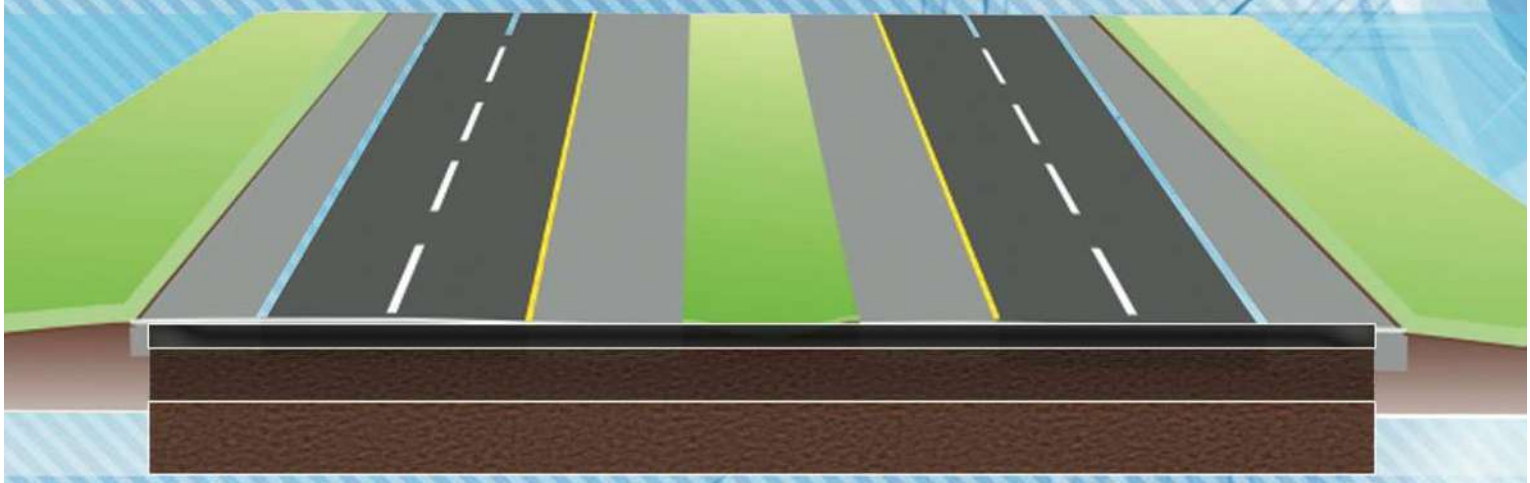
สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง
กรมทางหลวง

รายงานขั้นสุดท้าย

โครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวง



คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ปัจจุบันกรมทางหลวงยังขาดข้อมูลเชิงประจักษ์ด้านพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนน (Pavement Response) อันเกิดจากแรงกระทำของน้ำหนักรถบรรทุกและปัจจัยภายนอกต่างๆ รวมทั้งข้อมูลด้านสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance) ภายใต้สภาพการใช้งาน เงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการต่อเนื่องในปีที่ 2 เพื่อพัฒนาต่อยอดผลการศึกษาวิจัยในปีที่ 1 ประกอบด้วย 1) การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง 2) การติดตาม เก็บบันทึก และประเมินผลข้อมูลการตอบสนองของโครงสร้างถนนต่อเนื่องในระยะยาว (Long-term Performance Monitoring) และ 3) การติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนและระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มมิติด้านพื้นที่ ด้านระยะเวลาการตรวจวัด และด้านข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพ เพื่อใช้สนับสนุนการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนน และปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง ให้เป็นปัจจุบัน มีความน่าเชื่อถือ และนำไปใช้ออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะทางหลวงได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม

คณะที่ปรึกษาขอขอบพระคุณ สำนักควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ แขวงทางหลวงนครปฐม แขวงทางหลวงราชบุรี แขวงทางหลวงชัยนาท โครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 81 สายบางใหญ่-กาญจนบุรี ตอนที่ 9 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง ที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการก่อสร้างแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการกำกับโครงการและคณะทำงาน ที่ให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งตลอดจนช่วยเหลือในด้านต่างๆอย่างดีเสมอมา ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะที่ปรึกษา
กันยายน 2561

รายชื่อคณะที่ปรึกษา

1. ผศ.ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี	ผู้จัดการโครงการ
2. รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมปฐพี
3. ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมปฐพี
4. รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมงานทาง
5. ผศ.ดร.ดุสิต ธนเพทาย	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
6. อาจารย์ณรงค์ฤทธิ์ ว่องไว	บุคลากรสนับสนุน
7. อาจารย์วิทยา ศรีสมบูรณ์	บุคลากรสนับสนุน
8. นายทรงธรรม ประวัติโยธิน	บุคลากรสนับสนุน
9. นายนรเทพ ฟุ้งลัดดา	บุคลากรสนับสนุน
10. นายนันทพงษ์ พืชผล	บุคลากรสนับสนุน

สารบัญ

หน้า

สารบัญ i

สารบัญรูป iv

หน้า iv

สารบัญตาราง xxi

1. บทนำ 1-1

1.1 ความเป็นมาของโครงการ 1-1
1.2 วัตถุประสงค์ 1-1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 1-1

2. ขอบเขตของงาน 2-1

2.1 งานทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง 2-1
2.2 งานสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด 2-1
2.3 งานติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสาย สัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล 2-7
2.4 งานติดตั้งและทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม 2-8
2.5 งานติดตามและประเมินผลสมรรถนะทางหลวง (Highway Performance Monitoring) 2-9
2.6 งานพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance Model) 2-10
2.7 งานจัดทำคู่มือและแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลอง 2-10
2.8 งานฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้ 2-10

3. การบริหารโครงการ 3-1

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน 3-1
3.2 แผนงานและผลการดำเนินงาน 3-2
3.3 ความสอดคล้องกับข้อกำหนดการว่าจ้างที่ปรึกษา 3-4
3.4 กำหนดการรายงานผลการศึกษา 3-5

4. การทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง 4-1

4.1 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดแปลงโครงสร้างถนนลาดยางในระยะที่หนึ่ง 4-1
4.2 ข้อควรปฏิบัติ ข้อควรระวัง ประเด็นปัญหาและอุปสรรคในการทำงานระยะที่หนึ่ง 4-38
4.3 ข้อมูลการตรวจวัดพฤติกรรมการตอบสนองโครงสร้างถนนลาดยางในระยะที่หนึ่ง 4-41
4.4 ข้อมูลคุณสมบัติและผลงานการติดตั้งของเครื่องมือตรวจวัดในระยะที่หนึ่ง 4-55
4.5 การวิเคราะห์หน่วยแรงในโครงสร้างถนนลาดยาง 4-57
4.6 การวิเคราะห์โดยพิจารณาวัสดุเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous Material) 4-59
4.7 การวิเคราะห์โดยพิจารณาวัสดุเป็นชั้นๆ (Layered Systems) 4-62

4.8 การวิเคราะห์หน่วยแรงด้วยวิธี Finite Element 4-66
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนนกับปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง 4-67
4.10 แนวทางการออกแบบชั้นโครงสร้างถนนลาดยางในปัจจุบัน 4-71
4.11 การวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุก 4-72
4.12 การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF ของรถบรรทุกกับน้ำหนักลงกลุ่มเพลาต่างๆ 4-76
4.13 การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง 4-77

5. การสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด 5-1

5.1 แนวทางการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน 5-1
5.2 รวบรวมข้อมูลแปงตรวจวัด 5-3
5.3 การบูรณาการข้อมูลจากสถานีตรวจสอบน้ำหนัก 5-9
5.4 การจัดทำแบบแปลนการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน 5-11
5.5 การจัดทำแผนผังงานวางระบบและขั้นตอนการติดตั้ง 5-13

6. การติดตั้งและทดสอบเครื่องมือตรวจวัด 6-1

6.1 การจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จะดำเนินการติดตั้ง 6-1
6.2 ขั้นตอนและแผนการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัด 6-5
6.3 การติดตั้งและทดสอบเครื่องมือตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 6-12
6.4 ข้อมูลผลการทดสอบวัสดุก่อสร้างสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 6-55

7. การติดตั้งระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามโครงสร้างถนนลาดยาง 7-1

7.1 การติดตั้งโครงสร้างและตู้อุปกรณ์ควบคุมในภาคสนาม 7-1
7.2 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้อุปกรณ์ 7-2
7.3 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) 7-4
7.4 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV) และอุปกรณ์บันทึกภาพ 7-4
7.5 การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าและเครือข่าย 7-5

8. การติดตามและประเมินผลสมรรถนะทางหลวง (Highway Performance Monitoring) 8-1

8.1 หน้าเข้าสู่ระบบ 8-1
8.2 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) 8-1
8.3 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) และ ความชื้น (Moisture Content) 8-7
8.4 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเค้น (Stress) 8-10
8.5 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเครียด (Strain) 8-14
8.6 การส่งออกข้อมูล (Export Data) ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) 8-18
8.7 การส่งออกข้อมูล (Export Data) อุณหภูมิ (Temperature) และ ความชื้น (Moisture Content) 8-19
8.8 รายงานสรุป (Report) 8-19
8.9 แผนที่ (Map) 8-20
8.10 ระบบรักษาความปลอดภัยโดยใช้รหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password) 8-22

8.11 ระบบบริหารบัญชีผู้ใช้งาน (User Account Management) 8-22

9. การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance Model) 9-1

9.1 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนนกับทฤษฎีหรือโปรแกรม 9-1
9.2 การวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลาย (Load Equivalency Factor, LEF) 9-33
9.3 การปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง 9-47

10. การจัดทำรายงานละถ่ายทอดความรู้..... 10-1

10.1 คู่มือการใช้งานและดูแลรักษาระบบ..... 10-1
10.2 รายงานการศึกษาพัฒนาแบบจำลอง..... 10-1
10.3 การฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้..... 10-2

11. บทสรุป 11-1

12. ผลผลิต ผลลัพธ์ และผลกระทบของโครงการ 12-1

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section A) 2-3
รูปที่ 2.2 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section B) 2-4
รูปที่ 2.3 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section C) 2-5
รูปที่ 2.4 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section D) 2-6
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ 3-1
รูปที่ 3.2 แผนการดำเนินงานโครงการ (Work Plan).....3-3
รูปที่ 4.1 ประชุมร่วมกับแขวงทางหลวงราชบุรี หมวดการทางโพธาราม และตำรวจทางหลวง.....4-2
รูปที่ 4.2 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้งสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 4-3
รูปที่ 4.3 การปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....4-3
รูปที่ 4.4 การติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืน.....4-4
รูปที่ 4.5 การติดตั้งป้ายจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 4-4
รูปที่ 4.6 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 4-5
รูปที่ 4.7 การขุดรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางช่องจราจรที่ 1.....4-6
รูปที่ 4.8 การขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางจนถึงชั้น Subgrade.....4-6
รูปที่ 4.9 การบดอัดชั้น Subgrade 4-7
รูปที่ 4.10 การตรวจสอบระดับชั้น Subgrade.....4-7
รูปที่ 4.11 การทดสอบความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Field Desity Test) ในชั้น Subgrade.....4-8
รูปที่ 4.12 การตรวจสอบค่าการบดอัดด้วยเครื่อง Nuclear Density Gage ในชั้น Subgrade.....4-8
รูปที่ 4.13 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น subgrade ในระยะที่หนึ่ง..... 4-10
รูปที่ 4.14 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Subgrade..... 4-11
รูปที่ 4.15 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subgrade..... 4-12
รูปที่ 4.16 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น Subgrade 4-13
รูปที่ 4.17 การเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 24 ตัว ในชั้น Subgrade ลงท่อ PE..... 4-14
รูปที่ 4.18 การฝังกลบชั้น Subbase, Selected Material จนถึงชั้น Subbase..... 4-15
รูปที่ 4.19 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Subbase ในระยะที่หนึ่ง..... 4-16
รูปที่ 4.20 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Subbase 4-17
รูปที่ 4.21 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subbase 4-18

รูปที่ 4.22 การเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในชั้น Subbase ลงท่อ PE 4-19
รูปที่ 4.23 การฝังกลบชั้น Subbase จนถึงชั้น Middlebase 4-20
รูปที่ 4.24 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Under AC Surface ในระยะที่หนึ่ง 4-21
รูปที่ 4.25 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น Middlebase 4-22
รูปที่ 4.26 การเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในชั้น Middlebase ลงท่อ PE 4-23
รูปที่ 4.27 การฝังกลบชั้น Middlebase จนถึงชั้น Under AC Surface 4-24
รูปที่ 4.28 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในชั้น Under AC Suface 4-25
รูปที่ 4.29 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในชั้น Under AC Suface 4-26
รูปที่ 4.30 การเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในชั้น Under AC Surface ลงท่อ PE 4-27
รูปที่ 4.31 การเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในชั้น Under AC Surface ลงท่อ PE 4-27
รูปที่ 4.32 ชั้น Prime Coat 4-28
รูปที่ 4.33 ชั้น Asphalt Concrete Binder Course 4-28
รูปที่ 4.34 ชั้น Tack Coat 4-29
รูปที่ 4.35 ชั้น Asphalt Concrete Wearing Course 4-29
รูปที่ 4.36 ขุดหลุมเจาะ ลึกขนาด 15 เมตร จำนวน 2 จุด 4-30
รูปที่ 4.37 เทพื้นคอนกรีตบริเวณรอบหลุมเจาะและติดตั้งเสาเหล็กกั้นบริเวณ จำนวน 2 จุด 4-30
รูปที่ 4.38 ติดตั้งรั้วตาข่ายพร้อมโครงหลังคาเมทัลชีทและตู้ควบคุม 4-31
รูปที่ 4.39 บ่อพักสายสัญญาณ 4-32
รูปที่ 4.40 การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 4-33
รูปที่ 4.41 การเชื่อมต่อระบบเครือข่ายความเร็วสูงจากผู้ให้บริการ (Internet Service Provider : ISP) .. 4-34
รูปที่ 4.42 อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) 4-34
รูปที่ 4.43 อุปกรณ์ UPS สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 4-35
รูปที่ 4.44 การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) 4-35
รูปที่ 4.45 ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลจาก Data Logger 4-36
รูปที่ 4.46 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV) 4-37
รูปที่ 4.47 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) 4-37
รูปที่ 4.48 ปัญหาจราจรติดขัดระหว่างการทำงานในระยะที่หนึ่ง 4-38
รูปที่ 4.49 ปัญหาฝนตกระหว่างการทำงานในระยะที่หนึ่ง 4-39

รูปที่ 4.50 ปัญหาแนวท่อสาธารณูปโภคใต้ดิน 4-40
รูปที่ 4.51 ปัญหาความลาดเอียงของท่อร้อยสายสัญญาณ 4-41
รูปที่ 4.52 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ แปลงโครงสร้างถนนลาดยางในระยะที่หนึ่ง 4-42
รูปที่ 4.53 การเปลี่ยนแปลงความเค้น (Induced stress) ที่ Subgrade (SG) และ Subbase (SB) ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำหยุดนิ่ง (ตำแหน่ง 2 คือเพลาหลัง และตำแหน่ง 4 คือเพลาหน้า ตำแหน่ง L คือล้อซ้าย และตำแหน่ง C คือกลางช่องจราจร) สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 5.5 ตัน หยุดนิ่ง 4-44
รูปที่ 4.54 การเปลี่ยนแปลงความเครียด (Induced strain) ที่ Subgrade (SG) Subbase (SB) และ Asphaltic concrete (AC) surface ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำหยุดนิ่ง (ตำแหน่ง 2 คือเพลาหลัง และตำแหน่ง 4 คือเพลาหน้า ตำแหน่ง L คือล้อซ้าย และตำแหน่ง C คือกลางช่องจราจร) สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 5.5 ตัน หยุดนิ่ง 4-45
รูปที่ 4.55 ค่าความเค้น (Stress) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง 4-46
รูปที่ 4.56 ค่าความเค้น (Stress) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) และกึ่งกลาง สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง 4-47
รูปที่ 4.57 ค่าความเครียด (Strain) ที่ Subgrade ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง 4-48
รูปที่ 4.58 ค่าความเครียด (Strain) ที่ Subbase ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง 4-49
รูปที่ 4.59 ค่าความเครียด (Strain) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) และกึ่งกลาง ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) สำหรับชั้น Asphaltic Concrete กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง 4-50
รูปที่ 4.60 ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร เหนือชั้น Subgrade และ Subbase 4-51
รูปที่ 4.61 ค่าความเค้น เหนือชั้น Subgrade และ Subbase บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร 4-51
รูปที่ 4.62 ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา เหนือชั้น Subgrade และ Subbase 4-51
รูปที่ 4.63 ค่าความเครียด บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา ชั้น Subgrade 4-52
รูปที่ 4.64 ค่าความเครียด ชั้น Asphaltic concrete (AC) surface บริเวณ ล้อซ้าย ในทิศการจราจร (Longitudinal-X) ทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) 4-52
รูปที่ 4.65 ค่าความเค้น ชั้น Subgrade และ Subbase ที่ความเร็วรถต่างๆ 4-53
รูปที่ 4.66 ค่าความเครียด ชั้น Subgrade และ Subbase ที่ความเร็วรถต่างๆ 4-54
รูปที่ 4.67 ค่าความเครียด ชั้น AC ที่ความเร็วรถต่างๆ 4-54
รูปที่ 4.68 ตำแหน่งของ Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material . 4-57
รูปที่ 4.69 ตำแหน่งของ Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Bound Material 4-59
รูปที่ 4.70 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน z ที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954) 4-61

รูปที่ 4.71 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954)..... 4-61
รูปที่ 4.72 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นแนวสัมผัสวงกลมที่ระดับความลึกต่างๆโดย Foster and Ahlvin (1954).. 4-61
รูปที่ 4.73 กราฟแสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954)... 4-62
รูปที่ 4.74 ลักษณะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์แบบชั้นทาง 3 ชั้น..... 4-62
รูปที่ 4.75 ตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างทางโดยวิธี Finite element..... 4-66
รูปที่ 4.76 ผลการวิเคราะห์ความเค้นความเครียดของโครงสร้างทางโดยวิธี Finite element โดยโปรแกรม SIGMA/W..... 4-67
รูปที่ 4.77 การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสและปริมาณความชื้นในชั้น subgrade ต่อการเปลี่ยนแปลงฤดูกาล 4-68
รูปที่ 4.78 อัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางภายหลังการก่อสร้างหรือบูรณะทางหลวง..... 4-68
รูปที่ 4.79 ตัวอย่างโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model)..... 4-69
รูปที่ 4.80 ประเภทของโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model)..... 4-69
รูปที่ 4.81 รายการข้อมูลสำหรับใช้ในการพัฒนาโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model)..... 4-70
รูปที่ 4.82 ตัวอย่างการปรับแก้โมเดล (Model Updating) เมื่อมีข้อมูลเพิ่มขึ้น..... 4-70
รูปที่ 4.83 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความหนาชั้นโครงสร้างลาดยางด้วยวิธี Analytical Method..... 4-71
รูปที่ 4.84 ผลการวิเคราะห์จำนวนเที่ยวของน้ำหนักเพลามาตรฐานที่ยอมให้..... 4-73
รูปที่ 4.85 ตัวอย่างการหาความหนาชั้นทางที่เหมาะสม..... 4-74
รูปที่ 4.86 การเปรียบเทียบค่า Rutting จากข้อมูลที่ตรวจวัดจริงในสนามกับแบบจำลองการคาดการณ์ประสิทธิภาพทางหลวง..... 4-74
รูปที่ 4.87 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่า LEF ที่คำนวณได้จากวิธีต่างๆบนถนนสาย DK46 ประเทศโปแลนด์ สำหรับ a) flexible pavements และ b) semi-rigid pavements..... 4-76
รูปที่ 4.88 การเปรียบเทียบค่า LEF ที่วิเคราะห์ได้กับค่าของ AASHTO..... 4-77
รูปที่ 4.89 อัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางภายหลังการก่อสร้างหรือบูรณะทางหลวง..... 4-77
รูปที่ 4.90 ตัวอย่างแสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของถนน..... 4-78
รูปที่ 5.1 ภาพรวมการติดตั้งและเชื่อมโยงอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บข้อมูลจากระบบเครื่องมือตรวจวัด.....5-3
รูปที่ 5.2 ข้อมูลรายละเอียดตอนควบคุมสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า).....5-4
รูปที่ 5.3 ข้อมูลผิวทางสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า).....5-5
รูปที่ 5.4 ข้อมูลโครงสร้างและกายภาพสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า).....5-5
รูปที่ 5.5 แผนที่ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า).....5-6
รูปที่ 5.6 บริเวณด้านหน้าสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า).....5-6
รูปที่ 5.7 บริเวณเครื่องชั่ง WIM ก่อนถึงสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า).....5-7

รูปที่ 5.8 บริเวณแปลงโครงสร้างถนนลาดยางก่อนถึงบริเวณเครื่องชั่ง WIM สรรพยา (ขาเข้า) 5-7
รูปที่ 5.9 รูปแบบโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยาง 5-8
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงปริมาณของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) (ปี 2560 – 2561) 5-10
รูปที่ 5.11 กราฟแสดง Total ESAL ของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) (ปี 2560 – 2561) 5-10
รูปที่ 5.12 แบบแปลนตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) 5-12
รูปที่ 5.13 สัญลักษณ์เครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนลาดยาง 5-13
รูปที่ 5.14 แบบแปลนภาพรวมการติดตั้งแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง 5-14
รูปที่ 5.15 รูปตัด A ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง 5-15
รูปที่ 5.16 รูปตัด B ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง 5-16
รูปที่ 5.17 รูปตัด C ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง 5-17
รูปที่ 5.18 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระหว่างกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC 5-18
รูปที่ 5.19 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับใต้ชั้นผิวทาง AC 5-19
รูปที่ 5.20 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับกึ่งกลางชั้น Base 5-20
รูปที่ 5.21 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับใต้ชั้น Base 5-21
รูปที่ 5.22 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางชั้น Subgrade 5-22
รูปที่ 5.23 แบบขยายอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามภายในตู้จัดเก็บอุปกรณ์ภาคสนาม 5-23
รูปที่ 5.24 แผนผังงานวางระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบสำรองไฟฟ้า 5-24
รูปที่ 6.1 ขั้นตอนติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 6-5
รูปที่ 6.1 ขั้นตอนติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (ต่อ).....6-6
รูปที่ 6.2 แนวทางการบริหารจัดการจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....6-9
รูปที่ 6.3 ประชุมร่วมกับแขวงทางหลวงชัยนาท 6-12
รูปที่ 6.4 แบบป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้ง 6-13
รูปที่ 6.5 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้งสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 6-14
รูปที่ 6.6 การปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง..... 6-14
รูปที่ 6.7 การติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืน 6-15
รูปที่ 6.8 การติดตั้งป้ายจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 6-15
รูปที่ 6.9 แบบป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวร 6-16

รูปที่ 6.10 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง . 6-16
รูปที่ 6.11 งานขุดรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางช่องจราจรที่ 1 6-17
รูปที่ 6.12 งานขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางจนถึงชั้น Subgrade..... 6-18
รูปที่ 6.13 งานบดอัดชั้น Subgrade 6-19
รูปที่ 6.14 งานตรวจสอบระดับชั้น Subgrade..... 6-19
รูปที่ 6.15 การทดสอบความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Field Desity Test) ในชั้น Subgrade... 6-20
รูปที่ 6.16 การตรวจสอบค่าการบดอัดด้วยเครื่อง Nuclear Density Gage ในชั้น Subgrade..... 6-20
รูปที่ 6.17 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับชั้น Subgrade..... 6-21
รูปที่ 6.18 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับชั้น Subgrade..... 6-22
รูปที่ 6.19 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับชั้น Subgrade..... 6-23
รูปที่ 6.20 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในระดับชั้น Subgrade..... 6-24
รูปที่ 6.21 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 22 ตัว ในระดับชั้น Subgrade ลงท่อ PE ... 6-25
รูปที่ 6.22 การฝังกลบและบดอัดชั้น Subbase จนถึงระดับใต้ชั้น Base..... 6-26
รูปที่ 6.23 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับใต้ชั้น Base..... 6-27
รูปที่ 6.24 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับใต้ชั้น Base 6-28
รูปที่ 6.25 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับใต้ชั้น Base 6-29
รูปที่ 6.26 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับใต้ชั้น Base ลงท่อ PE..... 6-30
รูปที่ 6.27 การฝังกลบและบดอัดชั้น Base จนถึงระดับกึ่งกลางชั้น Base 6-31
รูปที่ 6.28 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้น Base..... 6-32
รูปที่ 6.29 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base..... 6-33
รูปที่ 6.30 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base..... 6-33
รูปที่ 6.31 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base..... 6-34
รูปที่ 6.32 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในระดับกึ่งกลางชั้น Base ลงท่อ PE..... 6-35
รูปที่ 6.33 การฝังกลบและบดอัดจากระดับกึ่งกลางชั้น Base จนถึงระดับใต้ชั้นผิวทาง AC 6-36
รูปที่ 6.34 ชั้น Prime Coat..... 6-36
รูปที่ 6.35 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC 6-38
รูปที่ 6.36 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC..... 6-39
รูปที่ 6.37 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC ลงท่อ PE 6-40

รูปที่ 6.38 ชั้น Asphalt Concrete Bound Base 6-41
รูปที่ 6.39 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC..... 6-42
รูปที่ 6.40 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC..... 6-43
รูปที่ 6.41 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC..... 6-43
รูปที่ 6.42 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC ลงท่อ PE..... 6-44
รูปที่ 6.43 ชั้น Asphalt Concrete Binder Course 6-45
รูปที่ 6.44 ชั้น Asphalt Concrete Wearing Course 6-45
รูปที่ 6.45 แนวเส้นบนผิวทาง AC เพื่อระบุตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดฯ..... 6-46
รูปที่ 6.46 ขุดหลุมเจาะ ลึกขนาด 15 เมตร จำนวน 1 จุด..... 6-47
รูปที่ 6.47 เทพื้นคอนกรีตบริเวณรอบหลุมเจาะและติดตั้งเสาเหล็กกั้นบริเวณ จำนวน 1 จุด 6-47
รูปที่ 6.48 การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) 6-48
รูปที่ 6.49 ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลจาก Data Logger..... 6-49
รูปที่ 6.50 การทดสอบเครื่องมือตรวจวัดฯ ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล..... 6-49
รูปที่ 6.51 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) 6-50
รูปที่ 6.52 การทดสอบความเร็วในการอ่านและบันทึก 100 Hz ของอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) 6-51
รูปที่ 6.53 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ชั้น Subgrade 6-51
รูปที่ 6.54 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ระดับใต้ชั้น Base..... 6-52
รูปที่ 6.55 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ระดับกึ่งกลางชั้น Base..... 6-52
รูปที่ 6.56 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ชั้น Subgrade..... 6-53
รูปที่ 6.57 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ระดับใต้ชั้น Base 6-53
รูปที่ 6.58 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ระดับกึ่งกลางชั้น Base 6-54
รูปที่ 6.59 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ระดับใต้ชั้นผิวทาง AC..... 6-54
รูปที่ 6.60 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC..... 6-55
รูปที่ 7.1 ติดตั้งรั้วตาข่ายพร้อมโครงหลังคาเมทัลชีทและตู้ควบคุม 7-1
รูปที่ 7.2 บ่อพักสายสัญญาณ 7-2

รูปที่ 7.3 ภาพรวมในตู้ควบคุม....7-3
รูปที่ 7.4 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)....7-4
รูปที่ 7.5 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV)....7-5
รูปที่ 7.6 ภาพบันทึกจากกล้องวงจรปิด (CCTV)....7-5
รูปที่ 7.7 การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง....7-6
รูปที่ 7.8 การเชื่อมต่อระบบเครือข่ายความเร็วสูงจากผู้ให้บริการ (Internet Service Provider : ISP) 7-7
รูปที่ 7.9 อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) 7-7
รูปที่ 7.10 อุปกรณ์ UPS สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 7-8
รูปที่ 8.1 หน้าเข้าสู่ระบบ....8-1
รูปที่ 8.2 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain 8-2
รูปที่ 8.3 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain 8-2
รูปที่ 8.4 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain 8-2
รูปที่ 8.5 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)....8-3
รูปที่ 8.6 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงโพธาราม(ลาดยาง)....8-3
รูปที่ 8.7 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงสรรพยา(ลาดยาง)....8-4
รูปที่ 8.8 การซ่อนข้อมูล Stess ของ P_SG4C แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)....8-4
รูปที่ 8.9 การซ่อนข้อมูล Stess ของ P_SG4C แปลงโพธาราม(ลาดยาง)....8-5
รูปที่ 8.10 การซ่อนข้อมูล Stess ของ P_SG1L ของแปลงสรรพยา(ลาดยาง) 8-5
รูปที่ 8.11 การซ่อนข้อมูล Stess ทั้งหมด แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต) 8-5
รูปที่ 8.12 การซ่อนข้อมูล Stess ทั้งหมด แปลงโพธาราม(ลาดยาง) 8-6
รูปที่ 8.13 การซ่อนข้อมูล Stess ทั้งหมด แปลงสรรพยา(ลาดยาง)....8-6
รูปที่ 8.14 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต) 8-6
รูปที่ 8.15 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงโพธาราม(ลาดยาง) 8-7
รูปที่ 8.16 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงสรรพยา(ลาดยาง)....8-7
รูปที่ 8.17 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture 8-8
รูปที่ 8.18 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture 8-8
รูปที่ 8.19 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture 8-8
รูปที่ 8.20 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) 8-9
รูปที่ 8.21 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงโพธาราม (ลาดยาง) 8-9
รูปที่ 8.22 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงสรรพยา (ลาดยาง) 8-9

รูปที่ 8.23 การซ่อนข้อมูล Temperature-Moisture ของ M_SG3L 8-10
รูปที่ 8.24 การซ่อนข้อมูล Temperature-Moisture 8-10
รูปที่ 8.25 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress 8-11
รูปที่ 8.26 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress ... 8-11
รูปที่ 8.27 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress 8-12
รูปที่ 8.28 ช่วงของข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress ตามที่ผู้ใช้งานเลือก 8-12
รูปที่ 8.29 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)..... 8-13
รูปที่ 8.30 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงโพธาราม(ลาดยาง)..... 8-13
รูปที่ 8.31 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงสรรพยา(ลาดยาง)..... 8-13
รูปที่ 8.32 การซ่อนข้อมูล Stess ของ P_SG3L ของกราฟ Traffic and Axle Load Data 8-14
รูปที่ 8.33 การซ่อนข้อมูล Stess ทั้งหมดของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress 8-14
รูปที่ 8.34 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain. 8-15
รูปที่ 8.35 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain ... 8-15
รูปที่ 8.36 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain..... 8-16
รูปที่ 8.37 ช่วงของข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain ตามที่ผู้ใช้งานเลือก..... 8-16
รูปที่ 8.38 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงนครชัยศรี (คอนกรีต)..... 8-17
รูปที่ 8.39 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงโพธาราม(ลาดยาง)..... 8-17
รูปที่ 8.40 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงสรรพยา(ลาดยาง) 8-17
รูปที่ 8.41 การซ่อนข้อมูล Strain ของ S_SG4C_Y ของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain 8-18
รูปที่ 8.42 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมดของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain..... 8-18
รูปที่ 8.43 การ Export ข้อมูล Stress-Strain..... 8-19
รูปที่ 8.44 การ Export ข้อมูล Temperature-Moisture..... 8-19
รูปที่ 8.45 รายงานสรุป (Report) 8-20
รูปที่ 8.46 แผนที่ (Map) 8-20
รูปที่ 8.47 แผนที่แบบ Google Street..... 8-21
รูปที่ 8.48 แผนที่แบบ Google Satellite 8-21
รูปที่ 8.49 แผนที่แบบ Google Hybrid..... 8-21
รูปที่ 8.50 ระบบรักษาความปลอดภัยโดยใช้รหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password) 8-22
รูปที่ 8.51 User Management 8-23
รูปที่ 8.52 เพิ่มผู้ใช้งาน..... 8-23

รูปที่ 8.53 กดปุ่มบันทึกเพื่อเพิ่มผู้ใช้งาน 8-23
รูปที่ 8.54 รายชื่อผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น 8-24
รูปที่ 8.55 การแก้ไขผู้ใช้งาน 8-24
รูปที่ 8.56 ข้อมูลผู้ใช้งานถูกลบ 8-24
รูปที่ 9.1 ลักษณะการกระจายแรงรูปวงกลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ 9-2
รูปที่ 9.2 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยว น้ำหนักเพลา 4 ตัน 9-4
รูปที่ 9.3 การกระจายความเครียดในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยว น้ำหนักเพลา 4 ตัน 9-4
รูปที่ 9.4 การกระจายความเครียดในแนวขนานกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยว น้ำหนักเพลา 4 ตัน 9-5
รูปที่ 9.5 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อคู่ น้ำหนักเพลา 11 ตัน 9-5
รูปที่ 9.6 การกระจายความเครียดในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อคู่ น้ำหนักเพลา 11 ตัน 9-6
รูปที่ 9.7 การกระจายความเครียดในแนวขนานกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อคู่ น้ำหนักเพลา 11 ตัน 9-6
รูปที่ 9.8 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาคู่ล้อคู่ น้ำหนักเพลา 10 ตัน 9-7
รูปที่ 9.9 การกระจายความเครียดในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาคู่ล้อคู่ น้ำหนักเพลา 10 ตัน 9-7
รูปที่ 9.10 การกระจายความเครียดในแนวขนานกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาคู่ล้อคู่ น้ำหนักเพลา 10 ตัน 9-8
รูปที่ 9.11 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่ น้ำหนักเพลา 8.5 ตัน.....9-8
รูปที่ 9.12 การกระจายความเครียดในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่ น้ำหนักเพลา 8.5 ตัน 9-9
รูปที่ 9.13 การกระจายความเครียดในแนวขนานกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่ น้ำหนักเพลา 8.5 ตัน 9-9
รูปที่ 9.14 ตำแหน่งกดทับของล้อรถบรรทุกบน Strain Gage ดังนี้ A) กึ่งกลางระหว่างล้อคู่ B) ใต้ล้อด้านใน C) ใต้ล้อด้านนอก..... 9-10
รูปที่ 9.15 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 4 ตัน 9-10
รูปที่ 9.16 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 11 ตัน..... 9-11
รูปที่ 9.17 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวขนานกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 4 ตัน..... 9-11
รูปที่ 9.18 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวขนานกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 11 ตัน 9-11

รูปที่ 9.19 แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น (Patch Test) สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้การทดสอบ FWD 9-12
รูปที่ 9.20 แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว และเพลาเดี่ยว-ล้อคู่ 9-13
รูปที่ 9.21 แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกเพลาคู่-ล้อคู่ 9-13
รูปที่ 9.22 แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกสามเพลา-ล้อคู่ 9-14
รูปที่ 9.23 ขอบเขตและเงื่อนไขสภาพการยึดรั้งสำหรับแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนท์ 3 มิติ 9-15
รูปที่ 9.24 แสดงผลการเปรียบเทียบการทำนายผลของค่าการเสียรูปแบบถาวรของแบบจำลองกับผลการทดสอบ (Ramsamooj และคณะ 1997) 9-17
รูปที่ 9.25 การทดสอบ FWD 9-18
รูปที่ 9.26 ระยะห่างระหว่างเพลาและระยะห่างระหว่างล้อสำหรับเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว (แรงดันลมยาง 0.83 MPa) และเพลาเดี่ยว-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.83 MPa) 9-19
รูปที่ 9.27 ระยะห่างระหว่างเพลาและระยะห่างระหว่างล้อสำหรับเพลาคู่-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.90 MPa) และสามเพลา-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.90 MPa) 9-19
รูปที่ 9.28 ค่าหน่วยแรง S22 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น 9-21
รูปที่ 9.29 ค่าหน่วยแรง S11 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น 9-22
รูปที่ 9.30 ค่าความเครียด E22 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น 9-22
รูปที่ 9.31 ค่าการยุบตัว U2 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น 9-22
รูปที่ 9.32 กราฟแสดงหน่วยแรงในแนวดิ่งตามระดับความลึก 9-23
รูปที่ 9.33 กราฟแสดงหน่วยแรงในแนวราบตามระดับความลึก 9-23
รูปที่ 9.34 กราฟแสดงความเครียดแนวดิ่งตามระดับความลึก 9-24
รูปที่ 9.35 กราฟแสดงความเครียดแนวราบตามระดับความลึก 9-24
รูปที่ 9.36 ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น และ LEA เทียบกับค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ FWD 9-25
รูปที่ 9.37 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว. 9-25
รูปที่ 9.38 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว .. 9-26
รูปที่ 9.39 ความเครียดแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว 9-26
รูปที่ 9.40 ความเค้นแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว 9-27
รูปที่ 9.41 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อคู่ 9-27
รูปที่ 9.42 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อคู่ 9-28

