะดวกและปลอดภัยนิยมกำหนดให้ทดสอบบนแนวร่องล้อด้านนอก (outer wheel path) โดยใช้น้ำหนักจากรถบรรทุกที่มีน้ำหนักลงเพลามาตรฐานขนาด เช่น เพลาเดี่ยวล้อคู่ขนาด 18,000 ปอนด์ โดยมีวิธีการทดสอบทั้งแบบโดยตรง (direct method) คือการถอยรถบรรทุกเข้า ๆ ให้ช่องว่างระหว่างล้อคู่หลังเข้าสู่บริเวณจุดทดสอบซึ่งมีปลายคาน BB ตั้งรออยู่ และทำการวัดค่าการยุบตัวของผิวทางแบบคืนค่า (rebound method) ที่ทำการทดสอบในทางกลับกัน ซึ่งทั้งสองวิธีการมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบที่แตกต่างกัน ค่ายุบตัวที่ได้จะสามารถนำมาออกแบบเสริมผิวทางได้



รูปที่ 1 เครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์

2.3 พัฒนาการของเครื่องเบนเคลแมนบีม

เนื่องจากเครื่องมือ BB เป็นเครื่องมือที่มีการใช้งานมาเป็นเวลานาน ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านที่มีความสนใจในการพัฒนาวิธีการทดสอบเพื่อปรับปรุงให้แม่นยำและใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น เช่น ในปี พ.ศ. 2553 พุทธิพล และ นิรชร [1] ได้มีการพัฒนาวิธีการทดสอบและนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบแบบอื่นๆ พบว่า สาเหตุหลักที่ทำให้เครื่องมือเบนเคลแมนบีมขาดความแม่นยำในการทดสอบคือ การอ่านค่าการยุบตัวด้วยตาเปล่าของผู้ปฏิบัติงาน และการอ่านค่าการยุบตัวเพียงจุดเดียว ส่วนงานวิจัยอื่น ๆ ในต่างประเทศ เช่น Jundhare และคณะ [6] ในปี ค.ศ. 2012 ได้เปรียบเทียบการทดสอบเพื่อหาค่าการยุบตัวที่บริเวณขอบและที่มุมของแผ่นคอนกรีตที่มีการเสริมผิวบนชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (Whitetopping Overlay) โดยเป็นการหาความสัมพันธ์ของค่าการยุบตัวระหว่างการทดสอบด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีมและเครื่องมือ FWD จากการวิจัยพบว่า ความความสัมพันธ์ของค่าการยุบตัวจาก

เครื่องมือทั้งสองได้ค่า R^2 อยู่ในระดับเกณฑ์ที่ดีคือมีค่าระหว่าง 0.65-0.80 โดยใช้ ฟังก์ชันเชิงเส้น ฟังก์ชันเลขชี้กำลัง และฟังก์ชันลอการิทึม จากนั้นในปีถัดมานักวิจัยกลุ่มดังกล่าว [7] ได้มีการศึกษาการนำเครื่องมือเบนเคลแมนบีมจำนวน 2 เครื่อง มาใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนัก (Load Transfer Efficiency, LTE) ของแผ่นพื้นคอนกรีตที่เสริมผิวบนชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต แทนการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ผลการวิจัยพบว่า เครื่องมือเบนเคลแมนบีมสามารถนำมาใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตได้ ดังนั้นจากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นว่า นักวิจัยทางด้านวิศวกรรมผิวทางได้ให้ความสนใจและมีความพยายามในการพัฒนาเครื่องมือเบนเคลแมนบีมอย่างต่อเนื่อง แต่จากงานวิจัยที่กล่าวมานั้น ยังเป็นเพียงการพัฒนาเฉพาะในส่วนของการทดสอบเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนาทั้งในส่วน of เครื่องมือและวิธีการทดสอบ รวมทั้งวิธีการวิเคราะห์ผลไปพร้อมกัน

3. วิธีการศึกษาและดำเนินการวิจัย

3.1 พัฒนาดันแบบเครื่องมือวัดค่าการยุบตัวกึ่งอัตโนมัติ

การพัฒนาดันแบบมี 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 พัฒนาดันแบบอุปกรณ์ส่วนควบเพื่อใช้กับเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ที่มีขายทั่วไป และส่วนที่ 2 พัฒนาดันแบบโครงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมกึ่งอัตโนมัติชุดสมบูรณ์

