รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เครื่องมือต้นแบบทดสอบการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติ

Prototype of Semi-Automatic Deflectometer Equipment for Asphalt Roads

โดย

ดร.พุทธพล ทองอินทร์ดำ	หัวหน้าโครงการ
นายจักรกฤษ อ่อนชื่นจิตร	ผู้ร่วมวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2556

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เครื่องมือต้นแบบทดสอบการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติ

Prototype of Semi-Automatic Deflectometer Equipment for Asphalt Roads

โดย

ดร.พุทธพล ทองอินทร์ดำ	หัวหน้าโครงการ
นายจักรกฤษ อ่อนชื่นจิตร	ผู้ร่วมวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2556

ส่วนที่ 1 รายละเอียดโครงการ

1. **ชื่อโครงการวิจัย** เครื่องมือต้นแบบทดสอบการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติ

   (Prototype of Semi-Automatic Deflectometer Equipment for Asphalt Roads)

2. **หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบงานวิจัย และสถานที่ตั้งพร้อมทั้งชื่อหน่วยงาน และลักษณะของการร่วมงานวิจัยกับหน่วยงานอื่น (ถ้ามี)**

   หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบ

   คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-4697 โทรสาร 02-549-3412

3. **คณะผู้วิจัย** บทบาทของนักวิจัยแต่ละคนในการทำวิจัย และสัดส่วนที่ทำการวิจัย

ลำดับ	ชื่อ-สกุล	บทบาทนักวิจัย	สัดส่วนการทำวิจัย
1	ดร.พุทธพล ทองอินทร์คำ (Dr.-Ing. Puttapon Thongindam)	หัวหน้าโครงการและผู้วิจัยหลัก	75%
2	นายจักรกฤษ อ่อนชื่นจิตร (Mr. Jakkrit Onashaunjit)	ผู้ร่วมวิจัย	25%

4. ประเภทของการวิจัย การวิจัยพัฒนาทดลอง (Experimental Development)

5. สาขาวิชาการและกลุ่มวิชาการที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

ส่วนที่ 2 เนื้อหาโครงการ

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันหน่วยงานหลักด้านการทางในประเทศได้หันไปใช้เครื่องมือวัดค่ากำลังรับน้ำหนักผิวทางจากต่างประเทศที่มีเทคโนโลยีทันสมัยแต่มีราคาแพง ทำให้หน่วยงานท้องถิ่นซึ่งมีงบประมาณจำกัดไม่สามารถจัดหาเครื่องมือดังกล่าวมาใช้งานได้ งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาเครื่องมือต้นแบบทดสอบกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยาง โดยการพัฒนาเครื่องเบนเคลแมนบีม (BB) ที่หน่วยงานท้องถิ่นส่วนใหญ่มีอยู่แล้วให้สามารถอ่านค่าวัดได้รวดเร็วขึ้น และใช้ต้นทุนต่ำ และมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์รับได้ ผลการศึกษาทำให้ทีมวิจัยสามารถพัฒนาเครื่องมือต้นแบบที่มีต้นทุนต่ำกว่า 300,000 บาท/เครื่อง โดยมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ ชุดโครงเครื่องมือแบบใหม่ และส่วนที่ 2 คือ กล่องควบคุมและอุปกรณ์อิเล็กโทรนิกส์ส่วนควบที่เซ็นเซอร์สามารถอ่านค่าแอ่งการแอ่นตัวของผิวทางแบบกึ่งอัตโนมัติได้ถึง 4 จุด และอ่านค่าอุณหภูมิที่ผิวและกึ่งกลางชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต ค่าทั้งหมดแสดงผลโดยทันทีและส่งข้อมูลผ่านสัญญาณไร้สายไปยังคอมพิวเตอร์พกพา ผลการสอบเทียบพบว่าค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.95 และมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 15 ไมครอน และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตฐานจากการเปลี่ยนตำแหน่งเซ็นเซอร์ 0.015 มม. ในขณะที่ค่าการทรุดตัวจริงของผิวทางสามารถปรับแก้โดยง่ายในโปรแกรมคำนวณทั่วไปโดยอาศัยสมการปรับแก้ที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้

คำสำคัญ เบนเคลแมนบีมกึ่งอัตโนมัติ, ถนนลาดยางท้องถิ่น, กำลังรับน้ำหนัก

Abstract

Nowadays the main authorities of highway in the country are importing and 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 error is less than 15 microns. The standard deviation of changing sensors configuration is about 0.015 mm. 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, bearing capacity.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับใช้ในการทดสอบ และทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัย “เครื่องมือต้นแบบทดสอบการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติ” ด้วยงบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2556 ที่เป็นงบประมาณในงานวิจัยฉบับนี้ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ สามารถจะนำไปใช้ต่อยอดให้เกิดการพัฒนาเครื่องมือที่เหมาะสมกับการประเมินกำลังรับน้ำหนักถนนลาดยางในท้องถิ่นที่มีราคาย่อมเยาว์และมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้ต่อไป

คณะผู้วิจัย

สิงหาคม พ.ศ. 2557

สารบัญเนื้อหา

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4

1.3 ขอบเขตการวิจัย 4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 หลักการพื้นฐานการวิเคราะห์โครงสร้างทางแบบยืดหยุ่น 7

2.2 การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างผิวทาง 9

2.3 เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวจากตุ้มกระแทก 10

2.4 เครื่องมือเบนเคลแมนบีม (Benkelman Beam) 13

2.5 มาตรฐานการทดสอบ 14

2.6 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล 19

2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ FWD กับเบนเคลแมนบีม 24

2.8 พัฒนาการของเครื่องเบนเคลแมนบีม 25

3 วิธีการศึกษาและดำเนินการวิจัย 27

3.1 พัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีม 28

3.2 สอบเทียบเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ 28

3.3 การทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบในภาคสนาม 30

4 วิเคราะห์ผลการศึกษา 31

4.1 อุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ (ดั้งเดิม) 31

4.2 โครงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบ 38

4.3 ผลการสอบเทียบเครื่องมือเบนเคลแมนบีม 40

4.4 การคำนวณหาค่าการแอ่นตัวของผิวทาง 49

4.5 ผลการทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบในสนาม 50

5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 51

เอกสารอ้างอิง 53
ภาคผนวก ก 55
ภาคผนวก ข 72
ภาคผนวก ค 79
ประวัตินักวิจัย 80

สารบัญรูป

รูป 1-1 เครื่องมือวัดค่าการแอ่นตัวจากตุ้มกระแทกที่นำเข้าด้วยราคาสูงและมีใช้เฉพาะหน่วยงานหลัก2
รูป 1-2 เครื่องมือเบนเคลแมนบีม ที่มีประจำหน่วยงานท้องถิ่นทั่วประเทศไทยแต่ขาดการพัฒนา 3
รูป 2-1 ตำแหน่งตัวแปรทางกลศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างถนนลาดยาง [3].....8
รูป 2-2 หลักการทำงานของเครื่องวัดค่าความแอ่นตัวโดยลูกตุ้มกระแทก (FWD) [4] 11
รูป 2-3 เครื่องมือเบนเคลแมนบีมในการใช้งานทดสอบ 13
รูป 2-4 รูปร่างและขนาดของเครื่องอมือเบนเคลแมนบีมมาตรฐาน [10] 14
รูป 2-5 จุดทดสอบตามมาตรฐานของ WASHO.....15
รูป 2-6 จุดทดสอบตามมาตรฐานของ Canadian 16
รูป 2-7 จุดทดสอบตามมาตรฐานของ Department of Highway 17
รูป 2-8 จุดทดสอบตามมาตรฐานของ Rebound deflection.....18
รูป 2-9 หลักการทดสอบด้วยเบนแคลแมนบีมตามมาตรฐานเยอรมัน.....19
รูป 2-10 ค่าปรับแก้อุณหภูมิชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตมาตรฐาน อ้างอิง Asphalt Institute 20
รูป 2-11 แบบบันทึกข้อมูลภาคสนามของการทดสอบด้วยเบนเคลแมนบีม.....23
รูป 3-1 การสอบเทียบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวด้วยฟิลเลอร์เกจ.....29
รูป 3-2 การทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบในสนาม.....30
รูป 4-1 ชุดยึดจับอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว.....31
รูป 4-2 รางเลื่อนสำหรับปรับระยะห่างของชุดวัดค่าการแอ่นตัว 32
รูป 4-3 การติดตั้งอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์.....33
รูป 4-4 การติดตั้งชุดยึดจับอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวแทนนาฬิกาวัด.....33
รูป 4-5 อุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรง 34
รูป 4-6 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ผิวบนสุดและกึ่งกลางชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต.....35
รูป 4-7 หน้าจอแสดงผลค่าการแอ่นตัวและค่าอุณหภูมิ 36
รูป 4-8 หลักการทำงานของชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 37
รูป 4-9 โครงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบที่ออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ 39
รูป 4-10 เครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบที่สร้างแล้วเสร็จ 39
รูป 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของแผ่น Feeler gauge และค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว.....44

รูป 4-12 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวแต่ละชุด.....45
รูป 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้แต่ละตำแหน่งที่มีการปรับระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวตามแบบที่ 1 46
รูป 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้แต่ละตำแหน่งที่มีการปรับระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวตามแบบที่ 2 46
รูป 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้แต่ละตำแหน่งที่มีการปรับระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวตามแบบที่ 3 47
รูป 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้แต่ละตำแหน่งที่มีการปรับระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวตามแบบที่ 4 47
รูป 4-17 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการปรับระยะห่างอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวแต่ละแบบ 48

สารบัญตาราง

ตาราง 2-1 ข้อสรุปเปรียบเทียบคุณสมบัติของ FWD และเบนเคลแมนบีม [12]_____24
ตาราง 4-1 รายละเอียดของอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์_____31
ตาราง 4-2 รายละเอียดของรางเลื่อนปรับระยะ _____40
ตาราง 4-3 ค่าความหนาของ Feeler Gauge ที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 1 _____41
ตาราง 4-4 ค่าความหนาของ Feeler Gauge ที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 2 _____42
ตาราง 4-5 ค่าความหนาของ Feeler Gauge ที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 3 _____43
ตาราง 4-6 ค่าความหนาของ Feeler Gauge ที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 4 _____44

1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเด็นหัวข้อเรื่องการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศถูกหยิบยกจากทุกรัฐบาล เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักของการพัฒนาประเทศในทุกๆด้าน และจากข้อมูลทางสถิติด้านโลจิสติกส์เกี่ยวกับการขนส่งสินค้าในประเทศไทยในช่วงทศวรรษล่าสุด ทำให้สามารถชี้ชัดได้ว่าระบบการขนส่งทางบกหรือการขนส่งโดยรถบรรทุกทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กในประเทศไทยนั้นเป็นหมวดการขนส่งที่โดดเด่นและมีความสำคัญมากที่สุด ดังจะเห็นได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลการขนส่งสินค้าในช่วงประมาณ 10 ปีที่ผ่านมาแสดงชัดเจนว่าระบบการจราจรทางบกโดยรถยนต์หรือรถบรรทุกยังคงเป็นกลไกหลักของการคมนาคมของประชาชนรวมทั้งการขนส่งผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมภายในประเทศ

ทั้งนี้หากแยกแยะเป็นร้อยละของค่าเฉลี่ยส่วนแบ่งทางการตลาดของระบบโลจิสติกส์ด้านการขนส่งสินค้าในเมืองไทยออกเป็นหมวดหมู่ของการขนส่งหลักในประเทศไทย ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการขนส่งโดยรถบรรทุกมีส่วนแบ่งการตลาดมากที่สุดโดยมีค่ามากถึงร้อยละ 89 ในขณะที่การขนส่งทางน้ำที่เป็นอันดับสองนั้นมีส่วนแบ่งของตลาดเพียงร้อยละ 9 โดยการขนส่งสินค้าทางระบบรางและการขนส่งทางอากาศมีส่วนแบ่งการตลาดน้อยมากเพียงร้อยละ 2 และร้อยละ 0.006 ตามลำดับ ทั้งนี้อันเป็นผลเนื่องมาจากระบบโครงข่ายที่ไม่ครอบคลุม การขาดการสนับสนุนที่จริงจังจากภาครัฐรวมทั้งปัจจัยประกอบอื่น ๆ อีกมากทำให้การหมวดการขนส่งอื่นไม่ได้รับความนิยมเท่ากับการขนส่งสินค้าโดยรถบรรทุก

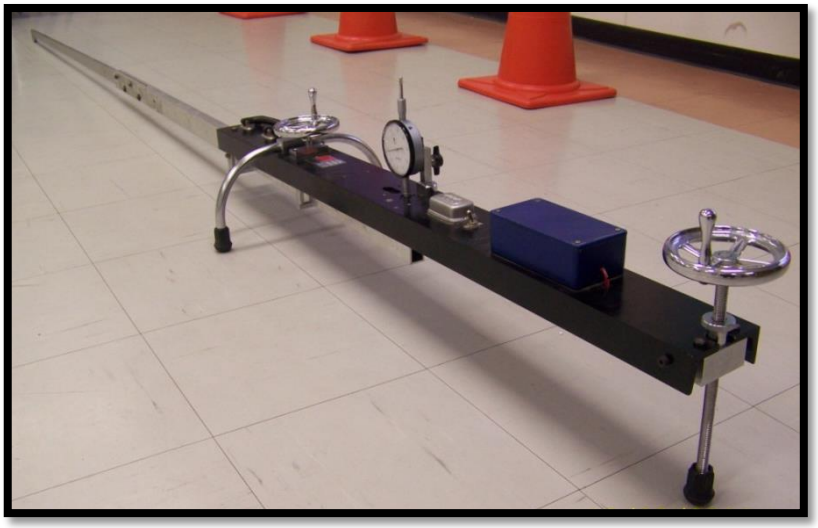
โดยจากภาพรวมดังกล่าวทำให้ปฏิเสธไม่ได้เลยว่าโครงข่ายทางหลวงทั้งสายหลักและสายรองต่าง ๆ มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจของประเทศ รวมทั้งคุณภาพชีวิตของประชาชน และในขณะที่โครงสร้างผิวทางลาดยางหรือผิวทางยืดหยุ่น (Flexible Pavement Structures) ได้ถูกสร้างขึ้นโดยงบประมาณของรัฐเป็นจำนวนมากเนื่องจากใช้งบประมาณการก่อสร้างที่ต่ำกว่าโครงสร้างผิวทางคอนกรีต โดยเฉพาะในท้องถิ่นต่าง ๆ ทั้งนี้นอกจากเป็นการพัฒนาโครงสร้างปัจจัยพื้นฐานให้รองรับการขนส่งสินค้าทั้งภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมแล้ว ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชนในท้องถิ่นให้ดีขึ้นด้วย ปัญหาความเดือดร้อนของประชาชนเกิดขึ้นเมื่อถนนลาดยางดังกล่าวมักพังเสียหาย ชำรุดเร็วเกินกว่าอายุการใช้งานที่ออกแบบไว้ อัน

เนื่องมาจากสาเหตุต่าง ๆ โดยเฉพาะจากการก่อสร้างที่ไม่ได้มาตรฐาน หรือการบรรทุกเกินน้ำหนัก เป็นต้น ส่งผลให้รัฐบาลไทยต้องสูญเสียงบประมาณจำนวนนับหลายหมื่นล้านบาททุก ๆ ปี เพื่อจัดสรรเป็นงบซ่อมแซมโครงสร้างพื้นฐานที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งเหล่านี้ให้กลับมาใช้งานได้ดังเดิม

แต่ทั้งนี้ข้อมูลจากหลากหลายงานวิจัยด้านวิศวกรรมผิวทางได้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผิวทางนั้นจะสามารถใช้งานได้ยาวนานคุ้มค่ามากขึ้นหากมีระบบการดูแลและบำรุงรักษาที่เหมาะสม โดยเฉพาะการมีวิธีการตรวจสอบหากำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางในขณะใช้งานที่มีประสิทธิภาพจะทำให้สามารถออกแบบซ่อมแซมถนนดังกล่าวได้อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ โดยในปัจจุบันหน่วยงานหลักที่รับผิดชอบดูแลงานด้านโครงสร้างการจราจร เช่น กรมทางหลวง และกรมทางหลวงชนบทได้พยายามพัฒนาการปฏิบัติงานให้ทันสมัยมากขึ้นโดยได้มีการสั่งซื้อเครื่องมือตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักโครงสร้างผิวทางที่มีความทันสมัยจากต่างประเทศ เช่น เครื่องวัดค่าความแอ่นตัวผิวทางด้วยลูกตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) ดังแสดงในรูป 1-1

รูป 1-1 เครื่องมือวัดค่าการแอ่นตัวจากตุ้มกระแทกที่นำเข้าด้วยราคาสูงและมีใช้เฉพาะหน่วยงานหลัก

การนำเข้าของเครื่องทดสอบ เช่น เครื่องมือวัดค่าการแอ่นตัวจากตุ้มกระแทก จากต่างประเทศนั้นทำให้การตรวจสอบถนนทางหลวงซึ่งเป็นโครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีปริมาณการจราจรสูงสามารถทำได้รวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น ทั้งยังลดปัญหาการติดขัดของการจราจรขณะปฏิบัติงาน แต่เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในระบบที่ทันสมัยขึ้นเหล่านี้ล้วนยังมีราคาสูงอยู่มาก โดยมีราคาในปัจจุบันอยู่ที่ประมาณ 15,000,000 – 20,000,000 บาท/เครื่อง จึงทำให้มีใช้อยู่ในเพียงบางหน่วยงานหลักด้านการจราจรของประเทศไทยเท่านั้น แต่ในอีกด้านหนึ่งการเริ่มต้นใช้เครื่องมือที่มีความทันสมัยมากขึ้นของหน่วยงานหลักนั้นได้ส่งผลให้ทำให้ความพยายามในการพัฒนาระบบและวิธีตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างผิวทางด้วยเครื่องมือดั้งเดิมที่มีราคาย่อมเยาว์กว่า เช่น เบนเคลแมนบีม (Benkelman beam) ดังแสดงในรูป 1-2 ซึ่งมีราคาเพียงประมาณ 150,000 บาท/เครื่อง นั้นลดน้อยลงอย่างมาก



รูป 1-2 เครื่องมือเบนเคลแมนบีม ที่มีประจำหน่วยงานท้องถิ่นทั่วประเทศไทยแต่ขาดการพัฒนา

ทั้งนี้หากพิจารณาโดยภาพรวมแล้วข้อเสียเปรียบของเครื่องมือเบนเคลแมนบีมนั้นจะลดน้อยลงอย่างมากเมื่อใช้กับโครงข่ายถนนลาดยางที่มีความยาวไม่มากและปริมาณการจราจรไม่สูงนัก ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นคุณสมบัติของถนนในท้องถิ่นต่าง ๆ แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา [[4], [5], [6], [7]] พบว่าเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบดั้งเดิมให้ค่าทดสอบที่มีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากการอ่านค่าด้วยตาเปล่าจากผู้ปฏิบัติการ และอ่านค่าการแอ่นตัวได้เพียงจุดเดียวทำให้ไม่สามารถนำผลการทดสอบมาใช้ในงานบริหารจัดการดูแลซ่อมแซมโครงข่ายถนนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบให้สามารถก้าวข้ามปัญหาดังกล่าวได้ เพื่อให้การนำไปใช้งานจริงมีประสิทธิภาพสูงสุด และสามารถนำไปต่อยอดให้เป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับในระดับนานาชาติต่อไป ส่งผลให้ถนนลาดยางซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีความสำคัญกับคุณภาพชีวิตของประชาชนและการเจริญเติบโตของประเทศถูกใช้งานอย่างคุ้มค่าเงินภาษีของประชาชน

การพัฒนาเครื่องมือแนวคิดใหม่นี้นอกจากจะส่งผลให้หน่วยงานท้องถิ่นต่างๆ ทั่วประเทศไทยที่มีเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบปรับด้วยมือหรือแบบดั้งเดิมอยู่แล้ว สามารถนำเครื่องต้นแบบดังกล่าวไปพัฒนาต่อไปได้แล้ว ยังเป็นความคาดหวังของนักวิจัยโครงการนี้ที่ต้องการผลิตเครื่องมือทดสอบแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพ และลดการนำเข้าเครื่องมือราคาแพงจากต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาต้นแบบของเครื่องมือตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกถนนลาดยางจากค่าการแอ่นตัว “เบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติ” ที่มีราคาถูก มีความถูกต้องน่าเชื่อถือและเหมาะสมกับโครงสร้างถนนลาดยางที่ก่อสร้างจริงในท้องถิ่นของประเทศไทย
2. ลดการนำเข้าเพื่อประหยัดงบประมาณรัฐบาลจากการสั่งซื้อเครื่องมือทดสอบผิวทางจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก ประมาณ 15,000,000 -20,000,00 บาท/เครื่อง
3. เพื่อให้หน่วยงานท้องถิ่นผู้รับผิดชอบดูแลซ่อมบำรุงสายทางนำเทคโนโลยีของเครื่องมือต้นแบบที่พัฒนาขึ้นไปพัฒนาเครื่องเบนเคลแมนบีมที่มีอยู่ทั่วประเทศให้มีศักยภาพสูงขึ้น
4. เพื่อยกระดับการการออกแบบซ่อมแซมงานผิวทางถนนลาดยางในท้องถิ่นให้คุ้มค่ากับเงินงบประมาณแผ่นดิน และส่งเสริมการขนส่งสินค้าทางบกให้มีคุณภาพสูงขึ้น
5. เพื่อถ่ายทอดความรู้และเทคโนโลยีให้กับองค์กรท้องถิ่นผู้รับผิดชอบดูแลซ่อมแซมโครงข่ายถนนอันเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่อชุมชน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีแนวทางหลักคือการสร้างและพัฒนาเครื่องมือเบนเคลแมนบีมให้เป็นระบบกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งเป็นงานวิจัยแบบพัฒนาทดลองโดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1. พัฒนาเครื่องมือให้เหมาะสมกับการทดสอบโครงสร้างถนนลาดยางตามชั้นความหนาที่ก่อสร้างในท้องถิ่นต่าง ๆ ในประเทศไทย
2. พัฒนาเครื่องมือให้เหมาะสมกับการทดสอบวัสดุชั้นทางเช่น ชนิดแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างในช่วงความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย
3. พัฒนาเครื่องมือให้มีต้นทุนการประดิษฐ์ต่ำ (ไม่เกิน 400,000 -500,000 บาท/เครื่อง) แต่ยังคงมีความน่าเชื่อถือในเกณฑ์ดี เพื่อให้หน่วยงานท้องถิ่นสามารถนำไปใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้ง่ายเทียบกับเครื่อง FWD ที่ต้องนำเข้าโดยใช้งบโดยประมาณ 17,000,000 บาท/เครื่อง
4. ใช้การทดสอบภาคสนามจากถนนที่ก่อสร้างจริงในท้องถิ่นในเขต จ.ปทุมธานี หรือจังหวัดใกล้เคียงที่มีความเหมาะสมเป็นจุดกำหนดการทดสอบความถูกต้องน่าเชื่อถือของเครื่องมือ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องมือต้นแบบทดสอบหากำลังรับน้ำหนักถนนลาดยางที่มีประสิทธิภาพ
2. การจดสิทธิบัตรเครื่องมือต้นแบบการวัดค่าการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติ
3. หน่วยงานท้องถิ่นทั่วประเทศไทย เช่น เทศบาล องค์การบริหารส่วนตำบล องค์การบริหารส่วนจังหวัด สำนักดูแลงานทางระดับ เขต/แขวง ฯลฯ สามารถนำไปพัฒนาเครื่องมือที่มีอยู่ได้
4. เผยแพร่ผลงานในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ
5. เพิ่มองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมผิวทางให้กับองค์กรปกครองท้องถิ่นและหน่วยงานผู้รับผิดชอบดูแลโครงสร้างทางในประเทศไทย
6. เพิ่มศักยภาพในการบริหารจัดการงบประมาณซ่อมแซมผิวทางถนนลาดยางในประเทศไทย ส่งเสริมระบบโลจิสติกส์ของประเทศให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างผิวทางที่ใช้รองรับยานพาหนะต่าง ๆ นั้นต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานสอง ประการ คือ คุณสมบัติที่รองรับการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ (Functional Properties) ซึ่งมักจะมีผลโดยตรงต่อความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น ความยึดเกาะ (Roughness) หรือการสะท้อนแสง (Reflection) เป็นต้น และคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง (Structural Properties) หรือกล่าวอีกแบบคือความสามารถในการต้านทานน้ำหนักที่มากระทำ ซึ่งความอ่อนด้อยในคุณสมบัติข้อหลังนี้มักจะเป็นต้นเหตุให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในลักษณะต่าง ๆ ต่อโครงสร้างผิวทางซึ่งอาจมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของโครงสร้างผิวทาง