รูปที่ 9.43 ตำแหน่งล้อที่ใช้วิเคราะห์ กรณีเพลาคู่-ล้อคู่ 9-28
รูปที่ 9.44 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่ 9-29
รูปที่ 9.45 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่ 9-29
รูปที่ 9.46 ความเครียดแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่ 9-30
รูปที่ 9.47 ความเค้นแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่ 9-30
รูปที่ 9.48 ตำแหน่งล้อที่ใช้วิเคราะห์ กรณีสามเพลา-ล้อคู่ 9-31
รูปที่ 9.49 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีสามเพลา-ล้อคู่ 9-31
รูปที่ 9.50 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีสามเพลา-ล้อคู่ 9-32
รูปที่ 9.51 ความเครียดแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีสามเพลา-ล้อคู่ 9-32
รูปที่ 9.52 ความเค้นในแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีสามเพลา-ล้อคู่ 9-33
รูปที่ 9.53 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เพลาเดี่ยว-ยางคู่ 9-34
รูปที่ 9.54 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เพลาคู่-ยางคู่ 9-35
รูปที่ 9.55 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน สามเพลา-ยางคู่ 9-35
รูปที่ 9.56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986) 9-39
รูปที่ 9.57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain ใต้ผิวทาง AC ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร (Mechanistic Approach)... 9-40
รูปที่ 9.58 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain ใต้ผิวทาง AC ในแนวขนานทิศทางจราจร (Mechanistic Approach)... 9-40
รูปที่ 9.59 การเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) 9-41
รูปที่ 9.60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain เหนือ Subgrade ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร (Mechanistic Approach) 9-42
รูปที่ 9.61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain เหนือ Subgrade ในแนวขนานทิศทางจราจร (Mechanistic Approach) 9-42
รูปที่ 9.62 การเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) 9-43

รูปที่ 9.63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain ใต้ผิวทาง AC ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) 9-44

รูปที่ 9.64 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain ใต้ผิวทาง AC ในแนวขนานทิศทางจราจร ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) 9-44

รูปที่ 9.65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain เหนือ Subgrade ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) 9-45

รูปที่ 9.66 ตัวอย่างการคำนวณค่า LEF สำหรับรถบรรทุกสิบล้อพิกัดน้ำหนักรวมต่างๆ 9-47

รูปที่ 9.67 ความเค้น กรณีรถหยุดนิ่งรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เพลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Pressure Cell ชั้น Top Subgrade (60 cm) แถวที่ 1 9-48

รูปที่ 9.68 ความเครียด กรณี รถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เพลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Middle Base (30 cm) แถวที่ 1 9-48

รูปที่ 9.69 ความเครียด กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เพลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Middle AC (10 cm) แถวที่ 1..... 9-49

รูปที่ 9.70 ความเค้น กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Pressure Cell ชั้น Bottom Base (40 cm) แถวที่ 2 9-49

รูปที่ 9.71 ความเครียด กรณี รถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Bottom Base (40 cm) แถวที่ 1 9-50

รูปที่ 9.72 ความเครียด กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Asphalt Strain Gage ชั้น Bottom AC (20 cm) แถวที่ 1 9-51

รูปที่ 9.73 ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา เหนือชั้น Subgrade และ Base แปลงสรรพยา 9-52

รูปที่ 9.74 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 40 cm (Bottom) ใต้ ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง แปลงสรรพยา 9-52

รูปที่ 9.75 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 30 cm (Middle) และใต้ ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง แปลงสรรพยา..... 9-53

รูปที่ 9.76 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Base ที่ความลึก 30 cm (Middle) และ ชั้น Base ที่ความลึก 40 cm (Base) ใต้ ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง แปลงสรรพยา..... 9-54

รูปที่ 9.77 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 1 และแถวที่ 3 ทิศทางตั้งฉากกับถนน Strain Y (Normal-to-lane axis)..... 9-54

รูปที่ 9.78 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 2 ทิศทางขนานกับถนน Strain X (Parallel-to-lane axis)..... 9-55

รูปที่ 9.79 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Base ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา 9-56

รูปที่ 9.80 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณด้านล่างชั้น AC (Bottom) ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา 9-57
รูปที่ 9.81 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณกึ่งกลาง AC (Bottom) ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา..... 9-58
รูปที่ 9.82 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 0 % น้ำหนักเพลา 4.1 ตัน 9-59
รูปที่ 9.83 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 100% น้ำหนักเพลา 4 ตัน และ 11 ตัน 9-59
รูปที่ 9.84 ค่าความเครียด (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 100% น้ำหนักเพลา 4 ตัน และ 11 ตัน..... 9-60
รูปที่ 9.85 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ เปรียบเทียบแปลงทดสอบ 3 แปลง AC (with selected mat)-โพธาราม, Concrete- นครชัยศรี และ AC (without selected mat)-สรรพยา 9-61
รูปที่ 9.86 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ เปรียบเทียบกรณีรถบรรทุก 6 ล้อ และรถกึ่งพ่วงแปลงทดสอบ AC (without selected mat)-สรรพยา 9-62
รูปที่ 9.87 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-middle ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ 9-63
รูปที่ 9.88 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ใต้ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ 9-64
รูปที่ 9.89 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ใต้ล้อซ้าย ในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ 9-65
รูปที่ 9.90 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น AC ใต้ล้อซ้ายและล้อขวา ในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ..... 9-66
รูปที่ 9.91 ค่าความอัตราส่วนความเค้นเปรียบเทียบกับความเค้นที่เหนือชั้น Subgrade เทียบตามความลึกแปลงสรรพยา (ผิวทาง AC ไม่มีชั้นวัสดุคัดเลือก) แปลงโพธาราม (ผิวทาง AC มีวัสดุคัดเลือก) และแปลงนครชัยศรี (ผิวทางคอนกรีต)..... 9-67
รูปที่ 9.92 อุณหภูมิในชั้น Subgrade และใต้ชั้น RC แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)..... 9-68
รูปที่ 9.93 ความชื้นในชั้น Subgrade และใต้ชั้น RC แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) 9-69
รูปที่ 9.94 อุณหภูมิในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (โพธาราม) 9-70
รูปที่ 9.95 ความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (โพธาราม)..... 9-71
รูปที่ 9.96 อุณหภูมิในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (สรรพยา)..... 9-72
รูปที่ 9.97 ความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (สรรพยา) 9-73
รูปที่ 9.98 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (โพธาราม) 9-74
รูปที่ 9.99 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (โพธาราม)..... 9-74
รูปที่ 9.100 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (สรรพยา)..... 9-75

รูปที่ 9.101 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (สรรพยา) 9-75
รูปที่ 9.102 อัตราส่วน ESAL/Strain และความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base ที่ช่วงเวลาต่างๆ แปลงถนน AC (โพธาราม) 9-76
รูปที่ 9.103 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถบรรทุกกับ Strain แนวราบ ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท 9-77
รูปที่ 9.104 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับระยะเวลาของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-78
รูปที่ 9.105 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ใต้ผิวทาง AC, Base และเหนือชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-78
รูปที่ 9.106 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-79
รูปที่ 9.107 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท 9-79
รูปที่ 9.108 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Base ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-80
รูปที่ 9.109 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Base ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท 9-80
รูปที่ 9.110 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-81
รูปที่ 9.111 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท 9-81
รูปที่ 9.112 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวดิ่ง กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-82
รูปที่ 9.113 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวดิ่ง กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท 9-82
รูปที่ 9.114 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nf กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-83
รูปที่ 9.115 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nf กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท 9-84
รูปที่ 9.116 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Df กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-84
รูปที่ 9.117 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Df กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท 9-85
รูปที่ 9.118 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nr กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-86
รูปที่ 9.119 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nr กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท 9-86
รูปที่ 9.120 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Dr กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-87
รูปที่ 9.121 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Dr กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท 9-87

รูปที่ 9.122 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ESALs /Induced Average Strain กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-88
รูปที่ 9.123 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rut Depth กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี..... 9-89
รูปที่ 9.124 ค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) ใต้ผิวทางคอนกรีต อ. นครชัยศรี จ. นครปฐม..... 9-90
รูปที่ 9.125 จำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตชำรุดเสียหายเนื่องจากความล้า (Nf) อ. นครชัยศรี จ. นครปฐม..... 9-91
รูปที่ 9.126 ค่าความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้าของถนนคอนกรีตอ. นครชัยศรี จ. นครปฐม 9-92
รูปที่ 9.127 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-93
รูปที่ 9.128 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท 9-93
รูปที่ 9.129 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-94
รูปที่ 9.130 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Deflection (FWD) ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-94
รูปที่ 9.131 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Strain ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 9-95
รูปที่ 9.132 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท 9-95
รูปที่ 9.133 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Deflection (FWD) ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท 9-96
รูปที่ 9.134 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Strain ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท 9-96
รูปที่ 10.1 คู่มือการใช้งานและดูแลรักษาระบบ..... 10-1
รูปที่ 10.2 รายงานการศึกษาพัฒนาแบบจำลองและแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลอง..... 10-2
รูปที่ 10.3 การฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้ 10-4
รูปที่ 10.4 การสาธิตการใช้งานและบำรุงรักษาระบบเครื่องมือตรวจวัดฯ 10-5
รูปที่ 10.5 การจัดสัมมนาผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ของกรมทางหลวง..... 10-6
รูปที่ 11.1 ภาพรวมการดำเนินงานโครงการ 11-1
รูปที่ 11.2 อำนาจการทำลายของน้ำหนักลงกลุ่มเพลารถบรรทุกประเทศไทยกรณีล้อคู่ 11-4
รูปที่ 11.3 อำนาจการทำลายของน้ำหนักลงกลุ่มเพลารถบรรทุกประเทศไทยกรณีล้อเดี่ยว..... 11-4

รูปที่ 11.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการคำนวณทางทฤษฎี 11-5
รูปที่ 11.5 ความเครียดใต้ผิวทางของรถบรรทุกหกล้อที่มีความเร็ว 20 กม./ชม. และ 60 กม./ชม. 11-5
รูปที่ 11.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถบรรทุกกับความเครียดใต้ผิวทาง 11-6
รูปที่ 11.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถบรรทุกกับอำนาจการทำลาย..... 11-6
รูปที่ 11.8 อำนาจการทำลายของรถบรรทุกสิบล้อเกินพิกัดน้ำหนัก 11-7
รูปที่ 11.9 ค่าเสื่อมของทางหลวงเนื่องจากรถบรรทุกแต่ละประเภทเกินพิกัดน้ำหนัก 11-8
รูปที่ 11.10 ค่าเสื่อมของทางหลวงต่อการขนส่งสินค้าน้ำหนัก 1 ตันโดยรถบรรทุกแต่ละประเภท..... 11-8
รูปที่ 11.11 แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง..... 11-9
รูปที่ 11.12 แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต 11-9
รูปที่ 12.1 สรุปผลผลิต (Output) ผลลัพธ์ (Outcome) และผลกระทบ (Impact) ของโครงการ..... 12-5

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 จำนวนเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง 2-8
ตารางที่ 2.2 จำนวนอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม 2-9
ตารางที่ 3.1 สรุปความก้าวหน้าและผลการดำเนินงานถึงปัจจุบัน 3-2
ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบความสอดคล้องของกิจกรรมตาม TOR กับรายงานขั้นสุดท้าย 3-4
ตารางที่ 3.3 กำหนดการรายงานผลการศึกษา 3-5
ตารางที่ 4.1 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 4-55
ตารางที่ 4.2 Stress Factor สำหรับการคำนวณแบบโครงสร้างชั้นทาง 3 ชั้น โดย Jones (1962)..... 4-64
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติวัสดุประเภท Unbound Granular Base และ Cemented Base 4-72
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลสถิติการเข้าชั่งฯสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) ประจำปี 2555 – 2560 5-4
ตารางที่ 6.1 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง 6-2
ตารางที่ 9.1 รายละเอียดการทดสอบในสนาม 9-1
ตารางที่ 9.2 คุณสมบัติวัสดุชั้นทางสำหรับการคำนวณทางทฤษฎี....9-2
ตารางที่ 9.3 ข้อมูลน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์.... 9-20
ตารางที่ 9.4 ค่าตัวแปรสำหรับใช้ในแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ.... 9-20
ตารางที่ 9.5 น้ำหนักลงเพลาที่ยอมให้สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่ยานพาหนะสามารถเดินบนทางหลวง..... 9-34
ตารางที่ 9.6 Load Equivalency Factor (LEF) สำหรับถนนลาดยาง 9-37
ตารางที่ 9.7 น้ำหนักเพลามาตรฐาน.... 9-38
ตารางที่ 9.8 ผลการคำนวณค่า LEF กรณียางเดี่ยว ตามน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load)..... 9-46
ตารางที่ 9.9 ผลการคำนวณค่า LEF กรณียางคู่ ตามน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load)..... 9-46
ตารางที่ 9.10 เกณฑ์การบำรุงรักษาถนนลาดยางตามระดับความรุนแรงของร่องล้อ 9-89
ตารางที่ 10.1 สรุปจำนวนผู้เข้าฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้.... 10-3

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัจจุบันกรมทางหลวงยังขาดข้อมูลเชิงประจักษ์ด้านพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนน (Pavement Response) อันเกิดจากแรงกระทำของน้ำหนักรถบรรทุกและปัจจัยภายนอกต่างๆ รวมทั้งข้อมูลด้านสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance) ภายใต้สภาพการใช้งาน เงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการต่อเนื่องในปีที่ 2 เพื่อพัฒนาต่อยอดผลการศึกษาวิจัยในปีที่ 1 ประกอบด้วย 1) การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง 2) การติดตาม เก็บบันทึก และประเมินผลข้อมูลการตอบสนองของโครงสร้างถนนต่อเนื่องในระยะยาว (Long-term Performance Monitoring) และ 3) การติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนและระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มมิติด้านพื้นที่ ด้านระยะเวลาการตรวจวัด และด้านข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพ เพื่อใช้สนับสนุนการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนน และปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง ให้เป็นปัจจุบัน มีความน่าเชื่อถือ และนำไปใช้ออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะทางหลวงได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม

ดังนั้น สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง จึงมีโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวง ระยะที่สอง โดยมีเป้าหมายสำคัญสามประการคือ ประการแรกเพื่อดำเนินการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนและระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามเพิ่มเติมอีก 1 แปลง ประการที่สองเพื่อดำเนินการตรวจวัดพฤติกรรม ติดตาม เก็บบันทึก และประเมินผลข้อมูลการตอบสนองของแปลงตรวจวัดจำนวนสองแปลงต่อเนื่องจากปีที่ 1 และเพิ่มเติมอีกจำนวนหนึ่งแปลงในปีที่ 2 และประการสุดท้ายเพื่อพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวง มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1) เพื่อติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนและระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม จำนวน 1 แปลง เพิ่มเติมจากระยะที่หนึ่ง
2) เพื่อตรวจวัดพฤติกรรม ติดตาม เก็บบันทึก และประมวลผลข้อมูลการตอบสนองของโครงสร้างถนนต่อเนื่อง ซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จ จำนวน 2 แปลงในระยะที่หนึ่ง และที่จะติดตั้งเพิ่มเติม จำนวน 1 แปลงในระยะที่สอง รวมจำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง
3) เพื่อพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงภายใต้สภาพการใช้งาน เงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย
4) เพื่อจัดทำแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงในการออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะทางหลวง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ข้อมูลของพฤติกรรมและการตอบสนองของโครงสร้างถนนต่อเนื่องจำนวน 2 แปลงในระยะที่หนึ่ง และที่จะติดตั้งเพิ่มเติม จำนวน 1 แปลงในระยะที่สอง รวมจำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง

2) แบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงภายใต้สภาพการใช้งาน เงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย
3) แนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงในการออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะทางหลวง

2. ขอบเขตของงาน

โครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวง มีขอบเขตของงานดังนี้

2.1 งานทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ปรึกษาจะดำเนินการทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1) ศึกษา ทบทวน และรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนน ขั้นตอนการทำงาน ข้อควรปฏิบัติและข้อควรระวังในการทำงาน ประเด็นปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงานศึกษาในระยะที่หนึ่ง
2) รวบรวมข้อมูลรายละเอียดคุณสมบัติและข้อกำหนดทางเทคนิคต่างๆของเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน รวมถึงผลงานการติดตั้งและการใช้งานที่ผ่านมาในระยะที่หนึ่ง
3) ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุกแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง พร้อมแนวทางการประยุกต์ใช้งานจริงจากหน่วยงานของต่างประเทศ

ทั้งนี้ ที่ปรึกษาต้องนำเสนอรายการเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ข้อมูลทางเทคนิค เงื่อนไขและข้อจำกัดของเครื่องมือตรวจวัด โดยคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือตรวจวัดแต่ละชนิดต้องเป็นไปตามรายละเอียดของ ภาคผนวก ก และต้องได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการกำกับโครงการก่อนดำเนินการต่อไป

2.2 งานสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด

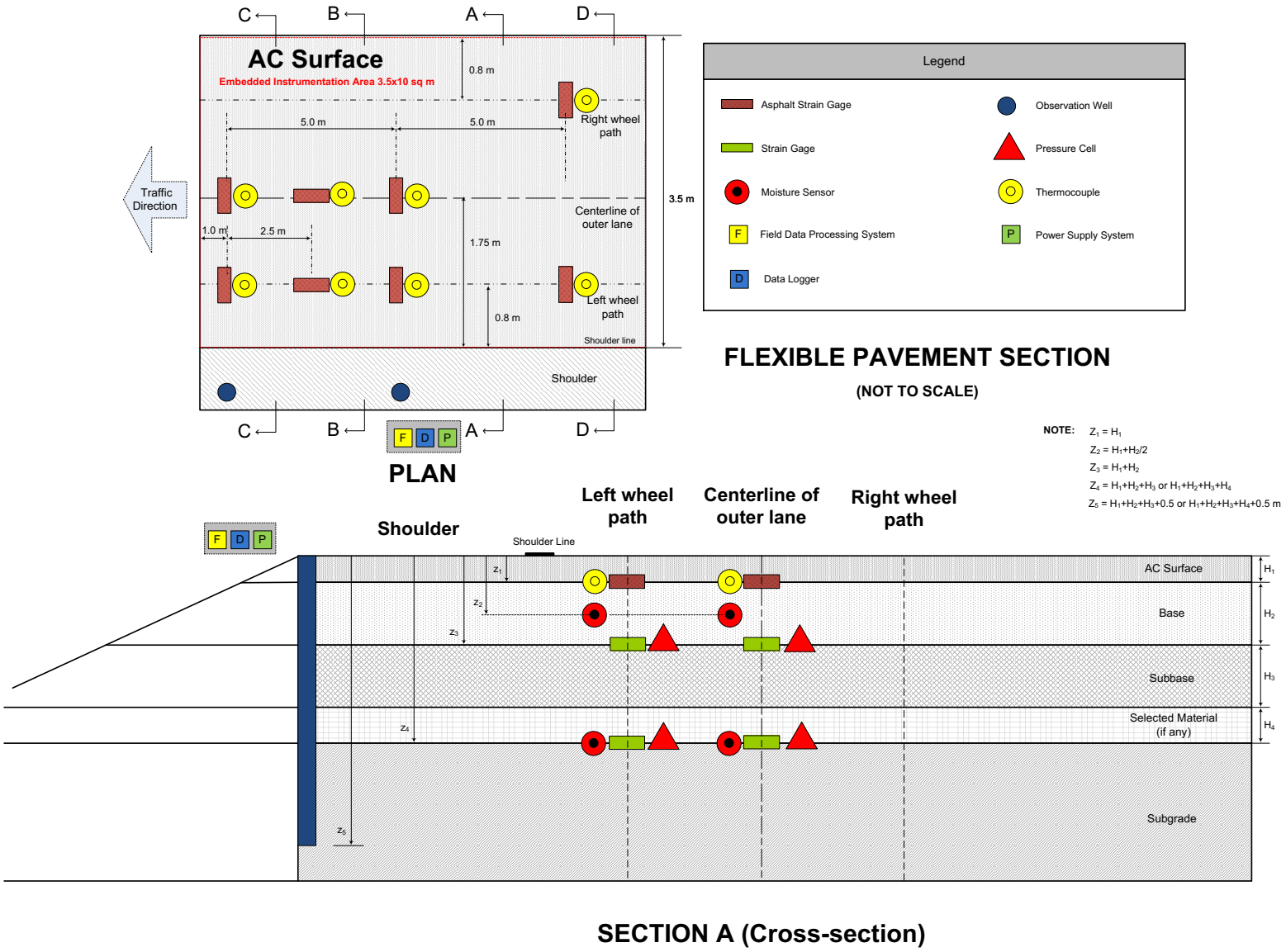
ที่ปรึกษาจะดำเนินการสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด เพื่อทำการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง จำนวน 1 แปลง บนทางหลวงหมายเลข 32 บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนัก ชัยนาท (ขาเข้า) ต.หาดอาษา อ.สรรพยา จ.ชัยนาท ซึ่งเป็นพื้นที่ในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงชัยนาท ทั้งนี้ตำแหน่งของแปลงตรวจวัดที่ใช้ในการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนลาดยางนั้น ต้องได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการกำกับโครงการก่อนดำเนินการ และหากมีเหตุอันจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนตำแหน่งของแปลงตรวจวัดดังกล่าว ให้อยู่ในดุลยพินิจของคณะกรรมการกำกับโครงการในการพิจารณาเปลี่ยนแปลงตามสมควร รายละเอียดการดำเนินงานสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัดฯ มีดังต่อไปนี้

1) รวบรวมข้อมูลลักษณะทางภูมิศาสตร์ รูปแบบโครงสร้างชั้นทาง ลักษณะทางเรขาคณิต และสำรวจสภาพผิวทางของแปลงตรวจวัดฯ พร้อมจัดทำรายงานผลการรวบรวมข้อมูล
2) รวบรวมข้อมูลประวัติสายทาง (Road Inventory) และข้อมูลปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (Truck Traffic Volume) ย้อนหลังอย่างน้อย 1 ปีของแปลงตรวจวัดฯโดยอ้างอิงจากฐานข้อมูลสถานีตรวจสอบน้ำหนักในบริเวณใกล้เคียงหรือจากฐานข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้อง พร้อมจัดทำรายงานผลการรวบรวมข้อมูล
3) จัดทำรายการ แบบแปลนแสดงรายละเอียด ข้อกำหนดและคุณสมบัติต่างๆของแปลงตรวจวัดฯ ตำแหน่งการติดตั้งและขั้นตอนแสดงกระบวนการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝัง (Embedded Instrumentation System) ในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยแต่ละแปลงต้อง

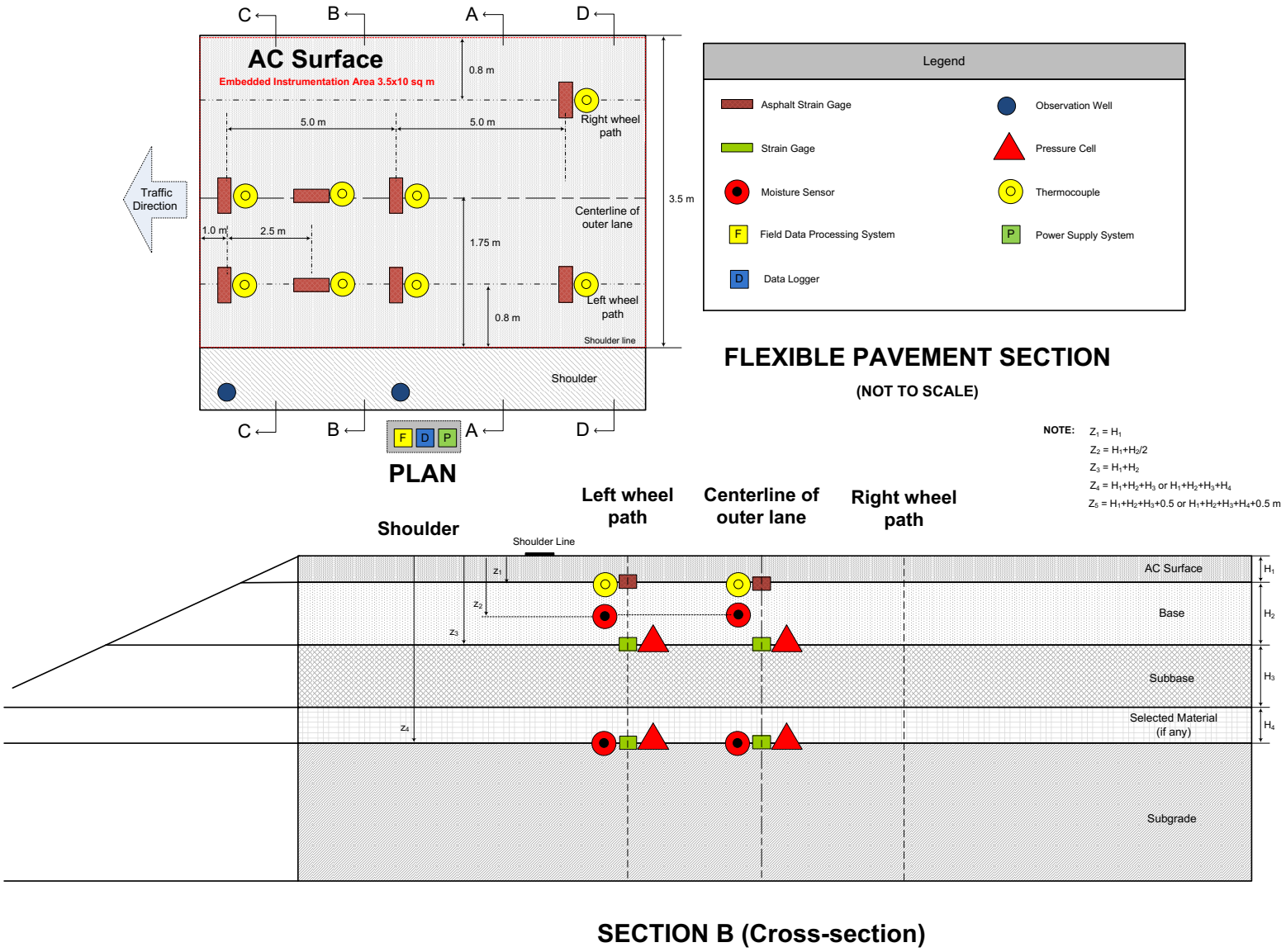
ประกอบด้วยรายการเครื่องมือตรวจวัดฯดังแสดงในรูปที่ 2.1 ถึงรูปที่ 2.4 พร้อมตำแหน่งและรูปแบบการติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการ ตามรายละเอียดของ ภาคผนวก ข ทั้งนี้ที่ปรึกษาสามารถเสนอแนะเพื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งหรือรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดฯดังแสดงใน รูปที่ 2.1 ถึง รูปที่ 2.4 ได้ เพื่อให้การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดฯมีความเหมาะสมกับเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจวัด เงื่อนไขและข้อจำกัดต่างๆของเครื่องมือตรวจวัดฯ โดยจำนวนเครื่องมือตรวจวัดฯต้องไม่น้อยกว่าในแบบรูปที่ 2.1 ถึง รูปที่ 2.4

4) จัดทำแผนและรายละเอียดขั้นตอนการจัดเก็บข้อมูลการจราจร ชนิดของยานพาหนะ และน้ำหนักลงเพลาที่ได้จากสถานีตรวจสอบน้ำหนักที่ติดตั้งระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสำนักงานควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ ตลอดจนวิธีการเชื่อมโยงข้อมูลดังกล่าวกับผลการตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างถนนที่ได้จากระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง
5) จัดทำแผนผังงานวางระบบพร้อมขั้นตอนการติดตั้งและรายละเอียดข้อกำหนดต่างๆ ได้แก่ (1) ระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System) (2) ระบบสายสัญญาณสำหรับเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างระบบเครื่องมือตรวจวัดฯกับระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม และ (3) ระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบสำรองไฟฟ้า (Power Supply System)

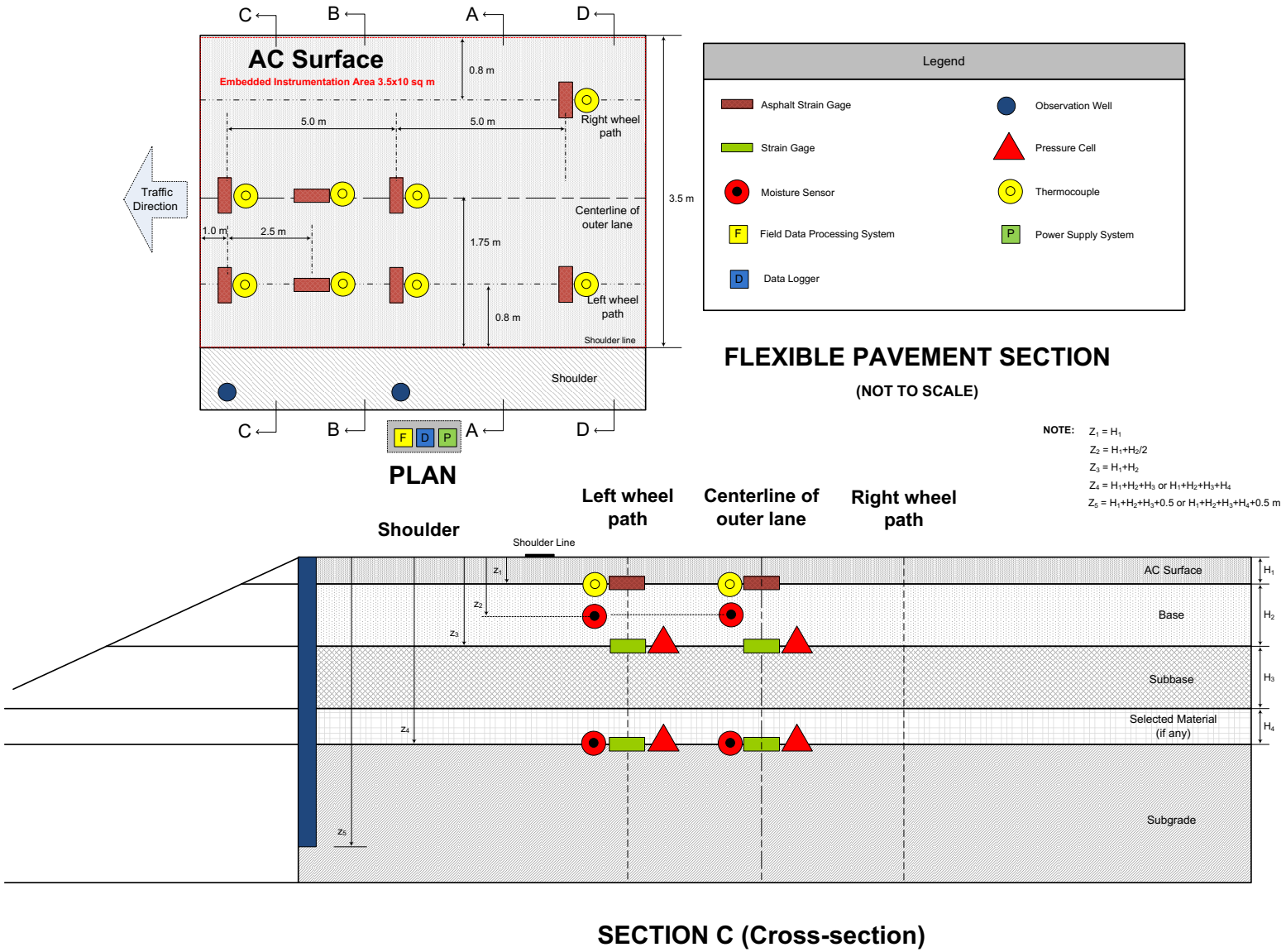
อนึ่ง ที่ปรึกษาต้องรายงานและแจ้งแผนกิจกรรมการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดและระบบต่างๆข้างต้น ต่อคณะกรรมการกำกับโครงการ สำนักงานควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ และแขวงทางหลวง เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 15 วันทำการ เพื่อขอความเห็นชอบก่อนดำเนินการในขั้นตอนต่อไป



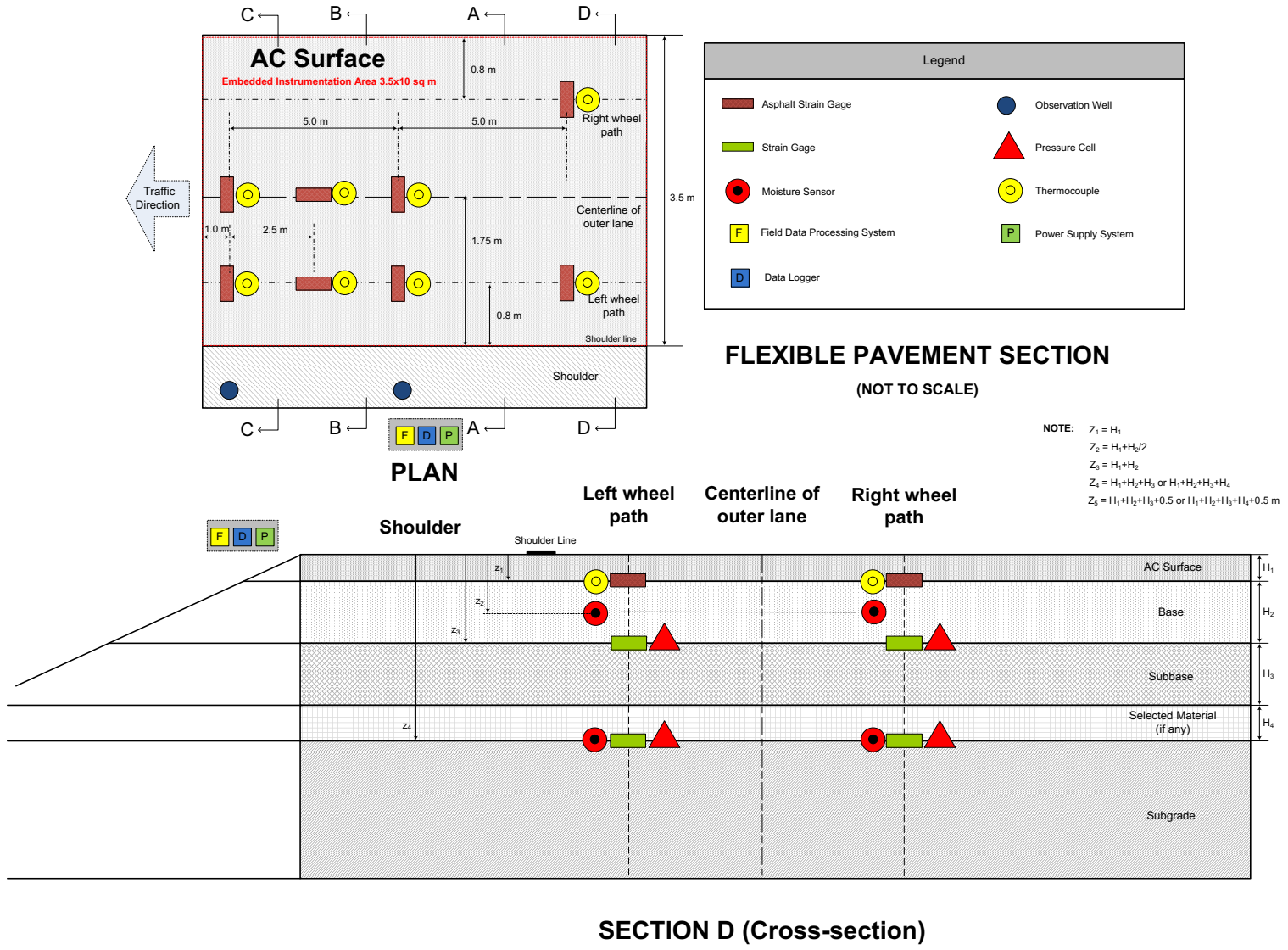
รูปที่ 2.1 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section A)



รูปที่ 2.2 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section B)



รูปที่ 2.3 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section C)



รูปที่ 2.4 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section D)

2.3 งานติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

ที่ปรึกษาจะดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ในข้อ 2.2 เพื่อตรวจวัดพฤติกรรม ติดตาม และเก็บบันทึกข้อมูลการตอบสนองของโครงสร้างถนนภายใต้สภาพการจราจรและน้ำหนักของยานพาหนะ โดยคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือตรวจวัดและอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแต่ละชนิดเป็นไปตามรายละเอียดของ ภาคผนวก ก ขอบเขตการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

1) งานขุดรื้อผิวทางและชั้นโครงสร้างทางเพื่อฝังระบบเครื่องมือตรวจวัดฯในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต ในข้อ 2.2
2) งานติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน (Embedded Instrumentation System) ระบบสายสัญญาณ (Cabling) และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) ในข้อ 2.2 ได้แก่
   - ระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนดังแสดงใน ตารางที่ 2.1
   - ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล สำหรับเชื่อมโยงและเก็บข้อมูลจากระบบเครื่องมือตรวจวัดฯ
3) งานทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล
4) งานปูผิวทางและชั้นโครงสร้างทางของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต ในข้อ 2.2 ให้กลับคืนสู่สภาพเดิม พร้อมตีเส้นจราจรตามมาตรฐานกรมทางหลวง โดยโครงสร้างถนนภายหลังการซ่อมคืนสภาพเดิมแล้วเสร็จต้องเป็นไปตามรูปแบบเดิม วัสดุที่ใช้ต้องได้คุณภาพตามมาตรฐานและข้อกำหนดของกรมทางหลวง
5) งานติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต ตามรายละเอียดของ ภาคผนวก ข