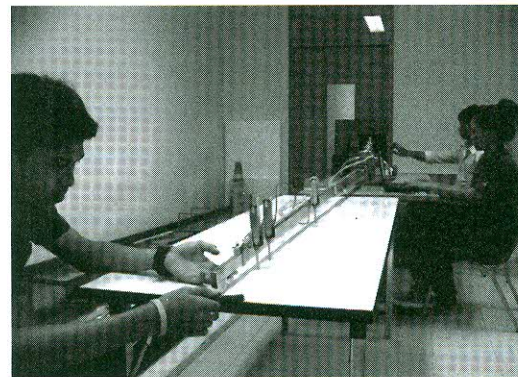
3.1.1 การพัฒนาอุปกรณ์ส่วนควบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ทั่วไป โดยการเลือกเซนเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัดค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งปลายคานและตำแหน่งออฟเซตตามแนวรัศมีรวม 4 ตำแหน่ง และเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งบริเวณผิวทางและกึ่งกลางชั้นทาง (surface and mid-depth temperature) เพื่อนำผลมาใช้ในการปรับแก้ค่ายุบตัวเทียบกับอุณหภูมิมาตรฐาน พัฒนาระบบกำลังไฟฟ้าสำรองที่กะทัดรัด รวมทั้งการส่งผ่านข้อมูลผ่านระบบไร้สายเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา เพื่อลดขั้นตอนและระยะเวลาในการทดสอบในสนาม

3.1.2 การพัฒนาต้นแบบโครงเครื่องเบนเคลแมนบีมกึ่งอัตโนมัติ เป็นการออกแบบสร้างโครงเครื่องมือใหม่ทั้งชุด เพื่อให้ตอบโจทย์ทั้งทางด้านขนาด น้ำหนัก ราคา และความสะดวกต่อการนำไปใช้ในการทดสอบในสนาม และที่สำคัญสามารถติดตั้งชุดอุปกรณ์ส่วนควบอิเล็กทรอนิกส์ในข้อ 3.1.1 ได้อย่างเหมาะสม

3.2 สอบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือ

เป็นการสอบเทียบความถูกต้องในส่วน of อุปกรณ์เซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวจำนวน 4 ชุด ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด เพื่อตรวจสอบความละเอียดและถูกต้องของอุปกรณ์ ทำการสอบเทียบโดยทดลองวัดค่าการยุบตัวผ่านแบบจำลองชั้นทางขนาดเล็กของถนน

ลาดยางที่สร้างขึ้นโดยเฉพาะสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยตุ้มน้ำหนักขนาด 25 กิโลกรัม และทดสอบทุกช่วงระยะการเคลื่อนที่ทางตั้งโดยใช้ฟีลเลอร์เกจ (feeler gauge) ที่มีความหนาแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นทำการวิเคราะห์ทางสถิติหาความถูกต้องและเที่ยงตรงของเครื่องมือ



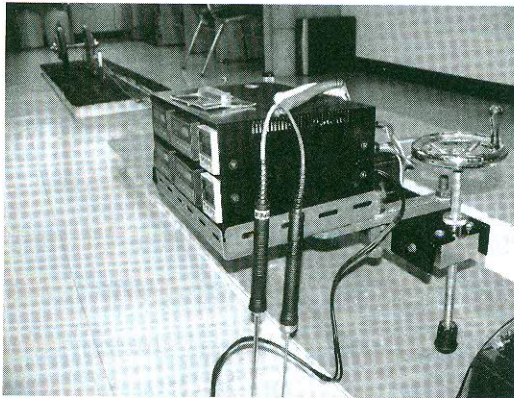
รูปที่ 2 การสอบเทียบความละเอียดและถูกต้องของอุปกรณ์ส่วนควบต้นแบบ

4. ผลการศึกษา

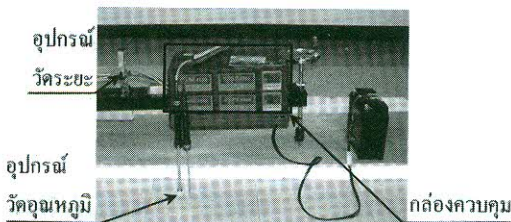
4.1 อุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีม

จากการออกแบบอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ได้สร้างชุดอุปกรณ์ส่วนควบดังแสดงรูปที่ 3 และรูปที่ 4 โดยติดตั้งเซนเซอร์ที่ปลายคานด้านสันแทนนาฬิกาวัดค่า (dial gauge) และติดตั้งเซนเซอร์วัดค่าการทรุดตัวที่ปลายคานด้านยาวอีก 3 ตำแหน่งโดยใช้รางอะลูมิเนียม เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปง่าย และยังทนทานต่อการเกิดสนิม ซึ่งได้ออกแบบให้มีช่องว่างสำหรับการ

ปรับระยะในช่วงใกล้ห้าหน้ากระทำได้ 70 ซม. และสามารถติดตั้งเซนเซอร์ในตำแหน่งรัศมีที่ไกลขึ้นได้ ทั้งนี้รายละเอียดของอุปกรณ์ส่วนควบส่วนต่างที่สำคัญมีดังนี้



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีบเชิงพาณิชย์



รูปที่ 4 รายละเอียดของอุปกรณ์ส่วนควบที่ติดตั้งในเครื่องมือเบนเคลแมนบีบเชิงพาณิชย์

4.1.1 อุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรง
ใช้อุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรงสำหรับวัดค่าการยุบตัวของผิวทาง ซึ่งหลักการทำงานของอุปกรณ์นั้นอาศัยหลักการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยสามารถวัดระยะได้สูงสุด 50 มม. มีความละเอียดในการวัดในระดับ 0.01 มม. และมีค่าความผิดพลาดจากการวัดในระดับ $\pm 0.1\%$ และยังสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 150°C ซึ่งเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานในสนามของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

4.1.2 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ 2 ชนิดคือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของบนพื้นผิว (surface probe) ซึ่งมีลักษณะของส่วนปลายเป็นแถบโลหะ เพื่อใช้ในการแตะสัมผัสสำหรับวัดอุณหภูมิที่ผิว โดยสามารถวัดอุณหภูมิระหว่าง -50°C ถึง 400°C และมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอยู่ที่ $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ และอีกชนิดคือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (piercing probe) โดยมีลักษณะเป็นปลายแหลมเพื่อใช้ในการสอดเข้าไปในรูที่เจาะจากผิวทางเพื่อวัดอุณหภูมิภายในของชั้นทาง โดยสามารถวัดอุณหภูมิระหว่าง -50°C ถึง 600°C และมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอยู่ที่ $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ ซึ่งช่วงของการวัดและค่าความละเอียดของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิมีความเหมาะสมเพียงพอต่อการนำไปใช้งานวัดค่าการยุบตัวของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตภายใต้หน้าทับบรรทุกทุกจากเพลามาตรฐาน

4.1.3 กล่องควบคุม (control box)

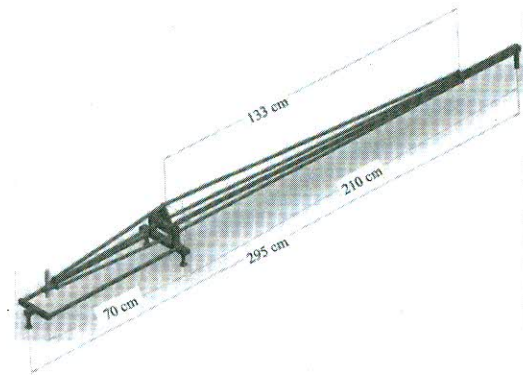
กล่องควบคุมทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลการวัดของอุปกรณ์ทั้งหมด และแสดงผลหรือส่งออกข้อมูลในแบบดิจิทัล (ตัวเลข) เพื่อลดความผิดพลาดในการอ่านค่าด้วยตาเปล่าจากนาฬิกาวัดแบบเดิม โดยมีการรับข้อมูลทั้งจากอุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรงและอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ แสดงผลและส่งต่อข้อมูลแบบไร้สายไปยังคอมพิวเตอร์ กล่องควบคุมมีขนาด $19 \times 31 \times 13$ ซม. ซึ่งภายในจะประกอบด้วยหน้าจอแสดงผลจากอุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรง หน้าจอแสดงค่าอุณหภูมิ อุปกรณ์