ด้วยเหตุนี้ทำให้การประเมินความเสียหายของโครงสร้างผิวทาง จึงสามารถแบ่งได้เป็น สองส่วนหลัก ได้แก่ ความเสียหายด้านการใช้งาน (Functional Failure) และความเสียหายด้านโครงสร้าง (Structural Failure) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความเสียหายด้านการใช้งานมักจะประเมินได้ทันที อันเนื่องมาจากลักษณะความเสียหายนั้น เกิดขึ้นที่ผิวทางทำให้สามารถมองเห็นและประเมินด้วยตาเปล่า (Visual Assessment) เช่น การหลุดร่อนของมวลรวม การเยิ้มของแอสฟัลต์ เป็นต้น ในขณะที่ความเสียหายทางโครงสร้างนั้นมีทั้งแบบที่สามารถประเมินได้ด้วยตาเปล่า เช่น การแตกร้าว และแบบที่ไม่สามารถประเมินได้ เช่น การประเมินกำลังต้านทานน้ำหนักของแต่ละชั้นทาง เป็นต้น

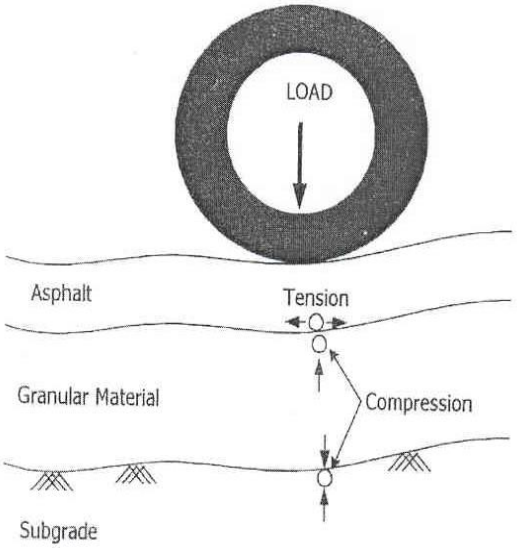
2.1 หลักการพื้นฐานการวิเคราะห์โครงสร้างทางแบบยืดหยุ่น

ในการวิเคราะห์โครงสร้างถนนลาดยางนั้นมีเป้าหมายเพื่อวิเคราะห์หาค่าความเปลี่ยนแปลงทางกลศาสตร์ที่เกิดขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดว่าสามารถป้องกันการเสียหายหลัก 2 ประการ ได้แก่ รอยแตกและร่องล้อ (cracking and rutting) ที่มักเกิดขึ้นกับถนนลาดยางได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีตัวแปรทางกลศาสตร์ที่สำคัญได้แก่

1. ความเครียดดึงแนวราบ (Horizontal Tensile Strain) ที่ใต้ชั้นทางที่มีวัสดุประสานเป็นตัวเชื่อมแน่น (bound materials) เช่น ชั้นผิวทางแอสฟัลต์ โดยจะเกิดขึ้นเนื่องจากชั้นแอสฟัลต์แอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักกระทำเมื่อมีรถบรรทุกแล่นผ่าน และเมื่อจำนวนเที่ยวสะสมมากขึ้นจะเกิดการสะสมของความเครียด และเมื่อเกินกว่าที่แอสฟัลต์จะรับได้จะทำให้แอสฟัลต์เกิดรอยแตกหลัก (major crack) โดยจะเริ่มเกิดที่ผิวด้านล่างก่อนแล้วค่อยลามขึ้นไปสู่ผิวด้านบน ความเครียดดึงแนวราบนี้จะเกิดในชั้นวัสดุที่มี

การเชื่อมแน่น เช่น วัสดุแอสฟัลต์ วัสดุดินซีเมนต์ แต่จะไม่เกิดในชั้นวัสดุที่ไม่มีการเชื่อมแน่น (unbound materials) เช่น หินคลุกหรือวัสดุมวลรวม

2. ความเครียดอัดแนวดิ่ง (vertical compressive strain) เกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุถูกกดทับจากน้ำหนักล้อรถแล้วส่งถ่ายแรงลงมายังชั้นวัสดุที่อยู่ด้านล่าง อิทธิพลของค่าความเค้นอัดแนวดิ่งจะส่งผลเสียหายต่อชั้นวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงต่ำ เช่น ชั้นดินคันทางเดิม (subgrade) การเกิดความเครียดอัดแนวดิ่งมากเกินกำหนดทำให้โครงสร้างชั้นทางวิบัติในลักษณะของการยุบตัวในแนวดิ่ง จนส่งผลต่อเนื่องทำให้เกิดรอยร่องล้อ โดยทั่วไปดินคันทางมีความแข็งแรงน้อยที่สุดหรือค่าโมดูลัสต่ำที่สุด สัดส่วนของความเครียดอัดทางดิ่งในชั้นดินคันทางจึงมากที่สุด ดังนั้นบางครั้งจึงมีการใช้ค่าความเครียดอัดทางดิ่งที่เกิดขึ้นในชั้นดินคันทางนี้เพียงชั้นเดียวในการออกแบบก่อสร้าง โดยค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างถนนลาดยางที่กล่าวข้างต้นแสดงไว้ในรูป 2-1



รูป 2-1 ตำแหน่งตัวแปรทางกลศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างถนนลาดยาง [3]

ในขณะที่การทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาค่าทางกลศาสตร์ต่างๆ ที่กล่าวถึงนั้นสามารถทำได้โดยการทดสอบโครงสร้างผิวทางแบบไม่ทำลาย (nondestructive testing, NDT) โดยอาศัยการทดสอบค่าการแอ่นตัวของผิวทางในสนาม เช่น เครื่องมือเบนเคลแมนบีม เครื่องวัดค่าแอ่นตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก และวิเคราะห์ผลโดยวิธีอ้อม โดยประกอบกับตัวแปรอื่นๆ เช่น อัตราส่วนปัวซ์ซอง ความหนาชั้นทาง แล้วนำมาคำนวณหากำลังต้านทานน้ำหนักของแต่ละชั้นทาง

2.2 การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างผิวทาง

2.2.1 การทดสอบแบบทำลาย

เป็นการทดสอบหาความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง โดยมีการเจาะทำลายโครงสร้างชั้นทาง เช่น การเจาะชั้นทางเพื่อเก็บก้อนตัวอย่างแล้วนำก้อนตัวอย่างมาทดสอบความแข็งแรงในห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการทดสอบต่างๆ ที่สอดคล้องกับวัสดุในแต่ละชั้นนั้น ซึ่งในที่นี้จะไม่ขอกล่าวในรายละเอียด เนื่องจากเป็นวิธีการพื้นฐานทั่วไป แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีการทดสอบแบบทำลายมักมีข้อจำกัดในหลายๆ ด้าน ที่ทำให้ไม่สามารถเป็นตัวแทนที่ดีของการวิเคราะห์สภาพของโครงสร้างโดยรวมได้ เช่น สภาพแวดล้อมของการทดสอบที่ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง จำนวนจุดทดสอบที่จำกัด เป็นต้น

2.2.2 การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing, NDT)

การทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นวิธีการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุ อุปกรณ์ ชิ้นงานหรือโครงสร้างต่าง ๆ โดยไม่ทำให้วัตถุ ชิ้นงาน อุปกรณ์ หรือ โครงสร้างต่าง ๆ ที่ทดสอบนั้นเสียหายหรือถูกทำลาย ในงานตรวจสอบประเมินสภาพทางและความแข็งแรงโครงสร้างทางก็ใช้แนวคิดของการทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งในการทดสอบนั้นจะไม่สามารถหาความแข็งแรงของโครงสร้างทางได้โดยตรงทันที แต่สามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบนั้นมาวิเคราะห์หาความแข็งแรงของโครงสร้างทางโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์คำนวณในรูปแบบต่างๆ เช่น การวิเคราะห์ลักษณะการสะท้อนกลับของคลื่นที่ถูกส่งออกไปและย้อนกลับมาก หรือ การคำนวณจากค่าแอ่งการยุบตัวจากน้ำหนักกระทะเพื่อหาความแข็งแรงของโครงสร้างทาง เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนั้นอาจทำได้โดยง่าย หรืออาจจำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ซับซ้อนในการวิเคราะห์คำนวณ แล้วจึงจะสามารถนำข้อมูลมาสรุปผลการประเมินคุณภาพได้ เนื่องจากถนนที่ต้องทำการทดสอบนั้นมีระยะทางยาวมาก และในการทดสอบนั้นต้องการการทดสอบที่มีความถี่สูงเพื่อความถูกต้องในการประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างทาง ถ้าใช้การทดสอบแบบทำลายจะเป็นเหตุทำให้ถนนชำรุดเสียหาย หรือเกิดความรู้สึกไม่มีความสะดวกสบายในการเดินทางของผู้ใช้ถนน เนื่องจากการซ่อมถนนให้กลับคืนสู่สภาพเดิมเหมือนตอนก่อสร้างแล้วเสร็จใหม่ทำได้ยาก ประกอบกับยวดยานในปัจจุบันมีความเร็วและมีปริมาณมากขึ้นกว่าเดิม จึงอาจเกิดความไม่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติการทดสอบได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาเครื่องมือทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างทางแบบไม่ทำลาย (NDT) เพื่อลดการเสียหายของโครงสร้างทาง ผลการทดสอบที่ได้มีความถูกต้องสอดคล้องกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น และผู้ปฏิบัติการทดสอบมีความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

ทั้งนี้จากทฤษฎีกลศาสตร์พื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผิวทาง เช่น ทฤษฎีของบูซิเนค (Boussinesq's Theory) ทฤษฎียืดหยุ่นหลายชั้นทาง (Multilayered Elastic Theory) หรือทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างผิวทางคอนกรีตเวสเตอร์การ์ดบนฐานรากของวิงค์เลอร์ (Westergaard's Theory on Winkler Foundation) จะพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวของผิวทาง (Surface Deflection Basin) กับค่าความแข็งแรงโครงสร้างผิวทางในสภาพแวดล้อมขณะทำการวัด จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงนำไปสู่การประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างทางจากการวัดค่าการแอ่นตัวของผิวทางในสนาม โดยในทางปฏิบัติของการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางนั้นนิยมใช้วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยเป็นการทดสอบในที่ ซึ่งทำให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากกว่าการทดสอบแบบทำลายเนื่องจากอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง เครื่องมือที่ใช้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางจากค่าการแอ่นตัวของผิวทางนั้น ถูกพัฒนาและคิดค้นขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงเกิดเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลายขึ้นหลากหลายประเภท ซึ่งสามารถแยกเป็นประเภทหลัก ๆ ได้แก่ [3]

1. เครื่องมือแบบสถิต (Static Device) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้น้ำหนักกดทับแบบสถิตหรือกึ่งสถิต เช่น เครื่องมือเบนเคลแมนบีม (Benkelman Beam)
2. เครื่องมือแบบสั่นสะเทือน (Vibratory Device) เช่น เครื่อง Dynaflect หรือ Road Rater เป็นต้น
3. เครื่องมือแบบใช้แรงกระตุ้น (Impulse Device) เช่น เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวจากตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD)

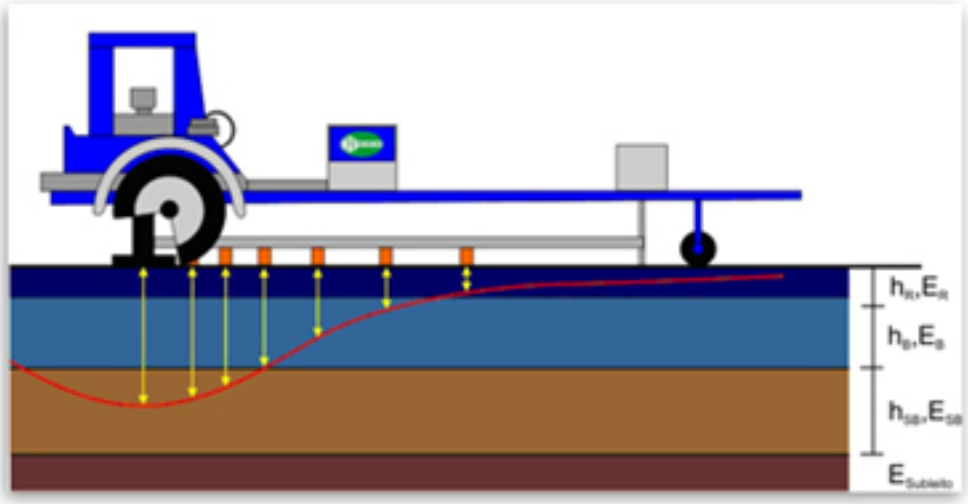
2.3 เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวจากตุ้มกระแทก

เครื่องมือแบบใช้แรงกระตุ้นนั้นเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในวงการวิศวกรรมผิวทาง ว่ามีประสิทธิภาพในการทดสอบที่ดีกว่าเครื่องมือประเภทอื่นในหลายด้าน เช่น ความสามารถในการจำลองน้ำหนักจากยานพาหนะที่วิ่งบนผิวทางด้วยความเร็วใช้งาน ความสามารถในการวัดค่าซ้ำเดิม (Repeatability) ได้อย่างแม่นยำทำให้ค่าที่วัดได้มีความน่าเชื่อถือสูง ความปลอดภัยในการปฏิบัติงานสูง แต่ก็มีข้อเสียคือเครื่องมือในการทดสอบนั้นราคาค่อนข้างสูง โดยในประเทศไทยได้มีการนำเครื่องทดสอบการแอ่นตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) เข้ามาใช้งานครั้งแรก ในโครงการประเมินสภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและพัฒนาวิธีการออกแบบโครงสร้างทาง ในเวลาต่อมาหน่วยงานอื่น ๆ ก็ได้มีการสั่งซื้อนำเข้าเครื่องมือเหล่านี้เข้ามาใช้งานเช่นกัน เช่น

กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท และบริษัท การท่าอากาศยานแห่งประเทศไทยจำกัด (มหาชน) (Heavyweight Deflectometer, HWD) เป็นต้น

เครื่องมือวัดค่าการยุบตัวจากตุ้มกระแทกประกอบด้วยส่วนสำคัญ ได้แก่ ก้อนน้ำหนัก แกนปล่อยน้ำหนัก แผ่นรองรับก้อนน้ำหนักและแผ่นยางกันกระแทกที่ทำหน้าที่คล้ายสปริงรวมทั้งชุดของตัวรับสัญญาณ (Geophones) ที่ติดตั้งบนคาน สำหรับกลไกควบคุมการยกและปล่อยก้อนน้ำหนักบนแผ่นรองรับน้ำหนักนั้นเป็นระบบอิเลคโทร-ไฮโดรลิค ที่ซึ่งต่อเชื่อมควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์ทำให้ผู้ควบคุมสามารถจัดรูปแบบการให้น้ำหนักเพื่อให้เกิดแรงที่กระทำต่อโครงสร้างถนนตามที่ต้องการตามความเหมาะสมกับสภาพถนนที่ต้องการตรวจสอบ

ในการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างทางโดยเครื่อง FWD สามารถทำได้โดยอิสระ (Stand Alone System) โดยไม่ต้องใช้รถบรรทุกขนาดมาตรฐานเหมือนเครื่องเบนเคลแมนบีม ซึ่งทำให้เกิดความสะดวกคล่องตัวรวมทั้งทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานมากขึ้นอีกด้วย โดยขั้นตอนในการทดสอบนั้นผู้ปฏิบัติงานสามารถนำเครื่องเข้าสู่จุดทดสอบได้ทันทีหลังจากที่ได้ปรับค่าน้ำหนักและความสูงของการยกที่ต้องใช้ในการทดสอบเรียบร้อยแล้ว โดยภายหลังจากการปล่อยน้ำหนักทดสอบผ่านแผ่นเหล็กแล้วจะทำให้เกิดแรงกระทำต่อโครงสร้างถนน ระบบจะทำการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่เป็นผลจากแรงที่กระทำโดยใช้ตัวรับสัญญาณ 6 ถึง 11 ตัว หรืออาจมากกว่า ซึ่งถึงแม้ว่าตำแหน่งของตัวรับสัญญาณจะสามารถปรับได้ตามที่ผู้ทดสอบต้องการ แต่โดยทั่วไปแล้วจะมีตำแหน่งการวางตัวที่เป็นมาตรฐานในการทำงาน เช่น ที่ระยะ 0, 200, 350, 400, 600, 900, 1200, 1500 และ 1,800 มม. เป็นต้น โดยนับจากจุดศูนย์กลางแผ่นเหล็กดังแสดงในรูป 2-2



รูป 2-2 หลักการทำงานของเครื่องวัดค่าความแอ่นตัวโดยลูกตุ้มกระแทก (FWD) [4]

ในขณะปฏิบัติงานระบบคอมพิวเตอร์จะเก็บข้อมูลการยุบตัวที่แต่ละตำแหน่งของตัวรับสัญญาณ และที่บริเวณตรงกลางแผ่นเหล็กจะติดตั้งเครื่องวัดน้ำหนัก (Load Cell) ไว้ด้วยเพื่อวัดค่าน้ำหนักที่แท้จริงที่กระทำต่อผิวจราจร

การประเมินความแข็งแรงโดยใช้ FWD จะอาศัยข้อมูลการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้จากการวัดในสนามมาคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทาง (layer moduli) โดยในขั้นตอนของการคำนวณย้อนกลับนี้จะกระทำโดยอาศัยหลักการป้อนข้อมูลต่าง ๆ ที่ทราบ ได้แก่ความหนาของแต่ละชั้นในโครงสร้างถนน น้ำหนักหรือแรงกระทำที่ใช้ในการทดสอบ ค่าอัตราส่วนปัวซ์ซองของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนน จะเห็นว่าวิธีการคำนวณในลักษณะดังกล่าวเหมาะสมและสะดวกอย่างยิ่งที่จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณให้ได้ผลที่ถูกต้องรวดเร็ว นอกจากนี้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันยังสามารถคำนวณประมาณอายุการใช้งานคงเหลือ (remaining life) ของถนนสายนั้น ๆ ตลอดจนค่าความหนาการเสริมความแข็งแรงผิวทาง (overlay reinforcement) ที่ถนนสายนั้นต้องการอีกด้วย ซึ่งหลักการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาการเสริมผิวนั้นในโปรแกรมโดยส่วนใหญ่อาศัยทฤษฎีชั้นทางแบบยืดหยุ่น (layered elastic theory) ในการคำนวณหาค่าหน่วยแรงเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าวิกฤตของตัวแปรดังกล่าว (critical stress and critical strain) และสรุปเป็นค่าที่ต้องการ

ถึงแม้ว่าเครื่อง FWD จะเป็นที่ยอมรับไปทั่วโลกในเรื่องของความแม่นยำและรวดเร็วในการปฏิบัติงาน และข้อมูลที่ได้เหมาะสมกระบวนการคำนวณย้อนกลับ (backcalculation) เพื่อหาค่าโมดูลัสชั้นทาง [7] แต่กลุ่มประเทศในยุโรปและสหรัฐเอมริกายังคงพัฒนาวิธีการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักโครงสร้างผิวทางด้วยเครื่องมืออื่น ๆ เช่น เบนเคลแมนบีม ซึ่งมีราคาต่ำกว่าหลายเท่าตัวไปด้วย [8] เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวยังคงมีประสิทธิภาพที่ยอมรับได้ในระดับหนึ่ง และอุปสรรคที่เกิดขึ้นจะน้อยลงเมื่อใช้ปฏิบัติงานกับโครงข่ายถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะของถนนในท้องถิ่น และยังสามารถนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลกับวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักแบบโดยตรง (direct method) ได้ [4]

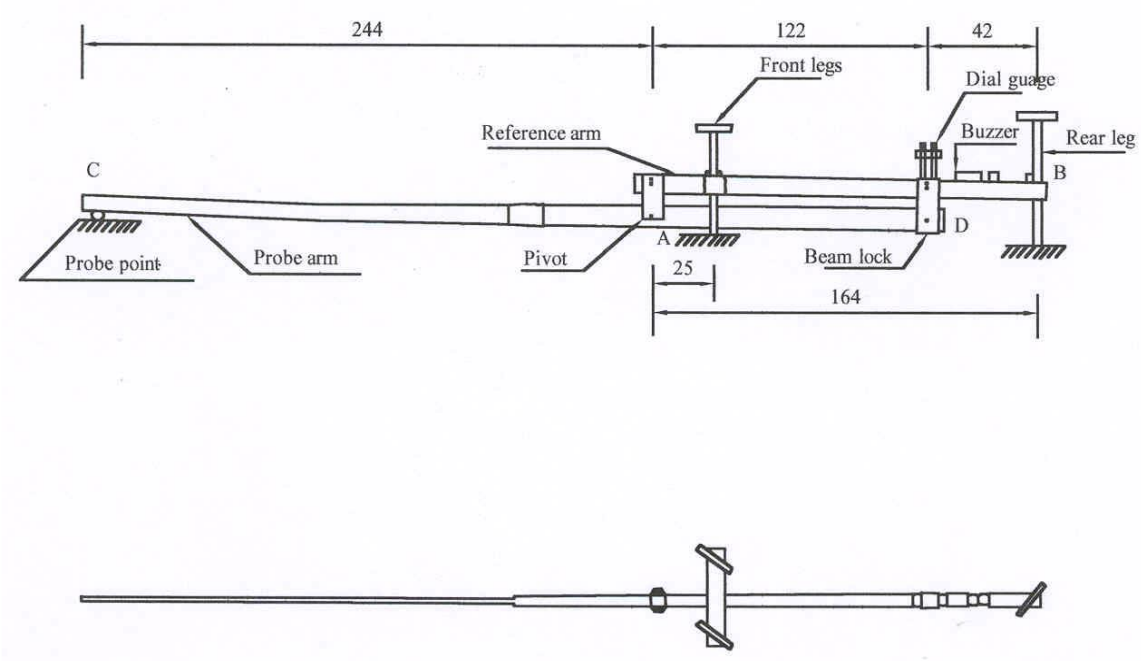
2.4 เครื่องมือเบนเคลแมนบีม (Benkelman Beam)