ทั้งนี้ ในกรณีระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล เกิดชำรุดบกพร่องหรือขัดข้อง อันเนื่องมาจากกิจกรรมการติดตั้ง หรือการใช้งานตามปกติและส่งผลกระทบต่อการดำเนินงานของโครงการ ภายในระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี หลังการติดตั้งแล้วเสร็จ ที่ปรึกษาจะรายงานต่อคณะกรรมการกำกับโครงการให้ทราบและดำเนินการซ่อมแซมหรือแก้ไขให้อยู่ในสภาพที่ใช้การได้ ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของคณะกรรมการกำกับโครงการในการพิจารณาซ่อมแซมหรือแก้ไขตามแต่ละกรณี

ตารางที่ 2.1 จำนวนเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง

ลำดับ	รายการ	แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (ชุด)
1	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage)	8
2	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage)	16
3	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell)	16
4	อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well)	1
5	อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)	8
6	อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor)	16
7	อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)	1

2.4 งานติดตั้งและทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม

ที่ปรึกษาจะดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง จำนวน 1 แปลง ตาม ตารางที่ 2.2 โดยคุณสมบัติทั่วไปของระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามเป็นไปตามรายละเอียดของ ภาคผนวก ค ขอบเขตการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

1) ติดตั้งชุดอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System) โดยมีรายละเอียดดังนี้
   - ติดตั้งหน่วยประมวลผลข้อมูล (Data Processing Unit) สำหรับเชื่อมโยงและประมวลผลข้อมูลจาก Data Logger
   - ติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV) สำหรับถ่ายภาพเหตุการณ์ในสนาม
   - ติดตั้งอุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) เพื่อจัดการและบันทึกภาพจากกล้องวงจรปิด (CCTV)
   - ติดตั้งฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บและสำรองข้อมูลผลการตรวจวัดในสนาม
   - ติดตั้งตู้จัดเก็บอุปกรณ์ภาคสนาม (Outdoor Cabinet)
2) ติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบสำรองไฟฟ้า (Power Supply System) ดังต่อไปนี้
   - อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC)
   - อุปกรณ์ UPS สำหรับสำรองไฟฟ้า
3) เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและเครือข่ายสื่อสาร เพื่อสนับสนุนการทำงานของเครื่องมือตรวจวัดฯ และอุปกรณ์ที่ติดตั้งในแปลงตรวจวัดฯ
4) ทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม

ทั้งนี้ ในกรณีระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามเกิดชำรุดบกพร่องหรือขัดข้องอันเนื่องมาจากการติดตั้ง หรือการใช้งานตามปกติ และส่งผลกระทบต่อการดำเนินงานของโครงการ ภายในระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี หลังการติดตั้งแล้วเสร็จ ที่ปรึกษาต้องรายงานต่อคณะกรรมการกำกับโครงการให้ทราบและดำเนินการซ่อมแซมหรือแก้ไขให้อยู่ในสภาพที่ใช้การได้ ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของคณะกรรมการกำกับโครงการในการพิจารณาซ่อมแซมหรือแก้ไขตามแต่ละกรณี

ตารางที่ 2.2 จำนวนอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม

ลำดับ	รายการ	แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง (ชุด)
1	ชุดอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System)	1
2	ชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply System)	1

2.5 งานติดตามและประเมินผลสมรรถนะทางหลวง (Highway Performance Monitoring)

ที่ปรึกษาจะดำเนินการออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูลสำหรับติดตามสมรรถนะทางหลวง (Highway Performance Monitoring) เพื่อรองรับข้อมูลจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จ จำนวน 2 แปลงในระยะที่หนึ่ง และที่ติดตั้งเพิ่มเติม จำนวน 1 แปลงในข้อ 2.3 และ 2.4 รวมจำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง โดยฐานข้อมูลฯ จะต้องรองรับการสืบค้นและนำเสนอข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายสำหรับผู้บริหาร เจ้าหน้าที่ นักวิจัย และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการติดตามตรวจสอบผลการตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างถนน (Pavement Response) ได้แก่ ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) อุณหภูมิ (Temperature) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) และข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลา (Traffic and Axle Load Data) โดยฐานข้อมูลฯ จะต้องรองรับการดำเนินงานอย่างน้อยดังต่อไปนี้

1) การจัดเก็บข้อมูลผลการตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างถนน (Pavement Response) จากเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนน จำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง
2) การรวบรวมและจัดเก็บข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลา (Traffic and Axle Load Data) จากสถานีตรวจสอบน้ำหนัก ราชบุรี (ขาเข้า) ต.ดอนทราย อ.โพธาราม จ.ราชบุรี สถานีตรวจสอบน้ำหนัก นครชัยศรี (ขาเข้า) ต.ท่าตำหนัก อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม และสถานีตรวจสอบน้ำหนัก ชัยนาท (ขาเข้า) ต.หาดอาษา อ.สรรพยา จ.ชัยนาท
3) การสืบค้นข้อมูลตามเงื่อนไขที่ผู้ใช้กำหนด เช่น การสืบค้นข้อมูลตามช่วงเวลา การสืบค้นข้อมูลตามประเภทรถ การสืบค้นข้อมูลตามช่วงของค่าน้ำหนักลงเพลา หรือการสืบค้นข้อมูลตามช่วงของผลการตรวจวัดความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) อุณหภูมิ (Temperature) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เป็นต้น
4) การส่งออกข้อมูล (Export Data) ผลการตรวจวัดฯ และข้อมูลการจราจรและน้ำหนัก ลงเพลาในรูปแบบไฟล์ MS Excel ได้เป็นอย่างน้อย
5) การนำเสนอข้อมูลผลการตรวจวัดฯ และน้ำหนักลงเพลาในรูปแบบแผนภูมิหรือกราฟ
6) การสร้างรายงาน (Report) สรุปสถิติผลการตรวจวัดฯ และน้ำหนักลงเพลา อาทิ ค่าสูงสุด (Maximum) ค่าต่ำสุด (Minimum) และค่าเฉลี่ย (Mean) ตามรายวัน รายเดือน และรายปี โดยจะต้องสามารถบันทึกรายงานในรูปแบบไฟล์ PDF (Acrobat) ได้เป็นอย่างน้อย

7) มีแผนที่สารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) แสดงตำแหน่งของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนทั้งสามแปลง
8) มีระบบรักษาความปลอดภัยโดยใช้รหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password) เพื่อจำกัดสิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูล โดยต้องให้ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนรหัสผ่านได้ด้วยตนเอง
9) มีระบบบริหารบัญชีผู้ใช้งาน (User Account Management) สำหรับสร้าง สืบค้น แก้ไข และลบบัญชีผู้ใช้งาน

2.6 งานพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance Model)

ที่ปรึกษาจะดำเนินการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองแสดงพฤติกรรมโครงสร้างถนนของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนน (Pavement Model) ซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จ จำนวน 2 แปลงในระยะที่หนึ่ง และที่ติดตั้งเพิ่มเติม จำนวน 1 แปลงในข้อ 2.3 และ 2.4 รวมจำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง โดยแบบจำลองต้องสามารถทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance Model) ภายใต้สภาพการใช้งาน เงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย ตามข้อมูลที่ได้ในข้อ 2.5 ดังต่อไปนี้

1) วิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนน เช่น ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) กับผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดจากทฤษฎีหรือโปรแกรมการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทาง จำนวนอย่างน้อย 3 วิธี อาทิ ODEMARK METHOD, ELASTIC LAYER THEORY, FINITE-ELEMENT METHOD เป็นต้น โดยใช้ค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของวัสดุชั้นทางตามรูปแบบโครงสร้างถนนของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางในข้อ 2.2
2) วิเคราะห์ค่าอัตราการทำลาย (Load Equivalency Factor, LEF) ของรถบรรทุกตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางในข้อ 2.2 เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์อัตราการทำลายจากทฤษฎี อาทิ กฎยกกำลังสี่ วิธี AASHTO เป็นต้น
3) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF ของรถบรรทุกกับน้ำหนักลงกลุ่มเพลาต่างๆที่ได้ในข้อ 2
4) พัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนน ซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จ จำนวน 2 แปลงในระยะที่หนึ่ง และที่ติดตั้งเพิ่มเติม จำนวน 1 แปลงในข้อ 2.3 และ 2.4 รวมจำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง ทั้งนี้แบบจำลองต้องประกอบด้วย 1) Simplified Model สำหรับงานปฏิบัติการ และ 2) Mechanistic (Analytical) Model สำหรับงานวิจัยวิชาการ

2.7 งานจัดทำคู่มือและแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

1) ที่ปรึกษาจะจัดทำคู่มือการใช้งานและดูแลรักษาระบบ ดังต่อไปนี้
   - ระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน
   - ระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม
2) ที่ปรึกษาจะจัดทำแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงในการออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะทางหลวง ในข้อ 2.6

2.8 งานฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้

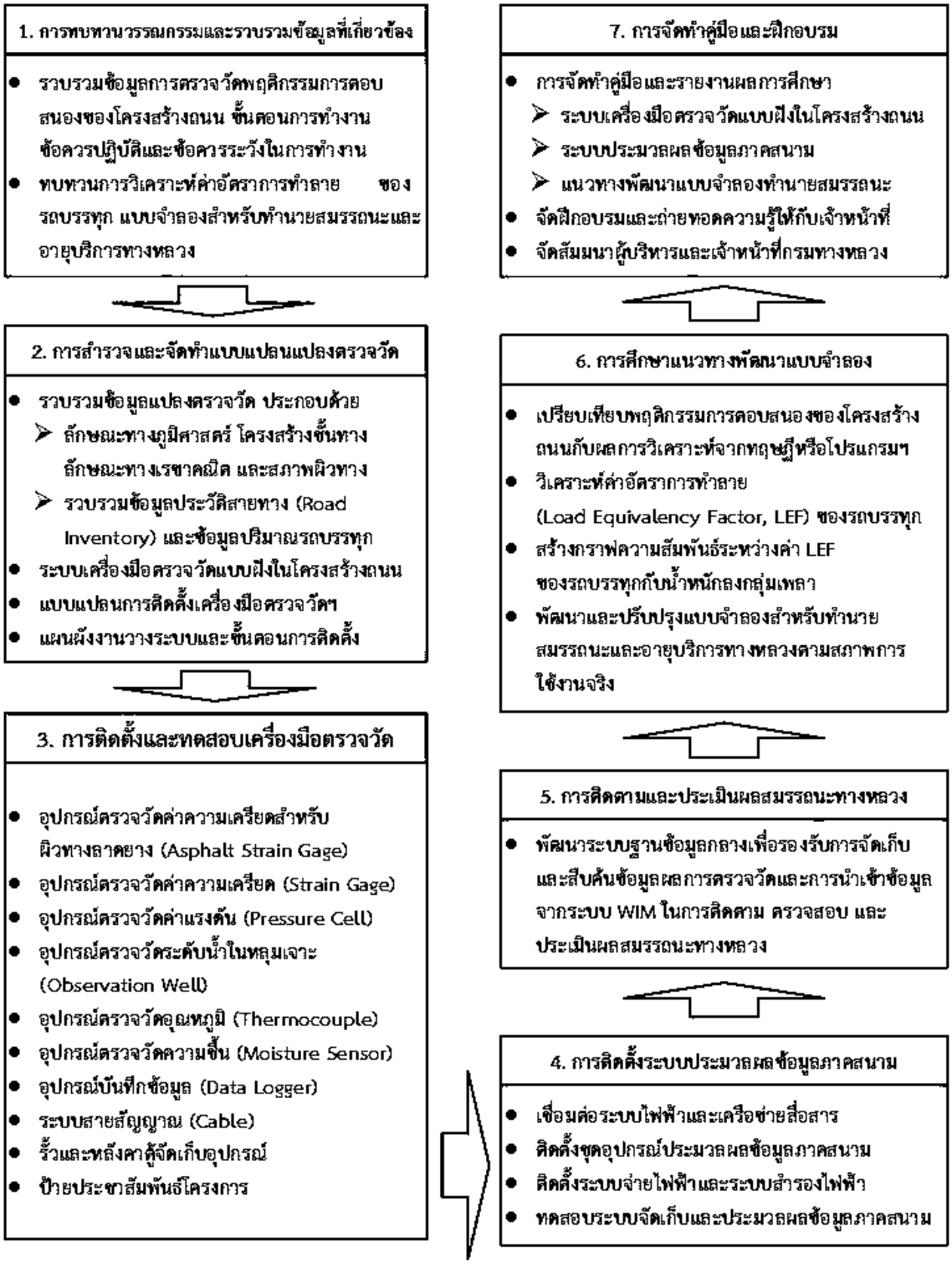
ที่ปรึกษาจะดำเนินการฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้ให้กับเจ้าหน้าที่ของกรมทางหลวง โดยมีรายละเอียดการดำเนินการดังต่อไปนี้

1) จัดฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้ให้กับเจ้าหน้าที่ฝ่ายปฏิบัติการของกรมทางหลวง เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 วัน จำนวนอย่างน้อย 30 คน ในหัวข้อดังต่อไปนี้
   - การติดตั้ง การใช้งานและดูแลรักษาระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน
   - การใช้งานและดูแลรักษาระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม
   - แนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงในการออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะทางหลวง
2) จัดสัมมนาผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ของกรมทางหลวง เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 วัน จำนวนไม่น้อยกว่า 70 คน

3. การบริหารโครงการ

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการดำเนินโครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวง ที่ปรึกษาได้กำหนดหัวข้อหลักของการดำเนินงานไว้ทั้งหมด 7 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังต่อไปนี้



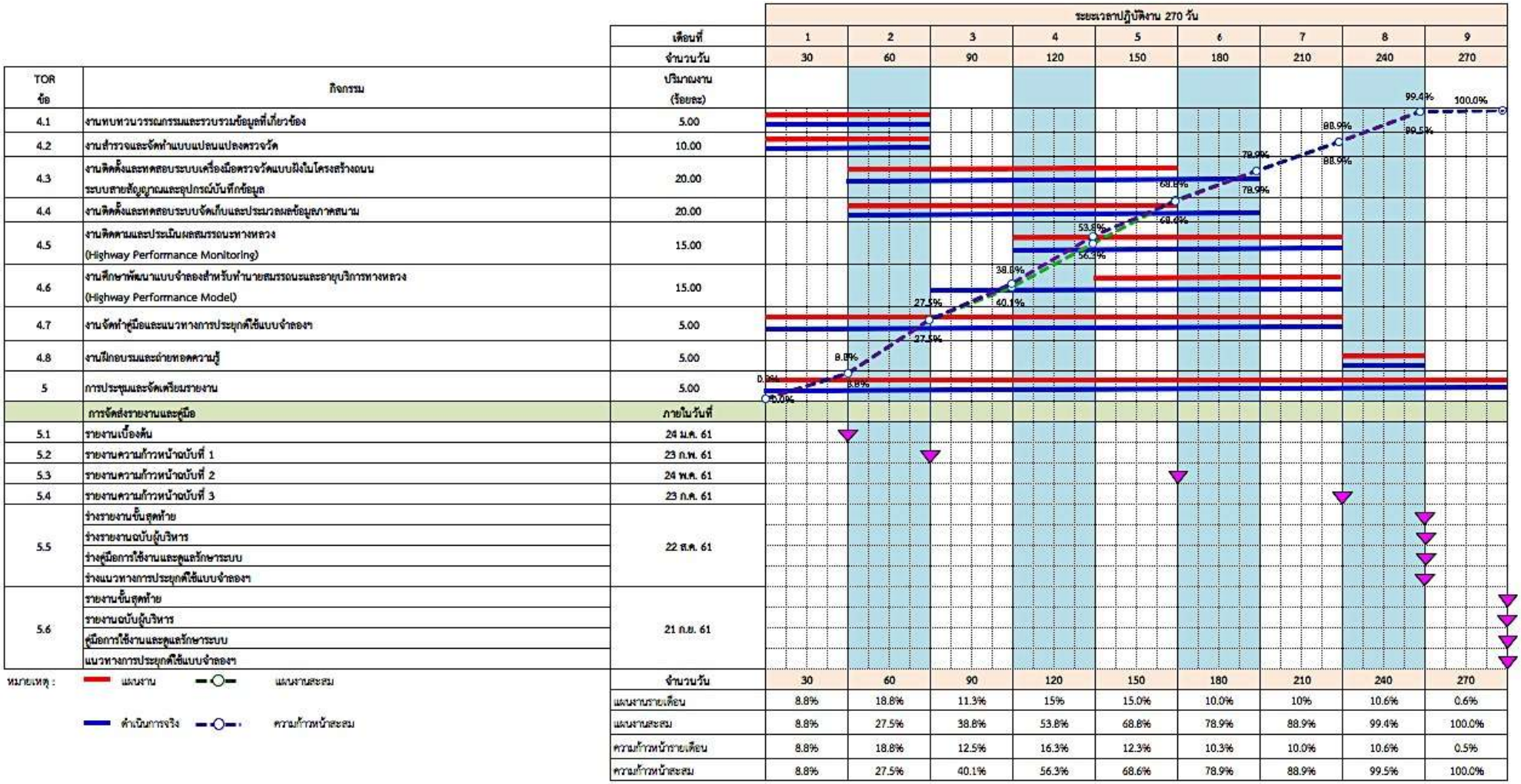
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ

3.2 แผนงานและผลการดำเนินงาน

ที่ปรึกษาได้ดำเนินงานตามขั้นตอนการดำเนินงานโครงการโดยผลการดำเนินงานถึงปัจจุบันแสดงรายละเอียดใน ตารางที่ 3.1 ซึ่งในปัจจุบันโครงการมีความก้าวหน้าโดยรวมร้อยละ 100 เป็นไปตามแผนงานที่วางไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 สรุปความก้าวหน้าและผลการดำเนินงานถึงปัจจุบัน

รายละเอียดการดำเนินงาน	ผลการดำเนินงานถึงปัจจุบัน
บทที่ 4 การทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	100%
บทที่ 5 การสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด	100%
บทที่ 6 การติดตั้งและทดสอบเครื่องมือตรวจวัด	100%
บทที่ 7 การติดตั้งระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามโครงสร้างถนนลาดยาง	100%
บทที่ 8 การติดตามและประเมินสมรรถนะทางหลวง	100%
บทที่ 9 การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง	100%
บทที่ 10 การจัดทำรายงานและถ่ายทอดความรู้	100%



รูปที่ 3.2 แผนการดำเนินงานโครงการ (Work Plan)

3.3 ความสอดคล้องกับข้อกำหนดการว่าจ้างที่ปรึกษา

ที่ปรึกษาได้ดำเนินงานตามรายละเอียดของกิจกรรมในรายงานขั้นสุดท้าย โดยมีสอดคล้องกับกิจกรรมตามรายการข้อกำหนดและขอบเขตงานบริการที่ปรึกษา (TOR) ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบความสอดคล้องของกิจกรรมตาม TOR กับรายงานขั้นสุดท้าย

กิจกรรมตาม TOR	รายงานขั้นสุดท้าย
4.1 งานทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	บทที่ 4 การทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
4.2 งานสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด	บทที่ 5 การสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด
4.3 งานติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล	บทที่ 6 การติดตั้งและทดสอบเครื่องมือตรวจวัด
4.4 งานติดตั้งและทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม	บทที่ 7 การติดตั้งระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามโครงสร้างถนนลาดยาง
4.5 งานติดตามและประเมินผลสมรรถนะทางหลวง (Highway Performance Monitoring)	บทที่ 8 การติดตามและประเมินสมรรถนะทางหลวง
4.6 งานพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance Model)	บทที่ 9 การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง
4.7 งานจัดทำคู่มือและแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลอง	บทที่ 10 การจัดทำรายงานและถ่ายทอดความรู้
4.8 งานฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้	บทที่ 10 การจัดทำรายงานและถ่ายทอดความรู้

3.4 กำหนดการรายงานผลการศึกษา

ระยะเวลาในการดำเนินโครงการรวมทั้งสิ้น 270 วันนับแต่วันลงนามในสัญญาจ้างและเพื่อให้การดำเนินโครงการสามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ภายใต้กรอบเวลา และงบประมาณที่กำหนดไว้ ที่ปรึกษาได้จัดทำแผนการดำเนินงาน โดยมีกำหนดการรายงานผลการศึกษาตามรายละเอียดในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 กำหนดการรายงานผลการศึกษา

ลำดับ	รายการ	ระยะเวลา (วัน)	กำหนดการส่งงาน	ส่งงานจริง
	เริ่มต้นโครงการ	-	-	26 ธ.ค. 60
1.	รายงานเบื้องต้น	30	24 ม.ค. 61	22 ม.ค. 61
2.	รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1	60	23 ก.พ. 61	23 ก.พ. 61
3.	รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2	150	24 พ.ค. 61	26 มิ.ย. 61
4.	รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3	210	23 ก.ค. 61	2 ส.ค. 61
5.	-ร่างรายงานขั้นสุดท้าย -ร่างรายงานฉบับผู้บริหาร -ร่างคู่มือการใช้งานและดูแลรักษาระบบ -ร่างรายงานการศึกษาพัฒนาแบบจำลอง	240	22 ส.ค. 61	12 ก.ย. 61
6.	-รายงานขั้นสุดท้าย -รายงานฉบับผู้บริหาร -คู่มือการใช้งานและดูแลรักษาระบบ -รายงานการศึกษาพัฒนาแบบจำลอง	270	21 ก.ย. 61	21 ก.ย. 61

4. การทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการศึกษา ทบทวน และรวบรวม ขั้นตอนการทำงาน ข้อควรปฏิบัติและข้อควรระวังในการทำงาน ประเด็นปัญหาและอุปสรรค และข้อมูลการตรวจวัดพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนนในการดำเนินงานศึกษาในระยะที่หนึ่ง รวมทั้งรวบรวมข้อมูลรายละเอียดคุณสมบัติและข้อกำหนดทางเทคนิคต่างๆของเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน และผลงานการติดตั้งและการใช้งานที่ผ่านมาในระยะที่หนึ่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดแปลงโครงสร้างถนนลาดยางในระยะที่หนึ่ง

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางบนทางหลวงหมายเลข 4 (ขาเข้า) ตอนควบคุมหมายเลข 0302 (คลองอีจาง – หลุมดิน) บริเวณหลักกิโลเมตรที่ 88+770 ต. ดอนทราย อ. โพธาราม จ.ราชบุรี บริเวณพิกัดละติจูดที่ 99.851005 องศา และลองติจูดที่ 13.637825 องศา ช่องจราจรซ้ายสุด ก่อนถึงสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า) ประมาณ 400 เมตร และอยู่หลังจากผ่านเครื่องชั่งน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ (WIM) ประมาณ 40 เมตร ในพื้นที่ความรับผิดชอบของแขวงทมางหลวงราชบุรี โดยมีขั้นตอนในการทำงานดังนี้

4.1.1 การประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการทำหนังสือขออนุญาตเข้าพื้นที่และเข้าไปนำเสนอภาพรวมโครงการ แผนการติดตั้งอุปกรณ์ การบริหารจราจร และรับข้อเสนอแนะจากแขวงทางหลวงราชบุรีในฐานะเจ้าของพื้นที่ โดยแขวงทางหลวงราชบุรีได้เน้นย้ำเรื่องการติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความปลอดภัย ให้ดำเนินการติดตั้งแผงกั้นจราจร ครอบคลุมพื้นที่แปลงทดสอบ ติดตั้งไฟเตือนและป้ายเบี่ยงการจราจร จัดหาคนเพื่ออำนวยการจราจรบริเวณจุดเริ่มปิดช่องจราจร รวมถึงติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการล่วงหน้าก่อนเข้าดำเนินการ เพื่อให้ผู้ใช้เส้นทางได้รับทราบข้อมูลช่วงเวลาที่จะปิดหรือเบี่ยงการจราจร ทั้งนี้ท่านได้มอบหมายให้หมวดการทางโพธาราม และตำรวจทางหลวงในพื้นที่ มาช่วยวางแผน กำกับและแก้ปัญหาการจราจรที่บริเวณแปลงทดสอบด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ประชุมร่วมกับแขวงทางหลวงราชบุรี หมวดการทางโพธาราม และตำรวจทางหลวง

4.1.2 การติดตั้งป้ายและอุปกรณ์การบริหารจราจร

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างกิจกรรมการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยมีลักษณะและรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แผ่นวัสดุที่ใช้ทำป้ายเป็นไปตามมาตรฐานป้ายจราจรในงานก่อสร้าง บูรณะและบำรุงรักษาทางหลวงของกรมทางหลวง
- สีป้ายเป็นสีน้ำเงิน มีตัวอักษรและตัวเลขสีขาว แผ่นวัสดุสะท้อนแสงที่ใช้ในการผลิตป้ายเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.
- แบบของตัวอักษรและตัวเลข และการจัดระยะห่างระหว่างตัวอักษร ให้ใช้ตามหนังสือมาตรฐานตัวอักษรและตัวเลขสำหรับป้ายจราจรของกรมทางหลวง หรือปรับเพิ่มลดขนาดตัวอักษรตามความเหมาะสม



รูปที่ 4.2 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้งสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

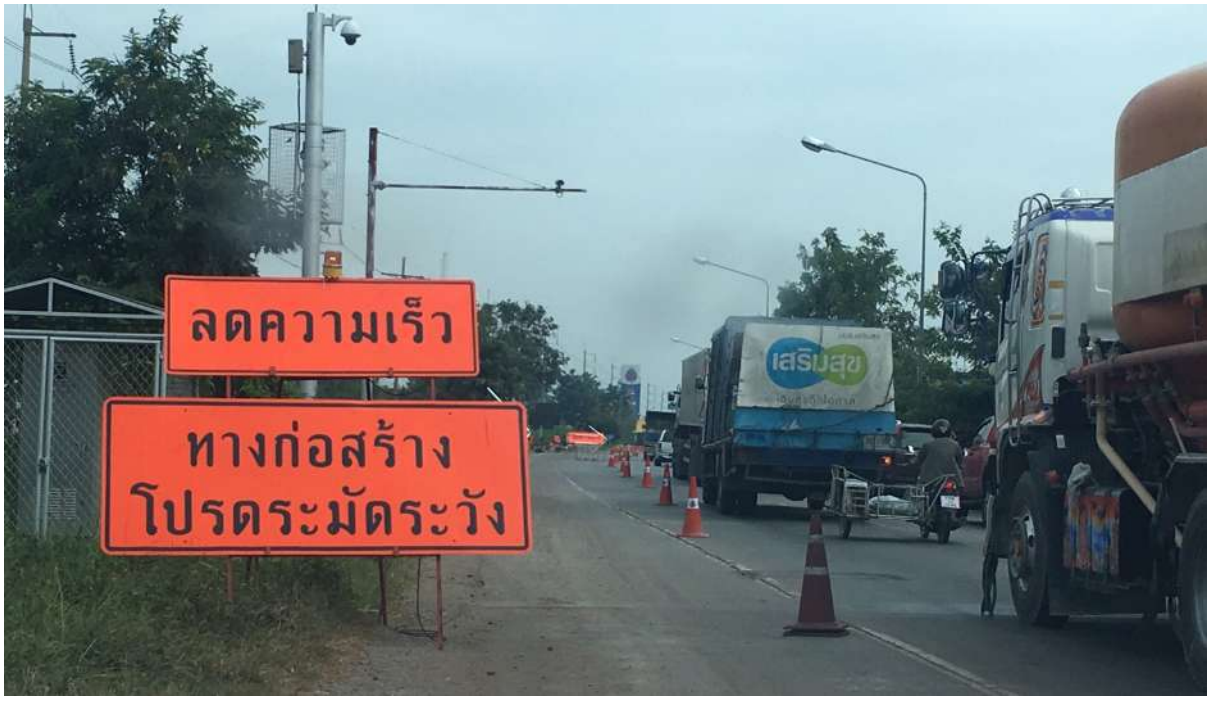
ที่ปรึกษาได้ดำเนินการปิดการจราจรจำนวน 2 ช่องทางซ้ายสุดจากไหล่ทางโดยใช้แผงกั้นจราจรชนิดบรรจุน้ำได้ (Barrier) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืนดังแสดงในรูปที่ 4.4 นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งป้ายจราจรอำนวยความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้ทางดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.3 การปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 4.4 การติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืน



รูปที่ 4.5 การติดตั้งป้ายจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

ภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแปลงโครงสร้างถนนลาดยางแล้วเสร็จ ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้ง ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวร โดยมีลักษณะและรูปแบบเป็นดังแสดงรูปที่ 4.6 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แผ่นวัสดุที่ใช้ทำป้ายเป็นไปตามมาตรฐานป้ายจราจรในงานก่อสร้าง บูรณะและบำรุงรักษาทางหลวงของกรมทางหลวง
- ใช้สีป้ายเป็นสีขาว มีตัวอักษรและตัวเลขสีดำ แผ่นวัสดุสะท้อนแสงที่ใช้ในการผลิตป้ายเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.

- แบบของตัวอักษรและตัวเลข และการจัดระยะห่างระหว่างตัวอักษร ให้ใช้ตามหนังสือมาตรฐานตัวอักษรและตัวเลขสำหรับป้ายจราจรของกรมทางหลวง หรืออาจพิจาณาปรับเพิ่มลดขนาดตัวอักษรตามความเหมาะสม



รูปที่ 4.6 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

4.1.3 การขุดรื้อผิวทาง

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการขุดรื้อ ฝังกลบ และบดอัดแต่ละชั้นทาง สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) งานขุดเจาะรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางจนถึงชั้น subgrade ขนาด 3.50 x 12.00 ม. บริเวณช่องจราจรที่ 1 นับจากไหล่ทาง ตัดแต่งขอบผิวทางและหลุมให้เรียบโดยให้ตั้งฉากกับผิวทางและชั้นทางเดิม จากนั้นทำความสะอาดก้นหลุมพร้อมทั้งนำเศษวัสดุที่หลุดร่วนออก ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การขุดรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางช่องจราจรที่ 1

2) งานขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางประกอบด้วยชั้น Base, Subbase, Selected Material จนถึงชั้น Subgrade ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางจนถึงชั้น Subgrade

4.1.4 การบดอัดชั้น Subgrade

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการปรับระดับชั้น Subgrade เดิมให้เรียบได้ระดับ พร้อมทั้งบดอัดให้แน่นโดยใช้เครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดเล็ก (Small Vibratory Compactor) พร้อมทั้งได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างวัสดุไปทดสอบคุณสมบัติและทดสอบความแน่นภายหลังการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 การบดอัดชั้น Subgrade



รูปที่ 4.10 การตรวจสอบระดับชั้น Subgrade



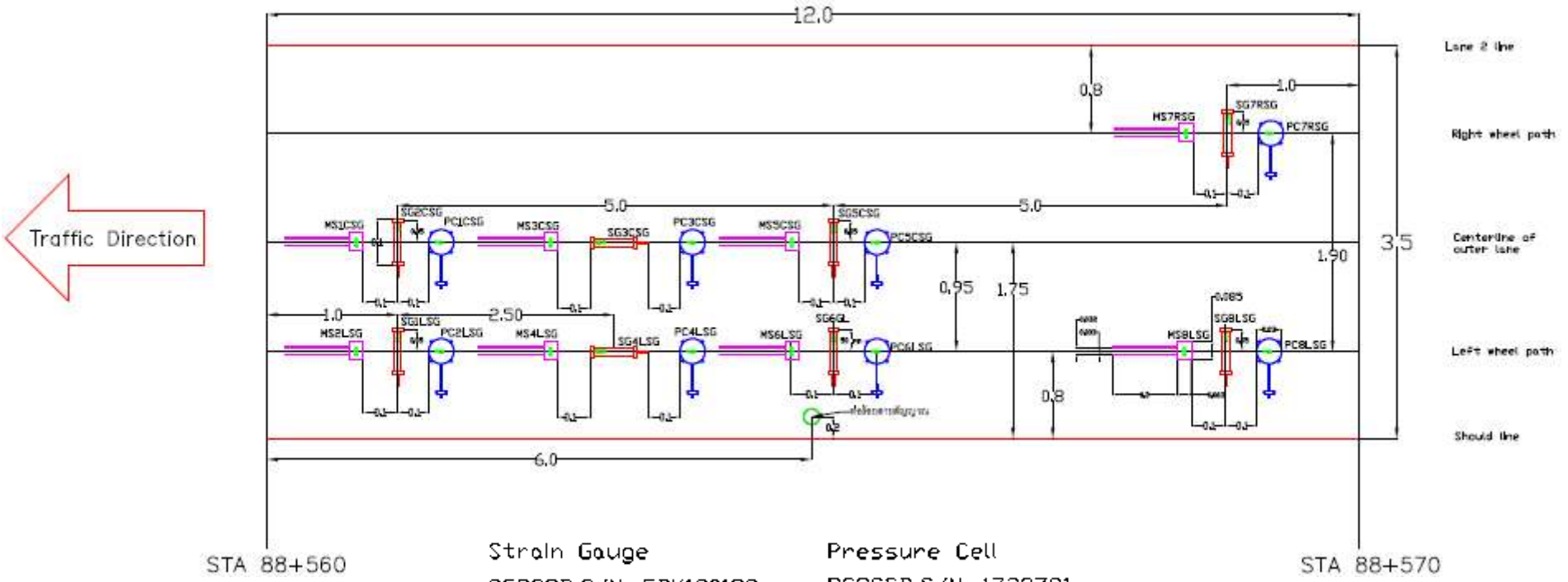
รูปที่ 4.11 การทดสอบความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Field Desity Test) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 4.12 การตรวจสอบค่าการบดอัดด้วยเครื่อง Nuclear Density Gage ในชั้น Subgrade

4.1.5 การติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Subgrade

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชั้น Subgrade จำนวน 24 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 4.13 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.14 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.16 นอกจากนี้ที่ปรึกษาได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



Strain Gauge	Pressure Cell
SG9CSB,S/N: EDK180182	PC9CSB,S/N: 1728791
SG10LSB,S/N: EDK180183	PC10LSB,S/N: 1728792
SG11CSB,S/N: EDK180184	PC11CSB,S/N: 1728793
SG12LSB,S/N: EDK180185	PC12LSB,S/N: 1728794
SG13CSB,S/N: EDK180186	PC13CSB,S/N: 1728795
SG14LSB,S/N: EKD180187	PC14LSB,S/N: 1728796
SG15RSB,S/N: EDK180188	PC15RSB,S/N: 1728797
SG16LSB,S/N: EKD180189	PC16LSB,S/N: 1728798

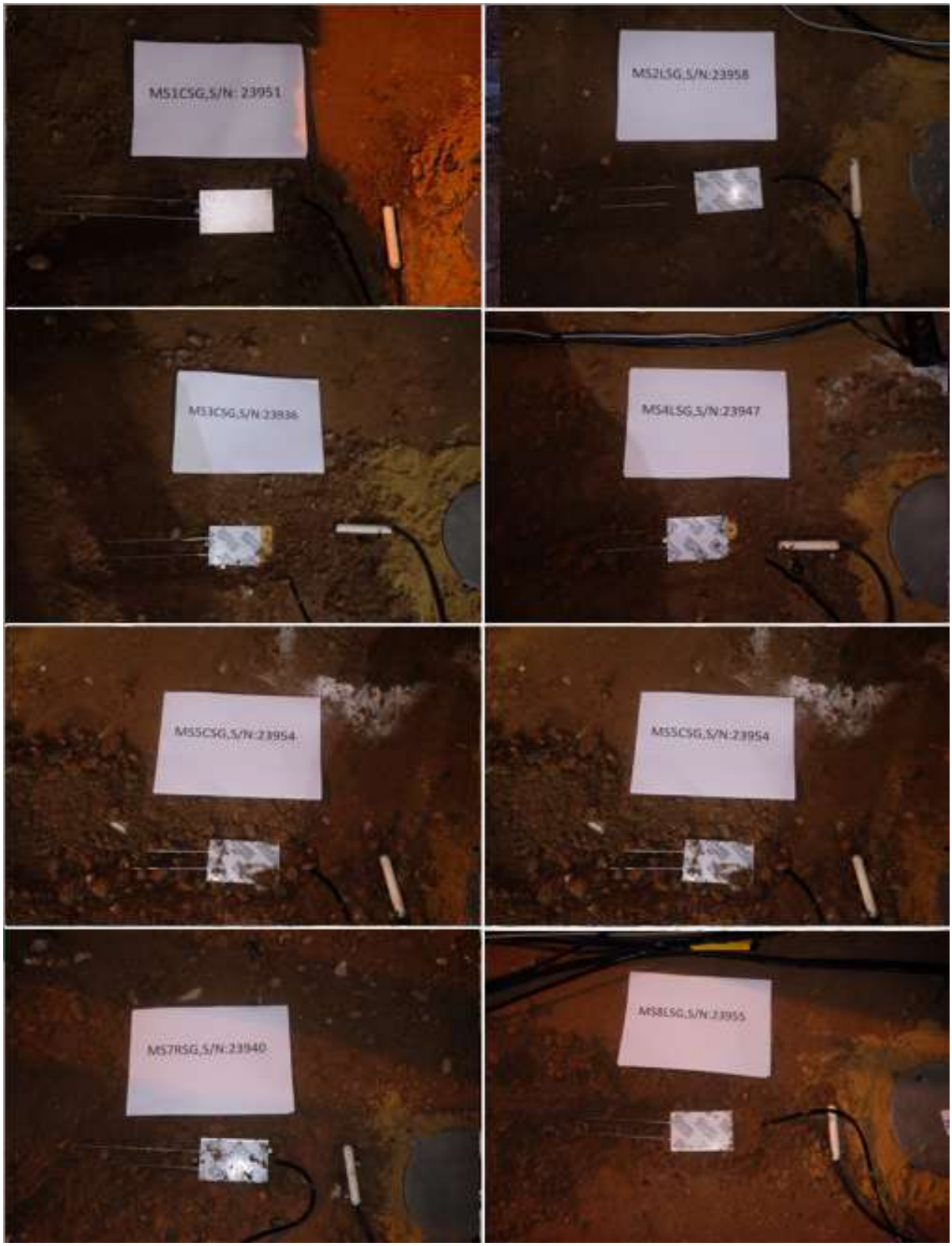
รูปที่ 4.13 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น subgrade ในระยะที่หนึ่ง