แปลงสัญญาณจากหน้าจอแสดงผล อุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย และอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 4 โดยหลักการทำงานเริ่มจากการกดทับจุดทดสอบบนถนนด้วยรถบรรทุกที่มีขนาดน้ำหนักเพลามาตรฐาน 18,000 ปอนด์ จากนั้นทำการวัดค่าการยุบตัวและอุณหภูมิของผิวทาง ข้อมูลวัดจะถูกส่งไปยังหน้าจอเพื่อแสดงผลหน้าจอแสดงผลแต่ละตัวจะส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์แปลงสัญญาณเพื่อรวมข้อมูลและแปลงสัญญาณผ่านอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชั้นทางต่อไป

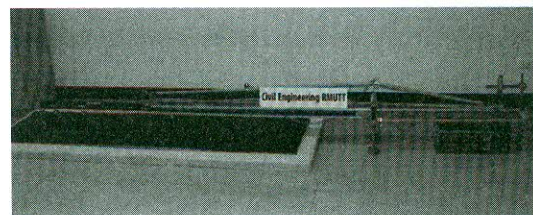
4.2 โครงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมกึ่งอัตโนมัติต้นแบบ

เครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบเป็นเครื่องมือที่มีการออกแบบและสร้างขึ้นใหม่ โดยเริ่มจากกระบวนการออกแบบที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบดังแสดงในรูปที่ 5 และมีการปรับขนาดและรูปทรงให้เหมาะสมกับวัสดุที่เลือกใช้ โดยในเบื้องต้นเลือกใช้เหล็กเป็นวัสดุหลักในการสร้างเครื่องมือ โดยขนาดความยาวของคานส่วนหน้าและคานส่วนหลังมีความยาว 210 ซม. และ 70 ซม. ตามลำดับ และเมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนมีค่าเท่ากับ 3:1 จากนั้นได้มีการสร้างเครื่องมือขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยเลือกใช้ท่อเหล็กขนาด 1/2 นิ้ว เป็นวัสดุหลักในการสร้างชุดเครื่องมือและมีการปรับเปลี่ยนวัสดุบางส่วนเป็นอะลูมิเนียมเพื่อความทนทานในการใช้งาน ลดน้ำหนักเครื่องมือ และสะดวกต่อการ

ขึ้นรูป ซึ่งรูปที่ 6 แสดงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบที่มีการประกอบแล้วเสร็จ พร้อมทั้งมีการติดตั้งรางเลื่อนสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวที่ออกแบบขึ้นใหม่ให้เหมาะสมกับเครื่องมือต้นแบบโดยเฉพาะ ทั้งนี้รางเลื่อนที่ได้ทำการติดตั้งมาพร้อมนี้ สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ส่วนควบได้เป็นอย่างดี โดยรางเลื่อนทำจากอะลูมิเนียมขนาด 6.0×1.2 ซม. ซึ่งใช้ประกอบกันทั้งหมด 6 ชิ้น โดยมีความยาวต่างกัน ซึ่งแต่ละชิ้นมีการเจาะทะลุและเจาะร่องทำเป็นรางเลื่อนและมีการติดแถบวัดระยะเพื่อบอกระยะทางของอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว จากนั้นยึดส่วนประกอบของรางเลื่อนทั้งหมดเข้าไว้ด้วยกันโดยใช้สลักเกลียว และเมื่อประกอบเครื่องมือทั้งหมดเสร็จแล้วจะมีขนาด 17.5×295.0×33.0 ซม.