เครื่องมือเบนเคลแมนบีมเป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าการยุบตัวหรือแอ่นตัวของถนนชนิดแรกๆ ของโลก ออกแบบโดย A.C. Benkelman ในโครงการทดสอบของ WASHO Road Test สามารถใช้ได้กับผิวทางทั้งแบบแกร่งและแบบยืดหยุ่น (rigid and flexible pavement) ภายใต้น้ำหนักเพลามาตรฐานของรถบรรทุก ซึ่งมีลักษณะเป็นเพลาเดี่ยว ล้อคู่ ขนาด 18,000 ปอนด์ [9] ค่าการยุบตัวได้จากการสอดปลายคานเข้าไปที่ตำแหน่งระหว่างล้อคู่ของเพลามาตรฐาน โดยค่าที่ได้สามารถคำนวณการออกแบบเสริมผิวทางและวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นค่าความแข็งแรงของทางได้ รูปที่ 2-3 แสดงการทดสอบวัดค่าการยุบตัวของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตบางสายทางขององค์กรบริหารส่วนตำบลบึงคำพร้อย (อบต. บึงคำพร้อย) ซึ่งจัดเป็นถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ (low-volume road) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดสอบรบกวนการจราจรโดยทั่วไปน้อยมาก

รูป 2-3 เครื่องมือเบนเคลแมนบีมในการใช้งานทดสอบ

เครื่องมือเบนเบนเคลแมนบีม ประกอบไปด้วยคาน 2 ตัว ดังรูป 2-4 โดยคานหลังตั้งอยู่บนขาทั้งสองซึ่งปรับระดับได้ ขาหน้าเป็นขาคู่ ขาหลังเป็นขาเดี่ยว คานหลังนี้ทำหน้าที่หิ้วคานหน้า เพื่อวัดค่าการแอ่นตัวของถนน ที่ปลายคานหน้ามีปลายเดือย (Probe) จะวางอยู่บนจุดทดลองเพื่อวัดค่าการแอ่นตัวของถนน ตัวคานหน้ายาวเรียวสามารถสอดเข้าไปในระหว่างล้อคู่หลัง ที่ปลายคานหน้าอีกด้านหนึ่งมีชุดวัดระยะซึ่งเป็นแบบมาตรวัดนาฬิกา (Dial Gauge) เพื่อวัดระยะขึ้น-ลงของปลายคานบนคานหลังมีขดลวดแม่เหล็กสั่นสะเทือน (Buzzer) เพื่อลดความฝืดของจุดสัมผัสต่าง ๆ ในการทดสอบจะใช้รถบรรทุกที่มีน้ำหนักเพลามาตรฐานที่มีน้ำหนัก 18,000 ปอนด์ และแรงดันลมยาง 85

ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในการทดสอบเมื่อนำรถบรรทุกมาจอดบริเวณจุดทดสอบแล้ว สอดปลายคานด้านที่มี (Probe Point) เข้าไปที่ช่วงกึ่งกลางของล้อคู่หลังโดยขนานกับแนวถนน โดยล้อรถทั้งคู่จะไม่สัมผัสกับคานของเครื่องมือเบนเคลแมนบีม คลายหมุดบังคับ จัดขาตั้งทั้งหน้าและหลังให้มั่นคง ปลายเดือยแตะที่จุดทดลอง และปลายอีกข้างหนึ่งสัมผัสกับเดือยของมาตรวัดนาฬิกา เปิด สวิทซ์ให้ขดลวดแม่เหล็กสั่นสะเทือน (Buzzer) ทำงาน ตั้งนาฬิกาวัด (Dial Gauge) ที่ขีด 0 (ศูนย์) เป็น และให้รถบรรทุกเคลื่อนไปข้างหน้าช้า ๆ (Creep Speed) โดยที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ ไปจนพ้นจุดทดลอง และจนเข็มมาตรวัดนาฬิกาหยุดนิ่งหรือหมุนช้ามาก จึงอ่านค่าการแอ่นตัว จากนั้นนำค่าการแอ่นตัวที่ได้ที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์รวมข้อมูลน้ำหนักและปริมาณการจราจร สามารถคำนวณหาค่าความหนาของการออกแบบเสริมผิวทางได้



รูป 2-4 รูปร่างและขนาดของเครื่องมือเบนเคลแมนบีมมาตรฐาน [10]

2.5 มาตรฐานการทดสอบ

การวัดค่าการแอ่นตัวโดยใช้เครื่องมือเบนเคนแมนบีมมีด้วยกันหลายวิธีตามแต่ละสถาบันจะกำหนดขึ้น และจำนวนในการทดสอบของแต่ละสายทางนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน โดยทั่วไปมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องแยกช่วงตอนของสายทาง โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของทาง เช่น ชนิดผิวทาง ลักษณะโครงสร้าง สภาพความเสียหาย อายุการให้บริการ ลักษณะภูมิประเทศ ปริมาณการจราจร และปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ โดยช่วงตอนที่แบ่งนี้จะกลายเป็นหน่วยออกแบบ (design

units) ของสายทางช่วงนั้นๆ ซึ่งถือเป็นกุญแจสำคัญของความสำเร็จในการวิเคราะห์และประเมินโครงสร้างทาง โดยทั่วไปหากกำหนดช่วงหน่วยออกแบบแล้ว จำนวนการทดสอบในช่วงนั้นด้วยเบนเคลแมนบีมขั้นต่ำ 10 จุดทดสอบ หรือมีค่าแนะนำ 20 จุดทดสอบต่อระยะทาง 1 ไมล์ เป็นต้น และโดยทั่วไปนิยมทดสอบบนแนวล้อด้านนอก (outer wheel path) ด้วยเหตุผลของการถูกกดทับและความสะดวกในการปฏิบัติงาน

ทั้งนี้การเลือกค่าที่ใช้ออกแบบจำเป็นต้องวิเคราะห์ร่วมกับหลักการทางสถิติเพื่อขจัดความแปรปรวนออกให้ได้มากที่สุด โดยทั่วไปนิยมเลือกกำหนดค่าความมั่นใจในการออกแบบ เช่น อาจเลือกค่าที่ 80 เปอร์เซ็นไทล์ หรือ อาจเลือกใช้ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นต้น

2.5.1 มาตรฐาน WASHO (Western Association of Star Highway Officials)

สถาบัน Western Association of Star Highway Officials นี้เป็นหนึ่งในผู้ริเริ่มสร้างมาตรฐานวิธีการวัดการแอ่นตัวเพื่อหาความแข็งแรงของถนน โดยได้กำหนดจุดทดลองดังแสดงในตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ให้ล้อรถอยู่ระหว่างจุดทดสอบ และขาหน้าของคานวางตามระยะ ที่กำหนด ดังแสดงให้ดูในรูป 2-5 อ่านค่า Zero Reading (D_1=0)

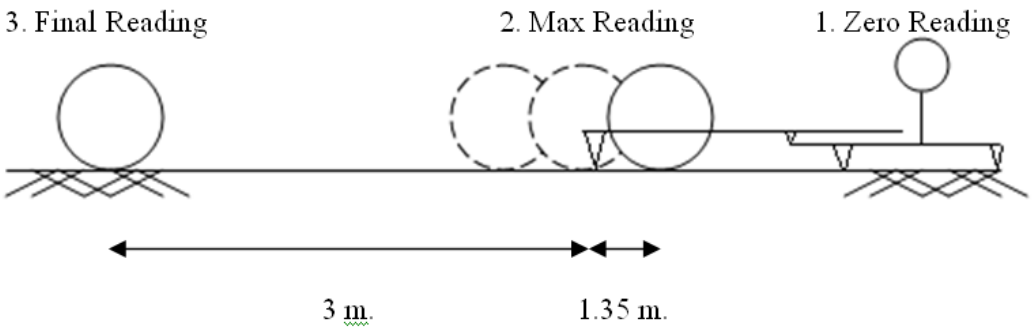
2) เลื่อนรถไปข้างหน้าช้าๆช่วงนี้เข็มจะกระดิกไปข้างใดข้างหนึ่งแล้วจะตีกลับให้อ่านค่าสูงสุดก่อนที่เข็มจะกระดิกกลับเป็นค่า Reverse Reading (D_2)

3) ให้เลื่อนรถต่อไปจนถึงตำแหน่งที่ 3 ในรูปที่ 2.1 อ่านค่าจุดสุดท้ายที่อ่านค่า(D_3)

4) จากนี้สามารถหาค่าการตอบสนอง(Rebound) ของพื้นทางได้ คือ

$$\text{Rebound} = Rb\ (D_2 - D_3)$$

$$Rb = \text{Beam ratio}$$



รูป 2-5 จุดทดสอบตามมาตรฐานของ WASHO

2.5.2 มาตรฐานการทดสอบ Canadian Test

เนื่องจากวิธีของ WASHO ยังมีข้อเสียอยู่ในขณะที่อ่านค่าค่าสูงสุดนั้น ถ้าบริเวณนั้นอ่อนมาก น้ำหนังของล้อซึ่งขณะนั้นอยู่ที่บริเวณ จุดทดสอบ จะทำให้ขาหน้าของคานทรุดตัวลงทำให้อ่านค่าการแอ่นตัวได้น้อยกว่าที่เป็นจริง สำหรับวิธีนี้ได้แก้ไขข้อบกพร่องอันนี้ ซึ่งมีจุดทดสอบดังแสดงในรูป 2-6 และมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

1) เลื่อนคู่ล้อมาที่จุดที่จะวัดหาค่าการแอ่นตัว

2) สอดปลายคานเข้าไปในระหว่างล้อคู่และวางตรงจุดทดสอบ

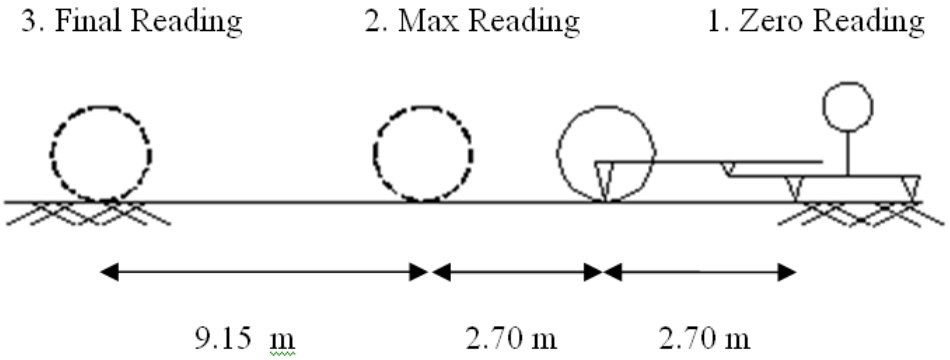
3) ปลดหมุดบังคับและจัดให้ปลายคานอีกด้าน แตะก้านชุดเครื่องวัดพอดี

4) ตั้งชุดเครื่องวัดให้อ่านได้ประมาณ 0.4 นิ้ว รอจนกระทั่งอัตราการเสียรูป ของผิวจราจร เท่ากับหรือ น้อยกว่า 0.001 นิ้วต่อนาที หรือนาน 3นาที จึงบันทึกค่าที่อ่านได้จากชุดเครื่องวัดเป็นค่า Initial Reading (D_1)

5) เลื่อนรถไปข้างหน้าช้าๆ 8 ฟุต 10 นิ้ว (2.7 m) แล้วหยุดรอจน อัตราการคืนตัวของผิวจราจร เท่ากับหรือน้อยกว่า 0.001 นิ้วต่อนาที หรือนานกว่า 3 นาทีถึงอ่าน ค่าการแอ่นตัวเป็น Intermediate Reading (D_2) ซึ่งระยะดังกล่าวอาจเปลี่ยนแปลงได้ โดยมีค่าเท่ากับระยะห่าง ระหว่าง จุดทดสอบ กับขาหน้าของคาน

6) เลื่อนรถไปข้างหน้าอีก 30 ฟุต (9.15 m) รอให้อัตราได้ตามกำหนดเหมือนข้อก่อนๆแล้วอ่านค่าการแอ่นตัวเป็นจุดสุดท้ายที่อ่านค่า (D_3)

7) จากค่าที่วัดได้สามรถหาค่า True Rebound ของผิวจราจรได้



รูป 2-6 จุดทดสอบตามมาตรฐานของ Canadian

2.5.3 มาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง (Thai Highway Department)

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่ากรมทางหลวงได้ใช้เครื่องมือเบนเคลแมนบีมในการทดสอบถนนมาเป็นระยะเวลานานพอสมควร โดยตลอดเวลาได้มีการพยายามพัฒนาปรับปรุงมาตรฐานาการทดสอบ รวมทั้งส่วนประกอบอื่นๆ เช่นแบบบันทึกข้อมูลหรือจำนวนจุดทดสอบเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย โดยกรมทางหลวงได้ประยุกต์ใช้วิธีทดลองของ WASHO แต่ว่าดัดแปลงระยะต่างๆบ้างเล็กน้อยโดยมีตำแหน่งจุดทดสอบดังแสดงในรูป 2-7 และมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1) ให้ล้อรถอยู่ระหว่างจุดทดสอบ และขาหน้าของคานวางตามระยะ ที่กำหนด ดังแสดงให้ดูในรูปที่ 2.1 อ่านค่า Zero Reading (D_1=0)

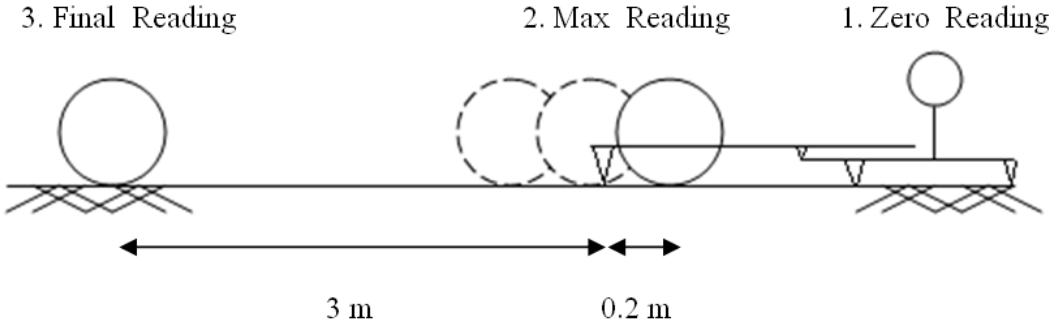
2) เลื่อนรถไปข้างหน้าช้าๆช่วงนี้เข็มจะกระดิกไปข้างใดข้างหนึ่งแล้วจะตีกลับให้อ่านค่าสูงสุดก่อนที่เข็มจะกระดิกกลับเป็นค่า Reverse Reading (D_2)

3) ให้เลื่อนรถต่อไปจนถึงตำแหน่งที่ 3 ในรูปที่ 2.3 อ่านค่าจุดสุดท้ายที่อ่านค่า(D_3)

4) จากนี้สามารถหาค่าการคืนตัวของพื้นทางได้ คือ

Rebound = Rb (D_2-D_3)

Rb = Beam ratio



รูป 2-7 จุดทดสอบตามมาตรฐานของ Department of Highway

2.5.4 มาตรฐานการทดสอบแบบ Rebound Deflection

การทดสอบแบบ Rebound deflection ใช้วิธีของ WASHO แต่ว่าดัดแปลงระยะการอ่านค่าต่างๆ ให้เหมาะสมกับสภาพพื้นทางมากขึ้น รวมถึงการกำหนดจุดทดสอบ ให้อยู่ระหว่างคู่ล้อแบบเดียวกับวิธี Canadian Test เนื่องจากเหตุผลเดียวกัน โดยมีจุดทดสอบดังแสดงในรูป 2-8 และมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1) นำรถบรรทุกเข้าจอดตามแนวของถนนโดยให้ช่องล้อคู่หลังอยู่บนจุดทดลอง

2) สอดปลายคาน จากด้านหลังรถ เข้าไปในช่องว่างระหว่างล้อคู่ โดยวางจุดปลายที่ต้องการวัดค่าการแอ่นตัว

3) จัดขาตั้งหน้าและหลังให้มั่นคง คลายหมุดบังคับให้เดือยที่ปลายอีกข้างหนึ่งของคานสัมผัสกับชุดเครื่องวัดโดยให้เข็มชุดเครื่องวัดหมุนอย่างน้อย 2 รอบเพื่อให้เข็มชุดเครื่องวัดสัมผัสกับพื้นผิวที่จะทำการทดสอบ

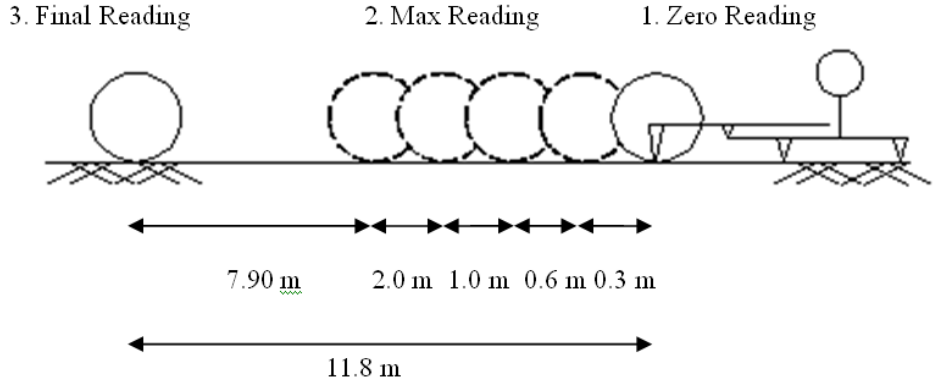
4) เปิดสวิทช์ให้ตัวสั่นสะเทือนทำงาน ปรับชุดเครื่องวัดไปที่ 0

5) ให้สัญญาณรถบรรทุกให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างช้าๆ ด้วยความเร็ว 10 ± 1 วินาทีต่อระยะทาง 5.0 ม.

6) อ่านค่าการตอบสนองที่ระยะ 0.30, 0.90, 1.90 และ 3.90 ม. โดยอ่านค่าที่ระยะรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากจุดทดลองประมาณ 11.80 ม. เป็นจุดสุดท้ายที่อ่านค่า (เป็นระยะโดยประมาณที่เข็มของชุดเครื่องวัดชี้ค่ามากที่สุด และเริ่มหยุดนิ่ง)

7) จดบันทึกค่าในแบบบันทึกข้อมูลเบนเคนแมนบีม

8) หมุนปิดหมุดบังคับก่อนที่จะเคลื่อนย้ายตัวคานเพื่อป้องกันการเสียหายอันอาจจะเกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนย้ายเครื่องมือ เนื่องจากแขนของคานที่สัมผัสกับเดือยของชุดเครื่องวัดจะไปตีชุดเครื่องวัดทำให้เสียหายได้



รูป 2-8 จุดทดสอบตามมาตรฐานของ Rebound deflection

2.5.5 การทดสอบด้วยเบนเคลแมนบีมแบบตามมาตรฐานการทดสอบเยอรมัน

วิธีการทดสอบนี้เป็นวิธีมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางลาดยางของประเทศเยอรมนี โดยรูป 2-9 แสดงหลักการทดสอบของวิธีนี้ซึ่งรายละเอียดการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1) นำรถบรรทุกเข้าจอดตามแนวของถนนโดยให้ช่องล้อคู่หลังอยู่บนจุดทดลอง

2) สอดปลายคาน จากด้านหลังรถ เข้าไปในช่องว่างระหว่างล้อคู่โดย วางจุดปลาย ที่ต้องการวัดค่าการแอ่นตัว

3) จัดขาตั้งหน้าและหลังให้มั่นคง คลายหมุดบังคับให้ปลายอีกข้างหนึ่งของคานสัมผัสกับเดือยของชุดเครื่องวัดโดยให้เข็มชุดเครื่องวัดหมุนอย่างน้อย 2 รอบเพื่อให้เข็มชุดเครื่องวัดสัมผัสกับพื้นผิวที่จะทำการทดสอบ

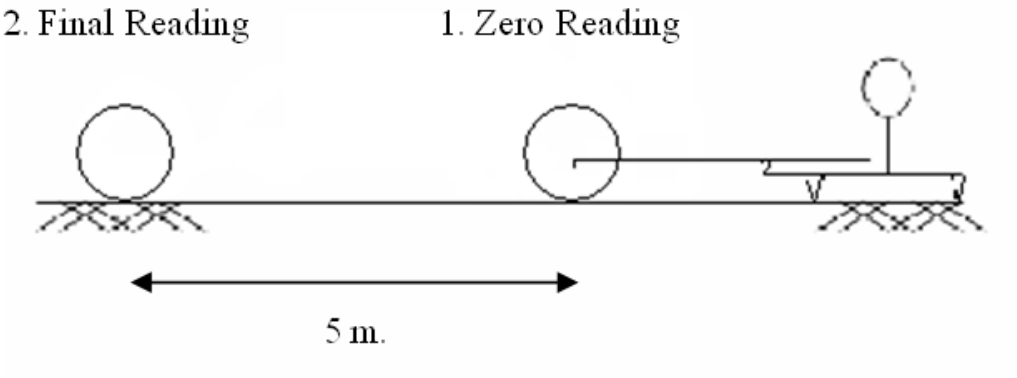
4) เปิด สวิทช์ให้ตัวสั่นสะเทือน ทำงาน ปรับชุดเครื่องวัดไปที่ 0

5) ให้สัญญาณรถบรรทุก ให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างช้าๆ ด้วยความเร็ว 10 ± 1 วินาทีต่อระยะทาง 5.0 ม.

6) อ่านค่าจุดสุดท้ายที่อ่านค่าที่ระยะ 5 m.