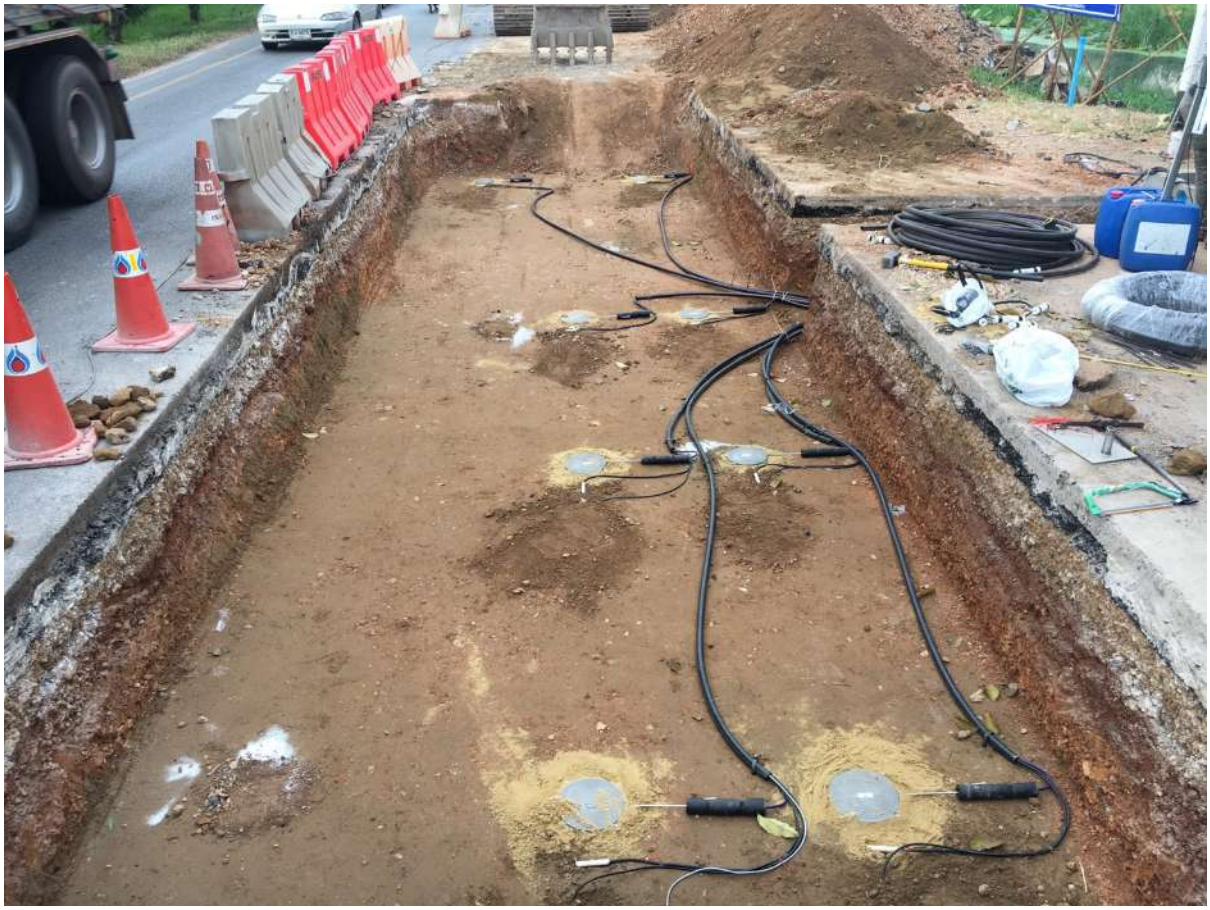
รูปที่ 4.14 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 4.15 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 4.16 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 4.17 การเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 24 ตัว ในชั้น Subgrade ลงท่อ PE

4.1.6 การฝังกลบอุปกรณ์และบดอัดชั้น Subgrade, Selected Material จนถึงชั้น Subbase

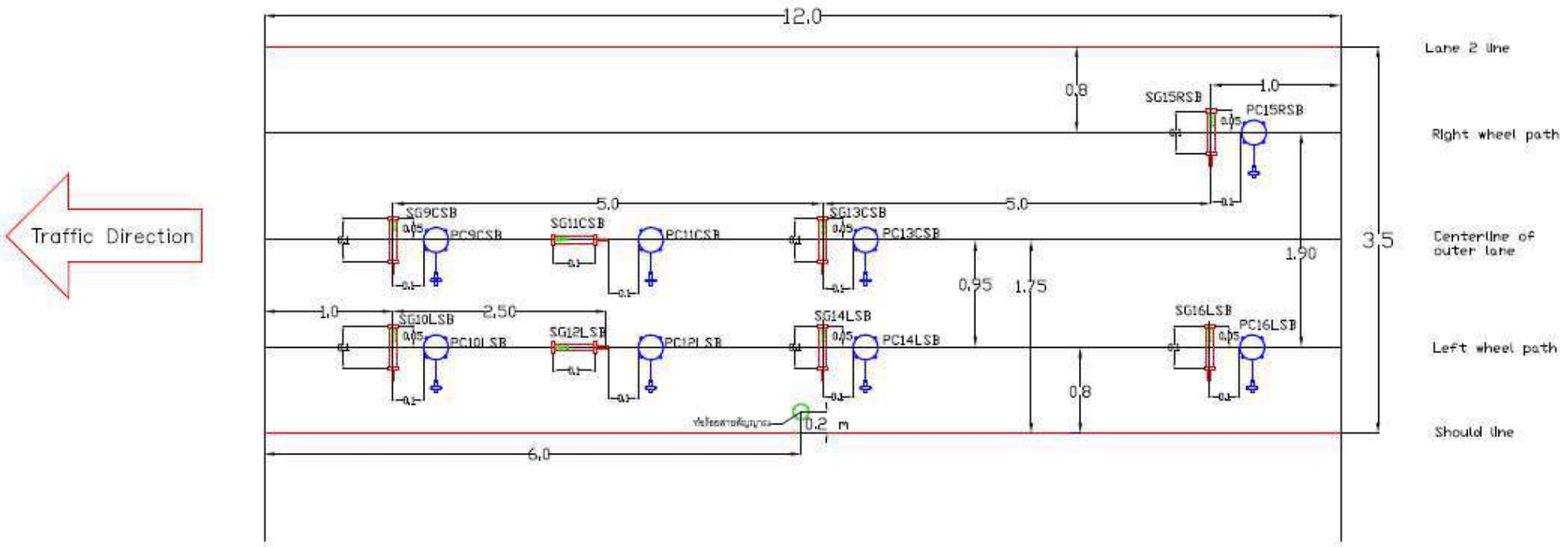
ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการฝังกลบชั้น Subgrade, Selected Material จนถึงชั้น Subbase พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดเล็ก (Small Vibratory Compactor) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การฝังกลบชั้น Subbase, Selected Material จนถึงชั้น Subbase

4.1.7 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณชั้น Subbase

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชั้น Subbase จำนวน 16 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 4.19 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.21 นอกจากนี้ที่ปรึกษาได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



Strain Gauge	Pressure Cell
SG9CSB,S/N: EDK180182	PC9CSB,S/N: 1728791
SG10LSB,S/N: EDK180183	PC10LSB,S/N: 1728792
SG11CSB,S/N: EDK180184	PC11CSB,S/N: 1728793
SG12LSB,S/N: EDK180185	PC12LSB,S/N: 1728794
SG13CSB,S/N: EDK180186	PC13CSB,S/N: 1728795
SG14LSB,S/N: EKD180187	PC14LSB,S/N: 1728796
SG15RSB,S/N: EDK180188	PC15RSB,S/N: 1728797
SG16LSB,S/N: EKD180189	PC16LSB,S/N: 1728798

รูปที่ 4.19 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Subbase ในระยะที่หนึ่ง



รูปที่ 4.20 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Subbase



รูปที่ 4.21 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subbase



รูปที่ 4.22 การเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในชั้น Subbase ลงท่อ PE

4.1.8 การฝังกลบอุปกรณ์และบดอัดชั้น Subbase จนถึงชั้น Middlebase

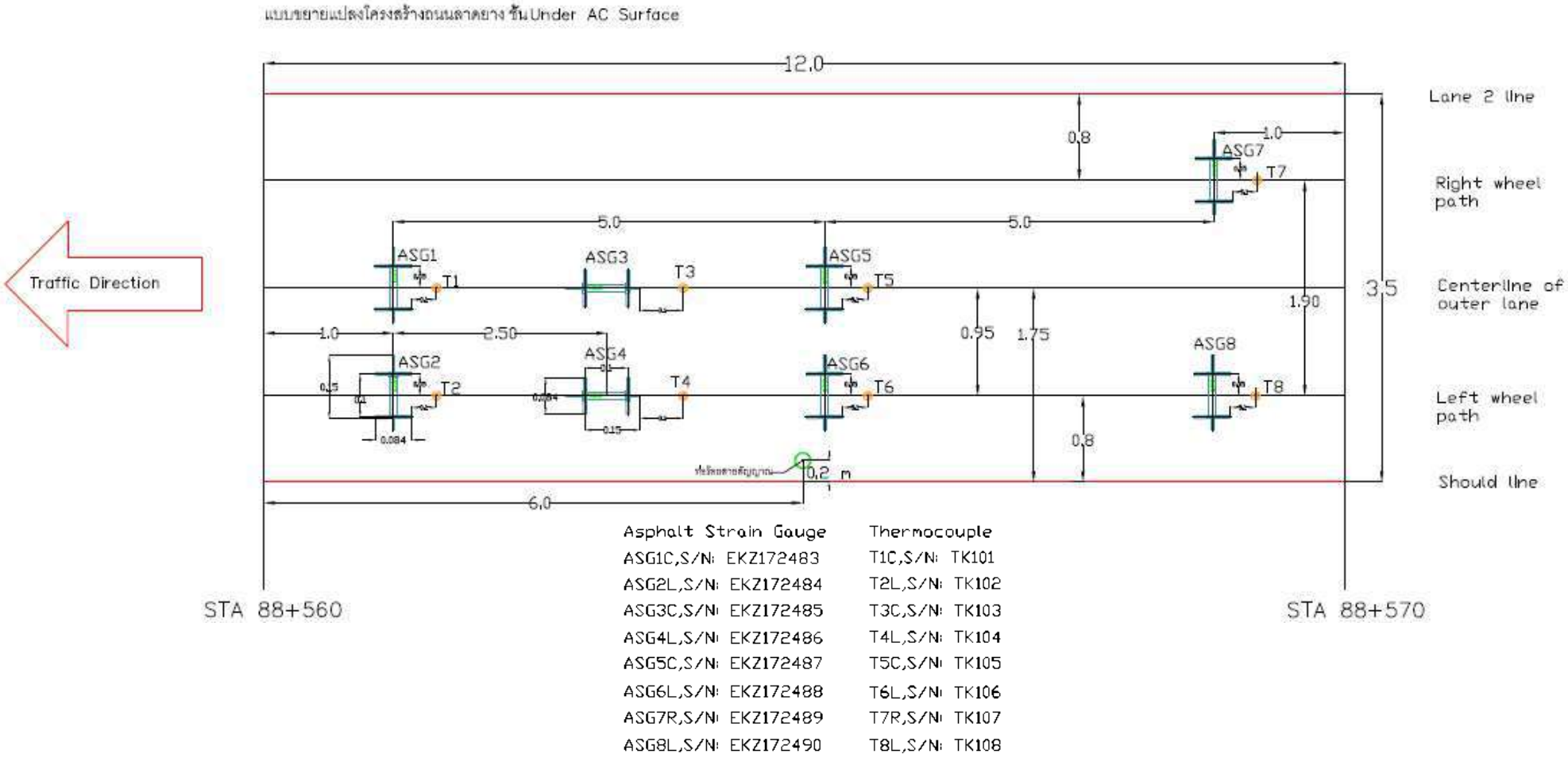
ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการฝังกลบชั้น Subbase จนถึงชั้น Middlebase พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดเล็ก (Small Vibratory Compactor) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 การฝังกลบชั้น Subbase จนถึงชั้น Middlebase

4.1.9 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณชั้น Middlebase

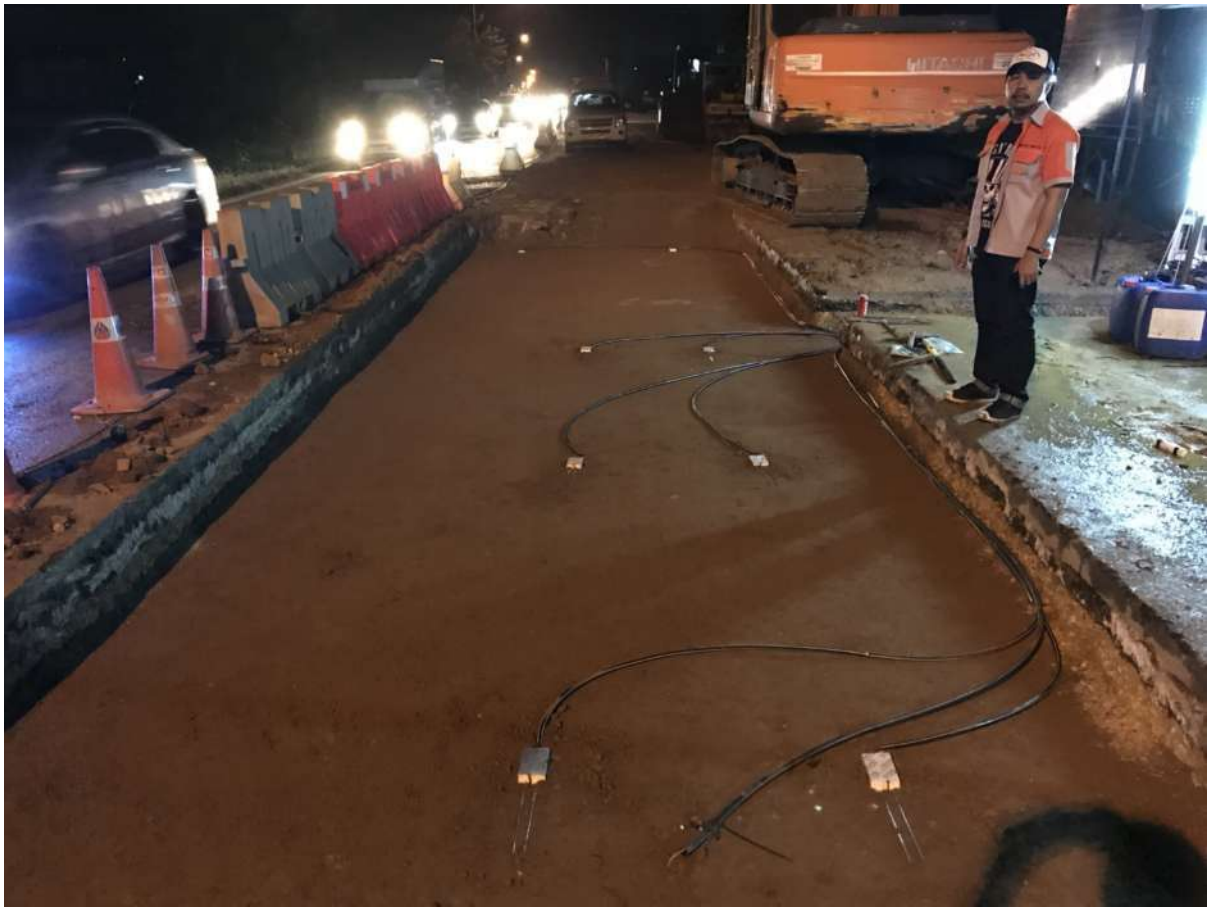
ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชั้น Middlebase จำนวน 8 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 4.24 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.25 นอกจากนี้ที่ปรึกษาได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 4.24 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Under AC Surface ในระยะที่หนึ่ง



รูปที่ 4.25 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น Middlebase



รูปที่ 4.26 การเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในชั้น Middlebase ลงท่อ PE

4.1.10 การฝังกลบอุปกรณ์และบดอัดชั้น Middlebase จนถึงชั้น Under AC Surface

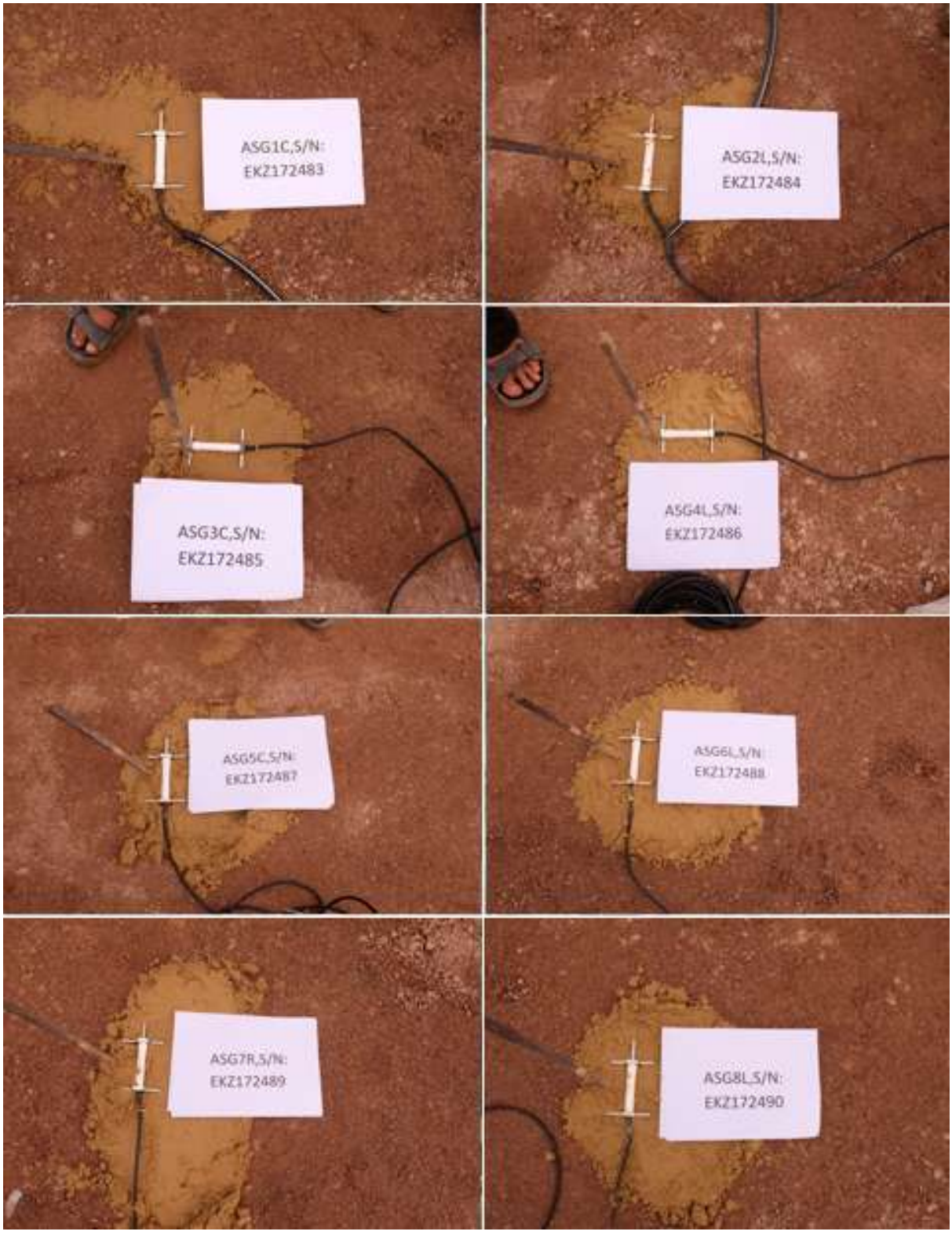
ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการฝังกลบชั้น Middlebase จนถึงชั้น Under AC Surface พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดเล็ก (Small Vibratory Compactor) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 4.27



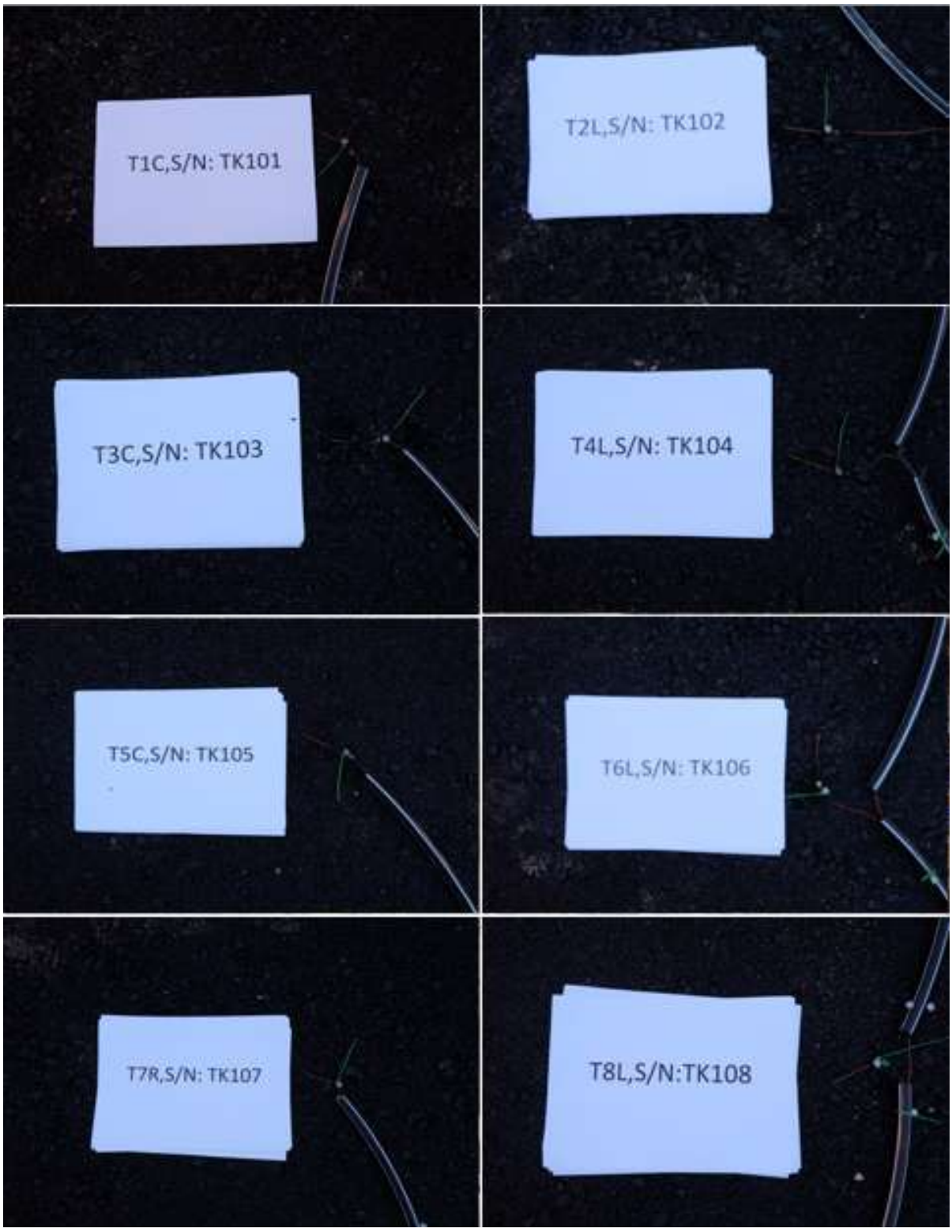
รูปที่ 4.27 การฝังกลบชั้น Middlebase จนถึงชั้น Under AC Surface

4.1.11 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณชั้น Under AC Surface

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชั้น Under AC Surface จำนวน 16 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 4.28 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) จำนวน 8 ตัว และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.29 นอกจากนี้ที่ปรึกษาได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ถึง รูปที่ 4.31 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 4.28 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในชั้น Under AC Suface



รูปที่ 4.29 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในชั้น Under AC Suface



รูปที่ 4.30 การเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในชั้น Under AC Surface ลงท่อ PE



รูปที่ 4.31 การเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในชั้น Under AC Surface ลงท่อ PE

4.1.12 การก่อสร้างชั้นผิวทางลาดยาง

ในระยะที่หนึ่งปรึกษาได้ดำเนินการก่อสร้างชั้นผิวทางลาดยางซึ่งประกอบชั้น prime coat, ชั้น asphalt concrete binder course, ชั้น tack coat และ ชั้น asphalt concrete wearing course ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ถึง รูปที่ 4.35



รูปที่ 4.32 ชั้น Prime Coat



รูปที่ 4.33 ชั้น Asphalt Concrete Binder Course



รูปที่ 4.34 ชั้น Tack Coat



รูปที่ 4.35 ชั้น Asphalt Concrete Wearing Course

4.1.13 การติดตั้ง observation well

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) จำนวน 2 จุด สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง ดังแสดงในรูปที่ 4.36 ถึง รูปที่ 4.37



รูปที่ 4.36 ขุดหลุมเจาะ ลึกขนาด 15 เมตร จำนวน 2 จุด



รูปที่ 4.37 เทพื้นคอนกรีตบริเวณรอบหลุมเจาะและติดตั้งเสาเหล็กกั้นบริเวณ จำนวน 2 จุด

4.1.14 การติดตั้งโครงสร้างและตู้อุปกรณ์ควบคุมในภาคสนาม

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ติดตั้งตู้อุปกรณ์ควบคุมและบ่อพักสายสัญญาณ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.38 ถึง รูปที่ 4.39



รูปที่ 4.38 ติดตั้งรั้วตาข่ายพร้อมโครงหลังคาเมทัลชีทและตู้ควบคุม



รูปที่ 4.39 บ่อพักสายสัญญาณ

4.1.15 การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าและเครือข่าย

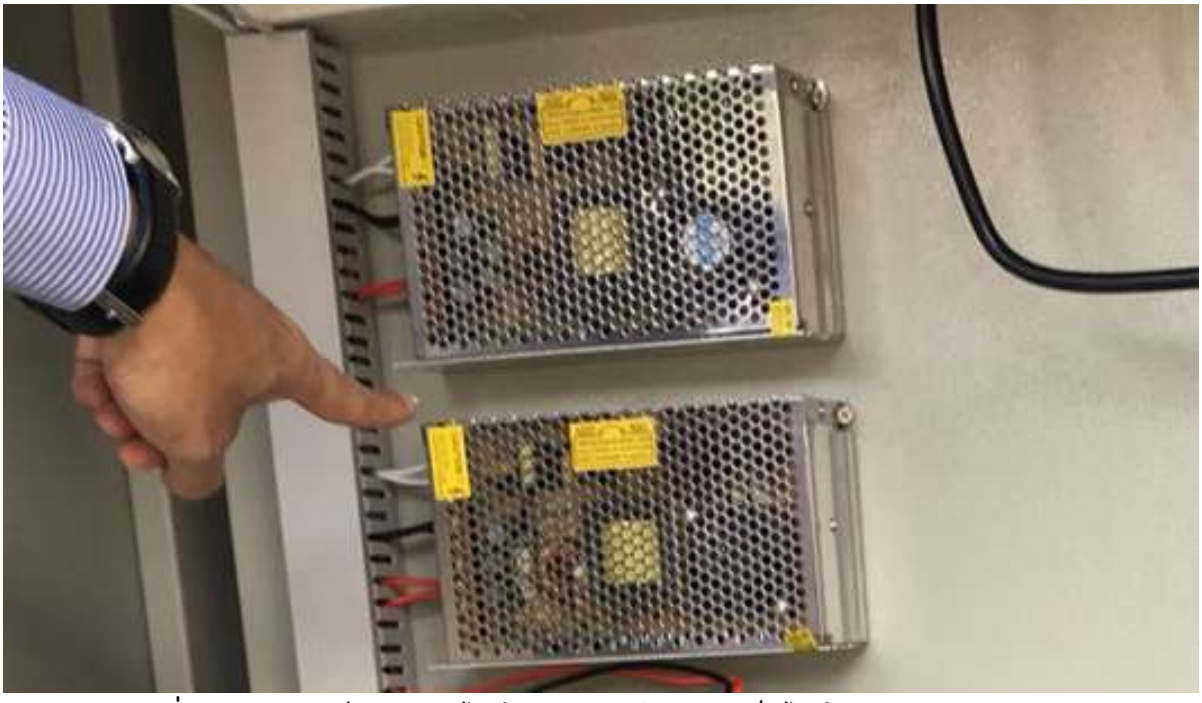
ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการขออนุญาตเพื่อเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าจากแนวสายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อใช้ให้ให้อุปกรณ์ต่างๆ ติดตั้งเครื่องสำรองไฟและอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า รวมถึงระบบเครือข่ายอินเตอร์เน็ตที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากภาคสนามมายังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย เพื่อประมวลข้อมูลและแสดงผลการตรวจวัดต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.40 ถึง รูปที่ 4.43



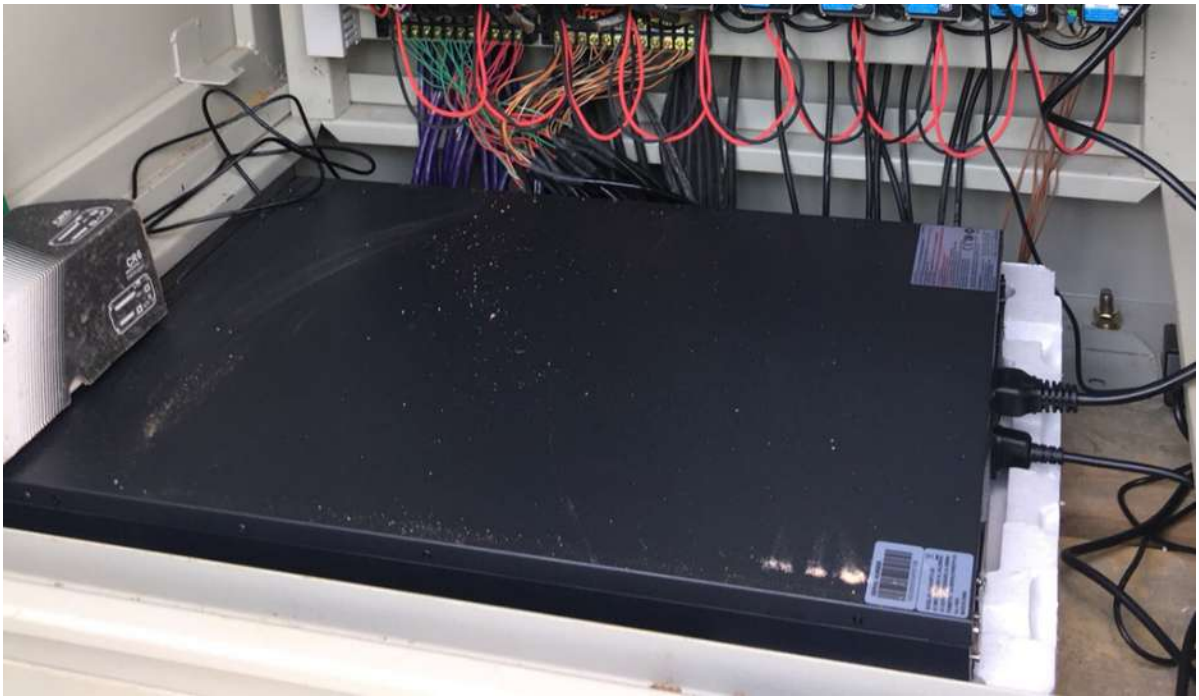
รูปที่ 4.40 การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 4.41 การเชื่อมต่อระบบเครือข่ายความเร็วสูงจากผู้ให้บริการ (Internet Service Provider : ISP)



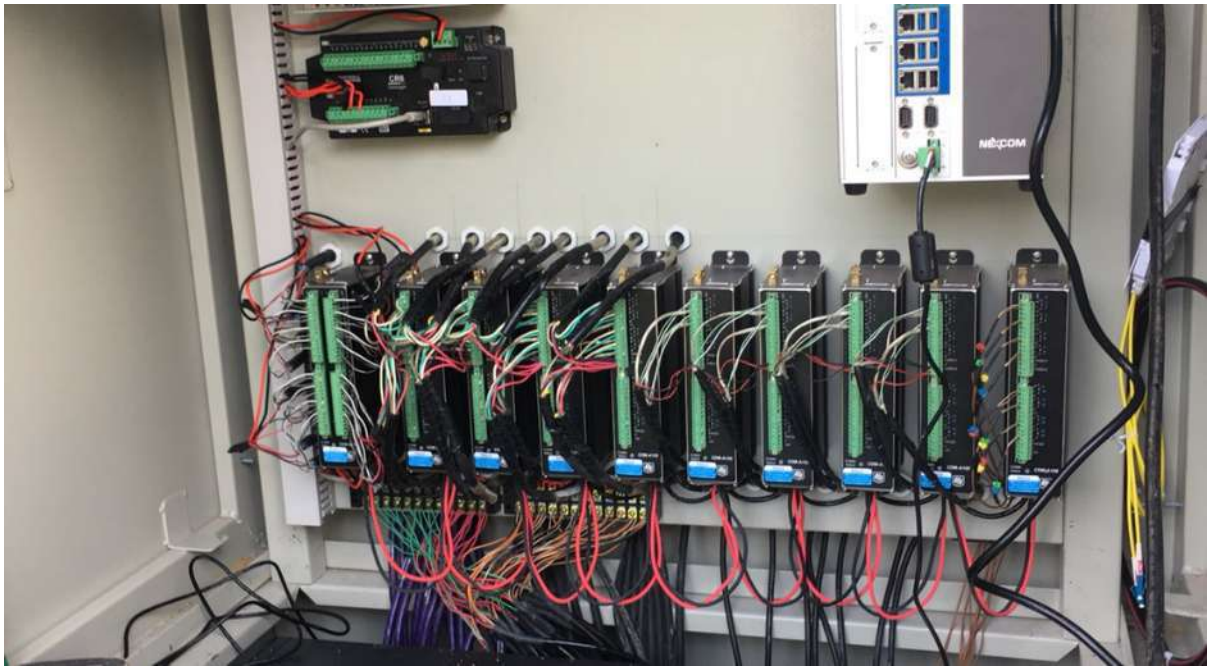
รูปที่ 4.42 อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC)



รูปที่ 4.43 อุปกรณ์ UPS สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

4.1.16 การติดตั้ง data logger

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) ติดตั้งภายใน Cabinet เพื่อป้องกันความชื้น ความร้อน และสภาพแวดล้อมที่จะให้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลเกิดความเสียหาย ขณะการใช้งานในภาคสนามได้ มีอัตราความถี่ในการเก็บข้อมูลสูงสุด 100 Hz ดังแสดงในรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)

การติดตั้ง data logger จะมีการเชื่อมต่อเข้ากับ UPS สำหรับในกรณีที่ไฟฟ้าขัดข้อง ไฟฟ้าตก หรือเกิดการกระชาก ระยะเวลาการ backup ก็จะขึ้นอยู่ตามขนาดของ UPS เมื่อไฟฟ้าติดระบบก็จะทำการชาร์ตไปเก็บไว้แบตเตอรี่ ในส่วนของข้อมูล data logger จะมี CF card สำหรับเก็บข้อมูล ในกรณีที่ไฟฟ้าดับข้อมูล

ที่ค้างอยู่ระหว่างการบันทึกจะถูกเก็บไว้ใน CF Card เมื่อไฟฟ้าติดระบบของ data logger จะกลับมาทำงานเป็นปกติ

เมื่อระบบขัดข้องระหว่างการใช้งานให้การทำการ on/off การจ่ายกระแสไฟฟ้า 12Vdc ให้กับ data logger อีกวิธีหนึ่งในกรณีที่ on/off แล้วระบบยังไม่สามารถทำงานได้ ให้ทำการลงระบบปฏิบัติการใหม่

ประมาณการระยะเวลาที่ Data Logger สามารถจัดข้อมูลผลการตรวจวัดทั้งหมด สำหรับแปลงลาดยางและแปลงคอนกรีตขึ้นอยู่กับการตั้งค่าความถี่ในการเก็บข้อมูล เช่น หากบันทึกค่าทุก 15 นาที จะมีระยะประมาณ 270 วัน (memory 16 GB) โดยผู้ใช้สามารถ Save ข้อมูลผลการตรวจวัดจาก Data logger ออกมาได้โดยใช้ Memory Card

วิธีการในการเชื่อมโยงข้อมูลจาก Data Logger ไปยัง Computer อีกเครื่องนึงจะเชื่อมต่อผ่าน RS232 หรือระบบ internet (เพิ่ม modem) แล้วแสดงผลผ่าน software (LoggerNet) ของ Campbell โดยโปรแกรม LoggerNet จะสามารถดูข้อมูล บันทึกข้อมูล หรือตั้งค่าให้ CR6 ส่งข้อมูลแบบอัตโนมัติกลับมาที่คอมพิวเตอร์เครื่องนั้นๆได้ ไฟล์ที่บันทึกมาจะเป็นตามไปตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลจาก Data Logger

4.1.17 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV) และอุปกรณ์บันทึกภาพ