รูปที่ 5 ขนาดและลักษณะของโครงเครื่องมือต้นแบบ

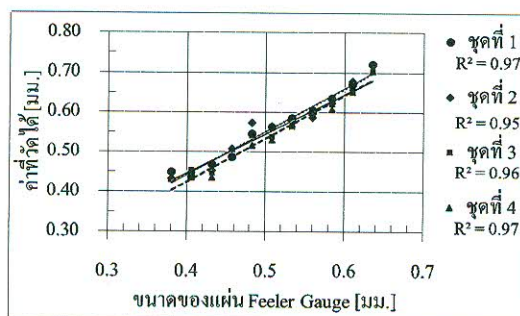


รูปที่ 6 โครงเครื่องมือต้นแบบที่สร้างแล้วเสร็จ

4.3 ผลการสอบเทียบเครื่องมือเบนเคลแมนบีม

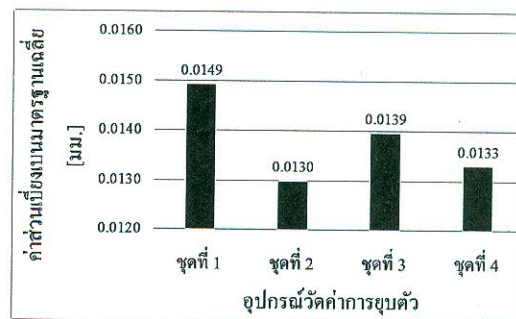
4.3.1 ผลการสอบเทียบความถูกต้องและเที่ยงตรงของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวแบบแยกอิสระ

ในการทดสอบความถูกต้องของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวทั้ง 4 ชุด แบบแยกอิสระในระบบตำแหน่งหลัก คือ ติดตั้งชุดที่ 1 เชื่อมต่อกับปลายคานด้านสั้น (สะท้อนการยุบตัวจากปลายด้านยาว) ชุดที่ 2, 3 และ 4 ติดตั้งห่างปลายคานด้านยาว 200, 300 และ 900 มม. ตามลำดับ ทำการทดสอบแบบแยกอิสระโดยสอดแผ่น Feeler Gauge ที่ปลายเซนเซอร์แต่ละตัว แผ่นทดสอบมีความหนาแตกต่างกัน 11 แผ่น ตั้งแต่ขนาด 0.381 ถึง 0.635 มม. โดยทดสอบซ้ำ 10 ครั้ง พบว่าค่าที่วัดได้มีค่าแตกต่างจากค่าความหนาของแผ่น Feeler Gauge เพียงเล็กน้อย และเมื่อทำการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นดังรูปที่ 7 พบว่าค่า R^2 ของเซนเซอร์ทั้ง 4 ชุดมีค่ามากกว่า 0.95 ซึ่งเป็นค่าความสอดคล้องที่อยู่ในเกณฑ์ดีมาก



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของแผ่น Feeler gauge และค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว

จากนั้นนำผลทดสอบมาวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของเซนเซอร์ในเทอมของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้ผลดังรูปที่ 8 พบว่าเซนเซอร์ชุดที่ 1 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุด 0.0149 มม. ในขณะที่ชุดที่ 2 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด เท่ากับ 0.0130 มม. โดยเฉลี่ยของเซนเซอร์ทั้ง 4 ชุด เท่ากับ 13.78 ไมครอน



รูปที่ 8 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวแต่ละชุด

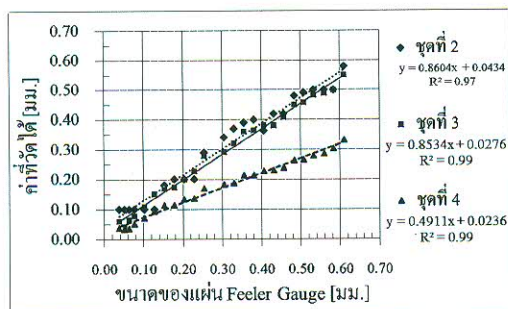
4.3.2 ผลการทดสอบความเที่ยงตรงของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวแบบโดยรวม

ทำการทดสอบความเที่ยงตรงของเซนเซอร์วัดค่าการแอ่นตัวแบบโดยรวม โดยปรับตำแหน่งระยะของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวที่ต่างกันต่างกัน 4 ระบบคือ (ระบบหลัก)

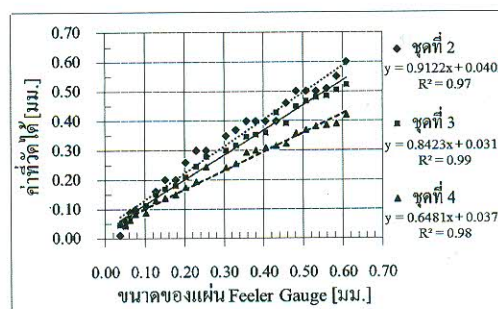
- ระบบที่ 1. ที่ระยะ 0, 200, 300 และ 900 มม.
- ระบบที่ 2. ที่ระยะ 0, 200, 300 และ 600 มม.
- ระบบที่ 3. ที่ระยะ 0, 150, 300 และ 600 มม.
- ระบบที่ 4. ที่ระยะ 0, 150, 300 และ 450 มม.