7) จดบันทึกค่าใส่ใน แผ่นข้อมูลเบนเคนแมนบีม

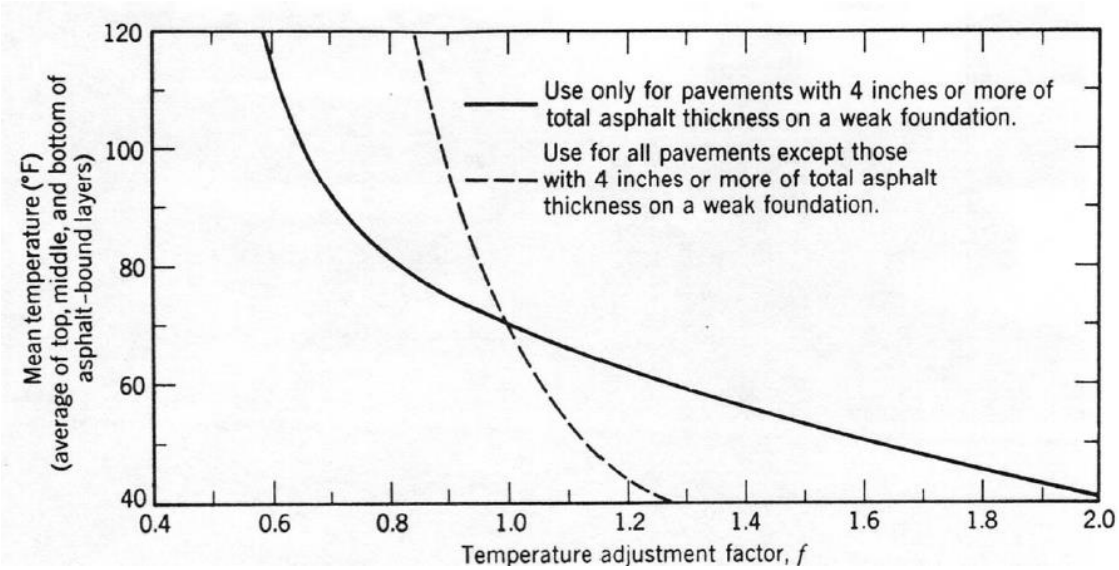
8) หมุนปิดหมุดบังคับก่อนที่จะเคลื่อนย้ายตัวคานเพื่อป้องกันการเสียหายอันอาจจะเกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนย้ายเครื่องมือ



รูป 2-9 หลักการทดสอบด้วยเบนแคลแมนบีมตามมาตรฐานเยอรมัน

2.6 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเบนเคลแมนบีมเป็นข้อมูลของการยุบตัวของผิวทางในสนาม ซึ่งมีความแปรปรวนในหลายด้าน โดยเฉพาะความแปรผันของความแข็งแรงของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตต่ออุณหภูมิ โดยสังเกตได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวจะมากขึ้นด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัดค่าการกระจายของอุณหภูมิของชั้นทางนี้ เพื่อนำมาปรับแก้ค่าอุณหภูมิให้เป็นมาตรฐานของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เช่น รูปที่ 2-10



รูป 2-10 ค่าปรับแก้อุณหภูมิชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตมาตรฐาน อ้างอิง Asphalt Institute

สำหรับการนำข้อมูลเบนเคลแมนบีมมาวิเคราะห์ต่อเนื่องเพื่อออกแบบเสริมผิวทางนั้น ได้มีการนำเสนอหลักการและวิธีการจากหลายหน่วยงานที่แตกต่างกัน ทั้งด้านทางหลวงและท่าอากาศยาน เช่น มีการนำเสนอให้ใช้ตัวคูณแปลงค่า (conversion factors) เพื่อปรับให้เหมาะสมกับสภาพของโครงสร้างผิวทางที่มีอายุการให้บริการนานแล้ว เช่น “wear-out factor” เพื่อให้สามารถกำหนดค่าความหนาประสิทธิผลของโครงสร้างได้ เป็นต้น และในส่วนของการคำนวณออกแบบเสริมความแข็งแรง (overlay design) ก็มีวิธีการที่หลากหลายเช่น กัน และมีการแบ่งออกเป็นหมวดหมู่ของการเสริมผิวทาง (overaly categories) เช่น ในการเสริมความแข็งแรงผิวทางยืดหยุ่นด้วยผิวทางยืดหยุ่น (flexible overlays over flexible pavements) โดยวิธีการของ Asphalt Institute ได้กำหนดให้ใช้วิธีการทดสอบแบบ rebound deflection test และให้ใช้วิธีการกำหนดตำแหน่งทดสอบในหน่วยออกแบบด้วยการสุ่ม (random test) และใช้ข้อมูลปริมาณจราจรที่คาดการณ์ในอนาคตประกอบการออกแบบเสริมความแข็งแรงด้วย

สำหรับตัวอย่างของแบบบันทึกข้อมูลการวัดด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีม (Benkelman Beam Data Sheet) ในการทดสอบภาคสนามที่พัฒนาขึ้นโดยกรมทางหลวงได้แสดงไว้ในรูป 2-11 โดยจากแบบบันทึกดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีการระบุให้บันทึกข้อมูลรายละเอียดของสายทาง เช่น หมายเลขสายทาง สภาพแวดล้อมของโครงสร้างผิวทางขณะทดสอบ เช่น อุณหภูมิผิวหน้า และอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นแอสฟัลท์ รวมทั้งลักษณะความเสียหายต่างๆ ของผิวทางเช่น รอยร่องล้อ ร้อยละของการ

แตกร้าวเทียบกับพื้นที่ และอื่นๆ โดยข้อมูลเหล่านี้จะนำไปประกอบในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างทางต่อไป สำหรับรายละเอียดของรหัสต่างๆ ที่ใช้ในแบบบันทึกข้อมูลสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ROUTE NUMBER เป็นหมายเลขทางหลวง รหัส 4 ตัวแรก
2. CONTROL SECTION เป็นหมายเลขตอนควบคุม รหัส 4 ตัวถัดมา
3. CARRIAGEWAY CODE เป็นรหัสคันทางต่อจาก CONTROL SECTION ดังนี้

0 = คันทางเดียว 2-3 ช่องจราจรไปกลับ

1 = ทาง 4-6 ช่องจราจรหรือทางด่วนขาไป

2 = ทาง 4-6 ช่องจราจรหรือทางด่วนขากลับ

3 = ทางคู่ขนานขาไป

4 = ทางคู่ขนานขากลับ

4. LRP หลักอ้างอิงหรือหลัก กม. (LOCATION REFERENCE POINT OR KILOMETER POINT)
5. KM.FROM และ KM.TO ช่วงระยะทำการทดลองในแผ่นนั้น
6. DAY-MONTH-YEAR วัน เดือน ปี ที่ทำการทดลอง
7. TIME = เวลาในขณะเริ่มทำการทดลอง
8. SURFACE WIDTH ความกว้างของผิวทาง (มม.)
9. SHOULDER WIDTH ความกว้างของไหล่ทาง (มม.)
10. BASE TYPE ชนิดของพื้นทางตามรหัสดังนี้

CR = CRUSHED ROCK (หินคลุก)

GR = CRUSHED GRAVEL (กรวดโม่)

SC = SOIL CEMENT (ดินซีเมนต์)

MR = CEMENT MODIFIELD CRUSHED ROCK (หินคลุกผสมซีเมนต์)

LS = LIME STABILIZED (ปูนขาวผสมเสริม)

BS = BITUMINOUS STABILIZED (แอสฟัลต์ผสมเสริม)

CC = CEMENT CONCRETE (ซีเมนต์คอนกรีต)

SA = SOIL AGGREGATE (วัสดุมวลรวม)

11. SHOULDER TYPE หรือ SURFACE TYPE ชนิดของไหล่ทางหรือชนิดของผิวทาง สำหรับชนิดของผิวทาง 2 ช่องแรกเป็นผิวทางชั้นล่างหรือผิวทางเก่า 2 ช่องหลังเป็นผิวทางชั้นบนหรือผิวทางใหม่ ถ้ามีชั้นเดียวหรือก่อสร้างในคราวเดียวกันให้กรอกชนิดผิวทาง 2 ช่องแรกเท่านั้น ให้กรอกชนิดผิวทางตามรหัสดังนี้

AC = ASPHALTIC CONCRETE (แอสฟัลต์คอนกรีต)

ST = SINGLE SURFACE TREATMENT (เซอร์เฟสทรีตเมนต์ชั้นเดียว)

DT = DOUBLE SURFACE TREATMENT (เซอร์เฟสทรีตเมนต์สองชั้น)

SS = SLURRY SEAL (สเลอรีซีล)

CS = CAPE SEAL (เคพซีล)

PM = PENETRATION MACADAM (เพนนิเตรชันแมคคาดัม)

CM = COLD MIX (แอสฟัลต์ผสมเย็น)

CC = CEMENT CONCRETE (ซีเมนต์คอนกรีต)

CP = COMPOSITE PAVEMENT (เสริมผิวลาดยางบนคอนกรีต)

UP = UNPAVED (ไม่มีผิวทาง)

UC = UNDER CONSTRUCTION (ทางอยู่ในระหว่างการก่อสร้าง)

BC = BOX CULVERT (ท่อเหลี่ยม)

BG = BRIDGE (สะพาน)

จ6-40/1 ปรับปรุงปี 2541

BENKELMAN BEAM DATA SHEET

ROUTE NUMBER AND CONTROL SECTION | LRP | KM. FROM | KM. TO | DAY - MONTH - YEAR | TIME | AIR TEMP. (°C) | PAVE TEMP. (°C)

SURFACE WIDTH (MM.) | SHOULDER WIDTH (MM.) | PAVEMENT CONDITION | BASE TYPE | SHLD TYPE | SURFACE TYPE | SURF. THK. (MM.) | TESTED LANE | SHEET NO...../.....

STATION	REV RDG	REB RDG	TOTAL	SURFACE COND. CODE 01-04 05-08 09-021 09-021	R. (0.30 M.)	R. (0.60 M.)	R. (1.00 M.)	R. (2.00 M.)	R. (FINAL)
-	-	-	-		-	-	-	-	-
-	-	-	-		-	-	-	-	-
-	-	-	-		-	-	-	-	-

2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ FWD กับเบนเคลแมนบีม

หน่วยงานหลักผู้ดูแลงานทางในประเทศไทย เช่น กรมทางหลวงได้ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างทางด้วยเครื่องมือทดลองหาค่าการแอ่นตัวของถนนโดยอาศัยเครื่องมือเบนเคลแมนบีมมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2514 ต่อมาในปี พ.ศ. 2537 กรมทางหลวงได้มีการปรับปรุงวิธีการทดสอบให้ทันสมัยมากขึ้นโดยได้มีการใช้เครื่องมือ FWD จากนั้นได้มีนักวิจัยหลายท่านที่ได้เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของเครื่องมือทั้งสอง จากการวิจัยของ ดิเรก ลาวัณย์ศิริ และ ธรรมมา เจียรธราวานิช [11] และในเอกสารสำหรับผู้เข้ารับการฝึกอบรมที่เกี่ยวกับการทดสอบแบบไม่ทำลายของกรมทางหลวง [12] สามารถสรุปข้อดีข้อด้อยได้ดังตาราง 2-1

ตาราง 2-1 ข้อสรุปเปรียบเทียบคุณสมบัติของ FWD และเบนเคลแมนบีม [12]

FWD	**เบนเคลแมนบีม**
1.สามารถทำงานได้รวดเร็วและมีความแม่นยำสูง หากไม่เกิดหากไม่เกิดการรบกวนในการทดสอบ	1.สามารถทำงานได้เร็วและความแม่นยำขึ้นกับผู้ปฏิบัติงานในสนาม
2. เครื่องมือมีความซับซ้อนใช้เทคโนโลยีชั้นสูง	2. เครื่องมือไม่มีความซับซ้อนมากนัก
3. ผู้ปฏิบัติต้องมีการฝึกอบรมมาอย่างชำนาญ	3. ผู้ปฏิบัติมีการฝึกอบรมแต่ใช้เวลาน้อยกว่า
4. หากอุปกรณ์ขัดข้องต้องใช้ผู้ชำนาญแก้ไข	4. การแก้ไขไม่ต้องอาศัยผู้ความชำนาญการมากนัก
5. เครื่องมือมีราคาแพง และมีค่าบำรุงรักษาสูง	5. เครื่องมือมีราคาถูก และมีค่าบำรุงรักษาต่ำ
6. สามารถหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวัสดุโครงสร้างชั้นทางได้เพื่อใช้ในการออกแบบโดยวิธี Analytical Design Method	6. ไม่สามารถหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างชั้นทางได้ หากต้องการพารามิเตอร์ต้องเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม
7. ต้องใช้ข้อมูลจากเครื่องมือ Borescope เพื่อหาความหนาของโครงสร้างชั้นทาง (หรือรูปตัดมาตรฐาน) ในการคำนวณ	7. ไม่ต้องใช้ประกอบกับเครื่องมือชนิดอื่นในการคำนวณ
8. มีการปรับเทียบอุปกรณ์อิเล็กโทรนิคทุกตัวและมีขั้นตอนมากและต้องมีการปรับเทียบเครื่องมืออยู่เสมอก่อนการออกสนามแต่ละครั้ง	8. การปรับเทียบอุปกรณ์ทดลองง่าย ขั้นตอนน้อยกว่า
9. ผู้ทดสอบมีความปลอดภัยมากกว่า	9. ผู้ทดสอบมีความปลอดภัยน้อยกว่า

จากข้อมูลในตารางจะเห็นได้ว่าเครื่องมือ FWD มีข้อดีหลายประการโดยเฉพาะความสามารถในการวัดค่าการแอ่นตัวได้ถูกต้องแม่นยำและหลายตำแหน่งจนทำให้เชื่อมโยงได้ค่าแอ่งของการแอ่นตัว (Deflection basin) ซึ่งหากพิจารณาในทางทฤษฎีแล้วจะทำให้สามารถแยกคำนวณความแข็งแรงของแต่ละชั้นทางได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้เครื่องมือ FWD เป็นที่นิยมใช้ไปทั่วโลกโดยเฉพาะในประเทศที่จัดได้ว่าเป็นผู้นำด้านเทคโนโลยี แต่ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าปัญหาด้านต้นทุนราคาที่สูงมากโดยเฉพาะเมื่อเทียบกับเบนเคลแมนบีม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งทดสอบเพื่อพัฒนาศักยภาพเครื่องมือเบนเคลแมนบีมให้มีศักยภาพเข้าใกล้เครื่อง FWD ให้ได้มากขึ้นเพื่อนำมาใช้ในหน่วยงานที่มีงบประมาณน้อยเช่น องค์การบริหารส่วนท้องถิ่นต่าง ๆ

2.8 พัฒนาการของเครื่องเบนเคลแมนบีม

เครื่องมือเบนเคลแมนบีมเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบเพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนาน และจากงานวิจัยที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยที่ชี้ให้เห็นว่า เครื่องมือเบนเคลแมนบีมมีความแม่นยำในการทดสอบน้อยและใช้เวลาค่อนข้างนาน ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านที่มีความสนใจในการพัฒนาวิธีการทดสอบเพื่อปรับปรุงให้แม่นยำและใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น เช่น หน่วยงานด้านการทางของ State of Califorania, USA และ Road Research Laboratory, England ได้พยายามพัฒนาให้เครื่องเบนเคลแมนบีมทำงานเป็นกลไกมากขึ้น โดยการพัฒนาให้คานวัดค่าติดอยู่กับตัวรถบรรทุก ทำให้สามารถวัดค่าได้อย่างต่อเนื่อง และเก็บข้อมูลได้มากขึ้น ในปี พ.ศ. 2553 ผู้วิจัยและ นิรชร นกแก้ว [4] ได้มีการพัฒนาวิธีการทดสอบและนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบแบบอื่น ๆ พบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้เครื่องมือเบนเคลแมนบีมขาดความแม่นยำในการทดสอบคือ การอ่านค่าการแอ่นตัวด้วยตาเปล่าของผู้ปฏิบัติงาน ส่วนงานวิจัยอื่น ๆ ในต่างประเทศเช่น Jundhare และคณะ [13] ในปี ค.ศ. 2012 ได้เปรียบการทดสอบเพื่อหาค่าการแอ่นตัวที่บริเวณขอบและที่มุมของแผ่นคอนกรีตที่มีการเสริมผิวบนชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (Whitetopping Overly) โดยเป็นการหาความสัมพันธ์ของค่าการแอ่นตัวระหว่างการทดสอบด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีมและเครื่องมือ FWD จากการวิจัยพบว่า ความความสัมพันธ์ของค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือทั้งสองได้ค่า R^2 อยู่ในระดับเกณฑ์ที่ดี คือมีค่าระหว่าง 0.65-0.80 โดยใช้ ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) ฟังก์ชัน (Exponential Function) และฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithmic Function) โดยฟังก์ชันเลขชี้กำลังให้ค่า R^2 ในระดับสูงสุดคือ 0.7991 และ 0.6852 สำหรับการทดสอบที่บริเวณขอบและที่มุมของแผ่นคอนกรีตตามลำดับ จากนั้นในปีถัดมานักวิจัยกลุ่มดังกล่าว [14] ได้มีการศึกษาการนำเครื่องมือเบนเคลแมนบีมจำนวน 2 เครื่อง มาใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพ (Load Transfer Efficiency, LTE) การถ่าย

น้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตที่เสริมผิวบนชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต แทนการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ผลการวิจัยพบว่าเครื่องมือเบนเคลแมนบีมสามารถนำมาใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตได้ ดังนั้นจากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นว่านักวิจัยทางด้านวิศวกรรมผิวทางได้ให้ความสนใจและมีความพยายามในการพัฒนาเครื่องมือเบนเคลแมนบีมอย่างต่อเนื่อง แต่จากงานวิจัยที่กล่าวมานั้น ยังเป็นเพียงการพัฒนาเฉพาะในส่วนของการทดสอบเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนาทั้งในส่วนของเครื่องมือและวิธีการทดสอบไปพร้อมกัน

3 วิธีการศึกษาและดำเนินการวิจัย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า เครื่องมือเบนเคลแมนบีมมีทั้งข้อดีและข้อด้อย ในการนำมาทดสอบเพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างทาง โดยในส่วนของข้อดี เช่น เครื่องมือมีราคาถูก มีความซับซ้อนในการใช้งานน้อย เป็นต้น ส่วนข้อเสีย เช่น มีความแม่นยำในการทดสอบน้อย เนื่องจากการอ่านค่าการแอ่นตัวของผิวทางด้วยตาเปล่าจากผู้ปฏิบัติงาน เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งหวังที่จะพัฒนาปรับปรุงเครื่องมือทดสอบให้มีการอ่านและบันทึกค่าได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยมีเป้าหมายให้มีความละเอียดถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานทดสอบถนนลาดยางในท้องถิ่นที่มีปริมาณจราจรน้อย (low-volume road) ซึ่งวิธีการวิจัยประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1) ศึกษารวบรวมข้อมูลเครื่องมือทดสอบโครงสร้างถนนลาดยางแบบไม่ทำลายจากเอกสารงานวิจัย ตำรา เว็บไซต์ รวมทั้งศึกษารวบรวมข้อดีและข้อเสียของเครื่องมือทดสอบหากำลังรับน้ำหนักภาคสนามของถนนลาดยางแบบไม่ทำลาย (NDT) แต่ละประเภท
2) ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์
3) ศึกษาและออกแบบเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติแบบใหม่โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (Computer Aided Design, CAD)
4) พัฒนาสร้างโครงเครื่องมือต้นแบบเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติแบบใหม่ที่สอดคล้องกับแนวคิด
5) ศึกษาพัฒนาระบบเซ็นเซอร์วัดค่าด้วย Geophones หรือ Linear potentiometer บันทึกค่าด้วย Data logger และแสดงผลผ่านหน้าจออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
6) ประกอบส่วนโครงเครื่องมือต้นแบบและส่วนระบบอ่านค่าด้วยเซ็นเซอร์และบันทึกและประเมินค่าการทรุดตัว
7) ทดสอบการทำงานของเครื่องมือต้นแบบเปรียบเทียบกับเครื่องมือดั้งเดิมในห้องปฏิบัติการ
8) สรุปผลข้อมูลที่รวบรวม และผลการวิจัยและเขียนรายงานการวิจัย รวมทั้งเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปแบบเอกสารสรุปสู่องค์กรส่วนท้องถิ่นใน จ.ปทุมธานี และจังหวัดใกล้เคียง หรือตีพิมพ์ผลงานวิจัยเผยแพร่ในวารสารวิชาการ

จากขั้นตอนการศึกษาดำเนินงานวิจัยทั้งหมดเพื่อพัฒนาเครื่องมือทดสอบการแอ่นตัว มีรายละเอียดของการดำเนินการดังนี้

3.1 พัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีม

3.1.1 สร้างอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์

เป็นการศึกษาออกแบบเพื่อสร้างชุดอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว โดยอุปกรณ์ในส่วนนี้จะนำมาติดเข้ากับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบดั้งเดิมหรือแบบเชิงพาณิชย์ เพื่อใช้ในการยึดจับอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว ซึ่งจะเป็นการพัฒนาเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบดั้งเดิมให้สามารถวัดค่าการแอ่นตัวได้หลายตำแหน่งมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิเพื่อใช้ในการเก็บบันทึกอุณหภูมิผิวทางด้วย

3.1.2 สร้างเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบ

เป็นการออกแบบสร้างเครื่องมือเบนเคลแมนบีมใหม่ทั้งชุด โดยมีการออกแบบให้ตอบโจทย์ทั้งทางด้านราคา ความสะดวกสบายเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการทดสอบในสนาม และมีการออกแบบให้สามารถการติดตั้งชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อเก็บบันทึกค่าได้ โดยใช้เหล็กเป็นวัสดุส่วนใหญ่ในการสร้างเครื่องมือและออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้ โดยในส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งเพิ่มเติมขึ้นมาประกอบไปด้วย อุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวจำนวน 4 ชุด และอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิจำนวน 2 ชุด

3.2 สอบเทียบเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ

เนื่องจากเครื่องมือชุดนี้มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวจำนวน 4 ชุด ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด ดังนั้นเพื่อให้การทำงานของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวมีความเที่ยงตรง จึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบอุปกรณ์ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ฟิลเลอร์เกจที่มีความหนาแตกต่างกันในการสอบเทียบ ซึ่งมีวิธีการสอบเทียบดังนี้

3.2.1 จัดตำแหน่งของอุปกรณ์วัดระยะให้ห่างจากปลายคานตามที่ได้กำหนด

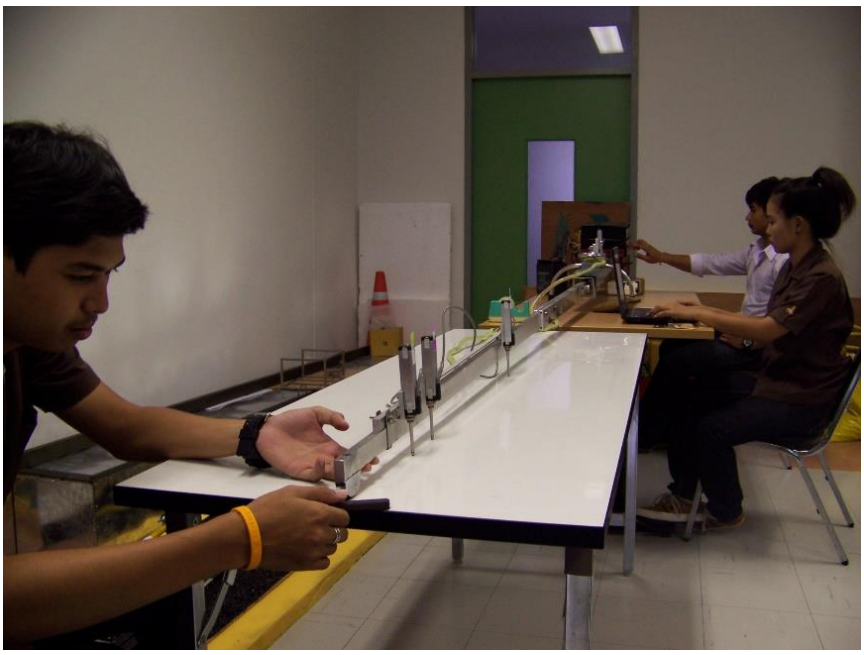
3.2.2 สอดฟิลเลอร์เกจไว้ระหว่างปลายคานด้านที่สัมผัสพื้นกับผิวทางดังรูป 3-1 แล้วตั้งศูนย์ที่เครื่องมือวัด

3.2.3 ดึงฟิลเลอร์เกจออกแล้วจดบันทึกค่าจากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว

3.2.4 เปลี่ยนความหนาของฟิลเลอร์เกจใหม่ แล้วทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 อีกครั้ง

3.2.5 เมื่อสอบเทียบกับความหนาของฟิลเลอร์เกจที่เลือกจนหมดแล้ว ให้จัดตำแหน่งของอุปกรณ์วัดระยะใหม่ แล้วทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2-3 อีกครั้ง

3.2.6 นำข้อมูลที่จดบันทึกได้มาคำนวณเพื่อปรับแก้ค่าอุปกรณ์



รูป 3-1 การสอบเทียบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวด้วยฟิลเลอร์เกจ

3.3 การทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบในภาคสนาม

นอกจากจะมีการสร้างเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบ และมีการ สอบเทียบเครื่องมือในห้องปฏิบัติการแล้ว ยังได้มีการนำเครื่องมือดังกล่าวมาทดลองใช้ในภาคสนามดัง

รูป 3-2 เพื่อเป็นการทดลองการนำไปใช้งานจริงและเป็นการตรวจสอบข้อบกพร่องและอุปสรรคต่าง ๆ ในการใช้งานจริง

รูป 3-2 การทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบในสนาม

4 วิเคราะห์ผลการศึกษา

4.1 อุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ (ดั้งเดิม)

จากการออกแบบอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ที่มีอยู่ทั่วไป เพื่อพัฒนาเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบเดิมให้มีศักยภาพในการวัดค่าการแอ่นตัวได้หลายตำแหน่งมากยิ่งขึ้น และรวดเร็วขึ้น จึงได้ข้อสรุปของการสร้างชุดอุปกรณ์ส่วนควบดังนี้

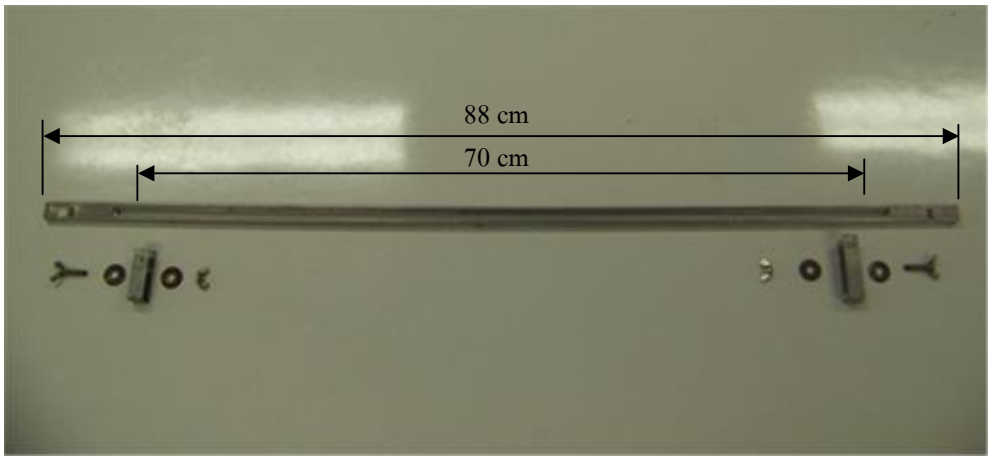
4.1.1 ชุดจับยึดเซ็นเซอร์

โดยเลือกใช้อลูมิเนียมเป็นวัสดุหลักเนื่องจากมีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปง่าย และยังทนทานต่อการเกิดสนิม ซึ่งชุดอุปกรณ์ส่วนควบนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ชุดยึดจับอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวดังรูป 4-1 และรางเลื่อนสำหรับปรับระยะห่างของชุดวัดค่าการแอ่นตัวดังรูปที่ รูป 4-2 โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ชุดดังกล่าวดังแสดงในตาราง 4-1

ตาราง 4-1 รายละเอียดของอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์

อุปกรณ์	ขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) [ซม.]	จำนวน [ชุด]
ชุดยึดจับอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว	0.7×2.5×4.0	4
รางเลื่อนปรับระยะห่างของชุดวัดค่าการแอ่นตัว	1.0×88.0×1.5	1

รูป 4-1 ชุดยึดจับอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว



รูป 4-2 รางเลื่อนสำหรับปรับระยะห่างของชุดวัดค่าการแอ่นตัว

การประกอบหรือติดตั้งชุดอุปกรณ์ส่วนควบ จะทำการติดตั้งที่ส่วนของปลายคานด้านหน้าของเครื่องมือเบนคลแมนบีม ซึ่งมีลักษณะการติดตั้งดังรูป 4-3 โดยในส่วนของรางเลื่อนหลังจากทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้ว จะมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวได้ 3 ชุด ซึ่งอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวทุกชุดสามารถปรับระยะได้ โดยรางเลื่อนมีช่องว่างสำหรับการปรับระยะได้สูงสุด 70 ซม. แต่ทั้งนี้การติดตั้งชุดรางเลื่อนนั้นสามารถขยับ เข้าใกล้-ออกห่าง จากปลายคานส่วนหน้าได้ โดยสามารถขยับให้อุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดแรกอยู่ห่างจากปลายคานได้ระหว่าง 10-30 ซม. แต่โดยทั่วไปนั้นกำหนดระยะไว้ที่ 20 ซม. ส่วนชุดยึดจับอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวอีกหนึ่งชุด จะนำมาติดตั้งแทนที่ตั้งแหน่งของนาฬิกาวัดแบบเดิมดังรูป 4-4 ดังนั้นภายหลังจากการติดตั้งอุปกรณ์ส่วนควบเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวทั้งหมด 4 ชุด ซึ่งมีอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว 3 ชุด ที่สามารถปรับระยะห่างจากปลายคานได้ แต่ในกรณีที่ต้องการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดค่าการยุบตัวในระยะรัศมีไกลกว่าระยะเลื่อนของราง เช่นที่ระยะ 1500 หรือ 1800 มิลลิเมตร จากปลายคาน สามารถติดตั้งด้วยตัวจับยึดเพิ่มเติมได้ การพัฒนาให้เครื่องมือเบนเคลแมนบีมต้นแบบสามารถอ่านค่าแอ่งการยุบตัวแบบกึ่งอัตโนมัติได้ใกล้เคียงเครื่อง FWD มากขึ้น จะทำให้สามารถนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการหรือแบบจำลองทางคณิตศาตร์ที่ใช้กับเครื่องมือ FWD ได้นั่นเอง

รูป 4-3 การติดตั้งอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์

รูป 4-4 การติดตั้งชุดยึดจับอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวแทนนาฬิกาวัด

4.1.2 อุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรง (Linear potentiometer)

มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเพื่อใช้วัดค่าการแอ่นตัวของผิวทางจำนวน 4 ชุด โดยติดตั้งแทนนาฬิกาวัด 1 ชุด และวางเรียงตัวเป็นแนวยาวตามคานชุดหน้าของเครื่องมือทดสอบ 3 ชุด ดังแสดงในรูป 4-5 เพื่อวัดค่าการแอ่นตัวจากตำแหน่งที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าการแอ่นตัวที่วัดได้จะสามารถนำมาใช้ในการประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างชั้นทางได้ละเอียดมากยิ่งขึ้น โดยหลักการทำงานของอุปกรณ์นั้นอาศัยหลักการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยสามารถวัดระยะได้ 50 มิลลิเมตร มีความละเอียดในการวัดในระดับ 0.01 มิลลิเมตร และมีค่าความผิดพลาดจากการวัดเพียง ±0.1% ซึ่งความแม่นยำของการวัดอยู่ในเกณฑ์ที่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการวัดค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่เกิดจาก

น้ำหนักลงเพลามาตรฐานของรถบรรทุก และยังสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิ -60˚C ถึง 150˚C ซึ่งเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานในสนาม โดยในงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวจำนวน 4 ชุด โดยที่ 3 ชุดแรกติดตั้งบริเวณปลายคานด้านที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำโดยวางเรียงตามแนวยาวของคาน โดยชิ้นส่วนที่ใช้ยึดอุปกรณ์แต่ละตัวได้ออกแบบให้สามารถเลื่อนปรับระยะให้ห่างจากปลายคานได้ เพื่อให้สะดวกต่อการกำหนดตำแหน่งของอุปกรณ์ให้เหมาะสมต่อการนำไปสอบเทียบและนำไปใช้งานในสนาม ส่วนอีกชุดนำไปติดตั้งแทนตำแหน่งของเดิมของนาฬิกาวัด (Dial Gauge) ที่อยู่บริเวณปลายอีกด้านหนึ่งของคานซึ่งไม่สามารถปรับระยะได้ โดยอุปกรณ์วัดระยะจะเชื่อมต่อโดยตรงกับกล่องควบคุม เมื่อเปิดเครื่องมือทดสอบค่าของการวัดที่ได้จากอุปกรณ์วัดระยะแต่ละชุดจะส่งข้อมูลเข้าที่กล่องควบคุมเพื่อแสดงผล

รูป 4-5 อุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรง

4.1.3 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิของชั้นผิวทางซึ่งเป็นชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตในขณะที่ทำการทดสอบในสนาม ดังแสดงในรูป 4-6 โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ 2 ชนิดคือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของบนพื้นผิว (Surface Probe) ซึ่งมีลักษณะของส่วนปลายเป็นแถบโลหะ เพื่อใช้ในการแตะสัมผัสสำหรับวัดอุณหภูมิที่ผิว โดยสามารถวัดอุณหภูมิระหว่าง -50ºC ถึง 400ºC และมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอยู่ที่ ±2.2 ºC ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และอีกชนิดคือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (piercing probe) โดยมีลักษณะเป็นปลายแหลมเพื่อใช้ในการสอดเข้าไปในรูที่เจาะจากผิวทางเพื่อวัดอุณหภูมิภายในของชั้นทาง โดยสามารถวัดอุณหภูมิระหว่าง -50ºC ถึง 600ºC และมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอยู่ที่ ±2.2 ºC ซึ่งช่วงของการวัดและค่าความละเอียดของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

มีความเหมาะสมเพียงพอต่อการนำไปใช้งานในสนาม โดยค่าอุณหภูมิที่ได้จากอุปกรณ์แต่ละชุดจะส่งข้อมูลไปยังกล่องควบคุมเพื่อแสดงผลเช่นเดียวกับกับอุปกรณ์วัดระยะ ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ได้จะนำมาใช้ในการปรับแก้ค่าการแอ่นตัวตามอุณหภูมิมาตรฐาน

รูป 4-6 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ผิวบนสุดและกึ่งกลางชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต

4.1.4 กล่องควบคุม (Box Control)

ติดตั้งกล่องควบคุมเพื่อทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลการวัดค่าของอุปกรณ์ทั้งหมด แล้วนำมาแสดงผล หรือส่งออกข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล ทั้งนี้เพื่อลดความผิดพลาดในการอ่านค่าด้วยตาเปล่าจากนาฬิกาวัดแบบเดิม (Dial Gauge) โดยมีการรับข้อมูลทั้งจากอุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรงและอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ จากนั้นนำมาแสดงผลและส่งต่อข้อมูลแบบไร้สายไปยังคอมพิวเตอร์ โดยกล่องควบคุมมีขนาด 19×31×13 ซม. ดังแสดงใน

รูป 4-7 ซึ่งภายในกล่องควบคุมจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

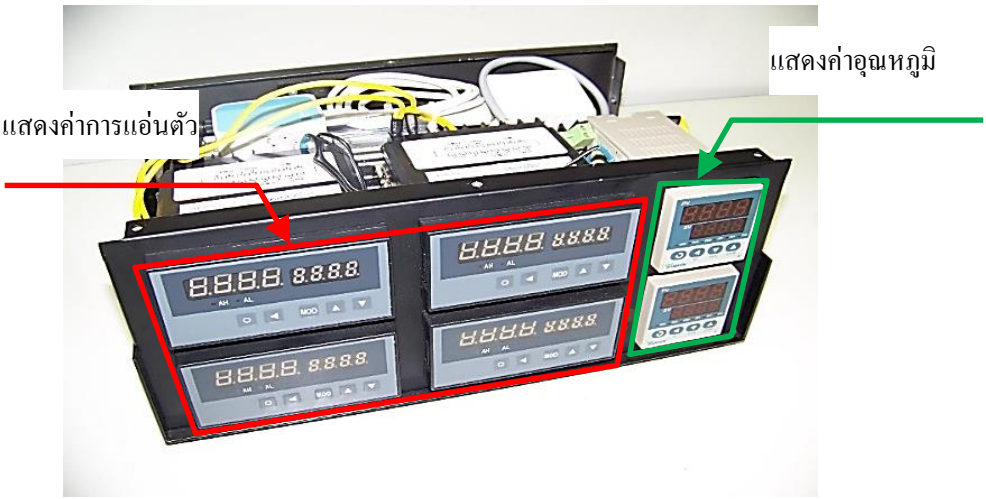
4.1.4.1 หน้าจอแสดงผลจากอุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรง (Digital Indicator for Linear Scales)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแสดงค่าการแอ่นตัวของผิวทาง ที่รับสัญญาณมาจากอุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรงจำนวน 4 ชุด โดยมีการทำงานแยกกันแต่ละหน้าจอ ซึ่งสามารถแสดงค่าได้ 4 ตำแหน่ง โดยมีหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตรและสามารถกำหนดช่วงของค่าการวัดได้ โดยทั่วไปเมื่อนำมาใช้งานจริงจะกำหนดช่วงไว้ที่ ±15.00 มิลลิเมตร และตั้งค่าให้มีการแสดงผลเป็นเลขทศนิยม 2 ตำแหน่ง (10 ไมครอน) นอกจากนั้นยังสามารถกำหนดค่าเพื่อให้เครื่องแจ้งเตือนได้

4.1.4.2 หน้าจอแสดงค่าของอุณหภูมิ (Indicating Display)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแสดงค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดที่รับสัญญาณมาจากอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิจำนวน 2 ชุดโดยแสดงอุณหภูมิเป็นทศนิยม 1 ตำแหน่งในหน่วยของศาเซลเซียส และสามารถ

กำหนดอุณหภูมิที่ต้องการให้แจ้งเตือนได้ โดยลำพังแล้วหน้าจอแสดงผลทั้งสองจะสามารถส่งออกส่งออกข้อมูลได้โดยตรงโดยใช้รหัสส่งสัญญาณแบบ RS-485 ซึ่งสามารถส่งออกข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์ได้โดยใช้สายส่งสัญญาณ แต่เนื่องจากการนำไปทดสอบในสนาม ในการส่งสัญญาณโดยใช้สายนั้นมักจะทำให้ผู้ปฏิบัติงานไม่ได้รับความสะดวก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาให้สามารถส่งข้อมูลแบบไร้สายได้ ดังนั้นหน้าจอแสดงผลทั้งสองนี้จึงจำเป็นต้องเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย เพื่อที่จะสามารถส่งออกข้อมูลแบบไร้สายได้



รูป 4-7 หน้าจอแสดงผลค่าการแอ่นตัวและค่าอุณหภูมิ

4.1.4.3 อุปกรณ์แปลงสัญญาณจากหน้าจอแสดงผล (Wireless Device Servers) เป็นอุปกรณ์ที่รวมข้อมูลจากหน้าจอแสดงผลที่ใช้รหัสส่งสัญญาณแบบ RS-485 แล้วแปลงเป็นสัญญาณแบบไร้สายเพื่อส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายอีกที

4.1.4.4 อุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้ (Router) จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลการวัดที่ได้จากอุปกรณ์แปลงสัญญาณไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งอุปกรณ์นี้จะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เครื่องมือสามารถติดต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อรับส่งข้อมูล โดยที่คอมพิวเตอร์จะต้องติดตั้งโปรแกรมที่รองรับการรับส่งข้อมูลเพื่อที่จะสามารถแสดงค่าการวัดและเก็บบันทึกข้อมูลได้

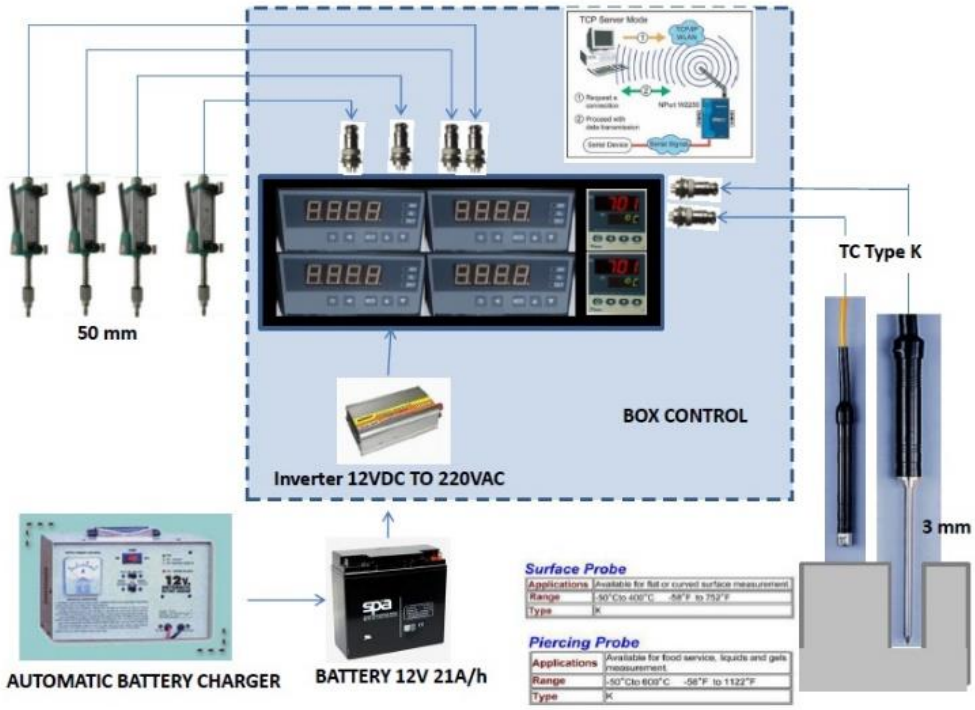
4.1.4.5 อุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า (DC to AC inverter) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลท์ ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลท์ เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ในกล่องควบคุม เนื่องจากการนำเครื่องมือไปทดสอบในสนามใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่แบบพกพา

แต่อุปกรณ์ส่วนใหญ่ในกล่องควบคุมใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลท์ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องติดตั้งอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้าด้วย

4.1.5 หลักการทำงานของชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เมื่อเริ่มทำการวัดค่าการแอ่นตัวและอุณหภูมิของผิวทาง จากนั้นอุปกรณ์วัดระยะและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิจะส่งสัญญาณข้อมูลไปยังหน้าจอเพื่อแสดงผล จากนั้นหน้าจอแสดงผลแต่ละตัวจะส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์แปลงสัญญาณเพื่อรวมข้อมูลและแปลงสัญญาณเป็นแบบไร้สายสำหรับส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายอีกที จากนั้นข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายจะสามารถส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชั้นทางต่อไป โดยมีแผนผังการทำงานของชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงใน

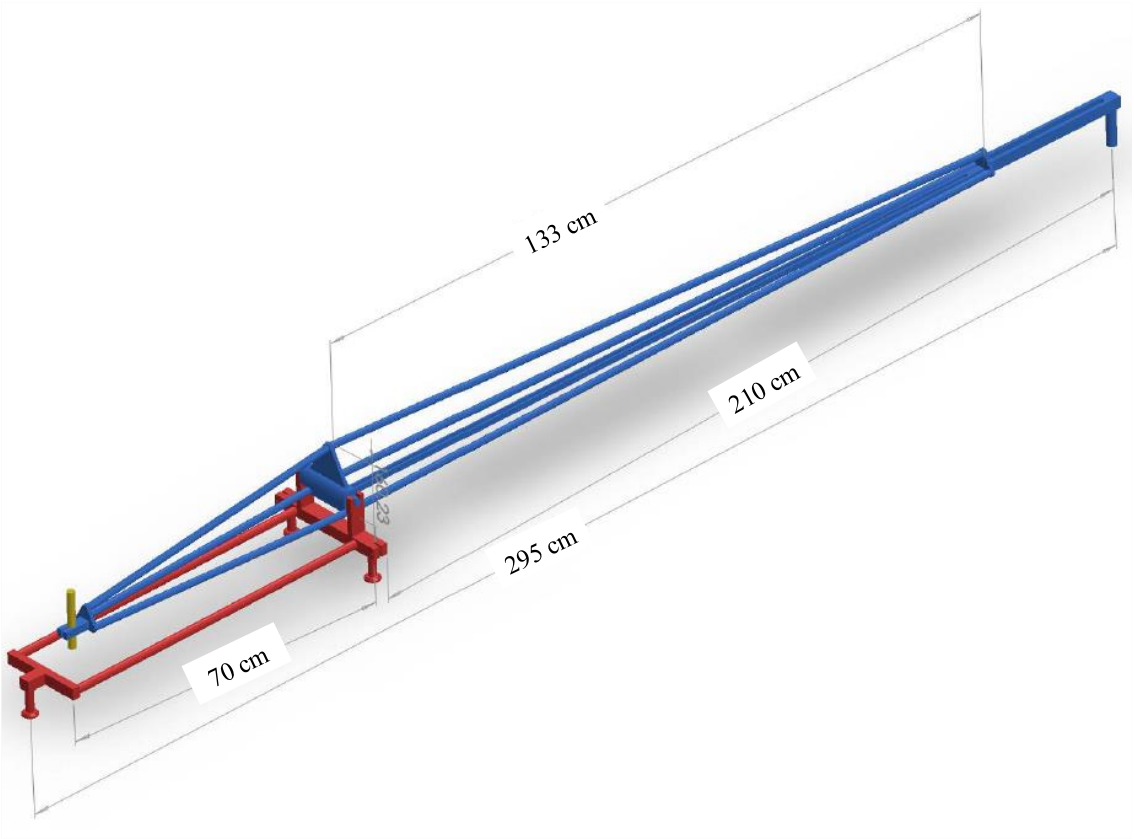
รูป 4-8



รูป 4-8 หลักการทำงานของชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

4.2 โครงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบ

เครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบเป็นเครื่องมือที่มีการออกแบบและสร้างขึ้นใหม่ทั้งชุด โดยมีแนวคิดหลักคือการออกแบบโครงที่มีขนาดเล็ก กระทัดรัด และที่สำคัญมีความสอดคล้องลงตัวกับอุปกรณ์ส่วนควบที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ กระบวนการออกแบบที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ และมีการปรับขนาดและรูปทรงให้เหมาะสมกับวัสดุที่เลือกใช้ โดยในเบื้องต้นเลือกใช้เหล็กเป็นวัสดุหลักในการสร้างเครื่องมือ เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ทำให้องค์กรท้องถิ่นต่างๆ มีโอกาสพัฒนาขึ้นใช้ได้เองได้โดยง่าย ซึ่งผลการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูป 4-6 โดยขนาดความยาวของคานส่วนหน้าและคานส่วนหลังมีความยาว 210 ซม. และ 70 ซม. ตามลำดับ และเมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนมีค่าเท่ากับ 3:1 จากนั้นได้มีการสร้างเครื่องมือขึ้นตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ โดยเลือกใช้ท่อเหล็กขนาด 1/2 นิ้ว เป็นวัสดุหลักในการสร้างชุดเครื่องมือและมีการปรับเปลี่ยนวัสดุบางส่วนเป็นอลูมิเนียมเพื่อความทนทานในการใช้งาน ลดน้ำหนักเครื่องมือ และสะดวกต่อการขึ้นรูป ซึ่งรูป 4-10 แสดงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบที่มีการประกอบแล้วเสร็จ พร้อมทั้งมีการติดตั้งอุปกรณ์ส่วนควบที่ได้พัฒนาขึ้น แสดงให้เห็นว่าโครงเครื่องมือต้นแบบสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ส่วนควบได้เป็นอย่างดี โดยรางเลื่อนทำจากอลูมิเนียมขนาด 6.0×1.2 ซม. ซึ่งใช้ประกอบกันทั้งหมด 6 ชิ้น โดยมีความยาวต่างกัน ซึ่งแต่ละชิ้นมีการเจาะทะลุและเซาะร่องทำเป็นรางเลื่อนและมีการติดแถบวัดระยะเพื่อบอกระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว จากนั้นยึดส่วนประกอบของรางเลื่อนทั้งหมดเข้าไว้ด้วยกันโดยใช้สลักเกลียว ซึ่งความยาวและระยะเลื่อนของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวของรางเลื่อนแสดงในตาราง 4-2 และเมื่อประกอบเครื่องมือทั้งหมดเสร็จแล้วมีจะขนาด 17.5×295.0×33.0 ซม. ขนาดที่เล็กกระทัดรัด และมีระยะสั้นลงทำให้ง่ายต่อการขนย้าย โครงเครื่องมือที่มีความสอดคล้องลงตัวกับอุปกรณ์ส่วนควบอิเล็กโทรนิกส์นี้จะทำให้การทดสอบในภาคสนามมีความสะดวก รวดเร็ว และได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น