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งและตั้งค่ากล้องวงจรปิด (CCTV) ที่รองรับ Digital WDR พร้อมเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าและสายสัญญาณ และเชื่อมต่อสัญญาณจากกล้องวงจรปิดและระบบเครือข่ายเข้ากับอุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) ดังแสดงในรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV)

4.1.18 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)

ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งและเดินสายสัญญาณหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) พร้อมดำเนินการตั้งค่าและเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบเครือข่ายเข้ากับหน่วยประมวลผลภาคสนามดังแสดงในรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)

4.2 ข้อควรปฏิบัติ ข้อควรระวัง ประเด็นปัญหาและอุปสรรคในการทำงานระยะที่หนึ่ง

ในระยะที่หนึ่งมีประเด็นปัญหาและอุปสรรคระหว่างการทำงานติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดที่สามารถนำมาเป็นข้อควรระมัดระวังและจะต้องความเตรียมพร้อมสำหรับการทำงานติดตั้งในระยะที่สองให้เป็นไปอย่างราบรื่น ดังนี้

4.2.1 ปัญหาเรื่องการจราจรติดขัด

เนื่องจากในการทำงานติดตั้งมีความจำเป็นต้องปิดกั้นการจราจรจำนวน 1 ช่องทางจราจร จึงส่งผลให้การจราจรติดขัดบริเวณแปลงติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางดังแสดงในรูปที่ 4.48 ซึ่งที่ปรึกษาได้ดำเนินการประสานงานกับหมวดการทางโพธารามและตำรวจทางหลวงในพื้นที่เพื่อร่วมกันวางแผน กำกับช่วยแก้ปัญหาการจราจร นอกจากนี้ที่ปรึกษาได้ติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการ ป้ายจราจรชั่วคราว แผงกั้นจราจร ไฟฟ้าแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืน และวางแผนการทำงานให้มีความต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมงเพื่อให้งานแล้วเสร็จได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.48 ปัญหาจราจรติดขัดระหว่างการทำงานในระยะที่หนึ่ง

4.2.2 ปัญหาเรื่องสภาพดินฟ้าอากาศ

ในระหว่างการขุดและบดอัดโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางเพื่อการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด หากเกิดฝนตกจะส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง และการขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางที่เสียหายจะเป็นไปได้ยาก เพราะจะทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ตรวจวัดที่ได้ติดตั้งไปแล้ว ซึ่งที่ปรึกษาได้ตรวจสอบพยากรณ์อากาศก่อนการทำงานในแต่ละวัน รวมทั้งได้จัดเตรียมเต็นท์ขนาดใหญ่สำหรับคลุมแปลงตรวจวัดเมื่อมีฝนตกระหว่างการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 ปัญหาฝนตกระหว่างการทำงานในระยะที่หนึ่ง

4.2.3 ปัญหาแนวท่อสาธารณูปโภคใต้ดิน

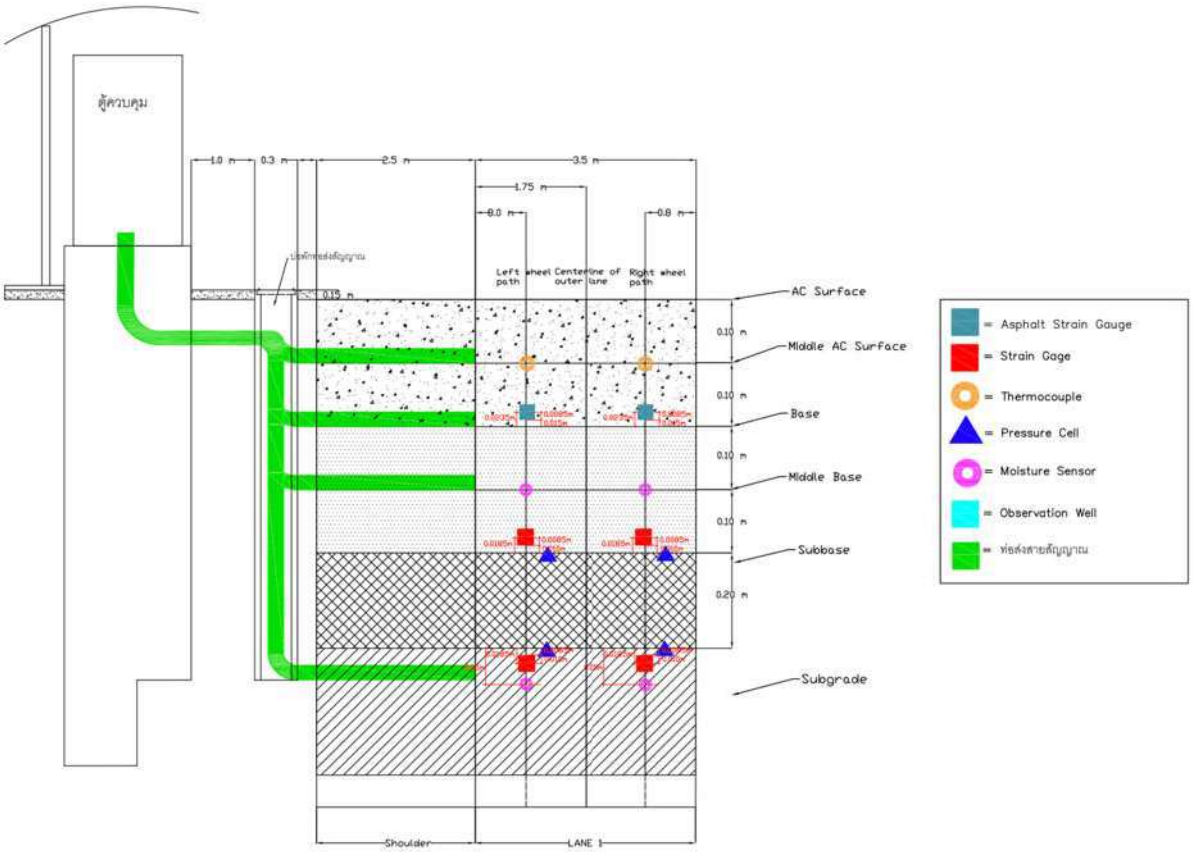
ในระยะที่หนึ่งที่ปรึกษาได้ประสบปัญหาเรื่องแนวท่อระบายน้ำและท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดินระหว่างงานขุดเพื่อติดตั้งท่อร้อยสายสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.50 ซึ่งทำให้ต้องปรับระดับความลึกของแนวท่อร้อยสายสัญญาณให้ต่ำกว่าแนวท่อท่อระบายน้ำและท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดินส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการติดตั้ง ดังนั้นจึงต้องดำเนินการตรวจสอบแบบและสำรวจแนวทางสาธารณูปโภคใต้ดินเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งหรือระดับแนวท่อร้อยสายสัญญาณได้ล่วงหน้า และหลีกเลี่ยงความเสียหายของท่อสาธารณูปโภคใต้ดินระหว่างการขุด



รูปที่ 4.50 ปัญหาแนวท่อสาธารณูปโภคใต้ดิน

4.2.1 ปัญหาความลาดเอียงของท่อร้อยสายสัญญาณ

การติดตั้งท่อร้อยสายสัญญาณจะต้องระมัดระวังเรื่องความลาดเอียงที่จะทำให้น้ำฝนหรือน้ำใต้ดินไหลผ่านท่อไปยังใต้ถนนลาดยางและส่งผลต่อความความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้ดังแสดงในรูปที่ 4.51 ดังนั้นจะต้องตรวจสอบความลาดเอียงของท่อร้อยสายสัญญาณให้ลาดเอียงไปทางบ่อพักสายสัญญาณ และปิดอุดปลายท่อทั้งสองด้านด้วยยางซิลิโคน



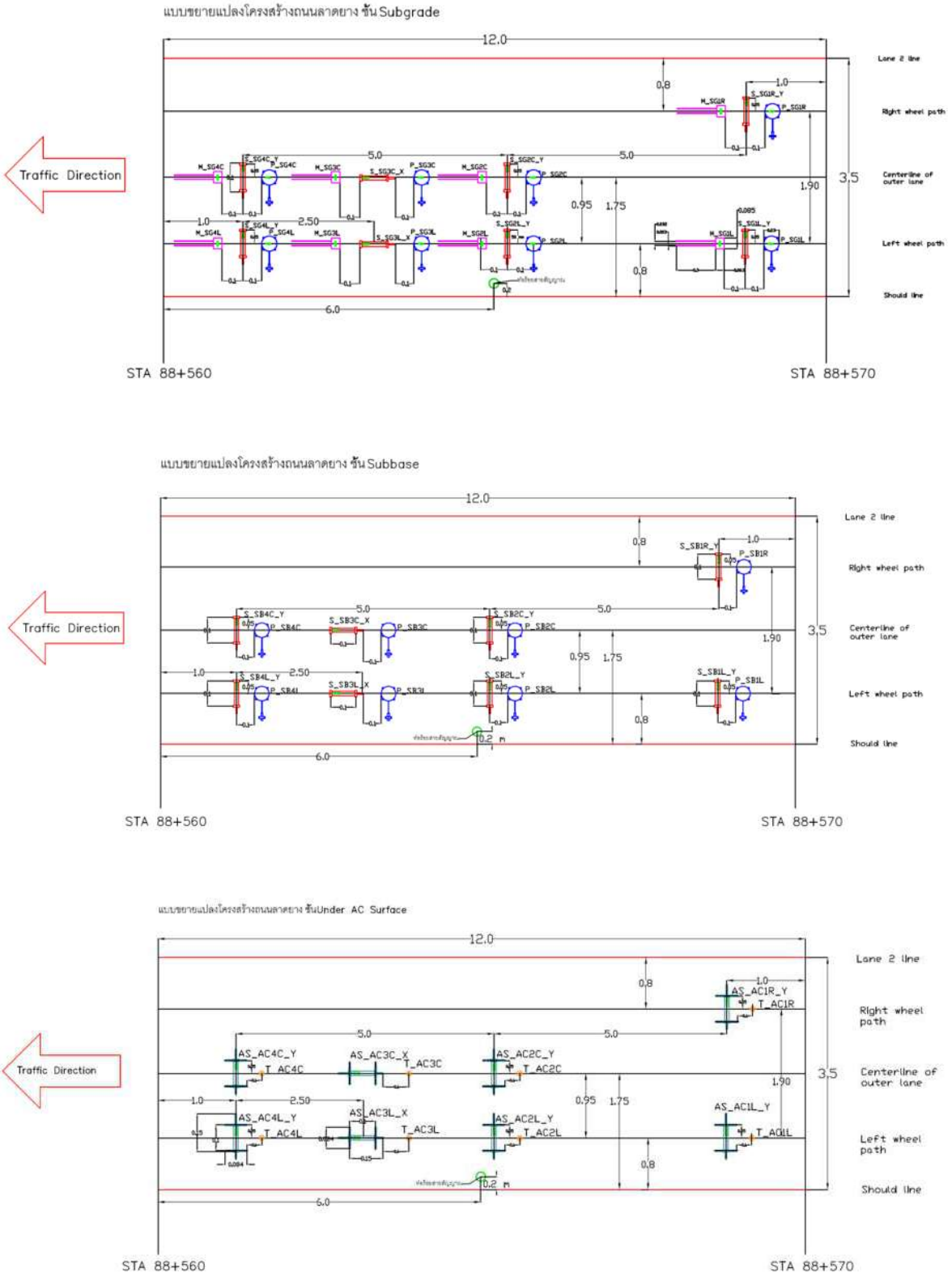
รูปที่ 4.51 ปัญหาความลาดเอียงของท่อร้อยสายสัญญาณ

4.3 ข้อมูลการตรวจวัดพฤติกรรมการตอบสนองโครงสร้างถนนลาดยางในระยะที่หนึ่ง

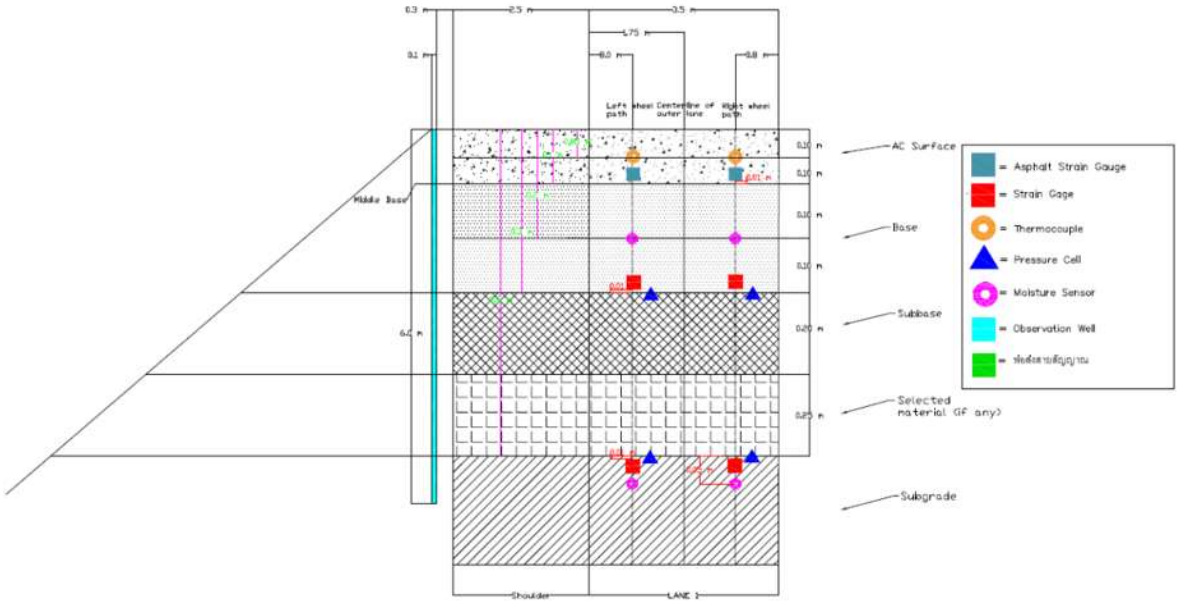
ที่ปรึกษาได้ดำเนินการศึกษา ทบทวน และรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดตอบสนองโครงสร้างถนนลาดยางในระยะที่หนึ่ง ซึ่งสามารถสรุปแนวโน้มและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด น้ำหนักลงเพลา และความเร็วรถบรรทุก ได้ดังนี้

4.3.1 ความเค้นและความเครียดในกรณีรถหยุดนิ่ง

การทดสอบกรณีรถหยุดนิ่งซึ่งสามารถบันทึกค่าความเค้นและความเครียดจากอุปกรณ์ตรวจวัดได้คือ กรณีน้ำหนักทดสอบลงเพลาหลัง 5.5 ตัน และ 11 ตัน โดยตำแหน่งของเพลาหลังอยู่ที่ ตำแหน่ง S2 สำหรับกรณีน้ำหนัก 5.5 ตัน และ ตำแหน่ง 3 สำหรับกรณีน้ำหนัก 11 ตัน รูปที่ 4.52 แสดงตำแหน่งอุปกรณ์วัดตัวอย่างลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเค้นและความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับกรณีน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.52 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ แปลงโครงสร้างถนนลาดยางในระยะที่หนึ่ง

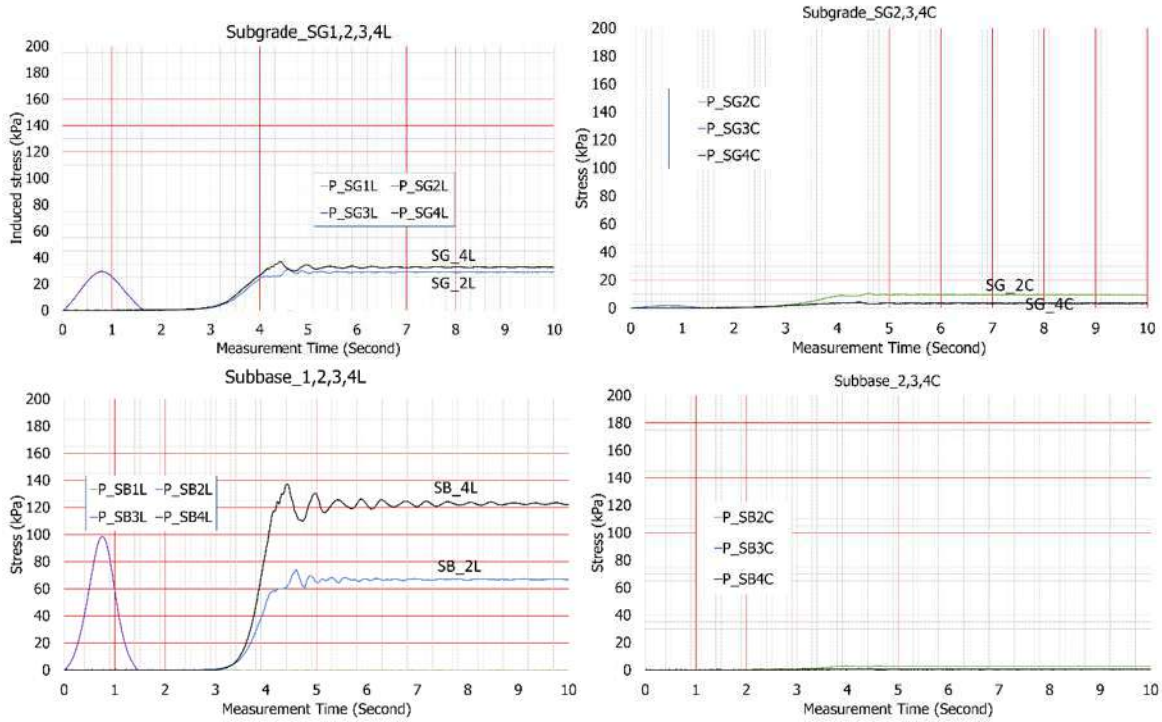


SECTION A

รูปที่ 4.52 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ แปลงโครงสร้างถนนลาดยางในระยะที่หนึ่ง (ต่อ)

จากตัวอย่างผลดังแสดงในรูปที่ 4.53 จะเห็นได้ว่าความเค้นที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง ล้อซ้าย (L) มีค่าสูงกว่ากึ่งกลางช่องจราจร (C) อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเหนือชั้น Subbase ซึ่งค่าความเค้นที่กึ่งกลางช่องจราจรมีประมาณ 0-10% ของค่าความเค้นใต้ล้อซ้าย และค่าความเค้นเหนือชั้น Subbase ที่กึ่งกลางช่องจราจรมีประมาณ 30-40% ของค่าความเค้นใต้ล้อซ้าย

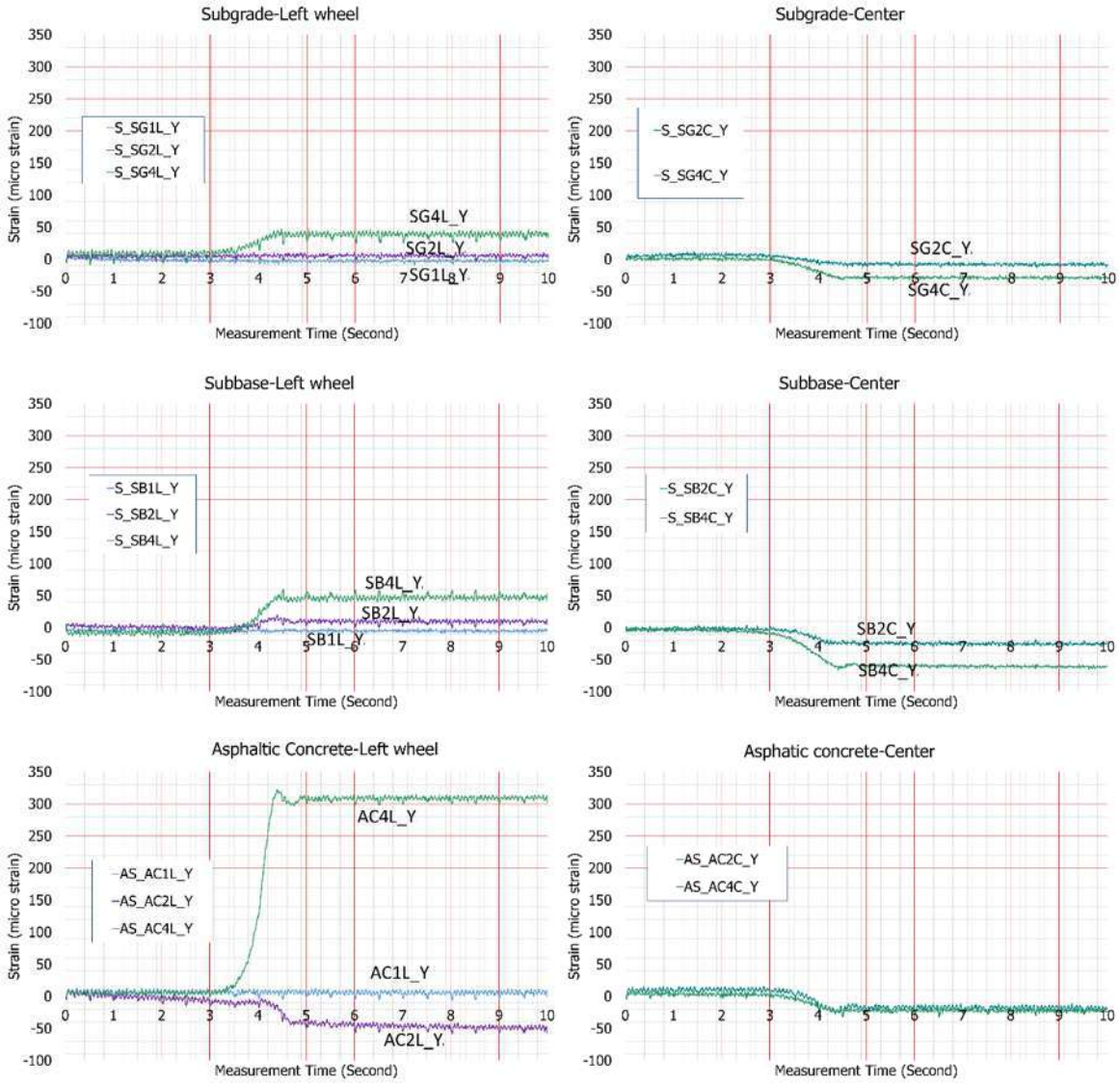
นอกจากนั้นยังเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า Stress ณ ช่วงเวลาใกล้หยุดนิ่ง ที่ตำแหน่งใต้ล้อซ้ายทั้งชั้น Subgrade และชั้น Subbase จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นคลื่น Ripple แบบ Sinusoidal wave ซึ่งค่อยๆลดลง (Attenuation) จนกระทั่งมีค่าลดลงจนคงที่ในสภาวะที่รถหยุดนิ่งจนสนิทดี โดยค่า Max induced stress ที่เกิดขึ้นในช่วงใกล้รถหยุดจะมีค่าสูงกว่าค่า Induced stress ในสภาวะที่รถหยุดประมาณ 10%



รูปที่ 4.53 การเปลี่ยนแปลงความเค้น (Induced stress) ที่ Subgrade (SG) และ Subbase (SB) ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำหยุดนิ่ง (ตำแหน่ง 2 คือเพลาหลัง และตำแหน่ง 4 คือเพลาหน้า ตำแหน่ง L คือล้อซ้าย และตำแหน่ง C คือกลางช่องจราจร) สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 5.5 ตัน หยุดนิ่ง

รูปที่ 4.54 แสดงตัวอย่างค่าความเครียด (Strain) ในชั้น Subgrade (SG) Subbase (SB) และ Asphaltic concrete (AC) surface ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำหยุดนิ่ง (ตำแหน่ง 2 คือเพลาหลัง และตำแหน่ง 4 คือเพลาหน้า ตำแหน่ง L คือล้อซ้าย และตำแหน่ง C คือกลางช่องจราจร) สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 5.5 ตัน หยุดนิ่ง ค่าที่ตรวจวัดได้ ณ ตำแหน่งใต้ล้อซ้าย มีค่าบวก ซึ่งแสดงถึง Tensile strain หรือความเครียดดึง โดยค่า Tensile strain ในชั้น Asphaltic concrete ณ ตำแหน่ง 4 L (ล้อหน้า) มีค่ามากที่สุดประมาณ 310 microstrain แต่ค่า ณ ตำแหน่ง 2L (ล้อหลัง) มีค่าติดลบ ซึ่งคาดว่าเกิดจากตำแหน่งล้อไม่ตรงกับตำแหน่ง Strain Gage ในกรณีที่ค่าไม่สอดคล้องกับหลักทางวิศวกรรม จะไม่นำค่าดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ขั้นถัดไป

ณ ตำแหน่งล้อซ้าย ค่าความเครียดในชั้น Subgrade และ ชั้น Subbase มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเพียงประมาณ 15% ของค่าความเครียดในชั้น AC แต่ในบริเวณกึ่งกลางช่องจราจร จะพบค่าความเครียดติดลบ ซึ่งหมายถึง ความเครียดอัด (Compressive strain) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันทั้งในชั้น Subgrade (SG) Subbase (SB) และ Asphaltic concrete (AC) surface



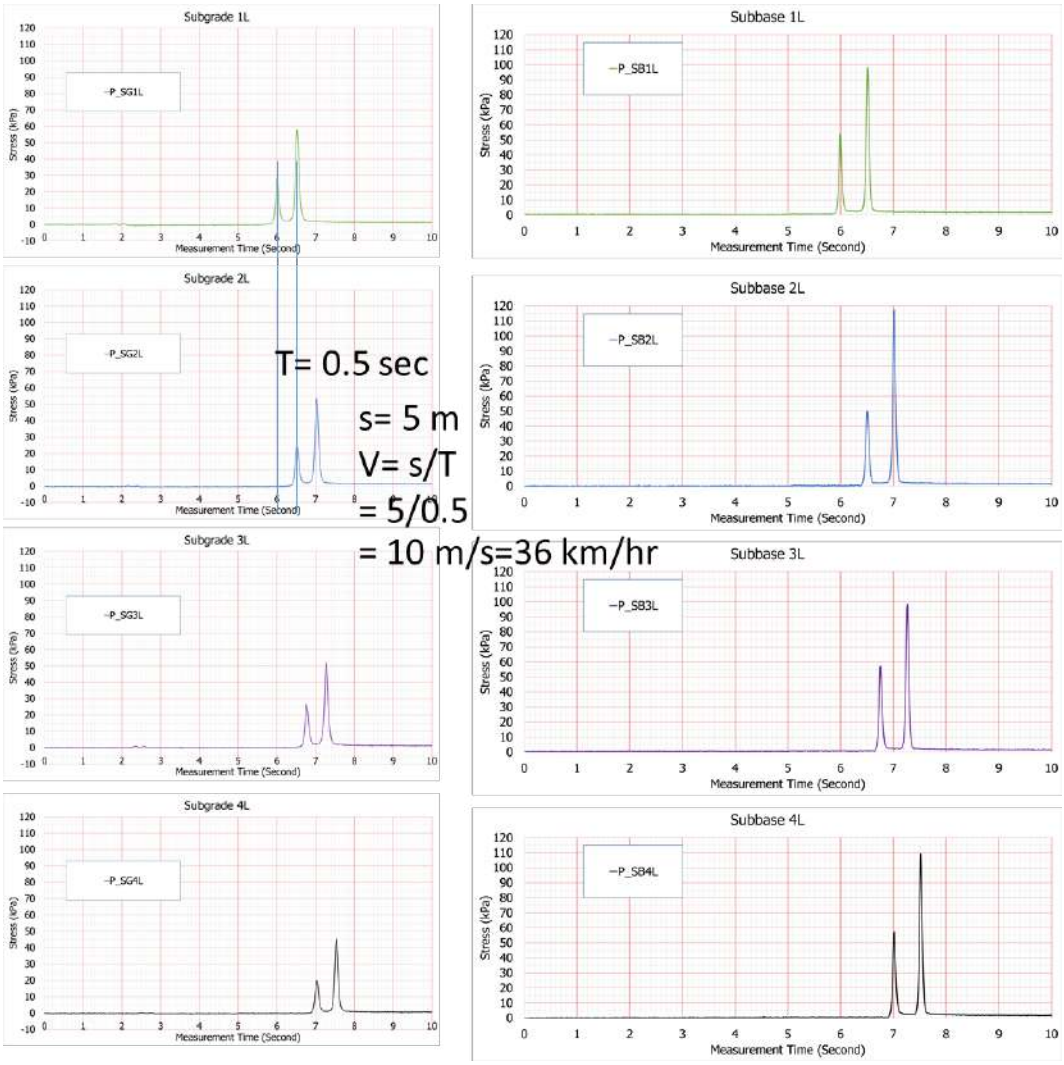
รูปที่ 4.54 การเปลี่ยนแปลงความเครียด (Induced strain) ที่ Subgrade (SG) Subbase (SB) และ Asphaltic concrete (AC) surface ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำหยุดนิ่ง (ตำแหน่ง 2 คือเพลาหลัง และ ตำแหน่ง 4 คือเพลาหน้า ตำแหน่ง L คือล้อซ้าย และตำแหน่ง C คือกลางช่องจราจร) สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 5.5 ตัน หยุดนิ่ง

4.3.2 ความเค้นและความเครียดในกรณีรถวิ่งที่ความเร็วต่างๆ

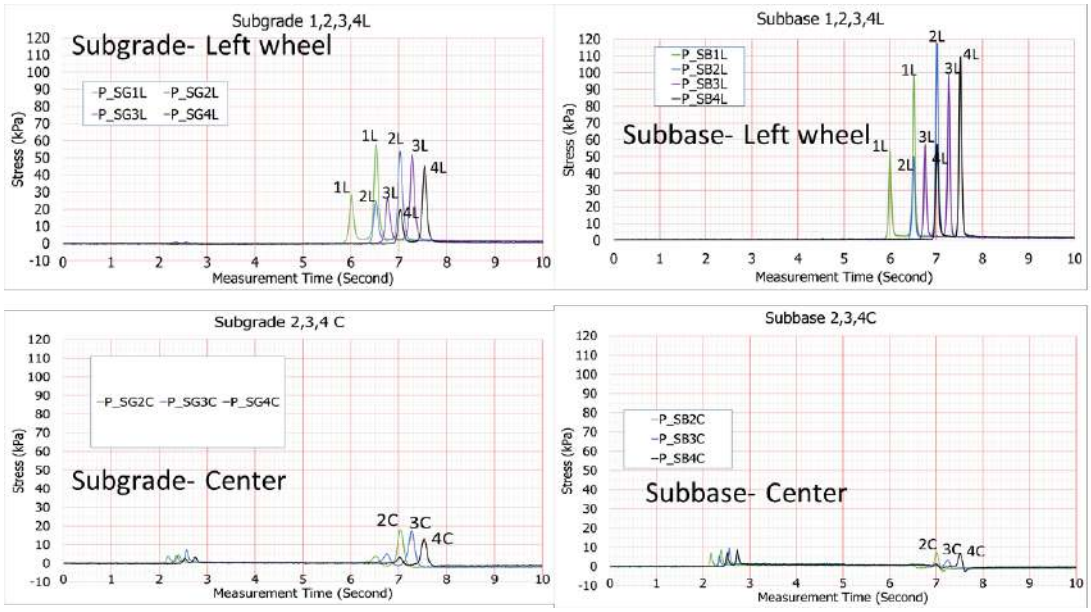
ตัวอย่างผลการตอบสนองของค่าความเค้น (Stress) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade แสดงดังแสดงในรูปที่ 4.55 สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง จะเห็นได้ว่าในช่วงวินาทีที่ 6 เพลาหน้าได้ส่งถ่ายน้ำหนักลงที่เซนเซอร์วัดแรงดันแถวที่ 1 ก่อนและจึงไปที่ตำแหน่งแถวที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งสามารถอ่านค่าระยะเวลาที่รถบรรทุกใช้วิ่งจากเซนเซอร์แถวที่ 1 ไปถึงแถวที่ 2 ได้เท่ากับ 0.5 วินาที เมื่อทราบระยะห่างระหว่างเซนเซอร์แถวที่ 1 และ 2 เท่ากับ 5 เมตร แล้วนำไปคำนวณค่าความเร็วได้เท่ากับ ระยะทาง/เวลา = 5 เมตร/0.5 วินาที = 10 เมตร/วินาที = 36 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับความเร็วที่กำหนดไว้

ค่าแรงดันที่วัดได้ เนื่องจากน้ำหนักเพลาหน้า (Pulse แรงดันที่เกิดขึ้นครั้งแรก)สามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ย จากเซนเซอร์วัดแรงดัน ทั้ง 4 ตัว และค่าแรงดันจากน้ำหนักเพลาหลัง จะคำนวณได้จาก Pulse แรงดันที่เกิดขึ้นครั้งที่สอง จากทุกเซนเซอร์มาเฉลี่ยกัน ค่าเฉลี่ยแรงดันนี้จะใช้ในการวิเคราะห์ผลขั้นต่อไป

รูปที่ 4.56 ปรียบเทียบค่าความเค้น ที่เกิดขึ้น ใต้ล้อซ้าย และบริเวณกึ่งกลาง สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade ซึ่งเห็นได้ว่า ค่า Stress ที่เกิดขึ้นใต้ล้อซ้าย ในชั้น Subbase มีค่าประมาณสองเท่าของค่าที่เกิดขึ้นในชั้น Subgrade แต่หากพิจารณา Stress ที่เกิดขึ้นที่กึ่งกลางถนน พบว่า Stress ในชั้น Subgrade มีค่าสูงกว่าในชั้น Subbase ซึ่งเป็นลักษณะการกระจายของหน่วยแรงซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีการกระจายหน่วยแรงทั่วไป



รูปที่ 4.55 ค่าความเค้น (Stress) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง



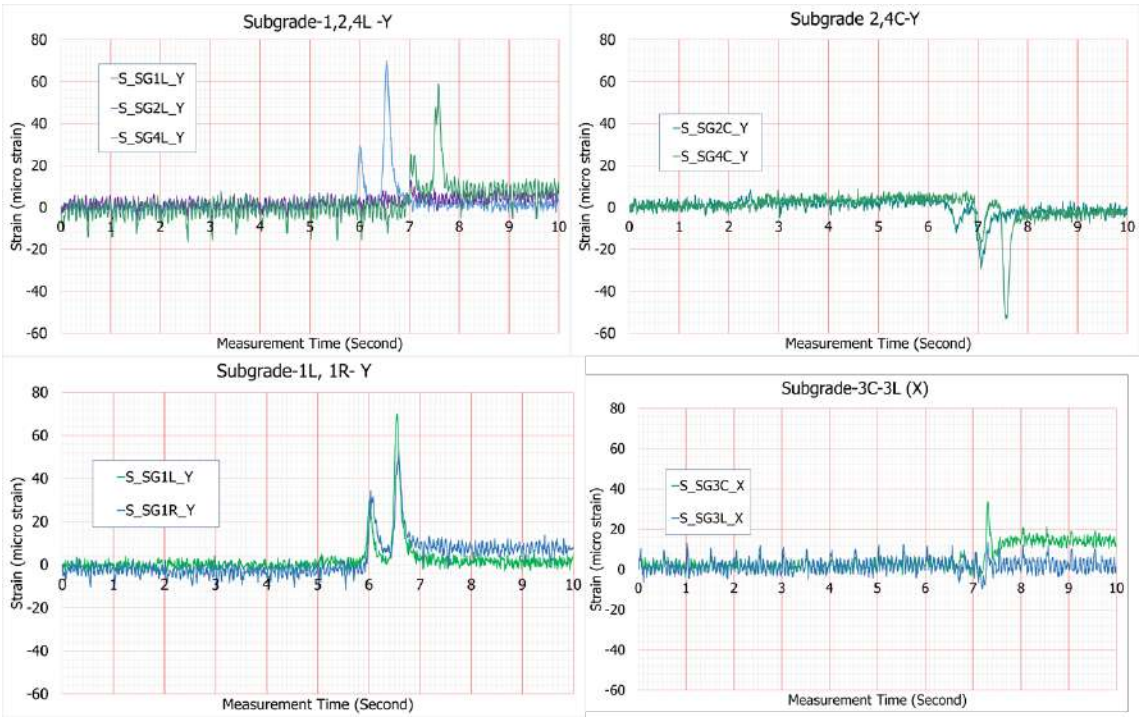
รูปที่ 4.56 ค่าความเค้น (Stress) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) และกึ่งกลาง สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง

ตัวอย่างลักษณะความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในชั้น Subgrade แสดงดังแสดงในรูปที่ 4.57 พบว่าค่า Strain ที่ใต้ล้อซ้าย (1L, 2L และ 4L) ซึ่งติดตั้งในแนวราบทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) มีค่าตอบสนองกับแรงกระทำจากเพลาหน้าและเพลาหลัง โดยมีลักษณะเป็น Tensile strain หรือการยืดตัวในแนวราบ ซึ่งสะท้อนถึงการอัดตัวในแนวดิ่ง แต่การตอบสนองของ Strain Gage ที่ตำแหน่ง 2L พบว่ามีน้อยกว่าที่จุดอื่นๆ คาดว่าอาจเกิดจากน้ำหนักล้อลงไม่ตรงตามตำแหน่งของ Strain Gage พอดี เนื่องจากขนาดของ Strain Gage ที่เล็ก

สำหรับค่า Strain ที่ตำแหน่งล้อขวาและซ้าย ทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) พบว่าค่าที่ตำแหน่ง 1R และ 1L มีค่าสอดคล้องกัน และมีค่าบวกแสดงถึง Tensile strain ทั้งสองตำแหน่ง