ทำการทดสอบเพื่อจำลองการทรุดตัวจากน้ำหนักกระทำที่ปลายคานด้านยาว

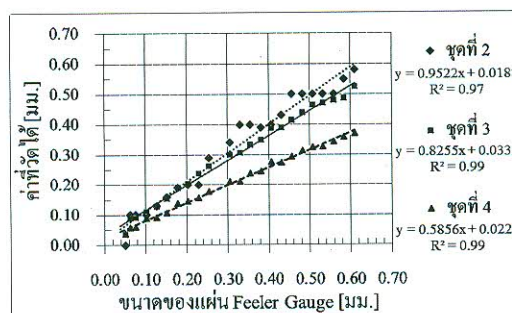
และวัดค่าด้วยเซนเซอร์ทุกชุดแบบโดยรวม โดยใช้ Feeler Gauge 24 แผ่น ความหนาตั้งแต่ 0.038 ถึง 0.610 มม. สอดเฉพาะบริเวณใต้ปลายคานด้านหน้าสุด และดึง Feeler Gauge ออก ทำการบันทึกค่าเซนเซอร์ชุดที่ 2, 3 และ 4 เนื่องจากเป็นชุดที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงระดับของคานแข็ง (rigid beam) ทดสอบซ้ำ 10 ครั้ง ผลที่ได้นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่อ่านได้แต่ละตำแหน่งของอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวดังรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 12 ซึ่งพบว่า ค่าความชันของสมการจะแปรผกผันกับระยะห่างของอุปกรณ์ที่วัดจากปลายคานด้านหน้าสุดเนื่องจากค่าการเคลื่อนที่มากขึ้น โดยเซนเซอร์ทั้ง 3 ชุดล้วนมีค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.95 ซึ่งเป็นระดับความเที่ยงตรงในเกณฑ์ดีมาก



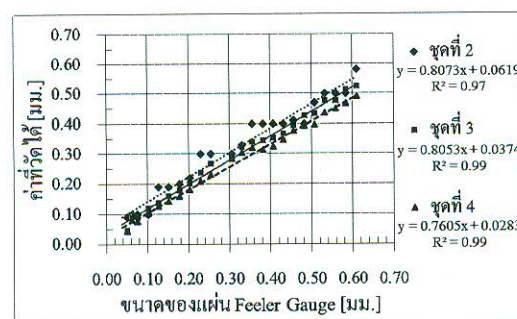
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้จากการปรับระยะระบบที่ 1



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้จากการปรับระยะระบบที่ 2

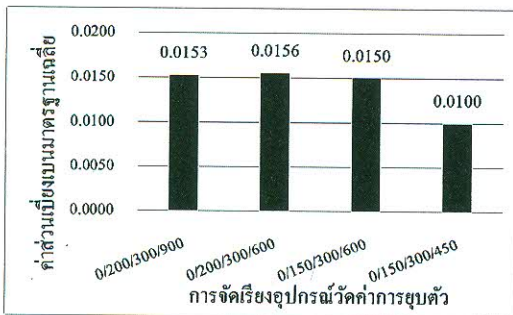


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้จากการปรับระยะระบบที่ 3



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้จากการปรับระยะระบบที่ 4

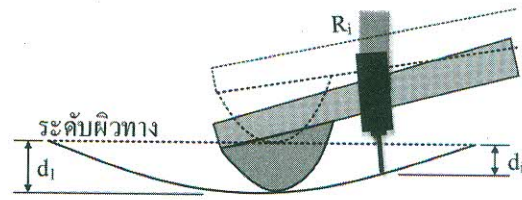
โดยจากการทดสอบทั้ง 4 ระบบ พบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยประมาณ 15 ไมครอน ดังรูปที่ 13 โดยในการปรับระยะห่างของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวตามแบบที่ 4 มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 10 ไมครอน



รูปที่ 13 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการปรับระยะห่างเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวแต่ละแบบ