รูป 4-9 โครงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบที่ออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์

รูป 4-10 เครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบที่สร้างแล้วเสร็จ

ตาราง 4-2 รายละเอียดของรางเลื่อนปรับระยะ

ชิ้นที่	ความยาว [ซม.]	ช่วงการปรับระยะของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว [มม.]
1	40	40-360
2	40	440-760
3	30	480-1060
4	30	1140-1360
5	30	1440-1640
6	30	1740-1970

4.3 ผลการสอบเทียบเครื่องมือเบนเคลแมนบีม

4.3.1 ผลการสอบเทียบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวแต่ละตำแหน่ง

จากการทดสอบความเที่ยงตรงและสอบเทียบอุปรณ์วัดค่าการแอ่นตัวทั้ง 4 ชุด โดยใช้แผ่น Feeler Gauge ที่มีความหนาแตกต่างกันจำนวน 11 แผ่น โดยทำการทดสอบซ้ำ 10 ครั้ง ผลที่ได้แสดงในตาราง 4-3 ถึง ตาราง 4-6 โดยพบว่าค่าที่วัดได้มีค่าแตกต่างจากค่าความหนาของแผ่น Feeler Gauge เล็กน้อย โดยส่วนใหญ่จะมีค่ามากกว่าความหนาของแผ่น Feeler Gauge จากนั้นเมื่อนำค่าที่ได้จากตารางมาหาความสัมพันธ์ดังรูป 4-11 พบว่าค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวมีค่าใกล้เคียงกับความหนาของแผ่น Feeler Gauge โดยแนวโน้มของค่าที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของแผ่น Feeler Gauge ที่หนาขึ้น และเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแบบถดถอยเชิงเส้นพบว่าค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.95 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ความน่าเชื่อถือสูง สะท้อนให้เห็นถึงความถูกต้องที่มากขึ้นอย่างมากเทียบกับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ทั่วไป

ตาราง 4-3 ค่าความหนาของ Feeler Gauge ที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 1

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge [มม.]										
	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.61	0.635
1	0.55	0.45	0.46	0.49	0.55	0.53	0.55	0.59	0.63	0.66	0.71
2	0.42	0.43	0.47	0.48	0.54	0.55	0.58	0.65	0.64	0.67	0.72
3	0.43	0.43	0.46	0.49	0.54	0.54	0.58	0.60	0.64	0.69	0.74
4	0.44	0.43	0.47	0.49	0.54	0.58	0.58	0.64	0.63	0.67	0.72
5	0.45	0.43	0.47	0.50	0.58	0.56	0.58	0.58	0.63	0.67	0.72
6	0.43	0.43	0.46	0.49	0.54	0.57	0.58	0.58	0.64	0.67	0.72
7	0.43	0.43	0.47	0.50	0.54	0.57	0.59	0.58	0.63	0.67	0.71
8	0.44	0.43	0.46	0.47	0.54	0.59	0.59	0.59	0.63	0.67	0.75
9	0.45	0.46	0.48	0.47	0.54	0.59	0.61	0.60	0.64	0.67	0.72
10	0.45	0.45	0.48	0.49	0.54	0.55	0.61	0.60	0.64	0.67	0.70
Avg.	0.45	0.44	0.47	0.49	0.55	0.56	0.59	0.60	0.64	0.67	0.72
S.D.	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01

ตาราง 4-4 ค่าความหนาของ Feeler Gauge ที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 2

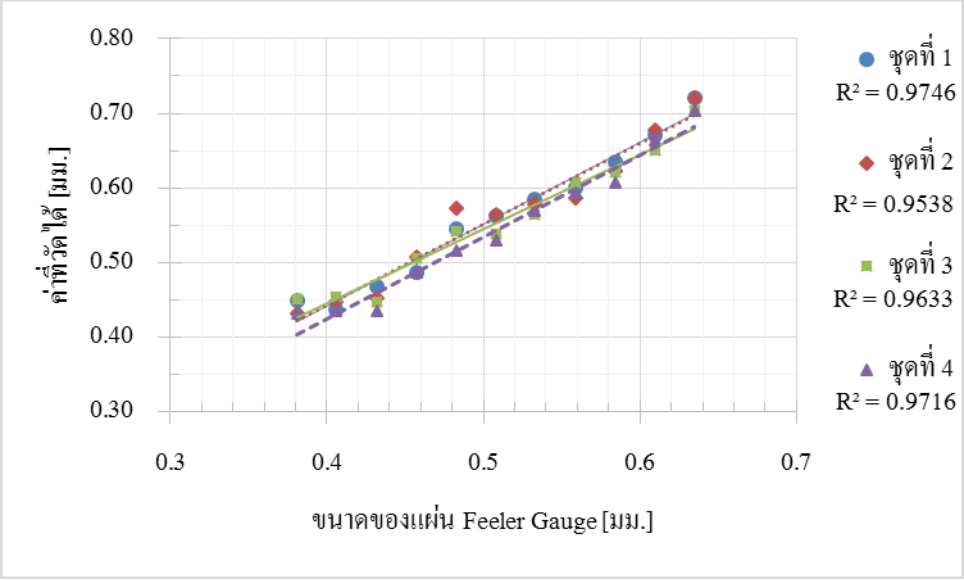
ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge [มม.]										
	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.61	0.635
1	0.45	0.45	0.46	0.50	0.61	0.58	0.57	0.63	0.63	0.68	0.70
2	0.44	0.45	0.46	0.50	0.57	0.55	0.58	0.58	0.61	0.68	0.73
3	0.45	0.45	0.45	0.51	0.58	0.56	0.59	0.58	0.60	0.68	0.69
4	0.44	0.48	0.45	0.51	0.56	0.55	0.57	0.57	0.62	0.67	0.72
5	0.44	0.43	0.45	0.51	0.57	0.55	0.58	0.57	0.62	0.67	0.73
6	0.41	0.43	0.46	0.51	0.57	0.58	0.58	0.58	0.63	0.68	0.72
7	0.43	0.46	0.45	0.51	0.57	0.61	0.58	0.58	0.64	0.68	0.74
8	0.43	0.45	0.45	0.51	0.58	0.57	0.57	0.60	0.63	0.68	0.74
9	0.43	0.43	0.45	0.50	0.54	0.55	0.59	0.60	0.62	0.68	0.74
10	0.40	0.44	0.45	0.51	0.57	0.54	0.57	0.58	0.63	0.68	0.69
Avg.	0.43	0.45	0.45	0.51	0.57	0.56	0.58	0.59	0.62	0.68	0.72
S.D.	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02

ตาราง 4-5 ค่าความหนาของ Feeler Gauge ที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 3

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge [มม.]										
	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.61	0.635
1	0.42	0.45	0.46	0.54	0.58	0.51	0.53	0.59	0.63	0.66	0.68
2	0.43	0.44	0.44	0.51	0.57	0.55	0.57	0.60	0.62	0.65	0.70
3	0.44	0.45	0.44	0.52	0.57	0.56	0.56	0.61	0.62	0.66	0.70
4	0.46	0.46	0.46	0.51	0.55	0.54	0.57	0.60	0.62	0.64	0.70
5	0.49	0.46	0.44	0.50	0.52	0.53	0.56	0.61	0.62	0.65	0.70
6	0.45	0.46	0.44	0.49	0.52	0.54	0.57	0.61	0.62	0.65	0.74
7	0.45	0.48	0.44	0.49	0.56	0.55	0.57	0.60	0.62	0.65	0.69
8	0.45	0.45	0.45	0.50	0.52	0.54	0.57	0.61	0.61	0.64	0.73
9	0.46	0.48	0.46	0.51	0.52	0.54	0.58	0.62	0.62	0.64	0.69
10	0.46	0.42	0.45	0.49	0.51	0.53	0.57	0.62	0.63	0.66	0.70
Avg.	0.45	0.46	0.45	0.51	0.54	0.54	0.57	0.61	0.62	0.65	0.70
S.D.	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02

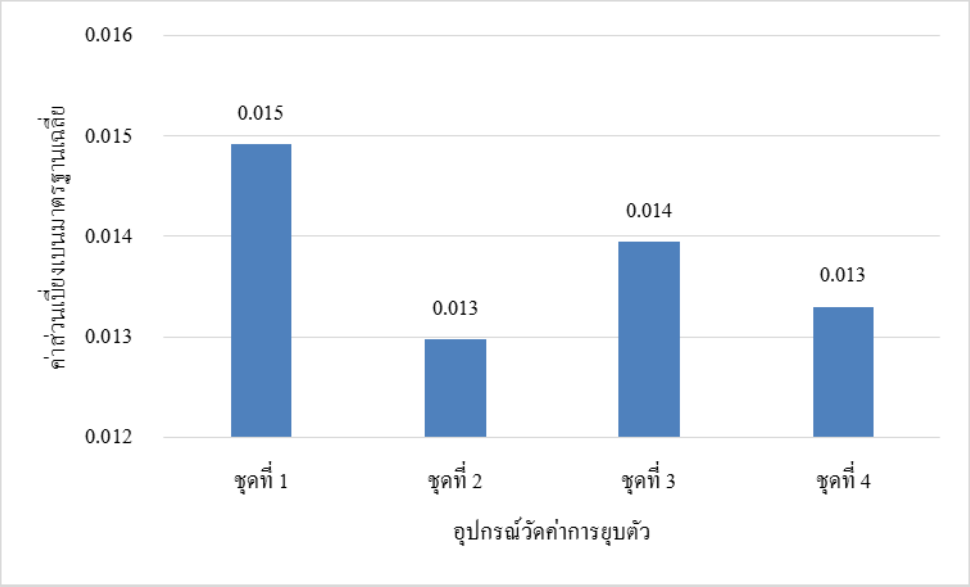
ตาราง 4-6 ค่าความหนาของ Feeler Gauge ที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 4

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge [มม.]										
	0.42	0.44	0.46	0.49	0.53	0.53	0.58	0.58	0.61	0.67	0.68
1	0.44	0.47	0.44	0.48	0.51	0.53	0.56	0.59	0.62	0.66	0.69
2	0.46	0.42	0.43	0.49	0.51	0.54	0.56	0.58	0.60	0.64	0.71
3	0.47	0.42	0.41	0.48	0.52	0.53	0.59	0.59	0.60	0.68	0.69
4	0.41	0.42	0.45	0.49	0.52	0.53	0.58	0.58	0.62	0.67	0.71
5	0.43	0.44	0.43	0.49	0.52	0.53	0.56	0.59	0.61	0.68	0.71
6	0.44	0.43	0.42	0.49	0.50	0.52	0.57	0.59	0.61	0.65	0.75
7	0.42	0.44	0.43	0.49	0.51	0.52	0.56	0.63	0.62	0.67	0.72
8	0.41	0.43	0.45	0.48	0.53	0.53	0.56	0.61	0.59	0.67	0.69
9	0.41	0.44	0.43	0.48	0.51	0.53	0.58	0.59	0.59	0.65	0.68
10	0.43	0.44	0.44	0.49	0.52	0.53	0.57	0.59	0.61	0.66	0.70
Avg.	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
S.D.	0.42	0.44	0.46	0.49	0.53	0.53	0.58	0.58	0.61	0.67	0.68



รูป 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของแผ่น Feeler gauge และค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว

จากนั้นทำทดสอบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวสามารถแสดงได้ดังรูป 4-12 ซึ่งจากการทดสอบพบว่า อุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 4 มีความคลาดเคลื่อนในรูปของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด หรือกล่าวอีกในหนึ่งคือมีความเที่ยงตรงมากที่สุด คือ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.013 มม. ส่วนชุดที่ 1, 3 และ 4 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.015, 0.014 และ 0.013 มม. ตามลำดับ ซึ่งหากพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้นจากการทดสอบซ้ำของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวทั้ง 4 ชุดนี้ พบว่ามีค่าประมาณ 0.015 มม. หรือ ประมาณ 15 ไมครอน



รูป 4-12 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวแต่ละชุด

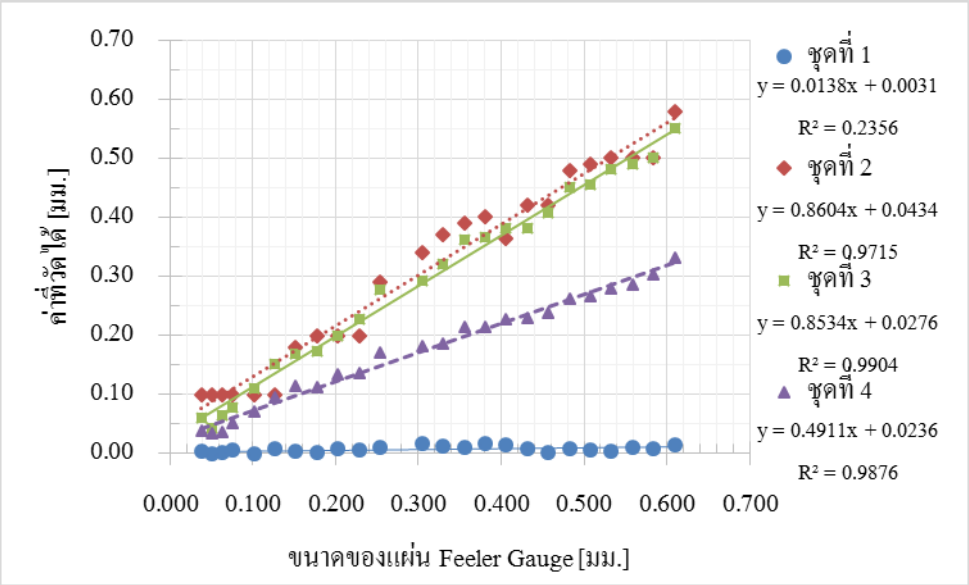
4.3.2 ผลทดสอบการทดสอบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวที่มีการปรับตำแหน่งระยะต่างกัน

จากการทดสอบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวที่มีการปรับตำแหน่งระยะต่างกัน 4 แบบคือ

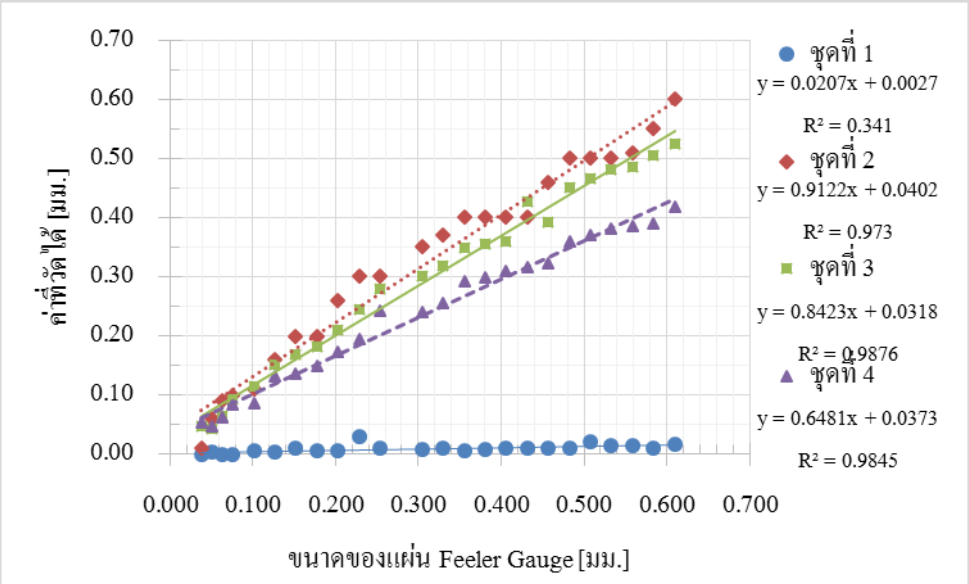
1. ที่ระยะ 0, 200, 300 และ 900 มม.
2. ที่ระยะ 0, 200, 300 และ 600 มม.
3. ที่ระยะ 0, 150, 300 และ 600 มม.
4. ที่ระยะ 0, 150, 300 และ 450 มม.

โดยใช้ Feeler Gauge ที่มีความหนาแตกต่างกันจำนวน 24 แผ่น สอดที่ปลายคานด้านหน้าสุด ทำการปรับตั้งค่าอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวเป็นศูนย์และดึง Feeler Gauge ออก จากนั้นจึงทำการจด

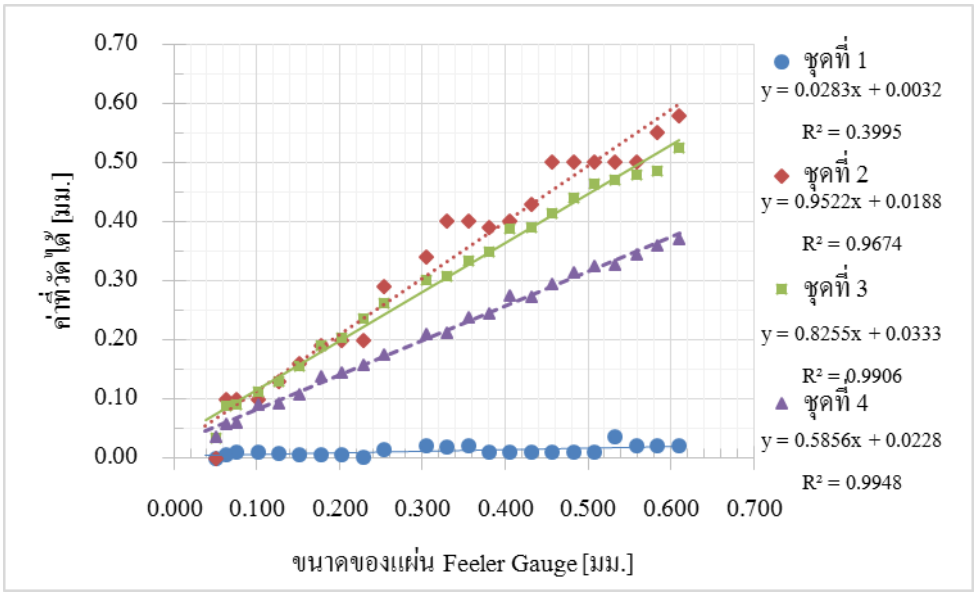
บันทึกค่า ซึ่งมีการทำซ้ำทั้งหมดแผ่นละ 10 ครั้ง ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในตาราง ก-1 ถึง ตาราง ก-16 ในภาคผนวก ก และค่าที่วัดได้จากตารางดังกล่าว สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่อ่านได้แต่ละตำแหน่งของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว ดังรูป 4-13 ถึง รูป 4-16



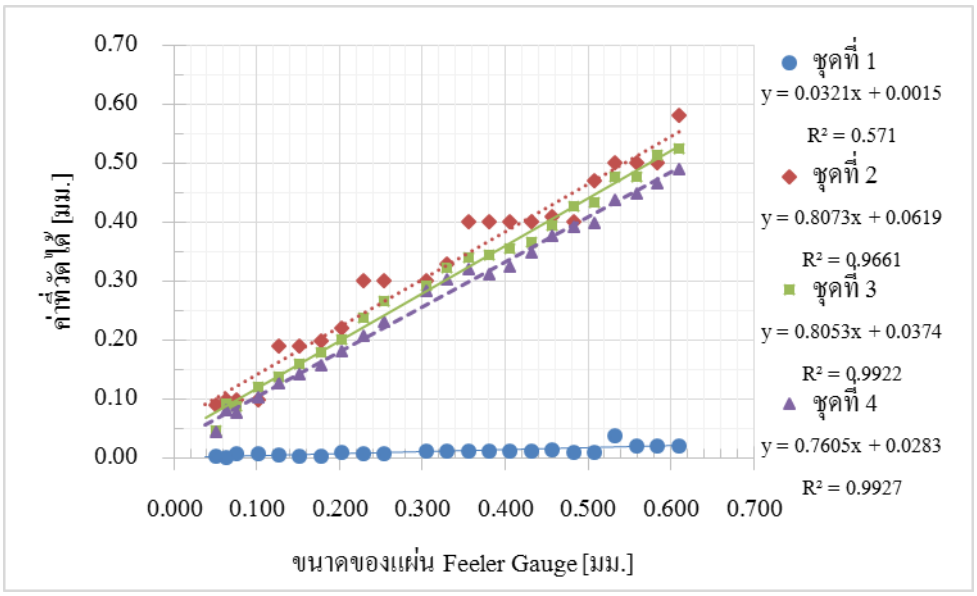
รูป 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้แต่ละตำแหน่งที่มีการปรับระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวตามแบบที่ 1



รูป 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้แต่ละตำแหน่งที่มีการปรับระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวตามแบบที่ 2

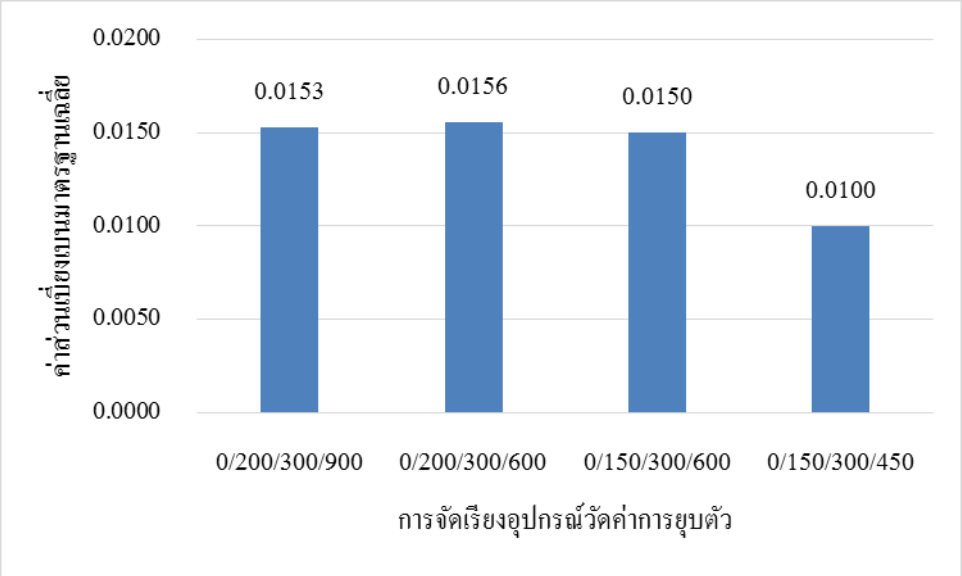


รูป 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้แต่ละตำแหน่งที่มีการปรับระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวตามแบบที่ 3



รูป 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้แต่ละตำแหน่งที่มีการปรับระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวตามแบบที่ 4

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่อ่านได้แต่ละตำแหน่งของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวจะพบว่า ค่าความชันของสมการ จะแปรผกผันกับระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวที่วัดจากปลายคานด้านหน้าสุด โดยหากระยะห่างยิ่งเข้าใกล้ปลายคานหรือมีค่าใกล้ศูนย์ ค่าความชันของสมการจะยิ่งมีค่ามากขึ้น โดยจากการทดสอบทั้ง 4 แบบ พบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยประมาณ 0.015 มม. ดังรูป 4-17 โดยในการปรับระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวตามแบบที่ 4 มีความคลาดเคลื่อนน้อยสุดคือ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.010 มม.