ค่า Strain ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง (2C และ 4C) ทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) พบว่ามีค่าติดลบแสดงถึง Compressive strain ซึ่งเกิดจากแรงอัดกระทำด้านข้างเนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกในแนวดิ่งที่แนวล้อ ทำให้เกิดการอัดตัวออกด้านข้าง

ค่า Strain ทิศการจราจร (Longitudinal-X) ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และล้อซ้าย (3C และ 3L) พบว่ามีการตอบสนองน้อยกว่าค่า Strain ในทิศทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) เนื่องจาก เป็นลักษณะการรับน้ำหนักแบบ Plane strain ด้วยถนนมีความยาวมาก การเสียรูปในชั้น Subgrade ซึ่งอยู่ใต้ชั้นทางลงไป ถึงมีการเคลื่อนตัวค่อนข้างน้อย ใกล้เคียงกับสมมุติฐานแบบ Plane strain ซึ่งเป็นสมมุติฐานทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์การรับน้ำหนักของคันทาง



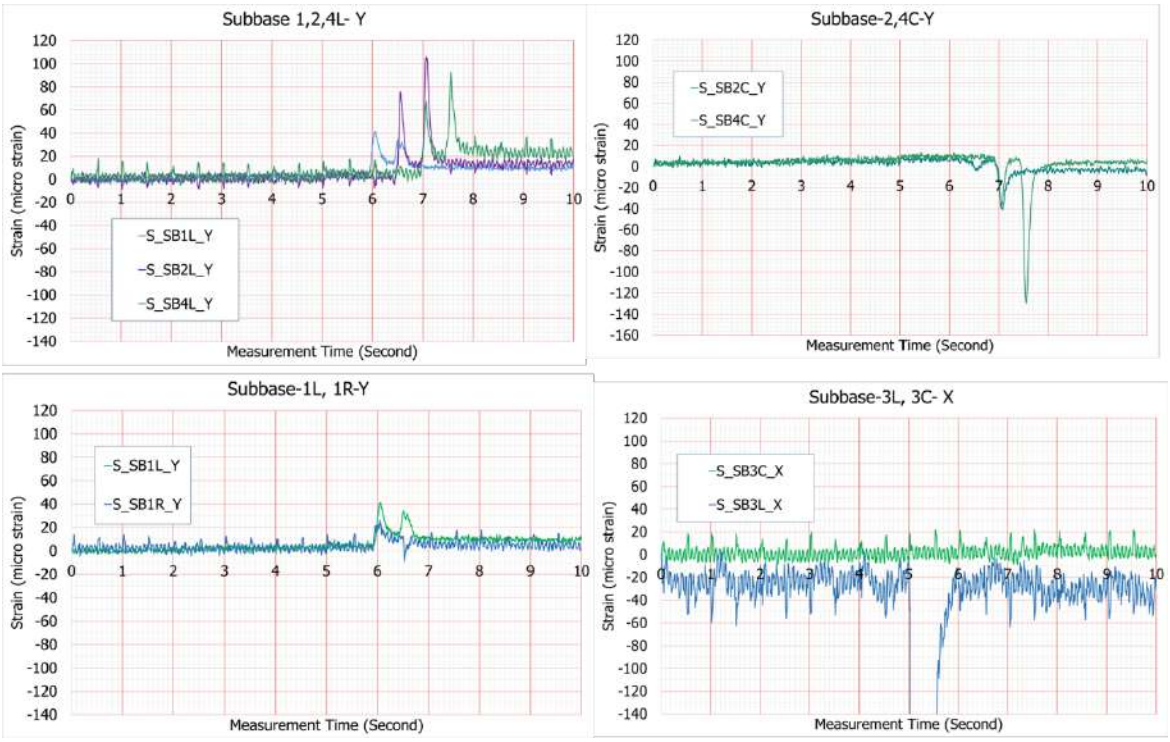
รูปที่ 4.57 ค่าความเครียด (Strain) ที่ Subgrade ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง

ตัวอย่างความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในชั้น Subbase แสดงดังแสดงในรูปที่ 4.58 พบว่าค่า Strain ที่ใต้ล้อซ้าย (1L, 2L และ 4L) ซึ่งติดตั้งในแนวราบทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) มีค่าตอบสนองกับแรงกระทำจากเพลาหน้าและเพลาหลัง โดยมีลักษณะเป็น Tensile strain หรือการยืดตัวในแนวราบ เช่นเดียวกับความเครียดในชั้น Subgrade โดยค่าความเครียดในชั้น Subbase จะมีค่าสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเค้น (Stresss) ในชั้น Subbase ที่สูงกว่าในชั้น Subgrade เช่นกัน

สำหรับค่า Strain ที่ตำแหน่งล้อขวาและซ้าย ทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) พบว่าค่าที่ตำแหน่ง 1R และ 1L มีค่าสอดคล้องกัน เมื่อรับน้ำหนักจากเพลาหน้า แต่เมื่อรับน้ำหนักจากเพลาหลังพบว่าค่าที่ตำแหน่ง 1R มีค่าติดลบ ซึ่งไม่สอดคล้องกับหลักการรับกระจายแรง คาดว่าอาจเกิดจากปัญหาในส่วนการบันทึกข้อมูลจาก Datalogger

ค่า Strain ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง (2C และ 4C) ทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) พบว่ามีค่าติดลบแสดงถึง Compressive strain ซึ่งเกิดจากแรงอัดกระทำด้านข้างเนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกในแนวดิ่งที่แนวล้อ ทำให้เกิดการอัดตัวออกด้านข้าง ซึ่งพบว่ามีค่า Strain สูงกว่ากรณี Subgrade

ค่า Strain ทิศการจราจร (Longitudinal-X) ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และล้อซ้าย (3C และ 3L) พบว่ามีการตอบสนองน้อยกว่าค่า Strain ในทิศทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) เนื่องจาก เป็นลักษณะการรับน้ำหนักแบบ Plane strain ถึงมีการเคลื่อนตัวค่อนข้างน้อย ใกล้เคียงกับสมมุติฐานแบบ Plane strain ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงค่า Strain ในช่วงวินาทีที่ 5-6 ของเซนเซอร์ SB3L-X เป็นช่วงที่ยังไม่มีรถบรรทุกวิ่งผ่าน จึงคาดได้ว่าเกิดจากระบบบันทึกข้อมูล และไม่ใช้พฤติกรรมค่า Strain จริง



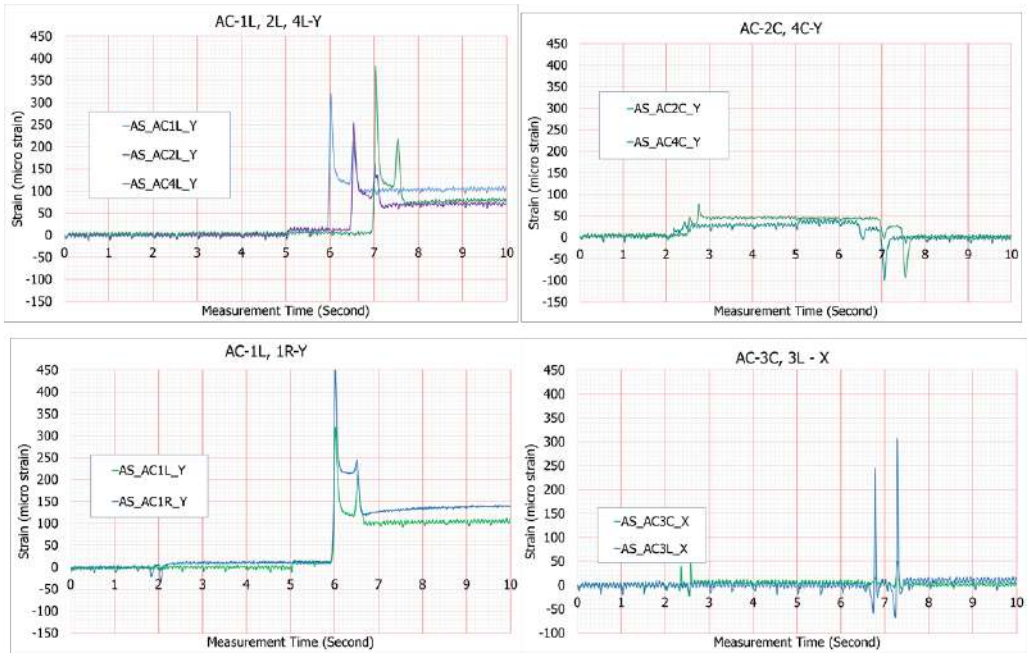
รูปที่ 4.58 ค่าความเครียด (Strain) ที่ Subbase ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.59 แสดงตัวอย่างความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในชั้น Asphaltic concrete พบว่าค่า Strain ที่ใต้ล้อซ้าย (1L, 2L และ 4L) ซึ่งติดตั้งในแนวราบทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) มีค่าตอบสนองกับแรงกระทำจากเพลาหน้าและเพลาหลัง โดยมีลักษณะเป็น Tensile strain หรือการยืดตัวในแนวราบ และเมื่อแรงกระทำผ่านไป พบว่าความเครียดยังคงค้างอยู่ ซึ่งเป็นพฤติกรรมความเครียดแบบพลาสติก Viscous plastic โดยค่าความเครียดในชั้น Asphaltic concrete มีค่าสูงกว่าในชั้น Subbase และ Subgrade อย่างมาก

สำหรับค่า Strain ที่ตำแหน่งล้อขวาและซ้าย ทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) พบว่าค่าที่ตำแหน่ง 1R และ 1L มีค่าสอดคล้องกัน เมื่อรับน้ำหนักจากเพลาหน้า โดยที่ตำแหน่ง 1R มีค่าสูงกว่า คาดว่าเกิดจากตำแหน่งของเซนเซอร์อยู่ตรงกับแนวล้อมากกว่า

ค่า Strain ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง (2C และ 4C) ทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) พบว่ามีค่าติดลบแสดงถึง Compressive strain ซึ่งเกิดจากแรงอัดกระทำด้านข้างเนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกในแนวดิ่งที่แนวล้อ ทำให้เกิดการอัดตัวออกด้านข้าง ซึ่งพบว่ามีค่า Strain ไม่สูงมากกว่ากรณี Subbase มากเท่ากับในกรณี Strain ที่ตำแหน่งล้อ L และ R

ค่า Strain ใน ชั้น AC ตามทิศการจราจร (Longitudinal-X) ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และล้อซ้าย (3C และ 3L) พบว่ามีการตอบสนองใกล้เคียงกับค่า Strain ในทิศทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) โดยมีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากระดับความลึกที่ติดตั้งเซนเซอร์ใน Asphalt Concrete อยู่ที่ประมาณ 20 ซม.จากผิวทาง ซึ่งสะท้อนว่าการแอ่นตัวของชั้น AC เป็นลักษณะ Axial symmetry



รูปที่ 4.59 ค่าความเครียด (Strain) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) และกึ่งกลาง ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) สำหรับชั้น Asphaltic Concrete กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง

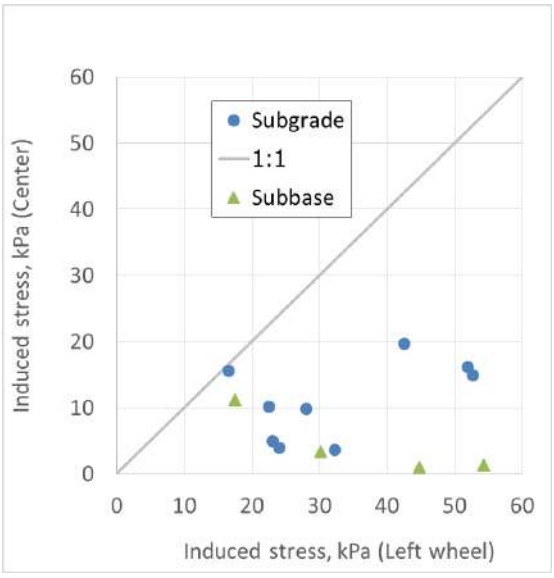
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในกรณีต่างๆ

จากผลการตอบสนองของค่าความเค้น (Stress) และความเครียดที่วัดได้ทุกกรณีสามารถนำมาสรุปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแต่ละตำแหน่งได้ดังแสดงในรูปที่ 4.60 ถึง รูปที่ 4.64

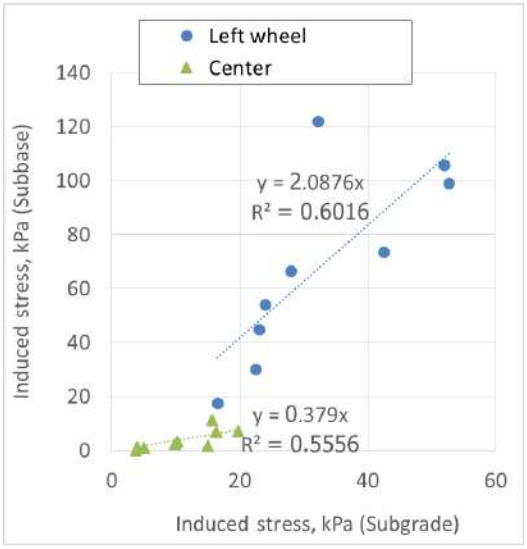
รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร เหนือชั้น Subgrade และ Subbase ในทุกกรณี ซึ่งเห็นได้ว่า ค่าความเค้น กึ่งกลางช่องจราจร มีแน้วโนมน้อยกว่าความเค้นบริเวณล้อซ้าย อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในชั้น Subbase เนื่องจากมีความลึกไม่มาก

รูปที่ 4.61 เปรียบเทียบค่าความเค้น เหนือชั้น Subgrade และ Subbase บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเหนือชั้น Subgrade และ Subbase ได้ดังรูป พบว่า

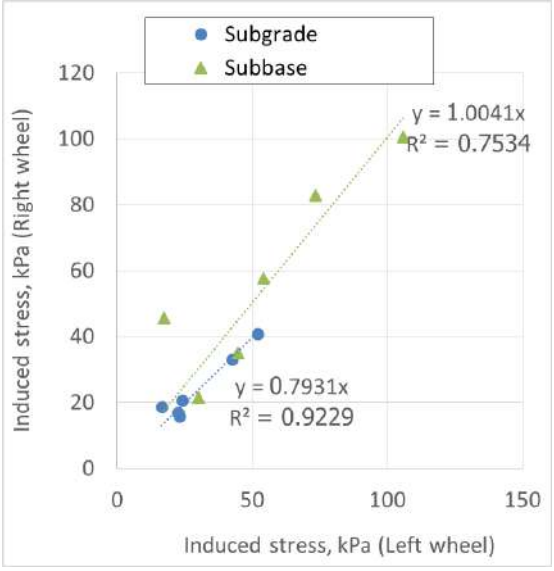
- บริเวณใต้ล้อซ้าย ความเค้นเหนือชั้น Subbase มีค่าประมาณ 2 เท่าของ ความเค้นเหนือชั้น Subgrade
- บริเวณกึ่งกลางถนน ความเค้นเหนือชั้น Subbase มีค่าประมาณ 0.38 เท่าของ ความเค้นเหนือชั้น Subgrade



รูปที่ 4.60 ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร เหนือชั้น Subgrade และ Subbase



รูปที่ 4.61 ค่าความเค้น เหนือชั้น Subgrade และ Subbase บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร

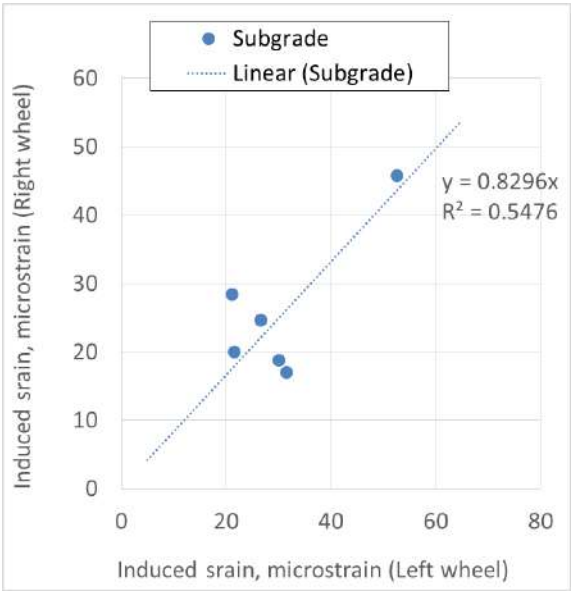


รูปที่ 4.62 ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา เหนือชั้น Subgrade และ Subbase

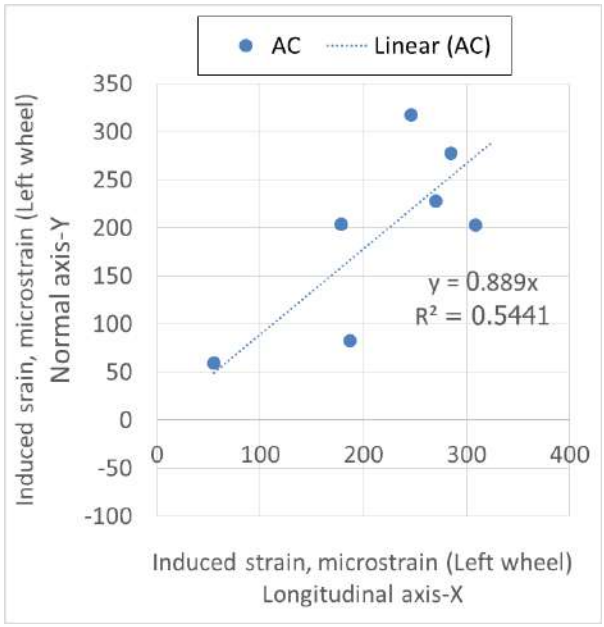
รูปที่ 4.62 เปรียบเทียบค่าความเค้น (Stress) เหนือชั้น Subgrade และ Subbase บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองกรณี พบว่า

- ความเค้นเหนือชั้น Subbase บริเวณใต้ล้อขวา มีค่าโดยประมาณเท่ากับค่า บริเวณใต้ล้อซ้าย
- ความเค้นเหนือชั้น Subgrade บริเวณใต้ล้อขวา มีค่าประมาณ 0.79 เท่าของ ค่าบริเวณใต้ล้อซ้าย

รูปที่ 4.63 เปรียบเทียบค่าความเครียด (Strain) เหนือชั้น Subgrade บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสองกรณี ได้ดังรูป พบว่ามีความสอดคล้องกับค่าความเค้น ทั้งนี้ค่าความเครียดเหนือชั้น Subbase พบว่าข้อมูลยังไม่สมบูรณ์จึงยังไม่นำเสนอความสัมพันธ์



รูปที่ 4.63 ค่าความเครียด บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา ชั้น Subgrade

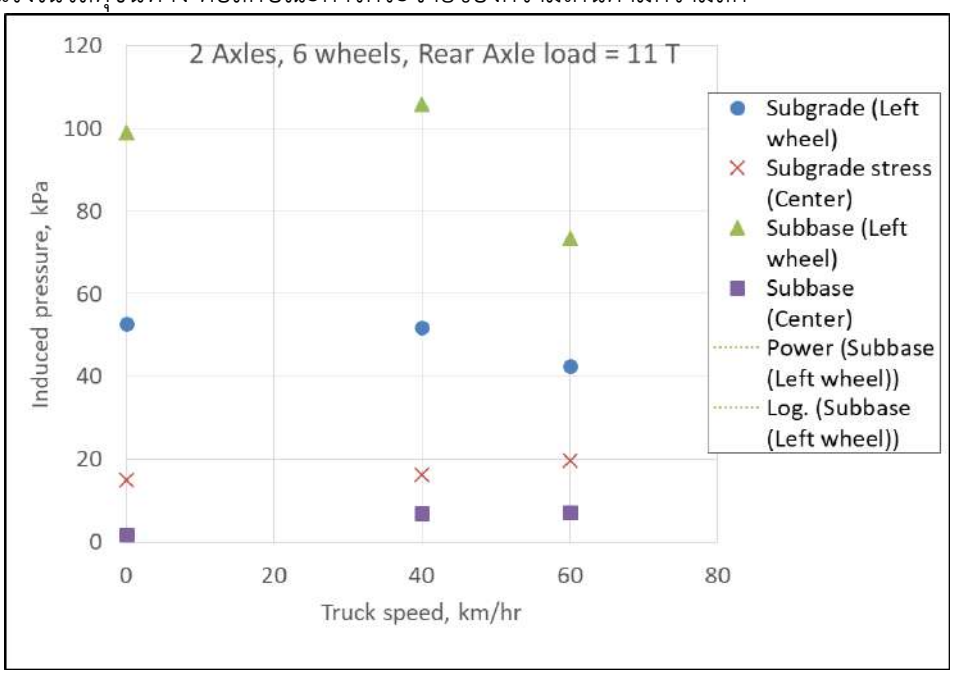


รูปที่ 4.64 ค่าความเครียด ชั้น Asphaltic concrete (AC) surface บริเวณ ล้อซ้าย ในทิศการจราจร (Longitudinal-X) ทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y)

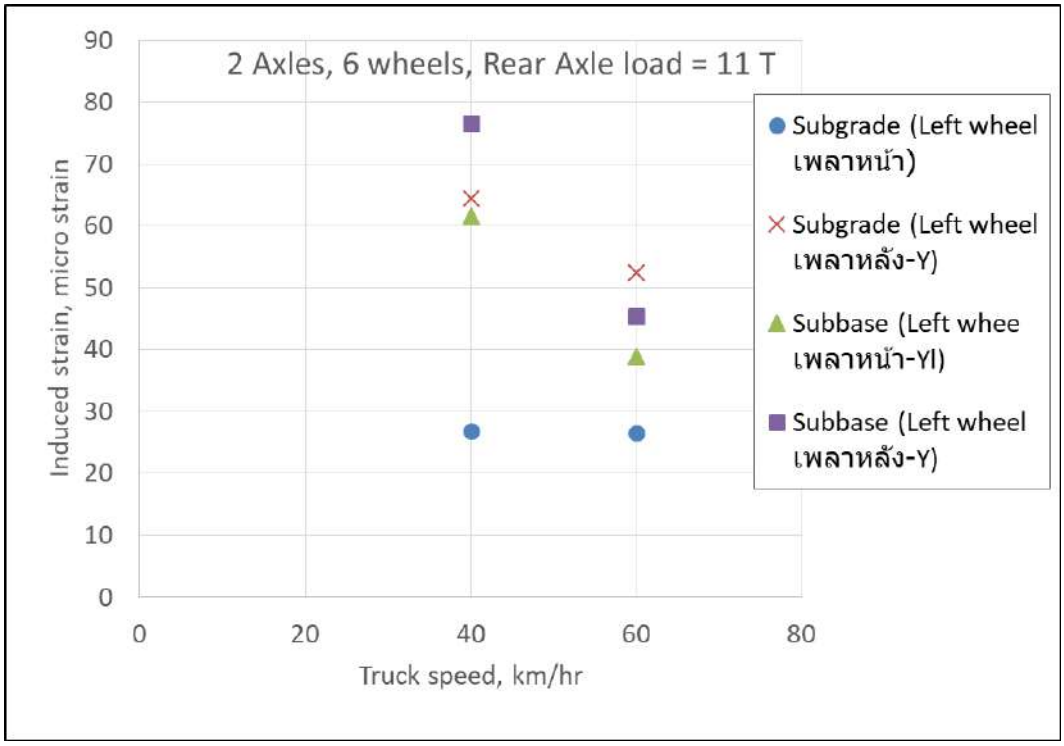
รูปที่ 4.64 เปรียบเทียบค่าความเครียด (Strain) ในชั้น Asphaltic concrete บริเวณ ล้อซ้าย ในทิศการจราจร (Longitudinal-X) เปรียบเทียบกับทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสองกรณี ได้ดังรูป พบว่ามีความเครียดในทิศทาง X มีค่าสูงกว่าในทิศทาง Y ประมาณ 10% โดยเฉลี่ย

4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดและความเร็วรถบรรทุก

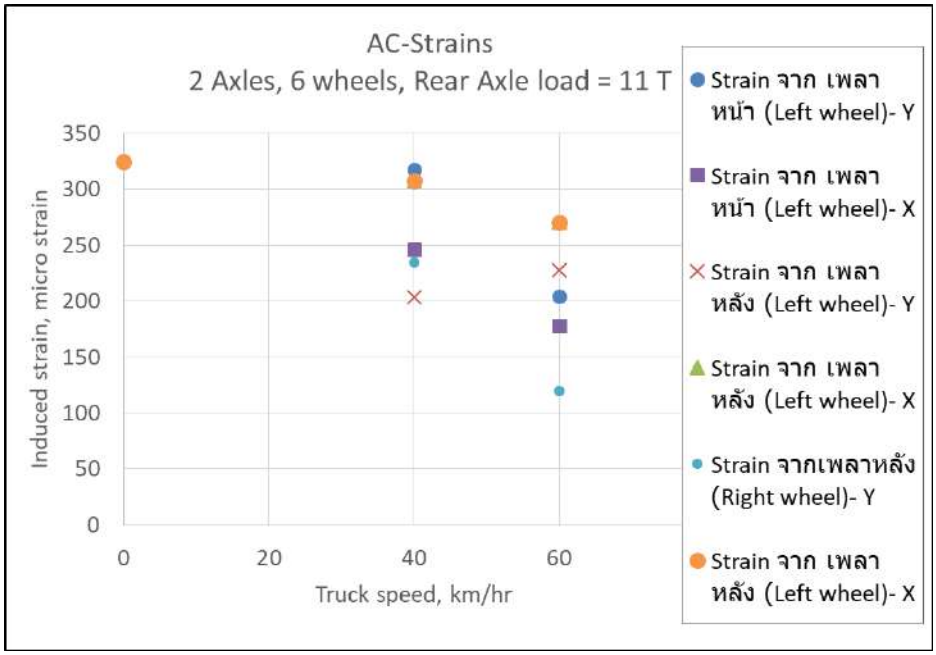
รูปที่ 4.65 ถึง รูปที่ 4.67 แสดงค่าความเค้นและความเครียด ใน ชั้น Subgrade Subbaseและ Asphaltic concrete ที่ความเร็วรถต่างๆ จากแนวโน้มพบว่า ค่าความเค้นและความเครียดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วรถบรรทุกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต (Mateos et al., 2002; Dai et al., 1997; Chatti, et al., 1996; Romero et al., 1994) และแสดงถึงอิทธิพลจากความเร็วรถบรรทุกและอัตราเร็วของการส่งถ่ายแรงในวัสดุชั้นทาง ต่อลักษณะการกระจายของความเค้นตามความลึก



รูปที่ 4.65 ค่าความเค้น ชั้น Subgrade และ Subbase ที่ความเร็วรถต่างๆ



รูปที่ 4.66 ค่าความเครียด ชั้น Subgrade และ Subbase ที่ความเร็วรถต่างๆ



รูปที่ 4.67 ค่าความเครียด ชั้น AC ที่ความเร็วรถต่างๆ

4.4 ข้อมูลคุณสมบัติและผลงานการติดตั้งของเครื่องมือตรวจวัดในระยะที่หนึ่ง

ระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณ และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ที่ได้ดำเนินการติดตั้งสำหรับแปลงโครงสร้างถนนลาดยางในระยะที่หนึ่งมีข้อมูลคุณสมบัติดังแสดงตารางที่ 4.1 โดยมีขั้นตอนและผลงานการติดตั้งดังแสดงรายละเอียดในข้อ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ดำเนินการติดตั้ง
1	**ระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนลาดยาง**	
1.1	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) แบบ / รุ่น : KM-100HAS ยี่ห้อ / ประเทศ : TML / Japan จำนวน : 8 ชุด	1. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ได้ 5,000 Microstrain 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิได้ 180 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ 2.5 mV/V 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
1.2	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) แบบ / รุ่น : KM-100B ยี่ห้อ / ประเทศ : TML / Japan จำนวน : 16 ชุด	1. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ได้ 5,000 Microstrain 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ได้ 2.5 mV/V 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
1.3	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) แบบ / รุ่น : 3500-1 ยี่ห้อ / ประเทศ : Geokon / U.S.A จำนวน : 16 ชุด	1. สามารถตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure) ได้ 600 กิโลปาสคาล 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ 2 mV/V 4. ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม Stainless Steel 5. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
1.4	อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) แบบ / รุ่น : M101 ยี่ห้อ / ประเทศ : Solinst / Canada จำนวน : 1 ชุด	1. มีความละเอียดของเส้นบอกระดับน้ำ 1 มิลลิเมตร 2. สามารถตรวจวัดระดับน้ำได้ 30 เมตร 3. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม Stainless Steel 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
1.5	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) แบบ / รุ่น : Type K	1. สามารถตรวจวัดอุณหภูมิ ในช่วง 0 ถึง 200 องศาเซลเซียส 2. มีฉนวนป้องกันการเกิดสนิมและการผุกร่อน

รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ดำเนินการติดตั้ง
	ยี่ห้อ / ประเทศ : TML / Japan จำนวน : 8 ชุด	3. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
1.6	อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) แบบ / รุ่น : CS650 ยี่ห้อ / ประเทศ : Campbell / U.S.A จำนวน : 16 ชุด	1. สามารถวัดค่าความชื้น ระหว่าง 5 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 70 องศาเซลเซียส 3. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
1.7	อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) แบบ / รุ่น : CR6 ยี่ห้อ / ประเทศ : Campbell / U.S.A จำนวน : 1 ชุด	1. มีความเร็วในการอ่านค่าสัญญาณและบันทึก 100 Hz 2. มีหน่วยความจำสำหรับจัดเก็บข้อมูล 16 GB 3. สามารถรองรับช่องสัญญาณได้ 70 ช่องสัญญาณ 4. มีช่องสำหรับถ่ายโอนข้อมูลแบบ RS-232 และแบบ Ethernet 5. สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -40° ถึง +70 องศาเซลเซียส 6. มีโปรแกรมควบคุมการทำงานระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัดโดยมีลิขสิทธิ์จากผู้ผลิต 7. มีหนังสือรับรองจากผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
2	**ชุดอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System)**	
2.1	หน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) แบบ / รุ่น : NIFE300P2 ยี่ห้อ : Nexcom จำนวน : 1 ชุด	1. สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -5 ถึง 55 องศาเซลเซียส 2. มีระบบ Shock Protection และ Vibration Protection 3. มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ Intel® Core™ i5-6500TE มีความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.3 GHz 4. มีหน่วยความจำหลัก (RAM) แบบ DDR4 ขนาด 8 GB 5. มีหน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard Disk) ความจุรวม 500 GB 6. มีพอร์ต RS232, USB 3.0 และ HDMI
2.2	กล้องวงจรปิด (CCTV) แบบ / รุ่น : DS-2CD2010F-I(W) ยี่ห้อ : Hikvision จำนวน : 1 ชุด	1. เป็นกล้องวงจรปิดแบบ Network Camera 2. เป็นกล้องชนิด Day & Night และมีชุดเซ็นเซอร์รับภาพขนาด 1/3 นิ้ว 3. มีระบบ Wide Dynamic Range (WDR) 4. รองรับเทคโนโลยีบีบอัดภาพแบบ H.264
2.3	อุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) แบบ / รุ่น : DS-7604NI-E1/4P ยี่ห้อ : Hikvision จำนวน : 1 ชุด	1. เป็นเครื่องบันทึกภาพที่สามารถทำงานร่วมกับกล้อง Network Camera หรือ IP Camera 2. รองรับการบันทึกภาพแบบ H.264 และ H.264+ 3. สามารถเชื่อมต่อผ่านพอร์ต RJ45 10/100/1000 Mbps 4. มี Hard disk แบบ SATA ขนาดความจุรวมขนาด 2 TB
3.	**ชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไป (Power supply System)**	
3.1	อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC)	1. รองรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าในช่วง 100-240VAC 2. มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) 12 โวลต์

รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ดำเนินการติดตั้ง
	แบบ / รุ่น : Adapter 12V 6A จำนวน : 1 ชุด	3. มีค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) 6 แอมป์
3.2	อุปกรณ์ UPS แบบ / รุ่น : PS3000RT3-230 ยี่ห้อ : Liebert® PSI จำนวน : 1 ชุด	1. มีค่ากำลังไฟฟ้า 3000 VA (2,700 Watts) 2. มีระบบป้องกันไฟกระชาก (Surge Protection) ขนาด 220J

4.5 การวิเคราะห์หน่วยแรงในโครงสร้างถนนลาดยาง

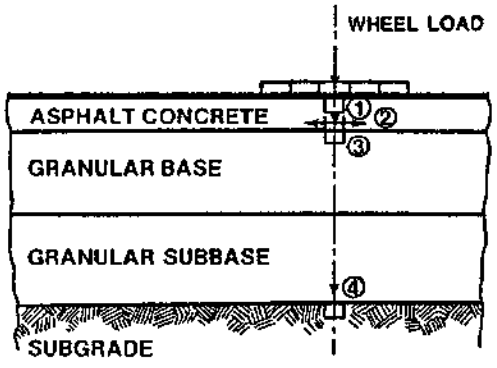
ถนนลาดยางประกอบด้วยวัสดุชั้นทางหลายชั้น วัสดุแต่ละชั้นมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ต่างกัน วางทับกันเป็นชั้นๆอย่างเป็นระบบ (Multi-layer System) เมื่อมีน้ำหนักกระทำจะเกิดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ในชั้นทาง ดังนี้

1) Vertical Stress/Strain คือ ความเค้น/ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงอัดในแนวดิ่ง ส่งผลให้ชั้นวัสดุมีความแน่นเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation) ในชั้นทาง
2) Shear Stress/Strain คือ ความเค้น/ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน ส่งผลให้ชั้นวัสดุสูญเสียเสถียรภาพความมั่นคง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าสูงมาก เช่น กรณีของรถบรรทุกหนักเกินพิกัด
3) Horizontal (Radial) Stress/Strain คือ ความเค้น/ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวของชั้นทางภายใต้น้ำหนักกระทำ มักเกิดขึ้นใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต หรือวัสดุประเภท Bound Material ส่งผลให้ชั้นทางดังกล่าว เกิดรอยแตกจากล่างขึ้นบน

ทั้งนี้ค่า Stress/Strain สูงสุด หรือ Critical Stress/Strain มักเป็น Vertical และ Horizontal Stress/Strain เท่านั้น ส่วน Critical Shear Stress/Strain จะเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่โครงสร้างชั้นทางต้องรับน้ำหนักบรรทุกสูงเกินพิกัด หรือในกรณีที่โครงสร้างชั้นทางเกิดความเสียหายมาก่อน ดังนั้นการออกแบบโดยทั่วไปจะพิจารณาเฉพาะค่า Critical Vertical และ Horizontal Stress/Strain เท่านั้น นอกจากนี้ค่า Critical Strain ของวัสดุชั้นทางมักมีความแปรปรวนน้อยกว่าค่า Critical Stress ดังนั้นการวิเคราะห์หน่วยแรงในถนนลาดยาง จึงนิยมใช้ค่า Critical Strain เป็นเกณฑ์กำหนดรูปแบบการวิบัติของวัสดุชั้นทาง

4.5.1 Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material

เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material พบว่า Critical Strain จะเกิด ณ ตำแหน่งหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.68 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.68 ตำแหน่งของ Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material

หมายเลข 1 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งเป็นค่าวิกฤตก็ต่อเมื่อมีรถบรรทุกหนักสูงเกินพิกัดหรือมีปริมาณการจราจรสูงมาก โดย Vertical Compressive Strain บนผิวทาง ส่งผลให้ผิวทางมีความแน่นขึ้นและเกิดการยุบตัวถาวรเป็นแนวร่องล้อ แต่อย่างไรก็ตามในการออกแบบไม่ถือว่า Vertical Compressive Strain บนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นค่า Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง

หมายเลข 2 เป็น Horizontal (Radial) Tensile Strain ที่เกิดใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เนื่องจากชั้นทางแอ่นตัวภายใต้น้ำหนักกระทำ ซึ่งคล้ายกับการแอ่นตัวของคาน น้ำหนักที่กระทำซ้ำไปมาหลายรอบทำให้ Horizontal Tensile Strain สะสมใต้ผิวทางเพิ่มขึ้นเกินกว่า Limiting Horizontal Tensile Strain ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต รอยแตกจะเริ่มเกิดขึ้นใต้ผิวทาง แล้วจึงแผ่ขยายขึ้นไปปรากฏบนผิวทาง ค่า Horizontal Tensile Strain ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง เพราะการเกิดรอยแตกจะทำให้น้ำสามารถซึมผ่านตามแนวรอยแตกของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างชั้นทางด้านล่าง ทำให้โครงสร้างชั้นทางอ่อนแอลง และเกิดการวิบัติในที่สุด ดังนั้นการเกิดรอยแตกใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจาก Horizontal Tensile Strain ถือเป็นจุดเริ่มต้นของการวิบัติของโครงสร้างชั้นทาง รอยแตกที่เกิดในลักษณะดังกล่าวนี้ เรียกว่า รอยแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue Crack)

หมายเลข 3 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนชั้นพื้นทาง (Unbound Granular Base) เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างพื้นทางโดยทั่วไปมักมีความแข็งแรงและได้ผ่านขั้นตอนการก่อสร้างมาอย่างดีแล้ว นอกจากนี้ในการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยาง จะเลือกใช้วัสดุตามมาตรฐานและข้อกำหนดงานก่อสร้างเท่านั้น ดังนั้นจึงไม่พิจารณา Vertical Compressive Strain ในชั้นพื้นทางเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง

หมายเลข 4 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนชั้นฐานราก ส่งผลให้โครงสร้างชั้นทางเกิดการยุบตัวถาวร เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ต่ำที่สุดของโครงสร้างถนนลาดยาง ดังนั้น Vertical Compressive Strain ที่เกิดขึ้นในดินคันทางนี้จึงมีค่ามากที่สุด และเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง ในกรณีงานก่อสร้างบนชั้นดินอ่อน (Soft Foundation) ซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำมาก อาจต้องใช้วัสดุอื่นมาทดแทน หรือทำการปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินอ่อน เพื่อเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นฐานราก และลดค่า Vertical Compressive Strain

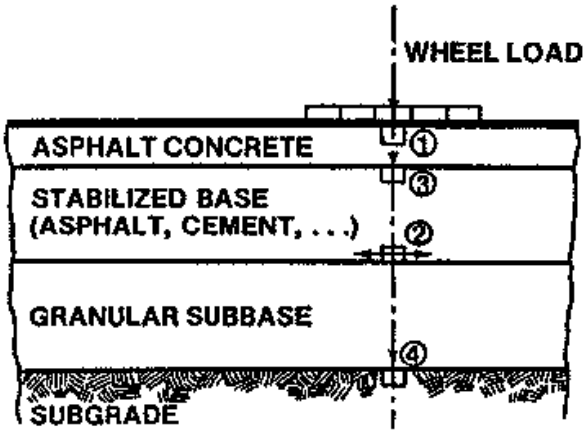
ดังนั้นสำหรับโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material ค่า Critical Strain ที่ทำให้โครงสร้างถนนลาดยางวิบัติได้ คือ Horizontal Tensile Strain ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (ตำแหน่งหมายเลข 2) ซึ่งทำให้เกิดรอยแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue Crack) และ Vertical Compressive Strain บนชั้นฐานราก (ตำแหน่งหมายเลข 4) ซึ่งทำให้เกิดการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation) ของโครงสร้างถนนลาดยาง

4.5.2 Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Bound Material

เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Bound Material พบว่า Critical Strain จะเกิด ณ ตำแหน่งหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.69 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เช่นเดียวกับกรณีของโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material และไม่ถือว่าเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง

หมายเลข 2 เป็น Horizontal Tensile Strain ที่เกิดใต้พื้นทางปรับปรุงคุณภาพ (Stabilized Base) หากเปรียบเทียบรูปที่ 4.68 และรูปที่ 4.69 จะเห็นได้ชัดว่าตำแหน่งหมายเลข 2 เปลี่ยนจากใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นใต้พื้นทางปรับปรุงคุณภาพแทน เนื่องจากสาเหตุ 2 ประการ คือ



รูปที่ 4.69 ตำแหน่งของ Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Bound Material

1) พื้นทางปรับปรุงคุณภาพมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จึงทำให้ Horizontal Tensile Strain ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตลดลง และไม่มีโอกาสสะสมจนถึง Limiting Horizontal Tensile Strain
2) เนื่องจากพื้นทางปรับปรุงคุณภาพ มีความสามารถในการรับแรงดึง (Tension) น้อยกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จึงทำให้พื้นทางปรับปรุงคุณภาพแตกได้ง่ายกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ดังนั้น Horizontal Tensile Strain ที่เกิดใต้พื้นทางปรับปรุงคุณภาพ จึงเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง นอกจากนี้ Horizontal Tensile Strain ในพื้นทางปรับปรุงคุณภาพยังมีสาเหตุเกิดจากการหดตัวของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ได้เช่นกัน

หมายเลข 3 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนพื้นทางปรับปรุงคุณภาพ แต่เนื่องจากพื้นทางปรับปรุงคุณภาพมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง จึงไม่ถือเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง

หมายเลข 4 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนชั้นฐานราก ถือว่าเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง เช่นเดียวกับในกรณีของโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material

ดังนั้นสำหรับโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Bound Material ค่า Critical Strain ที่ทำให้โครงสร้างถนนลาดยางวิบัติได้ คือ Horizontal Tensile Strain ใต้พื้นทางปรับปรุงคุณภาพ (ตำแหน่งหมายเลข 2) ซึ่งทำให้เกิดรอยแตกในชั้นวัสดุปรับปรุงคุณภาพ แล้วแผ่ขยายไปปรากฏบนผิวทาง และ Vertical Compressive Strain บนชั้นฐานราก (ตำแหน่งหมายเลข 4) ซึ่งทำให้เกิดการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation) ของโครงสร้างถนนลาดยาง

4.6 การวิเคราะห์โดยพิจารณาวัสดุเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous Material)

การวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงกระทำบนชั้นทางแบบยืดหยุ่นเริ่มต้นมาจากทฤษฎีของ Boussinesq ในปี ค.ศ. 1885 โดยมีสมมติฐานว่าวัสดุมีลักษณะเป็น Elastic Homogeneous Half-space ซึ่งนับเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดที่โดยค่าความเค้น (Stresses) ที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งและ

แนวราบนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 ในขณะที่ค่าความเครียด (Strains) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4 และค่าการแอ่นตัว (Deflection) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$\sigma_z = q\left[1-\frac{z^3}{\left(a^2+z^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right] \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{q}{2}\left[1+2\nu-\frac{2(1+\nu)z}{\left(a^2+z^2\right)^{1/2}}+\frac{z^3}{\left(a^2+z^2\right)^{3/2}}\right] \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1+\nu)q}{E}\left[1-2\nu+\frac{2\nu z}{\left(a^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}}-\frac{z^3}{\left(a^2+z^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right] \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \frac{(1+\nu)q}{2E}\left[1-2\nu-\frac{2(1-\nu)z}{\left(a^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}}+\frac{z^3}{\left(a^2+z^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right] \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{3qa^2}{2E\left(a^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

โดยที่

σ_z = ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง

σ_r = ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวนอน = σ_t

ε_z = ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง

ε_r = ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวนอน

Δ = ค่าการแอ่นตัว

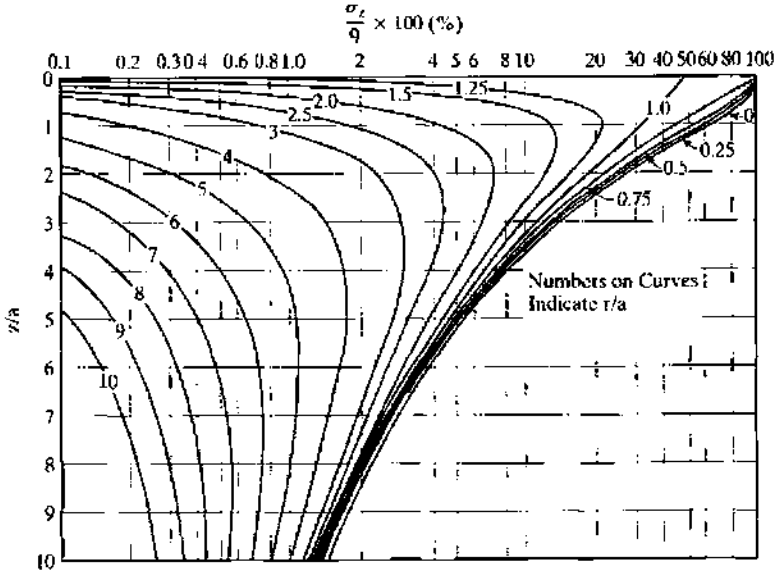
q = แรงต่อหน่วยพื้นที่

z = ความลึก

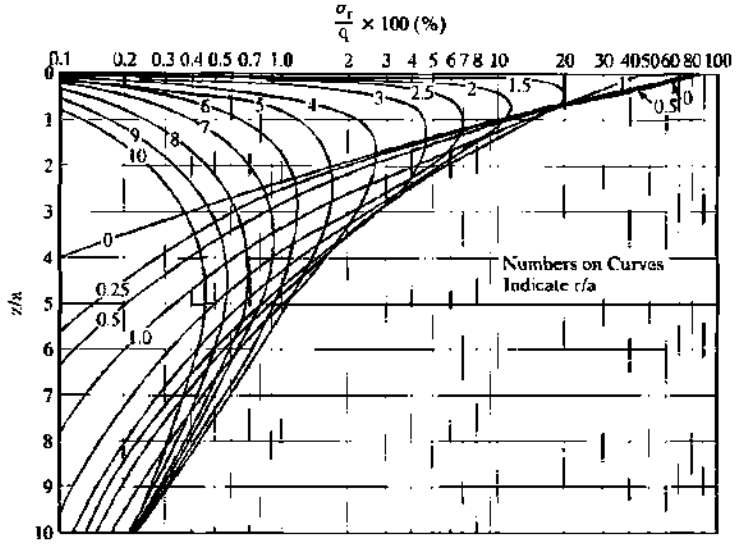
a = รัศมีของแรงกระทำแบบวงกลม

ν = อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

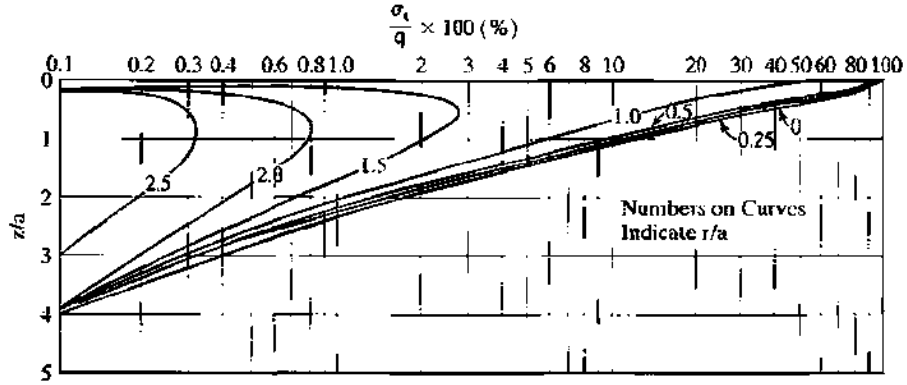
อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนากราฟช่วยในการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นโดย Foster and Ahlvin ในปี ค.ศ. 1954 ทำให้การวิเคราะห์หาค่าความเค้นเนื่องจากแรงกระทำสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยตัวอย่างกราฟสำหรับวิเคราะห์หาค่าความเค้นและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในทิศทางต่างๆแสดงไว้ในรูปที่ 4.70 ถึงรูปที่ 4.73



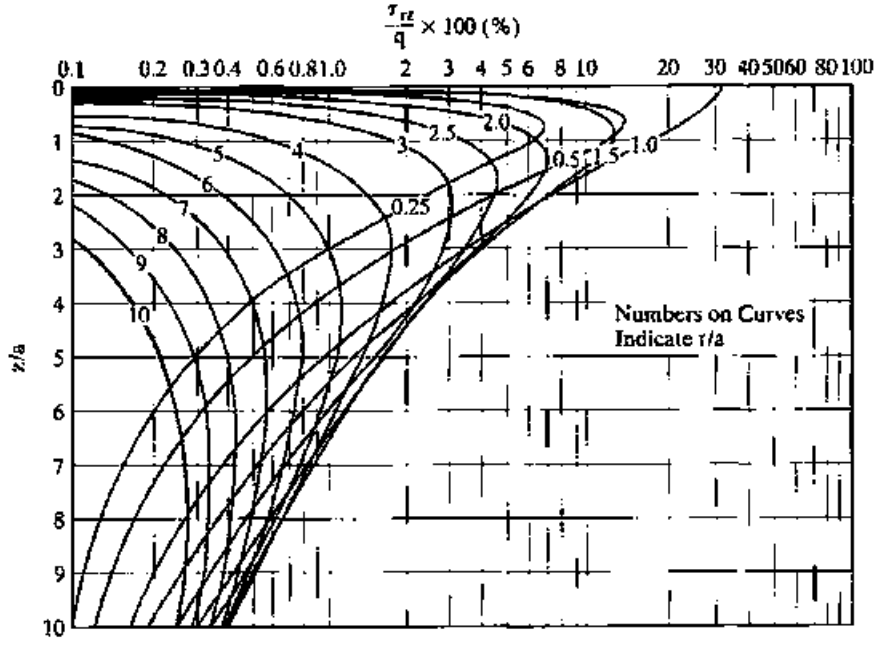
รูปที่ 4.70 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน z ที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954)
(ภาพจากหนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004)



รูปที่ 4.71 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954)
(ที่มา : ภาพจากหนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004)



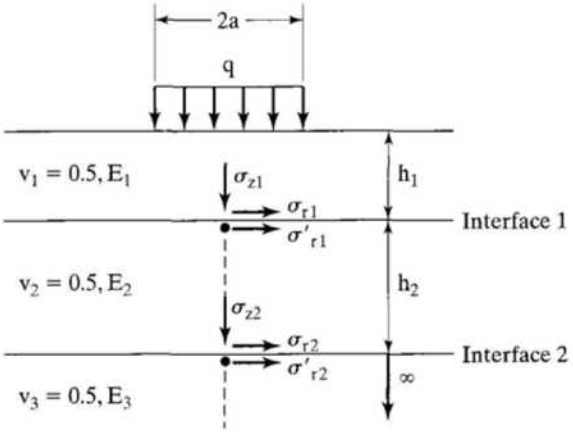
รูปที่ 4.72 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นแนวสัมผัสวงกลมที่ระดับความลึกต่างๆโดย Foster and Ahlvin (1954)
(ที่มา : ภาพจากหนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004)



รูปที่ 4.73 กราฟแสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954)
(ที่มา : ภาพจากหนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004)

4.7 การวิเคราะห์โดยพิจารณาวัสดุเป็นชั้นๆ (Layered Systems)

โดยทั่วไปวัสดุชั้นทางนั้นมีลักษณะเป็นชั้นๆ โดยที่มีวัสดุที่มีคุณสมบัติดีกว่าวางตัวอยู่ด้านบน ซึ่งมีความแตกต่างจากทฤษฎีของ Boussinesq ที่มองเป็นเนื้อเดียว Burmister จึงได้พัฒนาการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาชั้นดินเป็นชั้นๆ (ทั้งโครงสร้างทาง 2 ชั้น หรือ 3 ชั้น) ขึ้น โดยรูปที่ 4.74 แสดงในเห็นถึงการความเค้นที่เกิดขึ้นช่วงรอยต่อระหว่างชั้นทาง และความเค้นเหล่านี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้



รูปที่ 4.74 ลักษณะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์แบบชั้นทาง 3 ชั้น
(ที่มา : ภาพจากหนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004)

$$\sigma_{z1} - \sigma'_{r1} = \frac{\sigma_{z1} - \sigma_{r1}}{k_1} \qquad (6)$$

$$\sigma_{z2} - \sigma'_{r2} = \frac{\sigma_{z2} - \sigma_{r2}}{k_2} \quad (7)$$

$$\sigma_{z1} = q(ZZ1) \quad (8)$$

$$\sigma_{z2} = q(ZZ2) \quad (9)$$

$$\sigma_{z1} - \sigma_{r1} = q(ZZ1 - RR1) \quad (10)$$

$$\sigma_{z2} - \sigma_{r2} = q(ZZ2 - RR2) \quad (11)$$

$$k_1 = \frac{E_1}{E_2} \quad (12)$$

$$k_2 = \frac{E_2}{E_3} \quad (13)$$

$$A = \frac{a}{h_2} \quad (14)$$

$$H = \frac{h_1}{h_2} \quad (15)$$

โดยที่

σ_{z1} = ความเค้นในแนวตั้งที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุ 1 และวัสดุ 2

σ_{z2} = ความเค้นในแนวตั้งที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุ 2 และวัสดุ 3

σ_{r1} = ความเค้นในแนวนอนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบล่างของวัสดุ 1

σ'_{r1} = ความเค้นในแนวนอนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบบนของวัสดุ 2

σ_{r2} = ความเค้นในแนวนอนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบล่างของวัสดุ 2

σ'_{r2} = ความเค้นในแนวนอนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบบนของวัสดุ 3

q = แรงต่อหน่วยพื้นที่

ZZ1, ZZ2, RR1, RR2 = Stress factors ที่สามารถหาได้จากตารางที่ 4.2 เมื่อรู้ค่า k1, k2, A และ H

E_1 = Elastic Modulus ของวัสดุ 1

E_2 = Elastic Modulus ของวัสดุ 2

E_3 = Elastic Modulus ของวัสดุ 3

a = รัศมีของแรงกระทำแบบวงกลม

h_1 = ความหนาของวัสดุ 1

h_2 = ความหนาของวัสดุ 1

ตารางที่ 4.2 Stress Factor สำหรับการคำนวณแบบโครงสร้างชั้นทาง 3 ชั้น โดย Jones (1962)

ที่มา : หนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004

			$k_1 = 2$				$k_1 = 20$				$k_1 = 200$			
H	k_2	A	ZZ1	ZZ2	(ZZ1 − RR1)	(ZZ2 − RR2)	ZZ1	ZZ2	(ZZ1 − RR1)	(ZZ2 − RR2)	ZZ1	ZZ2	(ZZ1 − RR1)	(ZZ2 − RR2)
		0.1	0.42950	0.00896	0.70622	0.01716	0.14529	0.00810	1.81178	0.01542	0.03481	0.00549	3.02259	0.00969
		0.2	0.78424	0.03493	0.97956	0.06647	0.38799	0.03170	3.76886	0.06003	0.11491	0.02167	8.02452	0.03812
	2	0.4	0.98044	0.12667	0.70970	0.23531	0.78651	0.11650	5.16717	0.21640	0.33218	0.08229	17.64175	0.14286
		0.8	0.99434	0.36932	0.22319	0.63003	1.02218	0.34941	3.43631	0.60493	0.72695	0.27307	27.27701	0.45208
		1.6	0.99364	0.72113	−0.19982	0.97707	0.99060	0.69014	1.15211	0.97146	1.00203	0.63916	23.38638	0.90861
		3.2	0.99922	0.96148	−0.28916	0.84030	0.99893	0.93487	−0.06894	0.88358	1.00828	0.92560	11.87014	0.91469
0.125														
		0.1	0.43022	0.00228	0.69332	0.03467	0.14447	0.00182	1.80664	0.02985	0.03336	0.00128	3.17763	0.01980
		0.2	0.78414	0.00899	0.92086	0.13541	0.38469	0.00716	3.74573	0.11697	0.10928	0.00509	8.66097	0.07827
	20	0.4	0.97493	0.03392	0.46583	0.49523	0.77394	0.02710	5.05489	0.43263	0.31094	0.01972	20.12259	0.29887
		0.8	0.97806	0.11350	−0.66535	1.49612	0.98610	0.09061	2.92533	1.33736	0.65934	0.07045	36.29943	1.01694
		1.6	0.96921	0.31263	−2.82859	3.28512	0.93712	0.24528	−1.27093	2.99215	0.87931	0.20963	49.40857	2.64313
		3.2	0.98591	0.68433	−5.27906	5.05952	0.96330	0.55490	−7.35384	5.06489	0.93309	0.49938	57.84369	4.89895
		0.1	0.15524	0.00710	0.28362	0.01353	0.04381	0.00530	0.63215	0.00962	0.00909	0.00259	0.96553	0.00407
		0.2	0.42809	0.02783	0.70225	0.05278	0.14282	0.02091	1.83766	0.03781	0.03269	0.01027	3.10763	0.01611
	2	0.4	0.77939	0.10306	0.96634	0.19178	0.37882	0.07933	3.86779	0.14159	0.10684	0.04000	8.37852	0.06221
		0.8	0.96703	0.31771	0.66885	0.55211	0.75904	0.26278	5.50796	0.44710	0.30477	0.14513	18.95534	0.21860
		1.6	0.98156	0.66753	0.17331	0.95080	0.98743	0.61673	4.24281	0.90115	0.66786	0.42940	31.18909	0.58553
		3.2	0.99840	0.93798	−0.05691	0.89390	1.00064	0.91258	1.97494	0.93254	0.98447	0.84545	28.98500	0.89191
0.25														
		0.1	0.15436	0.00179	0.25780	0.02728	0.04236	0.00123	0.65003	0.01930	0.00776	0.00065	1.08738	0.00861
		0.2	0.42462	0.00706	0.67115	0.10710	0.13708	0.00488	1.90693	0.07623	0.02741	0.00257	3.59448	0.03421
	20	0.4	0.76647	0.02697	0.84462	0.39919	0.35716	0.01888	4.13976	0.29072	0.08634	0.01014	10.30923	0.13365
		0.8	0.92757	0.09285	0.21951	1.26565	0.68947	0.06741	6.48948	0.98565	0.23137	0.03844	26.41442	0.49135
		1.6	0.91393	0.26454	−1.22411	2.94860	0.85490	0.20115	6.95639	2.55231	0.46835	0.13148	57.46409	1.53833
		3.2	0.95243	0.60754	−3.04320	4.89878	0.90325	0.48647	6.05854	4.76234	0.71083	0.37342	99.29034	3.60964
		0.1	0.04330	0.00465	0.08250	0.00878	0.01122	0.00259	0.17997	0.00440	0.00215	0.00094	0.26620	0.00128
		0.2	0.15325	0.01836	0.28318	0.03454	0.04172	0.01028	0.64779	0.01744	0.00826	0.00373	0.98772	0.00509
	2	0.4	0.42077	0.06974	0.70119	0.12954	0.13480	0.03998	1.89817	0.06722	0.02946	0.01474	3.19580	0.01996
		0.8	0.75683	0.23256	0.96681	0.41187	0.35175	0.14419	4.09592	0.23476	0.09508	0.05622	8.71973	0.07434
		1.6	0.93447	0.56298	0.70726	0.85930	0.70221	0.42106	6.22002	0.62046	0.27135	0.19358	20.15765	0.23838
		3.2	0.98801	0.88655	0.33878	0.96353	0.97420	0.82256	5.41828	0.93831	0.62399	0.52912	34.25229	0.54931
0.5														
		0.1	0.04193	0.00117	0.08044	0.01778	0.00990	0.00063	0.19872	0.00911	0.00149	0.00023	0.31847	0.00257
		0.2	0.14808	0.00464	0.27574	0.07027	0.03648	0.00251	0.72264	0.03620	0.00564	0.00094	1.19598	0.01025
	20	0.4	0.40086	0.01799	0.67174	0.26817	0.11448	0.00988	2.19520	0.14116	0.01911	0.00372	1.02732	0.04047
		0.8	0.69098	0.06476	0.86191	0.91168	0.27934	0.03731	5.24726	0.51585	0.05574	0.01453	12.00885	0.15452
		1.6	0.79338	0.19803	0.39588	2.38377	0.50790	0.12654	10.30212	1.59341	0.13946	0.05399	32.77028	0.53836
		3.2	0.85940	0.49238	−0.41078	4.47022	0.70903	0.35807	16.38520	3.69109	0.30247	0.18091	77.62943	1.56409

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) Stress Factor สำหรับการคำนวณแบบโครงสร้างชั้นทาง 3 ชั้น โดย Jones (1962)

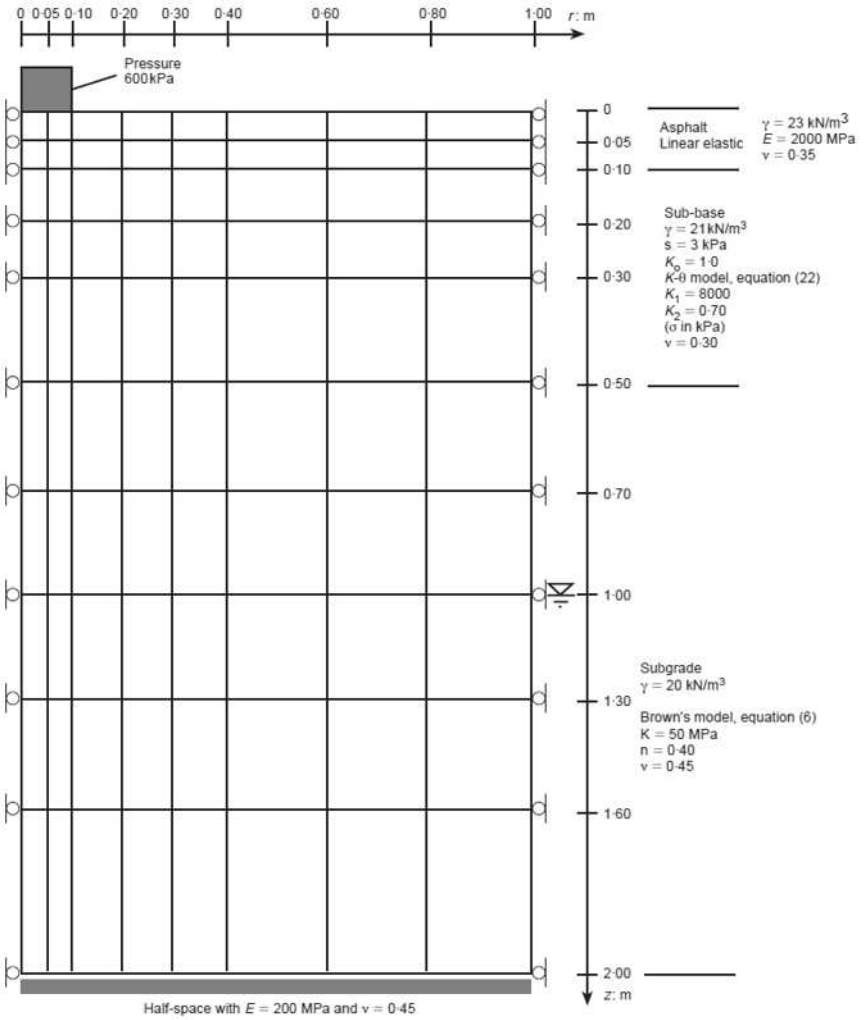
ที่มา : หนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004

		0.1	0.01083	0.00241	0.02179	0.00453	0.00263	0.00100	0.04751	0.00160	0.00049	0.00029	0.06883	0.00035
		0.2	0.04176	0.00958	0.08337	0.01797	0.01029	0.00347	0.18481	0.00637	0.00195	0.00116	0.26966	0.00138
	2	0.4	0.14665	0.03724	0.28491	0.06934	0.03810	0.01565	0.66727	0.02498	0.00746	0.00460	1.00131	0.00545
		0.8	0.39942	0.13401	0.71341	0.24250	0.12173	0.05938	1.97428	0.09268	0.02647	0.01797	3.24971	0.02092
		1.6	0.71032	0.38690	1.02680	0.63631	0.31575	0.20098	4.37407	0.29253	0.08556	0.06671	8.92442	0.07335
		3.2	0.92112	0.75805	0.90482	0.97509	0.66041	0.53398	6.97695	0.65446	0.25186	0.22047	20.83387	0.21288
1														
		0.1	0.00963	0.00061	0.02249	0.00920	0.00193	0.00024	0.05737	0.00322	0.00027	0.00007	0.08469	0.00062
		0.2	0.03697	0.00241	0.08618	0.03654	0.00751	0.00098	0.22418	0.01283	0.00104	0.00028	0.33312	0.00248
	20	0.4	0.12805	0.00950	0.29640	0.14241	0.02713	0.00387	0.82430	0.05063	0.00384	0.00110	1.25495	0.00985
		0.8	0.33263	0.03578	0.76292	0.51815	0.08027	0.01507	2.59672	0.19267	0.01236	0.00436	4.26100	0.03825
		1.6	0.52721	0.12007	1.25168	1.56503	0.17961	0.05549	6.77014	0.66326	0.03379	0.01683	12.91809	0.13989
		3.2	0.65530	0.33669	1.70723	3.51128	0.34355	0.18344	15.23252	1.88634	0.08859	0.06167	36.04291	0.45544
		0.1	0.00250	0.00100	0.00555	0.00188	0.00059	0.00033	0.01219	0.00051	0.00011	0.00008	0.01737	0.00009
		0.2	0.00991	0.00397	0.02199	0.00750	0.00235	0.00130	0.04843	0.00203	0.00045	0.00033	0.06913	0.00036
	2	0.4	0.03832	0.01569	0.08465	0.02950	0.00922	0.00518	0.18857	0.00803	0.00179	0.00131	0.27103	0.00142
		0.8	0.13516	0.05974	0.29365	0.11080	0.03412	0.02023	0.68382	0.03093	0.00685	0.00520	1.00808	0.00553
		1.6	0.36644	0.20145	0.75087	0.35515	0.10918	0.07444	2.04134	0.10864	0.02441	0.02003	3.27590	0.02043
		3.2	0.67384	0.51156	1.17294	0.77434	0.29183	0.23852	4.60426	0.30709	0.08061	0.07248	9.02195	0.06638
2														
		0.1	0.00181	0.00025	0.00652	0.00378	0.00033	0.00008	0.01568	0.00094	0.00005	0.00002	0.02160	0.00014
		0.2	0.00716	0.00099	0.02586	0.01507	0.00130	0.00031	0.06236	0.00374	0.00018	0.00007	0.08604	0.00058
	20	0.4	0.02746	0.00394	0.10017	0.05958	0.00503	0.00123	0.24425	0.01486	0.00071	0.00030	0.33866	0.00229
		0.8	0.09396	0.01535	0.35641	0.22795	0.01782	0.00485	0.90594	0.05789	0.00261	0.00119	1.27835	0.00901
		1.6	0.23065	0.05599	1.00785	0.78347	0.05012	0.01862	2.91994	0.21190	0.00819	0.00467	4.35311	0.03390
		3.2	0.37001	0.17843	2.16033	2.13215	0.11331	0.06728	7.95104	0.67732	0.02341	0.01784	13.26873	0.11666
		0.1	0.00057	0.00034	0.00147	0.00065	0.00013	0.00010	0.00312	0.00015	0.00003	0.00002	0.00437	0.00002
		0.2	0.00228	0.00137	0.00587	0.00260	0.00054	0.00039	0.01245	0.00059	0.00011	0.00009	0.01746	0.00009
	2	0.4	0.00905	0.00544	0.02324	0.01032	0.00214	0.00154	0.04944	0.00235	0.00042	0.00036	0.06947	0.00036
		0.8	0.03500	0.02135	0.08957	0.04031	0.00837	0.00610	0.19247	0.00924	0.00168	0.00142	0.27221	0.00144
		1.6	0.12354	0.07972	0.31215	0.14735	0.03109	0.02358	0.69749	0.03488	0.00646	0.00560	1.01140	0.00553
		3.2	0.34121	0.25441	0.81908	0.43632	0.10140	0.08444	2.09049	0.11553	0.02332	0.02126	3.28913	0.01951
4														
		0.1	0.00030	0.00008	0.00201	0.00128	0.00005	0.00002	0.00413	0.00025	0.00001	0.00000	0.00545	0.00003
		0.2	0.00119	0.00034	0.00803	0.00510	0.00021	0.00009	0.01651	0.00099	0.00003	0.00002	0.02178	0.00014
	20	0.4	0.00469	0.00134	0.03191	0.02032	0.00083	0.00035	0.06569	0.00396	0.00013	0.00008	0.08673	0.00054
		0.8	0.01790	0.00532	0.12427	0.07991	0.00321	0.00138	0.25739	0.01565	0.00050	0.00031	0.34131	0.00215
		1.6	0.06045	0.02049	0.45100	0.29991	0.01130	0.00542	0.95622	0.05993	0.00186	0.00124	1.28773	0.00833
		3.2	0.14979	0.07294	1.36427	0.97701	0.03258	0.02061	3.10980	0.20906	0.00612	0.00483	4.38974	0.03010

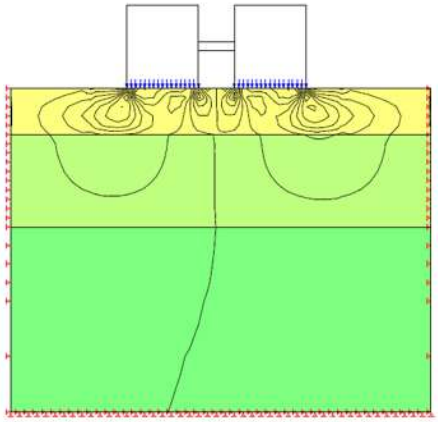
4.8 การวิเคราะห์หน่วยแรงด้วยวิธี Finite Element

การวิเคราะห์ความเค้นความเครียด (Stress-strain analysis) สำหรับโครงสร้างทางสามารถใช้วิธี Finite element ซึ่งจะให้ความละเอียดถูกต้องมากกว่าวิธีวิเคราะห์แบบดั้งเดิมเช่นวิธี Burmister หรือ Westergaard ซึ่งใช้สมมุติฐาน Elasticity โดยวิธี Finite element สามารถกำหนดให้วัสดุมีค่าโมดูลัสแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) หรือมีค่าแปรผันไปตามอิทธิพลต่างๆ เช่น ความชื้น แรงดูด หรืออุณหภูมิได้ รูปที่ 4.75แสดงตัวอย่างการจำลองโครงสร้างชั้นทางโดยวิธี Finite element โดยใช้การวิเคราะห์แบ Axi-symetric และสมมุติฐาน Elastic half-space ด้วยโปรแกรม FENLAP (d'Almeida, 1993, Brown, 1996)

รูปที่ 4.76 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ความเค้นความเครียดด้วยโปรแกรม SIGMA/W โดย Holmquist, (1998) ลักษณะหน่วยแรงที่วิเคราะห์ได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดในสนามเพื่อยืนยันความแม่นยำของแบบจำลองได้ นอกจากนั้นยังมีการศึกษาอื่นๆ เช่น Saevarsdottir & Erlingsson (2016) ซึ่งใช้แบบจำลอง Finite element รูปแบบสามมิติ อาทิ โปรแกรม Plaxis-3D ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.75 ตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างทางโดยวิธี Finite element
(ที่มา : Brown, 1996)



รูปที่ 4.76 ผลการวิเคราะห์ความเค้นความเครียดของโครงสร้างทาง โดยวิธี Finite element โดยโปรแกรมSIGMA/W

(ที่มา : Holmquist, 1998)

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนนกับปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง

พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนน (Pavement Response) เช่น ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) หรือค่าโมดูลัส (Modulus) มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาและ/หรือปริมาณจราจรสะสม และ/หรือปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพการใช้งานของแปลงตรวจวัด โดยรูปที่ 4.77 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลต่อค่าโมดูลัสและปริมาณความชื้นในชั้น subgrade จากรายงานของ Monitoring and Modeling Subgrade Soil Moisture for Pavement Design and Rehabilitation in Idaho Phase III: Data Collection and Analysis โดย Salem (2005) นอกจากนี้พบว่ากรมทางหลวงได้เคยทำการศึกษาความแข็งแรงและอัตราการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางโดยใช้ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยที่เกิดขึ้น(สมการที่ 16) จากการทดสอบด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) ในทางหลวงที่มีลักษณะโครงสร้างชั้นทางแตกต่างกันจำนวน 5 สายทาง (อัคคพัฒน์ และ ธนกฤต, พ.ศ. 2555) โดยผลศึกษาสามารถนำมา ใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพงานก่อสร้างและบูรณะทางหลวงได้ อนึ่งตัวอย่างผลการทดสอบจากงานศึกษาดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 4.78

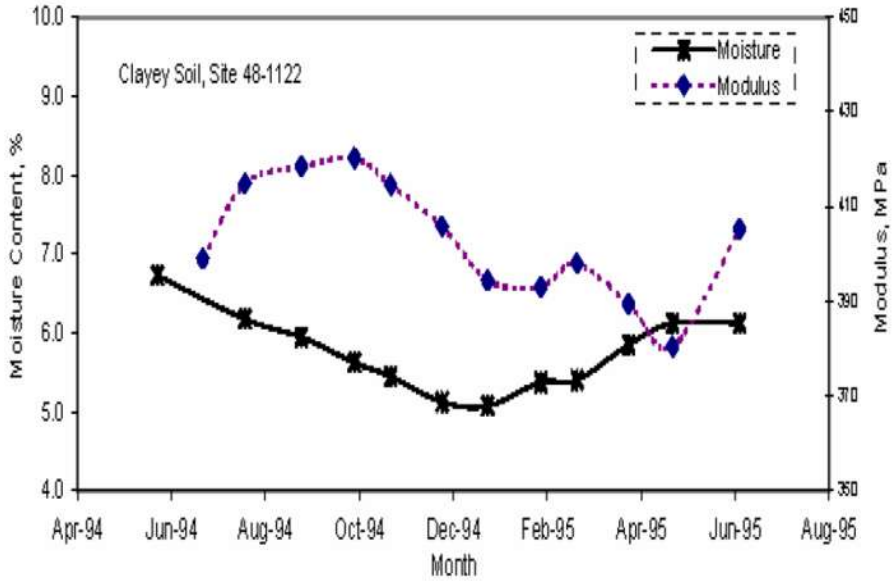
$$\overline{\delta_0} = \alpha t + \beta \qquad (16)$$