4.4.3 การคำนวณค่าการยุบตัวของผิวทาง

ค่าการยุบตัวของผิวทางที่อ่านได้จากเครื่องมือทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีบบแบบกึ่งอัตโนมัติจะต้องนำมาปรับแก้ค่าการยุบตัวก่อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ค่าการยุบที่ปลายคันเนื่องจากสัดส่วนของความยาวคัน และค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับของคันแข็งตามการยุบตัวของผิวทางดังรูปที่ 14 ดังนั้นค่าการยุบตัวของผิวที่เกิดขึ้นหลังจากการปรับแก้สามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 14 ลักษณะการอ่านตัวของผิวทางขณะทดสอบ

ค่าการยุบที่ปลายคัน

$$d_1 = R_1 \times f_{BB} \quad (1)$$

โดยที่

d_1 คือ ค่าการยุบที่ปลายคัน

R_1 คือ ค่าอ่านจากอุปกรณ์วัดการยุบตัว

ชุดที่ 1

f_{BB} คือ ค่าปรับแก้สัดส่วนของความยาว

คันของแต่ละเครื่อง ซึ่งในกรณีของเครื่องนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมา ที่ได้ทำการทดสอบไว้พบว่า มีค่าเท่ากับ 4.130 [1]

ค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี

$$d_i = R_i - y_i \quad (2)$$

โดยที่

d_i คือ ค่าการยุบที่ตำแหน่งอุปกรณ์

ชุดที่ i

R_i คือ ค่าอ่านได้จากอุปกรณ์วัดการยุบตัวชุดที่ i

y_i คือ ค่าปรับแก้จากสมการถดถอยเชิงเส้นของอุปกรณ์ชุดที่ i โดยแทนค่า x_1 (ในพจน์ y_1) ด้วยค่า d_1

ตัวอย่างการคำนวณค่าการยุบตัวของผิวทาง โดยสมมุติว่าทำการทดสอบในสนามด้วยระบบที่ 1 อ่านค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งปลายคันและที่ระยะ 200 มม. จากปลายคันได้ 0.36

และ 2.29 ตามลำดับ สามารถคำนวณค่าการยุบตัวได้ดังนี้

จากการวัดค่าการยุบตัวด้วยระบบที่ 1 ได้ผลการถดถอยเชิงเส้นสำหรับคำนวณค่าการยุบตัวที่ระยะ 200 มม. หรือในชุดที่ 2 จากรูปที่ 9 คือ

$$y_2 = 0.8604x + 0.0434$$

ดังนั้นค่าการยุบตัวที่ปลายคาน

$$d_1 = R_1 \times BB_1 = 0.36 \times 4.130 = 1.49 \text{ มม.}$$

และค่าการยุบตัวที่ระยะ 200 มม. จากปลายคาน

$$\begin{aligned} d_2 &= R_2 - y_2 \\ &= 2.29 - (0.8604 \times 1.49 + 0.0434) \\ &= 0.97 \text{ มม.} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าการยุบตัวของผิวทางที่ปลายคานและที่ระยะ 200 มม. จากปลายคานคือ 1.49 มม. และ 0.97 มม. ตามลำดับ

ทั้งนี้จากสมการที่ (1) และ (2) เป็นเพียงสมการเส้นตรงอย่างง่าย ดังนั้นการปรับแก้ค่าที่วัดได้จากระบบเซนเซอร์ที่ตำแหน่งออฟเซตตามแนวรัศมีทุกตำแหน่งจึงสามารถทำได้โดยการเขียนในโปรแกรมคำนวณแบบ spreadsheet ทั่วไปไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาที่ใช้อรับข้อมูลในการทดสอบนั้น

5. สรุป

จากการพัฒนาเครื่องมือต้นแบบทดสอบการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติ

โดยใช้เครื่องเบนเคลแมนบีบที่หน่วยงานหลักเล็กใช้ไปแล้วเป็นฐานของการพัฒนา เนื่องจากตอบโจทย์ของการจัดหาเครื่องมือโดยใช้งบประมาณน้อย และยังคงสามารถใช้งานได้กับถนนลาดยางในท้องถิ่นที่มีปริมาณจราจรน้อย โดยได้มีการสร้างชุดอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาให้เครื่องมือเบนเคลแมนบีบแบบดั้งเดิมสามารถอ่านค่าได้หลายตำแหน่งและมีความละเอียดถูกต้องสูงขึ้น และมีการวิจัยพัฒนาสร้างโครงเครื่องมือต้นแบบที่เหมาะสมสอดคล้องกับชุดอุปกรณ์ส่วนควบดังกล่าวให้มากที่สุด ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลทดสอบที่ได้จากเครื่องมือต้นแบบทำให้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) เครื่องมือต้นแบบมีความละเอียดถูกต้องโดยรวมค่อนข้างดี โดย R^2 จากการทดสอบเทียบมีค่ามากกว่า 0.95 และมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 13.75 ไมครอน