รูป 4-17 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการปรับระยะห่างอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวแต่ละแบบ

4.4 การคำนวณหาค่าการแอ่นตัวของผิวทาง

ค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่อ่านได้จากเครื่องมือทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติจะต้องนำมาปรับแก้ค่าการแอ่นตัวก่อน เนื่องจากค่าที่วัดได้อาจมีผลมาจากปัจจัยอื่น ๆ มาเกี่ยวข้อง เช่น ผลของการเปลี่ยนแปลงระดับของคานแข็ง (rigid beam) ตามการแอ่นตัวของผิวทาง เป็นต้น ดังนั้นค่าการแอ่นตัวของผิวที่เกิดขึ้นหลังจากการปรับแก้สามารถคำนวณได้ดังนี้

ค่าการแอ่นที่ปลายคาน

$$d_1 = \frac{y_1 - c_1}{m_1} \qquad (4\text{-}1)$$

โดยที่ d_1 คือ ค่าการแอ่นที่ปลายคาน

y_1 คือ ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 1

m_1 และ c_1 คือ ค่าความชันและค่าคงที่ที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 1

ค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี

$$d_i = R_i - y_i \qquad (4\text{-}2)$$

โดยที่ d_i คือ ค่าการแอ่นที่ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ i

R_i คือ ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ i

y_i คือ ค่าคำนวณได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ i โดยแทนค่า x_i ด้วยค่า d_1

ทั้งนี้จากสมการที่ (1) และ (2) เป็นเพียงสมการเส้นตรงอย่างง่าย ดังนั้นการปรับแก้ค่าที่วัดได้จากระบบเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งออฟเซ็ทตามแนวรัศมีทุกตำแหน่งจึงสามารถทำได้ง่ายมาก โดยการเขียนโปรแกรมคำนวณแบบ spreadsheet ทั่วไปไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาที่ใช้รับข้อมูลในการทดสอบนั้น

ตัวอย่างการคำนวณค่าการแอ่นตัว

สมมุติอ่านค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่วัดโดยใช้ระบบที่ 1 (0, 200, 300, 900 มม.) อ่านค่าการแอ่นตัวจากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 1 และ 2 ได้ 0.05 มม. และ 2.29 มม. ตามลำดับ จะสามารถคำนวณค่าการแอ่นตัวได้ดังนี้

จาก รูป 4-13 ได้สมาการคำนวณค่าการแอ่นตัวของอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวชุดที่ 1 และ 2 คือ $y_1 = 0.0318x + 0.0031$ และ $y_2 = 0.8604x + 0.0434$ ตามลำดับ ดังนั้นสามารถคำนวณค่าการแอ่นตัวได้ดังนี้

ค่าการแอ่นที่ปลายคาน

$$d_1 = \frac{y_1 - c_1}{m_1}$$
$$= \frac{0.05 - 0.0031}{0.0318}$$
$$= 1.475 \text{ มม.}$$

ค่าการแอ่นตัวตามแนวรัศมีที่ตำแหน่ง 200 มม.

$$d_2 = R_2 - y_2$$
$$= R_2 - \left(0.8604x_1 + 0.0434\right)$$
$$= 2.29 - \left(0.8604 \times 1.475 + 0.0434\right)$$
$$= 0.978 \text{ มม.}$$

ดังนั้นค่าการแอ่นตัวของผิวทาที่ตำแหน่ง 0 มม. และ 200 มม. ตามแนวรัศมี คือ 1.475 มม. และ 0.978 มม.

4.5 ผลการทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบในสนาม

จากการทดสอบนำเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบไปใช้งานในสนาม ในเบื่องต้นพบว่าเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบสามารถใช้ปฏิบัติงานภาคสนามดีกว่าเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ทั่วไปโดยเฉพาะในแง่มุมของการอ่านค่าที่ถูกต้อง แต่เครื่องมือดังกล่าวก็ยังมีข้อบกพร่องบางส่วนที่ยังต้องนำมาปรับปรุงเพิ่มเติมอีก เพื่อให้เครื่องมือดังกล่าวสามารถนำไปปฏิบัติงานในสนามได้ดียิ่งขึ้น เช่น การปรับปรุงหน้าจอแสดงผลให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น การปรับปรุงความจุของแบตเตอรี่ให้สามารถใช้งานได้ยาวนานยิ่งขึ้น เป็นต้น

5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการพัฒนาเครื่องมือต้นแบบทดสอบการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยใช้เครื่องเบนเคลแมนบีมที่หน่วยงานหลักเลิกใช้ไปแล้วเป็นฐานของการพัฒนา เนื่องจากตอบโจทย์ของการจัดหาเครื่องมือโดยใช้งบประมาณน้อย และยังคงสามารถใช้งานได้ดีกับถนนลาดยางในท้องถิ่นที่มีปริมาณจราจรน้อย โดยได้มีการสร้างชุดอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาให้เครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบดั้งเดิมสามารถอ่านค่าได้หลายตำแหน่งและมีความละเอียดถูกต้องสูงขึ้น และมีการวิจัยพัฒนาสร้างโครงเครื่องมือต้นแบบที่เหมาะสมสอดคล้องกับชุดอุปกรณ์ส่วนควบดังกล่าวให้มากที่สุด

โดยในส่วนของลักษณะทางกายภาพ (physical characteristics) ของเครื่องมือต้นแบบที่พัฒนาขึ้นได้ข้อสรุปดังนี้

- ชุดอุปกรณ์ส่วนควบประกอบไปด้วยหลายส่วน เช่น ชุดยึดจับเซ็นเซอร์ / เซ็นเซอร์วัดค่ายุบตัว 4 ตำแหน่ง / รางเลื่อนปรับระยะ. / เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่ผิวและกึ่งกลางชั้นแอสฟัลต์ / กล่องควบคุมและแสดงผล / ชุดพลังงาน ซึ่งทั้งหมดทำงานสอดคล้องกันอย่างดี
- โครงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบที่มีขนาดเล็กกระทัดรัดมากขึ้น เหมาะกับการทดสอบในสนามโดยเมื่อประกอบเครื่องมือแล้วเสร็จพร้อมใช้งานจะมีขนาด 17.5×295.0×33.0 ซม.
- อุปกรณ์ส่วนควบสามารถใช้งานร่วมกับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมทั้งแบบดั้งเดิมและเครื่องมือต้นแบบที่พัฒนาขึ้นใหม่ได้เป็นอย่างดี

และในส่วนของผลการทดสอบความละเอียดถูกต้อง (accuracy) และความน่าเชื่อถือ (reliability) ของเครื่องมือต้นแบบ ได้ข้อสรุปดังนี้

- เครื่องมือต้นแบบมีความละเอียดถูกต้องโดยรวมค่อนข้างดี โดย R2 จากการสอบเทียบมีค่ามากกว่า 0.95 และมีความคลาดเคลื่นโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 15 ไมครอน

- ความละเอียดถูกต้องของเซ็นเซอร์วัดค่าการยุบตัวในกรณีเปลี่ยนระยะวัดค่าออฟเซ็ทตามแนวรัศมีอยู่ในเกณฑ์พอใช้ โดยจากการทดสอบจาก 4 ระบบ พบว่ามีความเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.015 มม.
- การหาค่าการแอ่นตัวประสิทธิผลของโครงสร้างผิวทางจากผลทดสอบของเครื่องมือต้นแบบสามารถใช้ระบบสมการเชิงเส้นอย่างง่ายที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ และสามารถปรับใช้ได้โดยง่ายด้วยโปรแกรมคำนวนแบบ spreadsheet ทั่วไป
- ทีมวิจัยสามารถพัฒนาโครงเครื่องมือต้นแบบพร้อมชุดอุปกรณ์ส่วนควบประกอบอิเล็กโทรนิกส์ที่มีประสิทธิภาพในการวัดอุณหภูมิผิวและกึ่งกลางความหนา รวมทั้งอ่านค่าการยุบตัวของถนนลาดยางสูงกว่าเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ทั่วไปด้วยต้นทุนโดยประมาณ 300,000 บาท/เครื่อง

จากการทดสอบนำเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบไปใช้งานในสนาม ในเบื่องต้นพบว่าเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบสามารถใช้ปฏิบัติงานภาคสนามดีกว่าเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ทั่วไปโดยเฉพาะในแง่มุมของการอ่านค่าที่ถูกต้อง แต่เครื่องมือดังกล่าวก็ยังมีข้อบกพร่องบางส่วนที่ยังต้องนำมาปรับปรุงเพิ่มเติมอีก เพื่อให้เครื่องมือดังกล่าวสามารถนำไปปฏิบัติงานในสนามได้ดียิ่งขึ้นทั้งนี้ทีมนักวิจัยยังมุ่งหวังที่จะให้มีการศึกษาวิจัยต่อยอดเพื่อพัฒนาเครื่องมือต้นมือเบนเคลแมนบีมกึ่งอัตโนมัติต้นแบบนี้ ให้เกิดผลประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม และข้อเสนอแนะที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ คือการนำเครื่องมือต้นแบบนี้ไปใช้ในการประเมินกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางในท้องถิ่นที่เปิดใช้บริการแล้วเพื่อพิจารณาร่วมกับสภาพความแตกต่างของถนนที่มีอายุการให้บริการต่างๆกัน รวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์อื่นๆ ที่เอื้ออำนวย เช่น ใช้ควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง หรือ การควบคุมการสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก (microcracking control) เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวขนาดใหญ่ (major crack) ในโครงสร้างผิวทางที่มีชั้นพื้นทางเป็นดินซีเมนต์ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

[1] สมบัติ เจริญพัฒน์: การกำหนดน้ำหนักบรรทุก, สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

[2] วรศักดิ์ กนกนุกูลชัย: บทสรุปผู้บริหาร ปัญหาการใช้ทางหลวงของรถบรรทุกสิบล้อ.

[3] สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง, *การวัดค่าการแอ่นตัวของถนนและการออกแบบเสริมความแข็งแรง ปรับปรุงปี 2541 (ภาคผนวก)*, กรมทางหลวง. รายงานประจำปี 2543

[4] พุทธพล ทองอินทร์ดำ, นิรชร นกแก้ว: การพัฒนาระบบตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางในท้องถิ่นโดยวิธีตรง, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554

[5] ดิเรก ลาวัณย์ศิริ และธรรมมา เจียรธราวานิช. *การเปรียบเทียบการออกแบบเสริมผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer. วารสาร มก. ฉบับที่ 57, หน้า 46-59 . 2549.*

[6] P. Thongindam, *Enhancement of Backcalculation Techniques for Assessing Flexible Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms.* Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Unversity of Hannover, Germany, 2009

[7] พุทธพล ทองอินทร์ดำ: *วิศวกรรมงานทางแบบบูรณาการในการประเมินสภาพถนนลาดยางไทยแบบมีชีวิต*, การประกวดบทความวิชาการด้านวิศวกรรมขนส่งและการจราจร, สมาคมทางหลวงแห่งประเทศไทย, 2553

[8] S. Jendia: Bewertung der Tragfaehigkeit von bituminoesen Strassenbefestigungen (original in German), Doctoral Dissertation, Institute of Road and Railway, University of Karlsruhe, 1995

[9] แสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์. *การสำรวจและประเมินสภาพทางใช้ในงานบำรุงทาง*, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร. 2549.

[10] จิรยุทธ ชนะโชติ; ธงชัย วรวิทยธาดา และ อภิยุช ศรีสุข, *การออกแบบเสริมความแข็งแรงของถนนลาดยางโดยใช้เครื่องมือเบนเคลแมนบีม*, ปริญญานิพนธ์, ภาควิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2547.

[11] ดิเรก ลาวัณย์ศิริ และธรรมมา เจียรธราวานิช. *การเปรียบเทียบการออกแบบเสริมผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer. วารสาร มก. ฉบับที่ 57, หน้า 46-59 . 2549.*

[12] สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง: เอกสารสำหรับผู้เข้าอบรมการทดสอบแบบไม่ทำลาย: กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร

[13] D. R. Jundhare, Dr. K. C. Khare, and Dr. R. K. Jain. *Development Correlation between Benkelman Beam Deflection and Falling Weight Deflectometer for Conventional Whitetopping Overly*. Journal of Basic and Applied Scientific Research, pp. 8725-8731. 2012.

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

[15] จิรยุทธ ชนะโชติ; ธงชัย วรวิทยธาดา และ อภิยุช ศรีสุข, *การออกแบบเสริมความแข็งแรงของถนนลาดยางโดยใช้เครื่องมือเบนเคลแมนบีม*, ปริญญานิพนธ์, ภาควิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2547.

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 1 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 1

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge [มม.]																							
	0.038	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
2	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
5	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02
6	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
7	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.03
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
10	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
Avg.	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02
S.D.	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

ตาราง ก-2 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 2 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 1

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																								
	0.038	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
3	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
4	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.04	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
5	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.40	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
6	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
7	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
8	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
9	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.50	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.40	0.50	0.40	0.50	0.50	0.50	0.60
Avg.	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.18	0.20	0.20	0.20	0.29	0.34	0.37	0.39	0.40	0.36	0.42	0.42	0.48	0.49	0.50	0.50	0.50	0.58
S.D.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	0.05	0.03	0.00	0.11	0.04	0.04	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.04

ตาราง ก-3 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 3 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 1

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																								
	0.038	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.06	0.04	0.05	0.01	0.11	0.15	0.17	0.18	0.19	0.23	0.29	0.30	0.33	0.36	0.38	0.38	0.39	0.42	0.45	0.42	0.49	0.49	0.50	0.53
2	0.06	0.04	0.07	0.09	0.12	0.14	0.18	0.19	0.19	0.23	0.27	0.29	0.31	0.35	0.36	0.37	0.39	0.42	0.44	0.42	0.49	0.50	0.51	0.54
3	0.06	0.04	0.06	0.08	0.13	0.15	0.18	0.17	0.20	0.24	0.28	0.30	0.31	0.38	0.37	0.36	0.39	0.39	0.44	0.48	0.49	0.49	0.52	0.55
4	0.05	0.05	0.08	0.08	0.12	0.15	0.17	0.18	0.19	0.23	0.28	0.28	0.31	0.37	0.38	0.38	0.39	0.40	0.46	0.47	0.49	0.50	0.46	0.57
5	0.05	0.05	0.06	0.08	0.09	0.16	0.17	0.17	0.19	0.23	0.29	0.32	0.32	0.36	0.36	0.39	0.39	0.39	0.45	0.46	0.48	0.51	0.50	0.56
6	0.06	0.04	0.05	0.08	0.10	0.14	0.17	0.16	0.21	0.23	0.28	0.28	0.33	0.36	0.36	0.39	0.39	0.41	0.46	0.47	0.49	0.49	0.51	0.55
7	0.07	0.04	0.07	0.09	0.12	0.17	0.16	0.17	0.21	0.22	0.27	0.30	0.32	0.38	0.35	0.39	0.36	0.41	0.45	0.47	0.47	0.47	0.51	0.55
8	0.06	0.05	0.07	0.09	0.11	0.16	0.16	0.18	0.21	0.22	0.27	0.28	0.32	0.36	0.38	0.39	0.34	0.40	0.46	0.47	0.48	0.45	0.49	0.57
9	0.07	0.04	0.07	0.09	0.09	0.16	0.16	0.16	0.20	0.21	0.27	0.29	0.33	0.35	0.36	0.38	0.39	0.42	0.45	0.46	0.48	0.49	0.50	0.53
10	0.06	0.04	0.06	0.09	0.10	0.14	0.17	0.18	0.21	0.24	0.28	0.29	0.33	0.34	0.36	0.38	0.38	0.41	0.45	0.44	0.46	0.50	0.50	0.55
Avg.	0.06	0.04	0.06	0.08	0.11	0.15	0.17	0.17	0.20	0.23	0.28	0.29	0.32	0.36	0.37	0.38	0.38	0.41	0.45	0.46	0.48	0.49	0.50	0.55
S.D.	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01

ตาราง ก-4 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 4 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 1

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																								
	0.038	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	0.11	0.11	0.11	0.13	0.13	0.17	0.19	0.19	0.21	0.22	0.22	0.24	0.24	0.26	0.26	0.30	0.29	0.30	0.31
2	0.04	0.02	0.04	0.05	0.09	0.09	0.13	0.11	0.13	0.13	0.17	0.20	0.18	0.21	0.21	0.20	0.24	0.24	0.25	0.25	0.29	0.30	0.31	0.33
3	0.03	0.03	0.03	0.04	0.08	0.09	0.12	0.12	0.12	0.13	0.17	0.19	0.18	0.24	0.20	0.22	0.25	0.21	0.26	0.29	0.30	0.28	0.31	0.32
4	0.03	0.04	0.06	0.05	0.07	0.08	0.13	0.12	0.12	0.14	0.17	0.17	0.17	0.23	0.24	0.23	0.22	0.24	0.27	0.25	0.29	0.31	0.27	0.33
5	0.04	0.04	0.04	0.03	0.06	0.09	0.12	0.11	0.12	0.15	0.17	0.19	0.19	0.22	0.20	0.25	0.23	0.23	0.28	0.27	0.29	0.30	0.31	0.36
6	0.03	0.03	0.02	0.05	0.05	0.09	0.10	0.11	0.13	0.13	0.17	0.16	0.20	0.20	0.21	0.24	0.25	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.32	0.32
7	0.05	0.04	0.03	0.07	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15	0.17	0.19	0.19	0.22	0.21	0.23	0.21	0.25	0.26	0.29	0.26	0.27	0.31	0.33
8	0.03	0.04	0.02	0.04	0.08	0.10	0.11	0.12	0.17	0.13	0.18	0.19	0.19	0.22	0.23	0.24	0.20	0.24	0.27	0.28	0.28	0.25	0.30	0.36
9	0.05	0.04	0.04	0.06	0.06	0.10	0.11	0.10	0.13	0.13	0.16	0.17	0.18	0.21	0.21	0.22	0.23	0.25	0.27	0.26	0.26	0.29	0.30	0.31
10	0.05	0.03	0.04	0.07	0.06	0.09	0.10	0.11	0.14	0.14	0.17	0.17	0.20	0.18	0.21	0.23	0.22	0.24	0.25	0.25	0.25	0.29	0.31	0.34
Avg.	0.04	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.11	0.13	0.14	0.17	0.18	0.19	0.21	0.21	0.23	0.23	0.24	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.33
S.D.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02

ตาราง ก-5 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 1 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 2

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge [มม.]																								
	0.038	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
2	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
3	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.21	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
9	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
Avg.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
S.D.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00

ตาราง ก-6 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 2 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 2

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																								
	0.038	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.00	0.00	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
2	0.00	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
3	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
4	0.00	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
5	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60	0.60
6	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
7	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.40	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
8	0.00	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
9	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
Avg.	0.01	0.06	0.09	0.10	0.11	0.16	0.20	0.20	0.26	0.30	0.30	0.35	0.37	0.40	0.40	0.40	0.40	0.46	0.50	0.50	0.50	0.51	0.55	0.60
S.D.	0.03	0.05	0.03	0.00	0.03	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	0.00

ตาราง ก-7 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 3 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 2

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																								
	0.038	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.06	0.06	0.05	0.08	0.13	0.17	0.20	0.22	0.22	0.24	0.28	0.29	0.33	0.34	0.34	0.36	0.40	0.42	0.47	0.47	0.50	0.47	0.50	0.52
2	0.04	0.05	0.06	0.08	0.11	0.15	0.18	0.15	0.21	0.24	0.21	0.26	0.34	0.33	0.34	0.27	0.38	0.36	0.46	0.46	0.50	0.49	0.49	0.52
3	0.04	0.01	0.07	0.12	0.11	0.15	0.15	0.18	0.20	0.26	0.31	0.32	0.34	0.39	0.35	0.37	0.38	0.40	0.46	0.47	0.50	0.49	0.51	0.52
4	0.05	0.04	0.04	0.09	0.11	0.14	0.17	0.17	0.20	0.25	0.29	0.31	0.33	0.37	0.36	0.37	0.90	0.40	0.46	0.46	0.48	0.50	0.51	0.52
5	0.04	0.06	0.07	0.09	0.11	0.14	0.17	0.15	0.21	0.23	0.31	0.29	0.32	0.35	0.37	0.37	0.38	0.39	0.46	0.47	0.48	0.50	0.50	0.52
6	0.05	0.06	0.07	0.09	0.11	0.16	0.17	0.18	0.22	0.25	0.29	0.27	0.30	0.34	0.36	0.38	0.32	0.39	0.46	0.47	0.45	0.47	0.50	0.52
7	0.05	0.04	0.05	0.08	0.13	0.15	0.16	0.18	0.21	0.25	0.23	0.32	0.30	0.33	0.36	0.37	0.36	0.39	0.44	0.47	0.45	0.49	0.51	0.52
8	0.04	0.04	0.08	0.09	0.14	0.17	0.16	0.20	0.21	0.23	0.30	0.32	0.26	0.34	0.35	0.35	0.38	0.38	0.43	0.46	0.50	0.49	0.51	0.52
9	0.05	0.04	0.09	0.11	0.08	0.14	0.17	0.21	0.21	0.24	0.27	0.30	0.32	0.34	0.36	0.36	0.39	0.40	0.43	0.47	0.46	0.48	0.52	0.54
10	0.04	0.03	0.06	0.09	0.12	0.14	0.16	0.17	0.21	0.26	0.30	0.32	0.34	0.35	0.36	0.40	0.39	0.40	0.43	0.47	0.49	0.48	0.51	0.54
Avg.	0.05	0.04	0.06	0.09	0.12	0.15	0.17	0.18	0.21	0.25	0.28	0.30	0.32	0.35	0.36	0.36	0.43	0.39	0.45	0.47	0.48	0.49	0.51	0.52
S.D.	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.17	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01

ตาราง ก-8 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 4 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 2

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																								
	0.038	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.06	0.08	0.04	0.08	0.09	0.30	0.14	0.15	0.18	0.18	0.22	0.23	0.26	0.28	0.29	0.30	0.32	0.32	0.34	0.37	0.39	0.38	0.38	0.42
2	0.06	0.06	0.05	0.06	0.09	0.12	0.15	0.15	0.17	0.20	0.25	0.21	0.27	0.26	0.30	0.29	0.32	0.30	0.37	0.37	0.39	0.38	0.39	0.42
3	0.06	0.04	0.08	0.11	0.09	0.13	0.12	0.15	0.16	0.22	0.25	0.26	0.28	0.31	0.27	0.32	0.32	0.32	0.37	0.37	0.39	0.40	0.39	0.42
4	0.05	0.04	0.03	0.09	0.08	0.10	0.13	0.14	0.17	0.21	0.24	0.25	0.29	0.31	0.30	0.29	0.33	0.33	0.37	0.37	0.38	0.40	0.39	0.41
5	0.06	0.06	0.08	0.09	0.09	0.11	0.15	0.16	0.17	0.19	0.25	0.25	0.26	0.29	0.30	0.32	0.32	0.32	0.37	0.37	0.40	0.40	0.39	0.41
6	0.05	0.05	0.08	0.08	0.08	0.12	0.13	0.15	0.19	0.20	0.24	0.23	0.23	0.39	0.30	0.31	0.26	0.32	0.35	0.37	0.36	0.36	0.38	0.41
7	0.05	0.05	0.06	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.17	0.15	0.25	0.28	0.23	0.28	0.29	0.33	0.31	0.32	0.35	0.37	0.36	0.38	0.40	0.41
8	0.05	0.04	0.08	0.06	0.10	0.13	0.14	0.16	0.18	0.19	0.26	0.25	0.20	0.27	0.29	0.30	0.32	0.33	0.36	0.37	0.38	0.40	0.39	0.41
9	0.05	0.03	0.08	0.10	0.07	0.09	0.15	0.16	0.18	0.19	0.23	0.25	0.26	0.27	0.36	0.30	0.33	0.33	0.35	0.37	0.37	0.38	0.40	0.44
10	0.04	0.03	0.04	0.08	0.09	0.10	0.14	0.13	0.16	0.21	0.24	0.20	0.27	0.27	0.29	0.34	0.33	0.34	0.36	0.37	0.39	0.38	0.39	0.44
Avg.	0.05	0.05	0.06	0.08	0.09	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.24	0.24	0.26	0.29	0.30	0.31	0.32	0.32	0.36	0.37	0.38	0.39	0.39	0.42
S.D.	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01