2) ความละเอียดถูกต้องของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวในกรณีเปลี่ยนระยะวัดค่าออฟเซตตามแนวรัศมีอยู่ในเกณฑ์พอใช้ โดยจากการทดสอบจาก 4 ระบบ พบว่ามีความเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยเฉลี่ยประมาณ 15 ไมครอน

3) การหาค่าการแอ่นตัวประสิทธิผลของโครงสร้างผิวทางจากผลทดสอบของเครื่องมือต้นแบบสามารถใช้ระบบสมการเชิงเส้นอย่างง่ายที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ และสามารถปรับใช้ได้โดยง่ายด้วยโปรแกรมคำนวณแบบ spreadsheet ทั่วไป

4) ทีมวิจัยสามารถพัฒนาโครงเครื่องมือต้นแบบพร้อมชุดอุปกรณ์ส่วนควบประกอบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพในการวัดอุณหภูมิผิวและกึ่งกลางความหนา รวมทั้งอ่านค่าการยุบตัวของถนนลาดยางสูงกว่าเครื่องมือเบนเคลแมนบีบเชิงพาณิชย์ทั่วไปด้วยต้นทุนโดยประมาณ 300,000 บาท/เครื่อง

ทั้งนี้ทีมนักวิจัยยังมุ่งหวังที่จะให้มีการศึกษาวิจัยต่อยอดเพื่อพัฒนาโครงเครื่องมือต้นแบบเบนเคลแมนบีบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบนี้ให้เกิดผลประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม คือการนำไปใช้ในการประเมินกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางในท้องถิ่นที่เปิดให้บริการแล้ว รวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ต่าง ๆ ที่เอื้ออำนวย เช่น ใช้ควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง เป็นต้น จึงได้ทำการทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีบกึ่งอัตโนมัติบนโครงสร้างถนนลาดยางจริง และพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ผลทดสอบ ทั้งนี้ผลการศึกษาวินิจฉัยต่อยอดนี้จะได้นำเสนอในบทความวิจัยในอนาคตอันใกล้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัย “เครื่องมือต้นแบบทดสอบการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติ” ด้วยงบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2556

เอกสารอ้างอิง

- [1] พุทธิพล ทองอินทร์ดำ, นิรชร นกแก้ว: การพัฒนาระบบตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางในท้องถิ่นโดยวิธีตรง, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [2] พุทธิพล ทองอินทร์ดำ: วิศวกรรมงานทางแบบบูรณาการในการประเมินสภาพถนนลาดยางไทยแบบมีชีวิต. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ปีที่ 14 ฉบับที่ 1, หน้า 43-56, 2556
- [3] ดิเรก ลาวัณย์ศิริ และธรรมมา เจียรธรวาณิช. การเปรียบเทียบการออกแบบเสริมผิวทางแบบยึดหยุนที่ได้จากเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer. วารสาร มก. ฉบับที่ 57, หน้า 46-59. 2549.
- [4] สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทางกรมทางหลวง: เอกสารสำหรับผู้เข้าอบรมการทดสอบแบบไม่ทำลาย: กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร,
- [5] P. Thongindam, Enhancement of Backcalculation Techniques for Assessing Flexible Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms. Dissertation, Got-

tfried Wilhelm Leibniz University of
Hannover, Germany, 2009

- [6] D. R. Jundhare, K. C. Khare, and R. K. Jain. **Development Correlation between Benkelman Beam Deflection and Falling Weight Deflectometer for Conventional Whitetopping Overlay.** Journal of

Basic and Applied Scientific Research, pp. 8725-8731. 2012.

- [7] D. R. Jundhare, K. C. Khare, and R. K. Jain. **Use of Benkelman Beams for Measuring LTE in Whitetopping An Alternative Tool to FWD Test.** Springer-Verlag. pp. 203-207. 2012.