ตาราง ก-9 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 1 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 3

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge [มม.]																							
	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
2	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
3	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
4	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
5	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
6	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
7	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
8	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.20	0.02	0.02	0.02
9	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
10	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Avg.	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02
S.D.	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก-10 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 2 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 3

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																							
	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
2	0.00	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
3	0.00	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
4	0.00	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
5	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
6	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
7	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
8	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
9	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.40	0.30	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
Avg.	0.00	0.10	0.10	0.10	0.13	0.16	0.19	0.20	0.20	0.29	0.34	0.40	0.40	0.39	0.40	0.43	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.55	0.58
S.D.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.03	0.00	0.00	0.03	0.07	0.00	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04

ตาราง ก-11 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 3 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 3

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																							
	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.03	0.09	0.11	0.13	0.10	0.12	0.21	0.20	0.24	0.23	0.30	0.29	0.25	0.35	0.40	0.38	0.41	0.44	0.48	0.46	0.47	0.45	0.54
2	0.03	0.08	0.10	0.10	0.14	0.16	0.18	0.20	0.25	0.28	0.31	0.27	0.35	0.35	0.36	0.40	0.42	0.43	0.46	0.46	0.45	0.46	0.53
3	0.04	0.06	0.08	0.10	0.15	0.16	0.18	0.21	0.25	0.18	0.27	0.31	0.35	0.36	0.40	0.40	0.42	0.44	0.46	0.47	0.47	0.44	0.53
4	0.04	0.09	0.08	0.13	0.15	0.17	0.20	0.19	0.25	0.29	0.30	0.32	0.33	0.36	0.40	0.38	0.42	0.44	0.46	0.47	0.49	0.46	0.48
5	0.03	0.10	0.11	0.11	0.13	0.15	0.20	0.22	0.27	0.27	0.30	0.32	0.34	0.36	0.39	0.38	0.41	0.44	0.45	0.48	0.50	0.52	0.53
6	0.03	0.09	0.12	0.10	0.15	0.15	0.20	0.19	0.22	0.27	0.27	0.31	0.34	0.33	0.39	0.37	0.42	0.46	0.45	0.46	0.50	0.47	0.52
7	0.05	0.08	0.08	0.12	0.13	0.14	0.20	0.21	0.23	0.28	0.33	0.33	0.35	0.38	0.39	0.40	0.42	0.44	0.47	0.46	0.45	0.51	0.51
8	0.04	0.10	0.08	0.12	0.12	0.17	0.15	0.21	0.22	0.27	0.28	0.31	0.34	0.37	0.38	0.42	0.41	0.44	0.45	0.49	0.50	0.53	0.53
9	0.03	0.10	0.08	0.10	0.12	0.15	0.20	0.20	0.23	0.27	0.32	0.31	0.34	0.27	0.37	0.39	0.42	0.43	0.49	0.47	0.48	0.50	0.54
10	0.03	0.10	0.07	0.12	0.11	0.18	0.19	0.21	0.21	0.29	0.32	0.31	0.35	0.36	0.40	0.38	0.40	0.44	0.47	0.48	0.48	0.52	0.54
Avg.	0.04	0.09	0.09	0.11	0.13	0.16	0.19	0.20	0.24	0.26	0.30	0.31	0.33	0.35	0.39	0.39	0.42	0.44	0.46	0.47	0.48	0.49	0.53
S.D.	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02

ตาราง ก-12 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 4 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 3

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																							
	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.05	0.05	0.07	0.09	0.08	0.08	0.16	0.14	0.15	0.15	0.20	0.20	0.30	0.24	0.29	0.25	0.28	0.30	0.34	0.27	0.37	0.32	0.37
2	0.04	0.05	0.06	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	0.20	0.16	0.23	0.24	0.28	0.27	0.28	0.32	0.33	0.31	0.31	0.37	0.37
3	0.04	0.04	0.04	0.09	0.11	0.11	0.14	0.15	0.16	0.14	0.18	0.22	0.23	0.25	0.27	0.27	0.30	0.33	0.32	0.33	0.33	0.32	0.38
4	0.04	0.06	0.04	0.10	0.11	0.10	0.15	0.14	0.16	0.19	0.20	0.23	0.24	0.25	0.27	0.27	0.30	0.33	0.33	0.34	0.34	0.33	0.34
5	0.03	0.07	0.07	0.07	0.09	0.11	0.16	0.16	0.17	0.18	0.30	0.21	0.23	0.26	0.28	0.27	0.30	0.30	0.32	0.33	0.35	0.37	0.38
6	0.04	0.07	0.08	0.08	0.11	0.10	0.15	0.14	0.15	0.18	0.21	0.21	0.23	0.24	0.27	0.28	0.30	0.31	0.31	0.32	0.37	0.35	0.36
7	0.04	0.05	0.06	0.09	0.08	0.11	0.14	0.14	0.17	0.18	0.21	0.22	0.23	0.26	0.28	0.29	0.30	0.32	0.34	0.33	0.32	0.34	0.36
8	0.04	0.07	0.07	0.09	0.08	0.11	0.10	0.15	0.15	0.18	0.18	0.23	0.23	0.26	0.28	0.29	0.32	0.32	0.31	0.34	0.35	0.47	0.38
9	0.03	0.06	0.07	0.09	0.08	0.11	0.12	0.15	0.16	0.18	0.21	0.22	0.22	0.19	0.26	0.28	0.30	0.31	0.32	0.35	0.35	0.36	0.38
10	0.02	0.06	0.05	0.10	0.07	0.13	0.13	0.14	0.14	0.20	0.21	0.21	0.24	0.25	0.28	0.26	0.26	0.31	0.32	0.35	0.35	0.36	0.38
Avg.	0.04	0.06	0.06	0.09	0.09	0.11	0.14	0.15	0.16	0.18	0.21	0.21	0.24	0.24	0.28	0.27	0.29	0.32	0.32	0.33	0.34	0.36	0.37
S.D.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.01

ตาราง ก-13 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 1 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 4

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge [มม.]																							
	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
2	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
3	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
4	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
5	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
6	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
7	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
8	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.20	0.02	0.02	0.02
9	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
10	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Avg.	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02
S.D.	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก-14 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 2 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 4

ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																							
	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.60
2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.60
3	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.60
4	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.51
5	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
6	0.00	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
7	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
8	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
9	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60
Avg.	0.09	0.10	0.10	0.10	0.19	0.19	0.20	0.22	0.30	0.30	0.30	0.33	0.40	0.40	0.40	0.40	0.41	0.40	0.47	0.50	0.50	0.50	0.58
S.D.	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.04

ตาราง ก-15 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 3 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 4

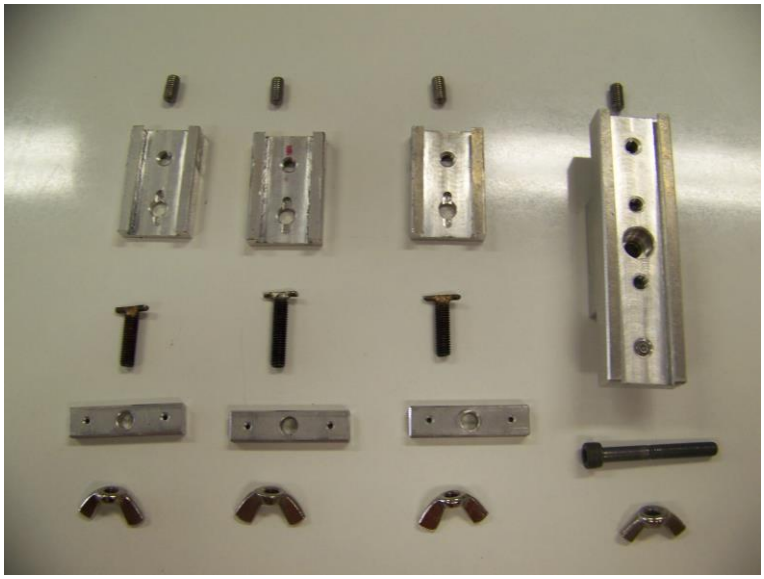
ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																							
	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.07	0.10	0.09	0.11	0.13	0.16	0.18	0.21	0.25	0.26	0.28	0.33	0.33	0.33	0.36	0.36	0.40	0.43	0.41	0.47	0.47	0.48	0.53
2	0.03	0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.23	0.23	0.26	0.29	0.34	0.34	0.34	0.36	0.35	0.40	0.42	0.44	0.48	0.48	0.51	0.52
3	0.05	0.09	0.09	0.11	0.13	0.16	0.18	0.18	0.23	0.27	0.30	0.34	0.35	0.35	0.36	0.36	0.40	0.43	0.44	0.48	0.47	0.52	0.55
4	0.05	0.09	0.09	0.13	0.15	0.17	0.18	0.20	0.23	0.27	0.29	0.31	0.33	0.34	0.36	0.37	0.40	0.43	0.42	0.47	0.48	0.52	0.51
5	0.05	0.08	0.09	0.14	0.14	0.14	0.18	0.21	0.24	0.27	0.29	0.32	0.34	0.35	0.36	0.37	0.40	0.43	0.44	0.48	0.47	0.52	0.54
6	0.04	0.09	0.09	0.11	0.14	0.14	0.18	0.20	0.25	0.27	0.28	0.31	0.34	0.35	0.36	0.36	0.39	0.43	0.42	0.47	0.47	0.52	0.51
7	0.05	0.10	0.07	0.12	0.14	0.17	0.18	0.19	0.24	0.27	0.30	0.32	0.34	0.34	0.34	0.37	0.39	0.42	0.43	0.48	0.48	0.52	0.51
8	0.05	0.09	0.08	0.12	0.14	0.18	0.18	0.19	0.24	0.27	0.30	0.32	0.34	0.35	0.35	0.37	0.39	0.43	0.46	0.48	0.48	0.52	0.53
9	0.05	0.09	0.09	0.13	0.14	0.18	0.18	0.20	0.24	0.27	0.30	0.32	0.34	0.35	0.35	0.39	0.39	0.43	0.42	0.47	0.48	0.51	0.53
10	0.04	0.10	0.09	0.12	0.14	0.15	0.18	0.20	0.23	0.26	0.30	0.32	0.35	0.34	0.35	0.37	0.39	0.42	0.46	0.48	0.48	0.51	0.52
Avg.	0.05	0.09	0.09	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.24	0.27	0.29	0.32	0.34	0.34	0.36	0.37	0.40	0.43	0.43	0.48	0.48	0.51	0.53
S.D.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01

ตาราง ก-16 ค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นชุดที่ 4 ที่ปรับระยะห่างตามแบบที่ 4

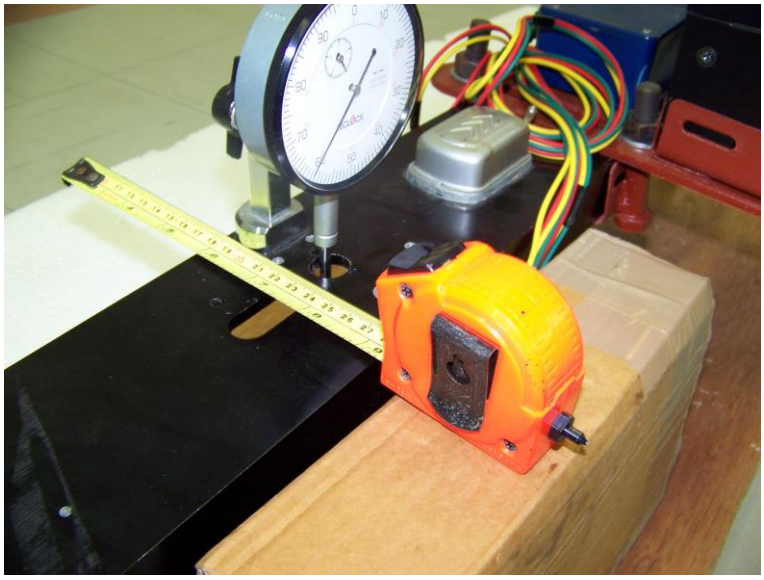
ครั้งที่	ขนาดของแผ่น Feeler Gauge																							
	0.051	0.063	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584	0.610
1	0.07	0.10	0.07	0.09	0.12	0.15	0.15	0.19	0.21	0.23	0.26	0.31	0.31	0.30	0.32	0.34	0.38	0.39	0.38	0.44	0.44	0.44	0.48
2	0.02	0.07	0.09	0.11	0.13	0.13	0.16	0.21	0.20	0.23	0.27	0.32	0.32	0.30	0.33	0.34	0.37	0.38	0.40	0.45	0.44	0.47	0.51
3	0.05	0.08	0.09	0.09	0.12	0.14	0.16	0.17	0.21	0.23	0.29	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33	0.38	0.39	0.39	0.45	0.45	0.47	0.51
4	0.05	0.08	0.09	0.11	0.13	0.13	0.16	0.18	0.20	0.23	0.28	0.29	0.32	0.31	0.33	0.35	0.38	0.40	0.40	0.45	0.45	0.47	0.48
5	0.05	0.07	0.09	0.13	0.13	0.12	0.16	0.20	0.21	0.23	0.28	0.31	0.32	0.31	0.33	0.35	0.38	0.40	0.41	0.45	0.45	0.47	0.50
6	0.03	0.08	0.07	0.09	0.12	0.16	0.16	0.18	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.32	0.33	0.35	0.37	0.40	0.38	0.45	0.45	0.47	0.47
7	0.04	0.09	0.06	0.09	0.13	0.15	0.15	0.16	0.21	0.24	0.28	0.31	0.32	0.31	0.32	0.35	0.38	0.39	0.40	0.42	0.45	0.47	0.49
8	0.05	0.08	0.06	0.10	0.13	0.16	0.16	0.17	0.21	0.23	0.28	0.29	0.32	0.32	0.32	0.36	0.38	0.40	0.42	0.42	0.45	0.47	0.49
9	0.05	0.08	0.08	0.12	0.13	0.16	0.16	0.18	0.21	0.23	0.38	0.30	0.32	0.32	0.32	0.36	0.38	0.39	0.39	0.42	0.45	0.47	0.49
10	0.03	0.09	0.07	0.10	0.13	0.13	0.16	0.18	0.21	0.23	0.27	0.30	0.33	0.31	0.32	0.35	0.38	0.39	0.41	0.42	0.46	0.47	0.49
Avg.	0.04	0.08	0.08	0.10	0.13	0.14	0.16	0.18	0.21	0.23	0.28	0.30	0.32	0.31	0.33	0.35	0.38	0.39	0.40	0.44	0.45	0.47	0.49
S.D.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

ภาคผนวก ข

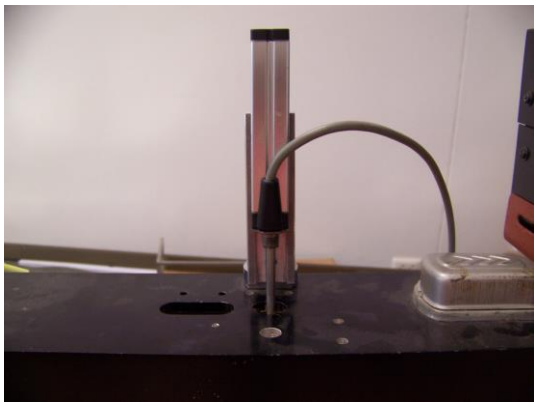
รูป ข-1 ชุดรางเลื่อนสำหรับยึดจับอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว



รูป ข-2 ชุดยึดจับอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว



รูป ข-3 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว



รูป ข-4 เปรียบเทียบตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวแทนนาฬิกาวัด

รูป ข-5 การติดตั้งอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์

รูป ข-6 ส่วนประกอบภายในของกล่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์

รูป ข-7 การสร้างโครงเครื่องมือต้นแบบ

รูป ข-8 ลักษณะโครงเครื่องมือต้นแบบก่อนตกแต่งผ่นสี

รูป ข-9 โครงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมที่สร้างแล้วเสร็จ

รูป ข-10 การสอบเทียบความละเอียดและถูกต้องของอุปกรณ์ส่วนควบต้นแบบในห้องปฏิบัติการ

รูป ข-11 การทดสอบนำเครื่องมือไปใช้ในสนาม

รูป ข-12 การปรับและตั้งค่าเครื่องมือขณะทดสอบในสนาม

ภาคผนวก ค

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล ดร. พุทธพล ทองอินทร์ดำ

   ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Dr.-Ing. Puttapon Thongindam

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 5099 00417 23 2

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

   ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ธัญบุรี

   โทรศัพท์: 02-549-3410

   โทรสาร: 02-549-3412

   E-mail: th.puttapon@googlemail.com

5. ประวัติการศึกษา

มี.ค. 2548 - ส.ค. 2552	Doctor of Engineering (Dr.-Ing.) Faculty of Engineering, University of Hannover, Hannover, Germany
ต.ค. 2545 - ก.พ. 2548	M.Sc. for Geotechniques and Infrastructure Faculty of Engineering, University of Hannover, Hannover, Germany
มิ.ย. 2539 - มี.ค. 2542	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วศ.บ. โยธา) มทร.ธัญบุรี (เดิม: ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล) จ.ปทุมธานี
มิ.ย. 2536 - มี.ค. 2539	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงช่างสำรวจ มทร. ล้านนา (เดิม: สถาบันเทคโนโลยีวิทยาเขตภาคพายัพ) จ.เชียงใหม่

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ:

   วิศวกรรมผิวทาง (Pavement engineering)

   วิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnique Engineering)

   วิศวกรรมการจราจร (Transportation Engineering)

   วิศวกรรมระบบราง (Railway system engineering)

7. ผลงานวิจัยที่เผยแพร่:

   1. จักรพงษ์ นามหาไชย และ พุทธพล ทองอินทร์คำ: *การเลือกชุดพารามิเตอร์สำหรับระเบียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Selection of Genetic Algorithm Parameters for Backcalculation of Layer Moduli of Asphalt Concrete Pavement)*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, จ.ขอนแก่น, 2014
   2. จตุพล สายัณหวัฒน์ และ พุทธพล ทองอินทร์คำ: *การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสองชั้นภายใต้แรงแผ่นดินไหวในพื้นที่แอ่งกรุงเทพ (Performance Evaluation of a Two Story Reinforced Concrete Structure under Earthquakes in the Basin Area of Bangkok)*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, จ.ขอนแก่น, 2014
   3. พุทธพล ทองอินทร์คำ. "วิศวกรรมงานทางแบบบูรณาการในการประเมินสภาพถนนลาดยางไทยแบบมีชีวิต" วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ปีที่ 14 ฉบับที่ 1, ISSN 1513-4652, 2013
   4. พุทธพล ทองอินทร์คำ: *เอกสารประกอบการสอนวิชา "การสำรวจ (Surveying)"* , ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2013
   5. พุทธพล ทองอินทร์คำ : *ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของความหนาชั้นทางต่อค่าการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางของโครงสร้างผิวทางคอนกรีต (Impact of Layer Thickness Errors on Evaluation of Layer Moduli of Concrete Pavement Structure)*. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 9, จ.พิษณุโลก, 2013

6. พุทธพล ทองอินทร์คำ และ นิรชร นกแก้ว: *การศึกษาพัฒนาระบบตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางในท้องถิ่น*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, จ.เชียงใหม่, 2013
7. จตุพล สายัณหวัฒน์ และ พุทธพล ทองอินทร์คำ: *ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเหล็กถ่ายน้ำหนักกับโพรงใต้ผิวทางแผ่นพื้นคอนกรีตของท่าอากาศยาน*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, จ.เชียงใหม่, 2013
8. ภูชิต โพนทัน, พุทธพล ทองอินทร์คำ, รัฐวุฒิ รู้แทนคุณ; *ความล่าช้าในงานก่อสร้างของโครงการติดตั้งระบบควบคุมการผ่านเข้า-ออก ประตูตรวจสอบอัตโนมัติ: กรณีศึกษาท่าเรือกรุงเทพ*, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 หน้า 59-71, 2012, ISSN 1685-5280
9. Thongindam, P.: *Alternative for Pavement Model in Backcalculation Process*. The 5thPSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011), Phuket, Thailand, 2011
10. พุทธพล ทองอินทร์คำ และ นิรชร นกแก้ว: "*การพัฒนาระบบตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางในท้องถิ่นโดยวิธีตรง,* โดยงบประมาณแผ่นดิน, 2011
11. พุทธพล ทองอินทร์คำ: *วิศวกรรมงานทางแบบบูรณาการในการประเมินสภาพถนนลาดยางไทยแบบมีชีวิต*, การประกวดบทความวิชาการด้านวิศวกรรมขนส่งและการจราจร, สมาคมทางหลวงแห่งประเทศไทย, 2010
12. ภานุมาศ แก้วตา, พุทธพล ทองอินทร์คำ, กองกูณฑ์ โตชัยวัฒน์: *ปัญหาการทิ้งงานในโครงการภาครัฐที่จัดจ้างด้วยวิธีการสอบราคาก่อนและหลังมาตรการช่วยเหลือผู้ประกอบอาชีพงานก่อสร้าง: กรณีศึกษา มติคณะรัฐมนตรี วันที่ 17 มิถุนายน 2551*, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, ปีที่ 7 ฉบับที่ 1-2 หน้า 78-87, 2009, ISSN 1685-5280
13. Thongindam, P.: *Enhancement of Backcalculation Techniques for Assessing Flexible Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms*, Doctoral Dissertation, Faculty of Engineering, Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hannover, 2009
14. Thongindam, P.: *Proposed Method for Determining Depth to Bedrock from FWD data*, Research Report, Pavement of Engineering Section, Leibniz University of Hannover, Germany, 2007

15. Thongindam, P.: *The Crisis of Thai Roads and Highways*, Fachkolloquium der wissenschaftlichen Mitarbeiter auf dem Gebiet des Straßenwesens, Leibniz University of Hannover, Germany, 2007
16. Thongindam, P.: *Bestimmung von Wirkungsparametern fuer ein Mikroskopisches Simulationsprogramm*, Wissenschaftliche Arbeit (M.Sc. Abschluss), Institut fuer Verkehrswirtschaft, Strassenwesen und Staedtebau (IVH), Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hannover, Gemany, 2005

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายจักรกฤษ อ่อนชื่นจิตร

   ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Jakkrit Onshaunjit

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 8415 00401 60 6

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 7

4. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก

   ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

   มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่ 39 มู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก

   ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

   โทร. 0 2549 3633 โทรสาร 0 2549 3422

   E-mail : jakraj@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

   พ.ศ. 2539 วศ.ม. (ไฟฟ้า (อิเล็คทรอนิกส์)) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

   พ.ศ. 2534 วศ.บ. (ไฟฟ้า (อิเล็คทรอนิกส์)) ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

   6.1 อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม

   6.2 การประมวลผลภาพดิจิตอล

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

   7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : -

   7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : -

   7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :

- J. Onshaunjit and J. Srinonchat, "LSP Trajectory Analysis for Speech Recognition", 2008 Fifth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGiV'08), 26 - 28 August 2008, Penang, Malaysia, 2008, pp. 276-279.
- J. Onshaunjit and J. Srinonchat, "Design LSP Trajectory Model for Speech Recognition", International Conference on Computer Science and Information Technology 2008 (ICCSIT 2008), 29 August - 2 September 2008, Singapore, 2008, pp. 208-211.
- จักรกฤษ อ่อนชื่นจิตร, สุวรรณ รื่นสุคนธ์ และ จักรี ศรีนนท์ฉัตร, "การวิเคราะห์แนวทางเดินเสียงในรูปแบบของสัมประสิทธิ์คู่เส้นสเปกตรัม", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), 29 - 31 ตุลาคม 2551, นครนายก, 2551, หน้า 1133-1136.