โดยที่

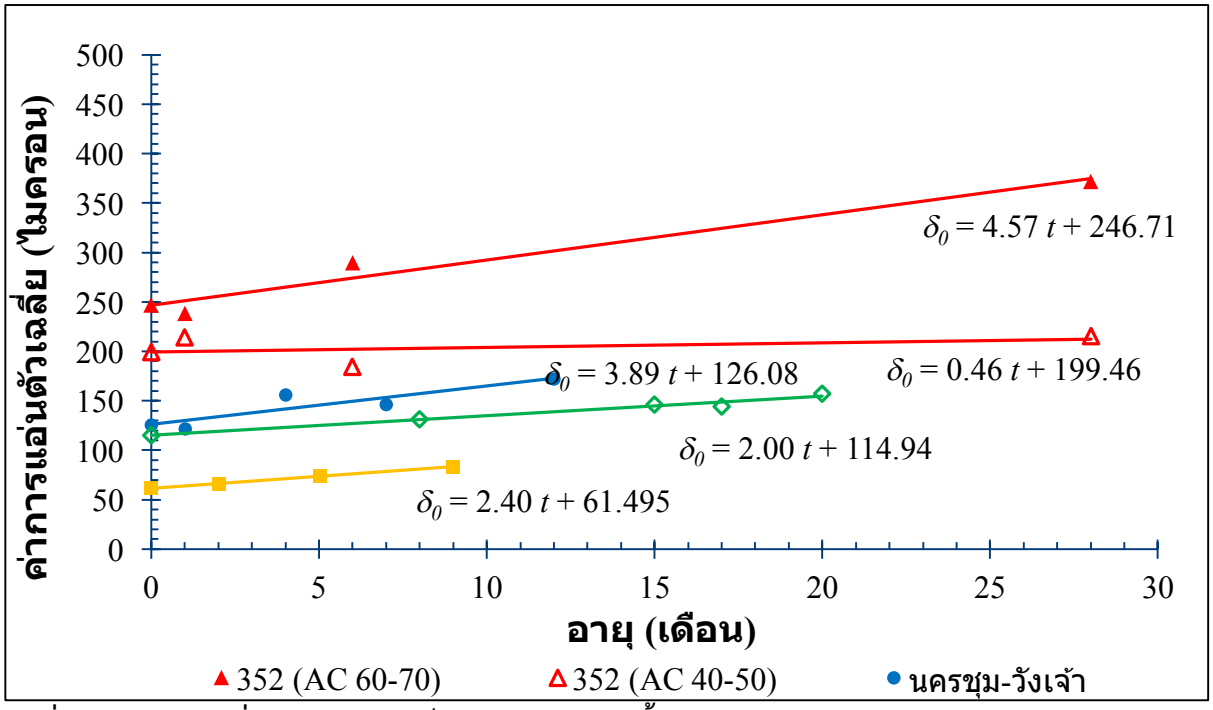
$\overline{\delta_0}$ = ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ (ไมครอน)

t = อายุการใช้งาน (เดือน)

α และ β = ค่าคงที่ได้จากการทดสอบ (ค่าคงที่ α เป็นตัวชี้วัดอัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางภายหลังการก่อสร้างหรือบูรณะทางหลวง และค่าคงที่ β เป็นตัวชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางหรือค่าการแอ่นตัวเริ่มต้น)

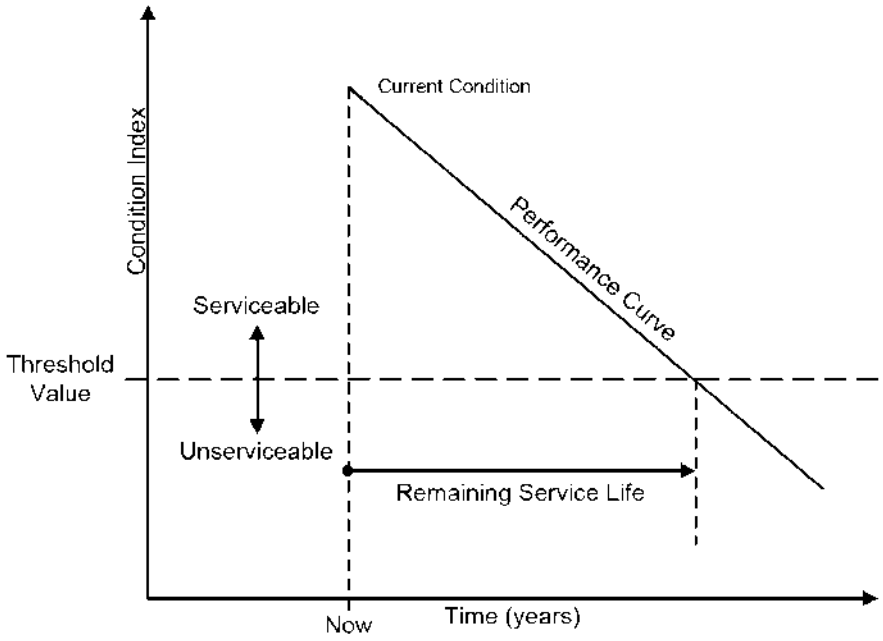


รูปที่ 4.77 การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสและปริมาณความชื้นในชั้น subgrade ต่อการเปลี่ยนแปลงฤดูกาล
(ที่มา : Bayomy and Salem, 2005)



รูปที่ 4.78 อัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางภายหลังการก่อสร้างหรือบูรณะทางหลวง
(ที่มา : อัคคพัฒน์ และ ธนกฤต, พ.ศ. 2555)

แนวทางการพัฒนาโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model) เพื่อใช้ในการคาดการณ์สภาพถนน (Condition Index) ที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งานดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.79 ถึง รูปที่ 4.81 และเมื่อมีการเก็บรวบรวมข้อมูลมากขึ้นจะมีแนวทางในการปรับแก้โมเดล (Model Updating) ให้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.82



รูปที่ 4.79 ตัวอย่างโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model)
(ที่มา : NHI, 1998)

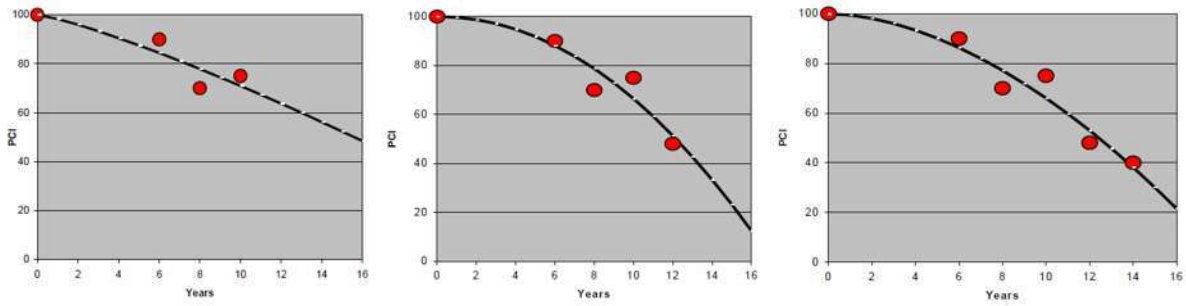
Types of Performance Models

	Deterministic				Probabilistic		
	Primary Response	Structural	Functional	Damage	Survivor Curves	Transition Process Models	
	Deflection Stress Strain	Distress Pavement Condition	PSI Safety	Load Equiv.		Markov	Semi-Markov
National Level				✓	✓	✓	✓
State or District Level		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Project Level	✓	✓	✓	✓			

รูปที่ 4.80 ประเภทของโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model)
(ที่มา : NHI, 1998)

Data Requirements	Deterministic	Probabilistic (Markovian)
Inventory Data		
Pavement Structure	Required	Required
Joint Features	Useful	Useful
Drainage Characteristics	Useful	Useful
Age	Required	Required
Prior Condition/Traffic	Required	Required
Environmental/Climatic	Useful	Useful
Material Properties	Useful	Useful
Monitoring Data		
Distress	Required	Required
Traffic	Required (may be in traffic categories rather than exact counts)	Required (may be in traffic categories rather than exact counts)
Deflection	Useful, if available	Useful, if available
Profile	Useful, if available	Useful, if available
Maintenance History	Useful, if available	Not required
Condition Index	Required	Required

รูปที่ 4.81 รายการข้อมูลสำหรับใช้ในการพัฒนาโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model)
(ที่มา NHI, 1998)

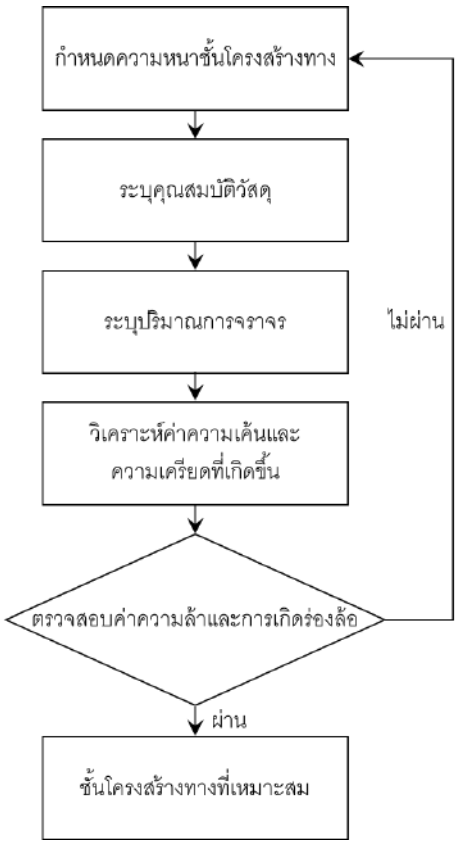


รูปที่ 4.82 ตัวอย่างการปรับแก้โมเดล (Model Updating) เมื่อมีข้อมูลเพิ่มขึ้น
(ที่มา : NHI, 1998)

4.10 แนวทางการออกแบบชั้นโครงสร้างถนนลาดยางในปัจจุบัน

การออกแบบชั้นโครงสร้างทางถนนลาดยางในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่วิธี Empirical Metod และวิธี Analytical Method โดยวิธีที่นิยมใช้กันมากคือวิธี Empirical Method โดย Asphalt Institute (1970) เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถดำเนินการได้โดยง่าย สะดวก อาศัยค่าคุณสมบัติคุณสมบัติของวัสดุเช่นค่า CBR เป็นเกณฑ์ในการกำหนดความหนาชั้นทาง อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวอาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ออกแบบถนนที่มีปริมาณการจราจรสูงกว่าค่ามาตราฐานที่กำหนดไว้ได้เนื่องจากจะทำให้ค่าที่ออกแบบไว้มีความคลาดเคลื่อนเช่นโครงสร้างทางเกิดความเสียหายผิดไปจากอายุการใช้งานที่คาดไว้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้วิธี Analytical Method ในการออกแบบชั้นโครงสร้างทางแทน

การออกแบบโดยวิธี Analytical Method นั้น จะทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียด ที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นโครงสร้างทางต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักกระทำของล้อรถเพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบถึงการเกิดความล้าและการเกิดร่องล้อในชั้นโครงสร้างทางที่มีลักษณะโครงสร้างหลายชั้น (Multilayered System) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างทางโดยวิธี Analytical Method ดังแสดงในรูปที่ 4.83 ปัจจัยสำคัญในการออกแบบด้วยวิธีนี้คือค่าคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างชั้นทางต่างๆที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์เช่นค่าโมดูลัสของวัสดุเป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปผู้วิเคราะห์มักจะใช้ค่าแนะนำเชิงประสบการณ์จากต่างประเทศดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4.3 เป็นต้น อย่างไรก็ตามค่าคุณสมบัติวัสดุนั้นมักจะแปรเปลี่ยนไปขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นเป็นสำคัญ ซึ่งอาจจะส่งผลให้ค่าคุณสมบัติแนะนำที่นำมาใช้นั้นมีความแตกต่างจากค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในประเทศไทย



รูปที่ 4.83 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความหนาชั้นโครงสร้างลาดยางด้วยวิธี Analytical Method

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติวัสดุประเภท Unbound Granular Base และ Cemented Base

(ที่มา : NAASRA, 1987)

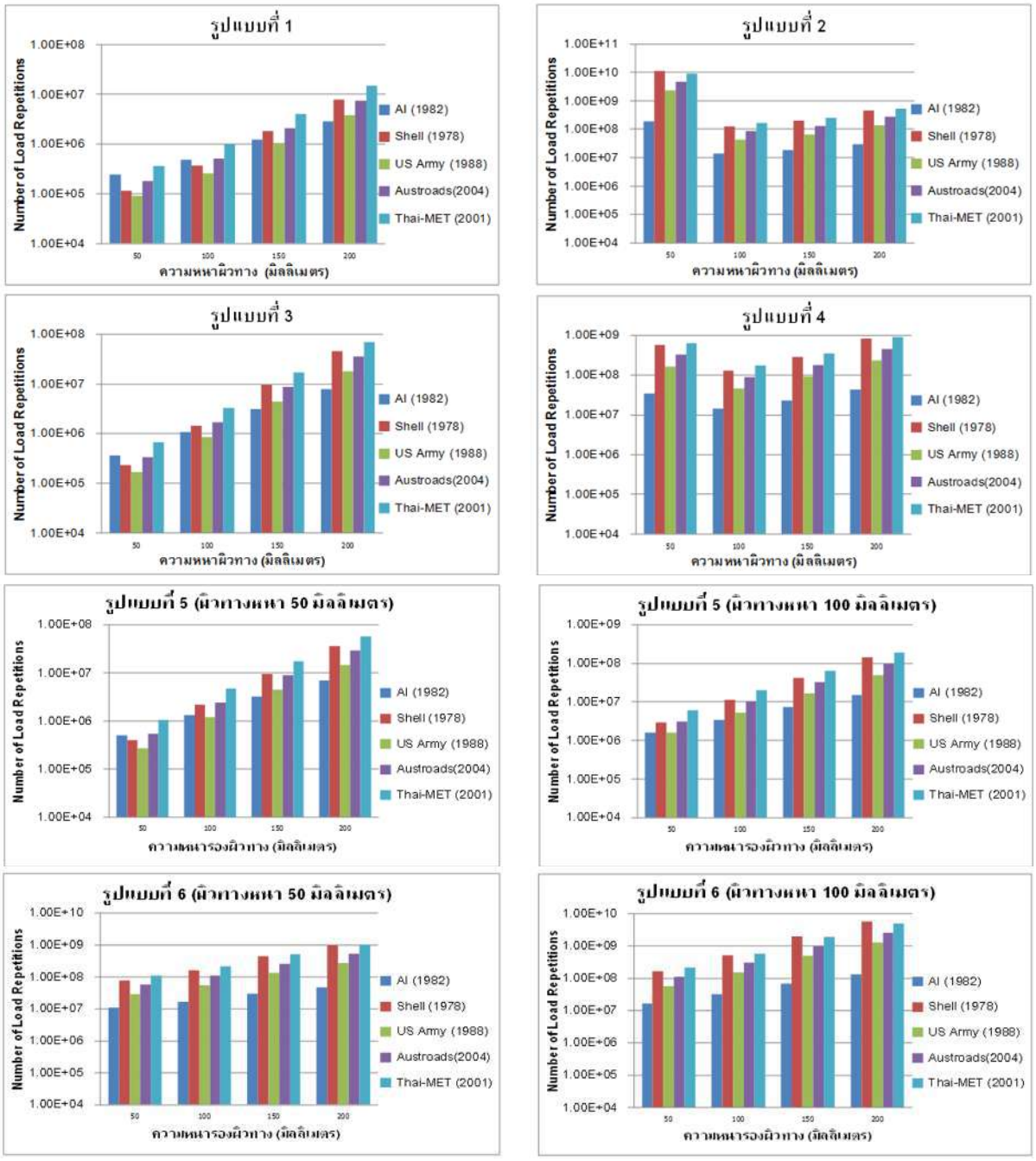
MATERIAL CATEGORY	UNBOUND GRANULAR						CEMENTED MATERIAL		
	High Quality Crushed Rock		Base Quality Gravel		Sub-base Gravel				
PROPERTY	Over Granular Material	Over Stiff Cemented Material	Over Granular Material	Over Stiff Cemented Material	Over Granular Material	Over Stiff Cemented Material	Crushed Rock 2-3% cement	Base Quality Natural Gravel 4-5% Cement	Sub-base Quality Natural Gravel 4-5% Cement
Range of Modulus (Vertical MPa)	150 - 350	200 - 700	150 - 500	200 - 500	150 - 400	150 - 450	5000 - 8000	3000 - 7000	1500 - 3000
Typical Modulus (Vertical MPa)	500[2] 350	500[2] 350	400[2] 300	400[2] 300	300[2] 250	300[2] 250	5000	5000	2000
Degree of Anisotropy[3]	2	2	2	2	2	2	1	1	1
Range of Poisson's Ratio (Vertical, horizontal and cross)	0.25 - 0.4	0.25 - 0.4	0.25 - 0.4	0.25 - 0.4	0.25 - 0.4	0.25 - 0.4	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3
Typical Value of Poisson's Ratio	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.2	0.2	0.2
f (See CIRCLY Manual)	Given by formula f = Vertical Modulus / (1 + Poissons Ratio)						not required		
Vertical Modulus under asphalt Surfacing	Refer to Table 6.7						same as above		

1. Although figures are only quoted for cement, other cementing agents such as lime, lime flyash, cement flyash and granulated slag may be used. The stiffness of such materials should be determined by testing.
2. where material is compacted using Modified compaction, other value for Standard Compaction.
3. Degree of Anisotropy = Vertical Modulus / Horizontal Modulus

4.11 การวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุก

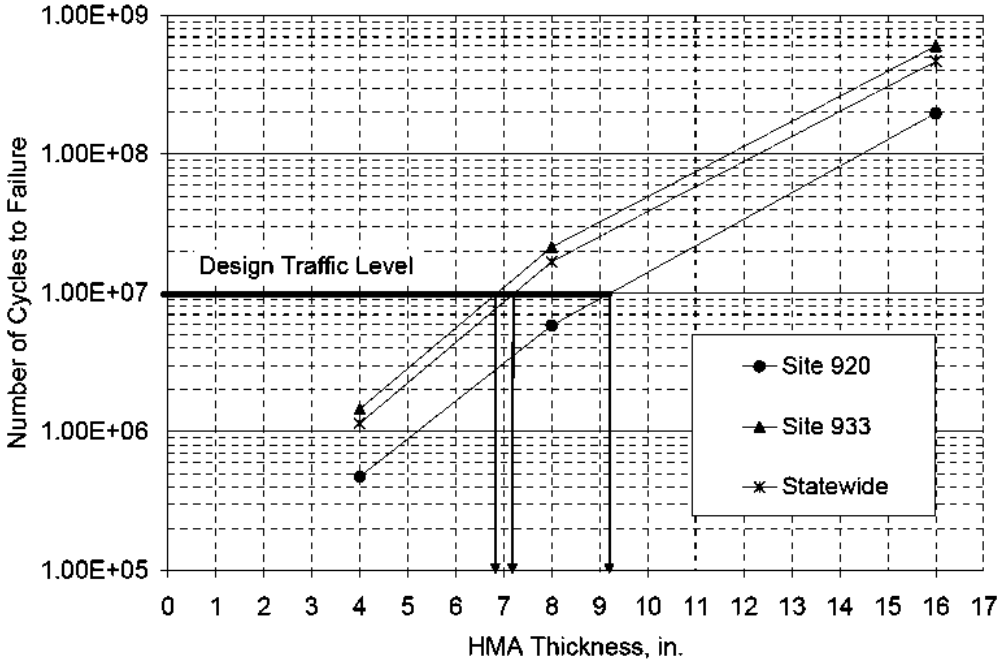
ในอดีตการทำนายอายุบริการทางหลวงนั้นอาศัยมักจะดำเนินการตามคู่มือการออกแบบชั้นทางของ AASHTO (1993) ซึ่งเป็นวิธีการเชิงประสบการณ์ (Empirical Method) จากการทดสอบบนถนนที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยสภาพการใช้งานปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงไปค่อนข้างมาก เช่น จำนวนและน้ำหนักรถบรรทุกที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้การทำนายอายุบริการดังกล่าวอาจจะเกิดการคลาดเคลื่อนได้ ส่งผลให้ทางหลวงเกิดความเสียหายได้รวดเร็วกว่าที่คาดการณ์ไว้ได้ นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ล้วนแต่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของทางหลวงด้วยเช่นกัน จึงได้มีการนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้จริงจากในสนาม เช่น อุณหภูมิรวมทั้งค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้งค่าความเครียดหรือค่าการแอ่นตัวมาปรับปรุงตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบให้เหมาะสมยิ่งขึ้น (Rilett and Hutchinson, 1988)

ธนกฤตและคณะ (พ.ศ. 2554) ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเครียดวิกฤตที่เกิดขึ้นในโครงสร้างถนนลาดยางทั้งหมด 6 รูปแบบ โดยการวิเคราะห์นั้นใช้โปรแกรม Layer Elastic เพื่อประเมินหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปวิเคราะห์หาจำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำของโครงสร้างทางลาดยางแต่ละรูปแบบได้ดังแสดงในรูปที่ 4.84



รูปที่ 4.84 ผลการวิเคราะห์จำนวนเที่ยวของน้ำหนักเพลามาตรฐานที่ยอมให้
(ที่มา : ธนกฤตและคณะ, พ.ศ. 2554)

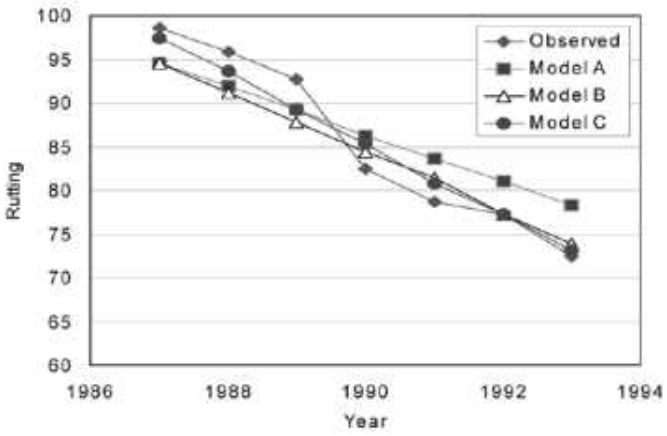
Turochy et al. (2005) ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงค่า Truck Factor ของเมือง Auburn มล รัฐ Alabama โดยอาศัยข้อมูลทางสถิติจากสถานีตรวจวัดน้ำหนักแบบ Weight In Motion (WIM) และใช้วิธีการออกแบบ Mechanistic-Empirical สำหรับนำมาใช้ในออกแบบความหนาชั้นทางให้เพียงพอต่อการรองรับจำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำที่จะเกิดขึ้น โดยตัวอย่างการหาความหนาชั้นทางที่เหมาะสมแสดงไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.85



รูปที่ 4.85 ตัวอย่างการหาความหนาชั้นทางที่เหมาะสม

(ที่มา : Turochy et al., 2005)

Kim and Kim (2006) ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อคาดการณ์ถึงประสิทธิภาพของทางหลวงลาดยางที่มลรัฐ Georgia โดยอาศัยฐานข้อมูลประสิทธิภาพทางหลวงที่ได้จัดเก็บไว้ก่อนหน้านี้ด้วยวิธี Pavement Condition Evaluation System (PACES) ร่วมกับแบบจำลองการวิเคราะห์ Regression Analysis โดยผลของการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงแนวโน้มความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในระยะเวลาต่างๆ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.86 ทำให้สามารถประมาณช่วงเวลาการซ่อมแซมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.86 การเปรียบเทียบค่า Rutting จากข้อมูลที่ตรวจวัดจริงในสนามกับแบบจำลองการคาดการณ์ประสิทธิภาพทางหลวง

(ที่มา : Kim and Kim, 2006)

เนื่องด้วยค่าอัตราการทำลาย Load Equivalent Factor (LEF) ที่มักนำมาใช้ส่วนใหญ่นั้นเป็นค่า ที่กำหนดไว้ในคู่มือการออกแบบชั้นทางของ AASHTO ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1993 (AASHTO, 1993) ซึ่งทำให้ค่าที่ใช้นั้นอาจจะไม่ตรงตามสภาพความเป็นจริงในปัจจุบัน ซึ่งถ้าหากค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุกจริงมีค่าสูงกว่าที่ทำนายไว้จะทำให้ถนนเกิดความเสียหายได้รวดเร็วกว่าที่คาดการณ์ไว้ หรือในอีกแง่มุมหนึ่งถ้าหากค่าอัตราการ

ทำลายของรถบรรทุกจริงมีค่าต่ำกว่าที่ทำนายไว้ จะทำให้เกิดการสูญเสียงบประมาณที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อทางหลวงสายอื่นได้ ดังนั้นที่ปรึกษาจะดำเนินการวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุกตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์อัตราการทำลายจากทฤษฎี เช่น กฎยกกำลังสี่ (สมการที่ 17 และ 18) วิธี AASHTO (สมการที่ 19 – 25) เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 2016 Rys et al. ได้ดำเนินการเปรียบเทียบค่า LEF ที่คำนวณจากวิธีต่างๆทั้งวิธีสมการกำลังสี่, AASHTO 1993, French LCPC และ GUT (Gdansk University of Technology) Method โดยใช้ข้อมูลยานพาหนะประเภทต่างๆทั้งรถบรรทุก (C) รถบรรทุกพ่วง (C+P) รวมถึงรถโดยสารสาธารณะ (A) จากสถานีตรวจวัดประเภท Weight In Motion (WIM) บนชั้นทางทั้งแบบ flexible และ semi-rigid ดังแสดงในรูปที่ 4.87 ซึ่งพบว่าสำหรับถนนประเภท flexible นั้นทั้งสามวิธีแรกที่กล่าวถึงให้ค่า LEF ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนวิธี GUT Method ซึ่งเป็นวิธีคำนวณแบบ Mechanistic-Empirical นั้นค่า LEF จะขึ้นกับ fatigue criteria ซึ่งค่า LEF ที่คำนวณได้จาก asphalt fatigue มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณจาก subgrade deformation ขณะที่ข้อมูลจากถนนประเภท semi-rigid นั้นพบว่าค่า LEF จากสมการยกกำลัง 12 นั้นมีค่ามากกว่าสมการกำลังสี่ประมาณ 1.5 เท่า และพบว่าค่า LEF ที่คำนวณได้จากวิธี LCPC มีค่าแตกต่างค่อนข้างมากจากค่าที่คำนวณด้วยวิธี GUT ของประเทศโปแลนด์ ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการที่ประเทศฝรั่งเศสกำหนดน้ำหนักเพลามาตรฐาน (130 kN) ที่สูงกว่าประเทศโปแลนด์ (100 หรือ 115 kN)

$$LEF = \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{18}} \right)^4 \tag{17}$$

$$LEF = \left(\frac{L_x}{L_s} \right)^4 \tag{18}$$

เมื่อ ε_x = tensile strain ที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ชั้น Asphalt เนื่องจาก x-axle load

ε_{18} = tensile strain ที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ชั้น Asphalt เนื่องจาก 18-kip axle load

L_x = แรงกระทำต่อ single axle ในหน่วย kip

L_s = 18 kips สำหรับ single axle

สำหรับถนนลาดยาง: $\log\left(\frac{w_{tx}}{w_{t18}} \right) = 4.79\log(18+1) - 4.79\log(L_x + L_2) + 4.33\log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$ (19)

$$G_t = \log\left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5} \right) \tag{20}$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081\left(L_x + L_2\right)^{3.23}}{\left(SN+1\right)^{5.19} L_2^{3.23}} \tag{21}$$

สำหรับถนนคอนกรีต: $\log\left(\frac{w_{tx}}{w_{t18}} \right) = 4.62\log(18+1) - 4.62\log(L_x + L_2) + 3.28\log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$ (22)

$$G_t = \log\left(\frac{4.5 - p_t}{4.5 - 1.5} \right) \tag{23}$$

$$\beta_x = 1.00 + \frac{3.63\left(L_x + L_2\right)^{5.20}}{\left(D+1\right)^{8.46} L_2^{3.52}} \tag{24}$$

$$LEF\,(AASHTO) = \frac{w_{t18}}{w_{tx}} \tag{25}$$

เมื่อ w_{tx} = จำนวนแรงกระทำโดย x-axle

w_{t18} = จำนวนแรงกระทำโดย 18-kip single-axle

L_x = แรงกระทำที่เกิดขึ้น (kip)

L_2 = axle code (1 สำหรับ single axle, 2 สำหรับ tandem axles และ 3 สำหรับ tridem axles)

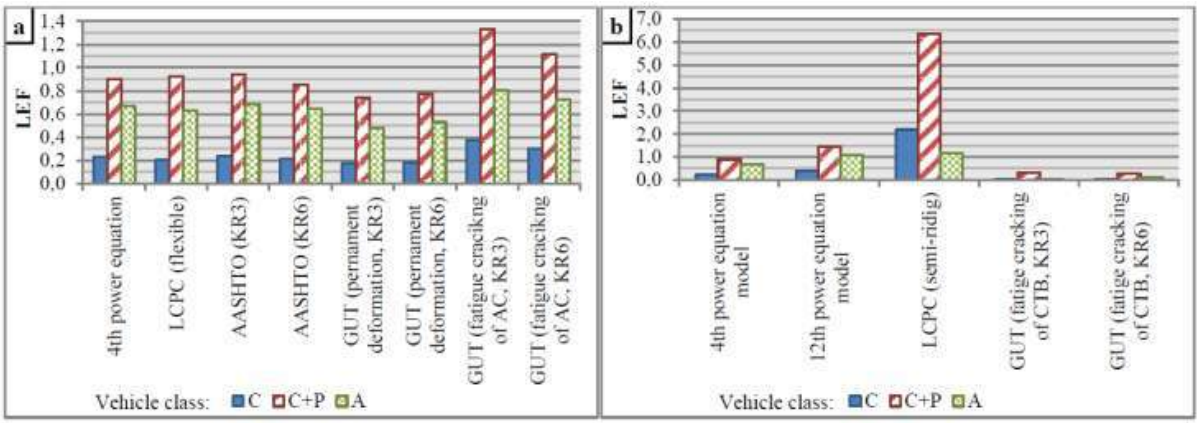
SN = structure number

p_t = terminal serviceability

G_t = ฟังก์ชั่นของ p_t

β_{18} = ค่า β_x เมื่อ L_x = 18 และ L_2 = 1

D = ความหนาพื้นคอนกรีต (นิ้ว)

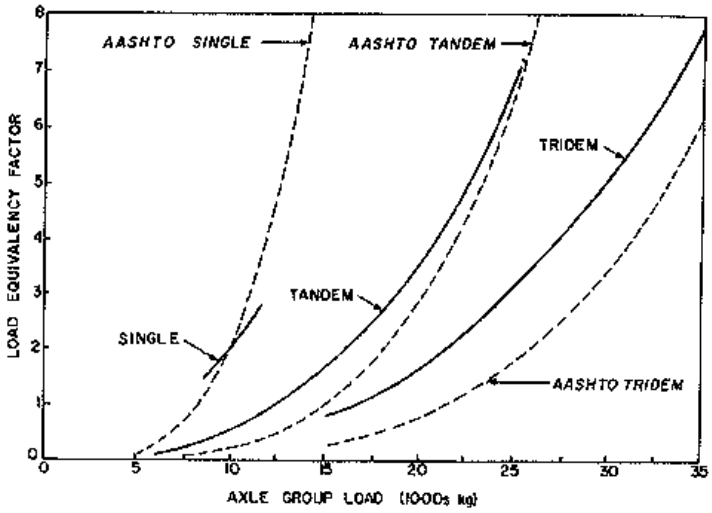


รูปที่ 4.87 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่า LEF ที่คำนวณได้จากวิธีต่างๆบนถนนสาย DK46 ประเทศโปแลนด์ สำหรับ a) flexible pavements และ b) semi-rigid pavements

(ที่มา : Rys et al., 2016)

4.12 การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF ของรถบรรทุกกับน้ำหนักลงกลุ่มเพลาต่างๆ

เนื่องด้วยเหตุผลเดียวกันกับที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่าค่า LEF ที่นำมาใช้นั้นอาจจะไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้ทางหลวงในปัจจุบัน เช่นการศึกษาของ Rilett and Hutchinson (1988) ที่พบว่าค่า LEF ที่วัดได้จากค่าการแอ่นตัวของถนนในประเทศ Canada ดังแสดงในรูปที่ 4.88 นั้นมีค่าสูงกว่าค่า LEF ที่คำนวณได้จากวิธีของ AASHTO อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นที่ปรึกษาจะดำเนินการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF ของรถบรรทุกกับน้ำหนักลงกลุ่มเพลาต่างๆที่ได้ในข้อ 4.11 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงของรถบรรทุกในประเทศไทย ซึ่งจะทำให้การออกแบบนั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

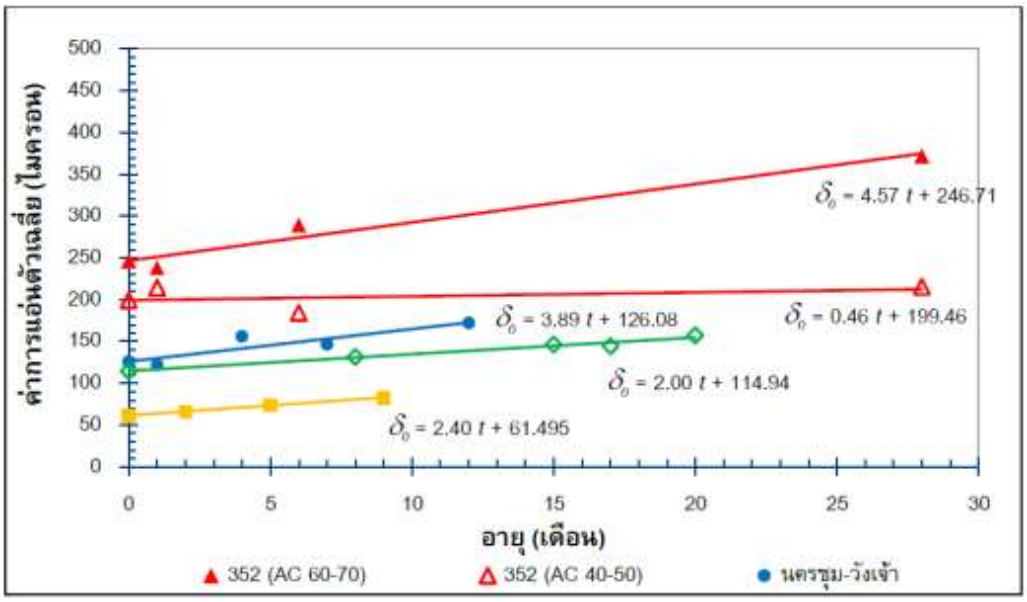


รูปที่ 4.88 การเปรียบเทียบค่า LEF ที่วิเคราะห์ได้กับค่าของ AASHTO

(ที่มา : Rilett and Hutchinson, 1988)

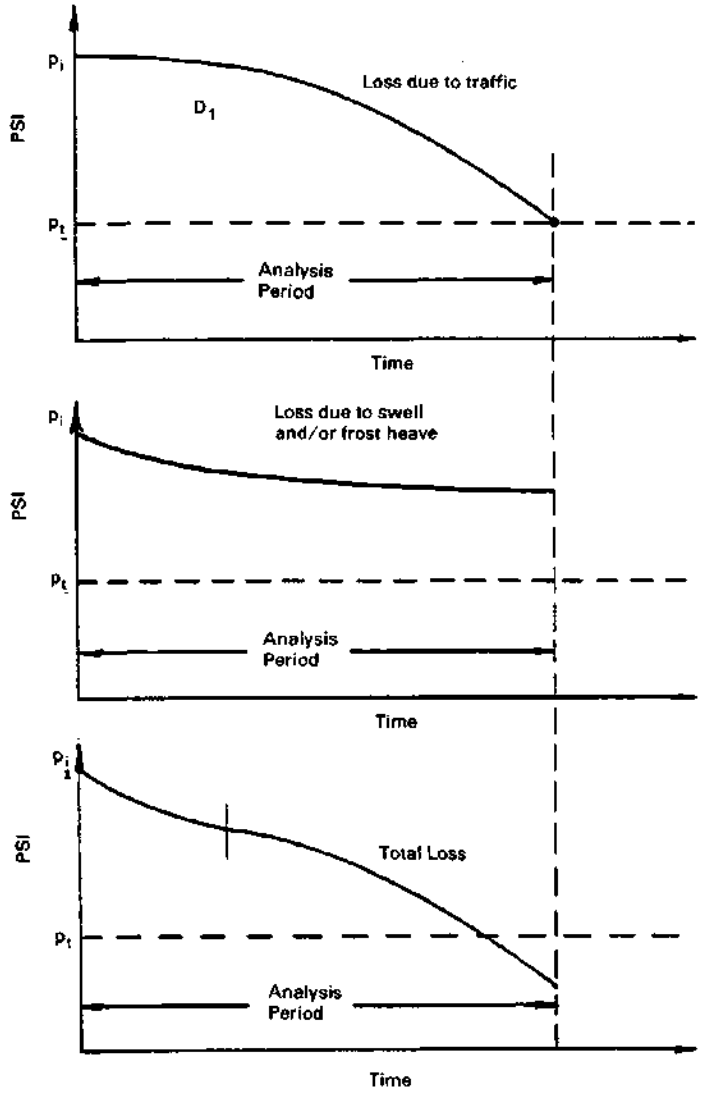
4.13 การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง

ที่ปรึกษาจะดำเนินการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จจำนวน 2 แปลง ในระยะที่หนึ่ง และที่ติดตั้งเพิ่มเติมจำนวน 1 แปลง รวมจำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง โดยที่ปรึกษาจะนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมในสนามมาพัฒนาแบบจำลองเพื่อคาดการณ์สภาพถนนที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออายุใช้งานมากขึ้น ทั้งนี้แบบจำลองจะประกอบไปด้วย 1) Simplified Model สำหรับงานปฏิบัติการ และ 2) Mechanistic (Analytical) Model สำหรับงานวิจัยวิชาการ โดยตัวอย่างการคาดการณ์ประสิทธิภาพทางหลวงแสดงไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.89 และ รูปที่ 4.90



รูปที่ 4.89 อัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางภายหลังการก่อสร้างหรือบูรณะทางหลวง

(ที่มา: อัคคพัฒน์ และ ธนกฤต, พ.ศ. 2555)



รูปที่ 4.90 ตัวอย่างแสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของถนน

(ที่มา : AASHTO, 1998)

5. การสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด

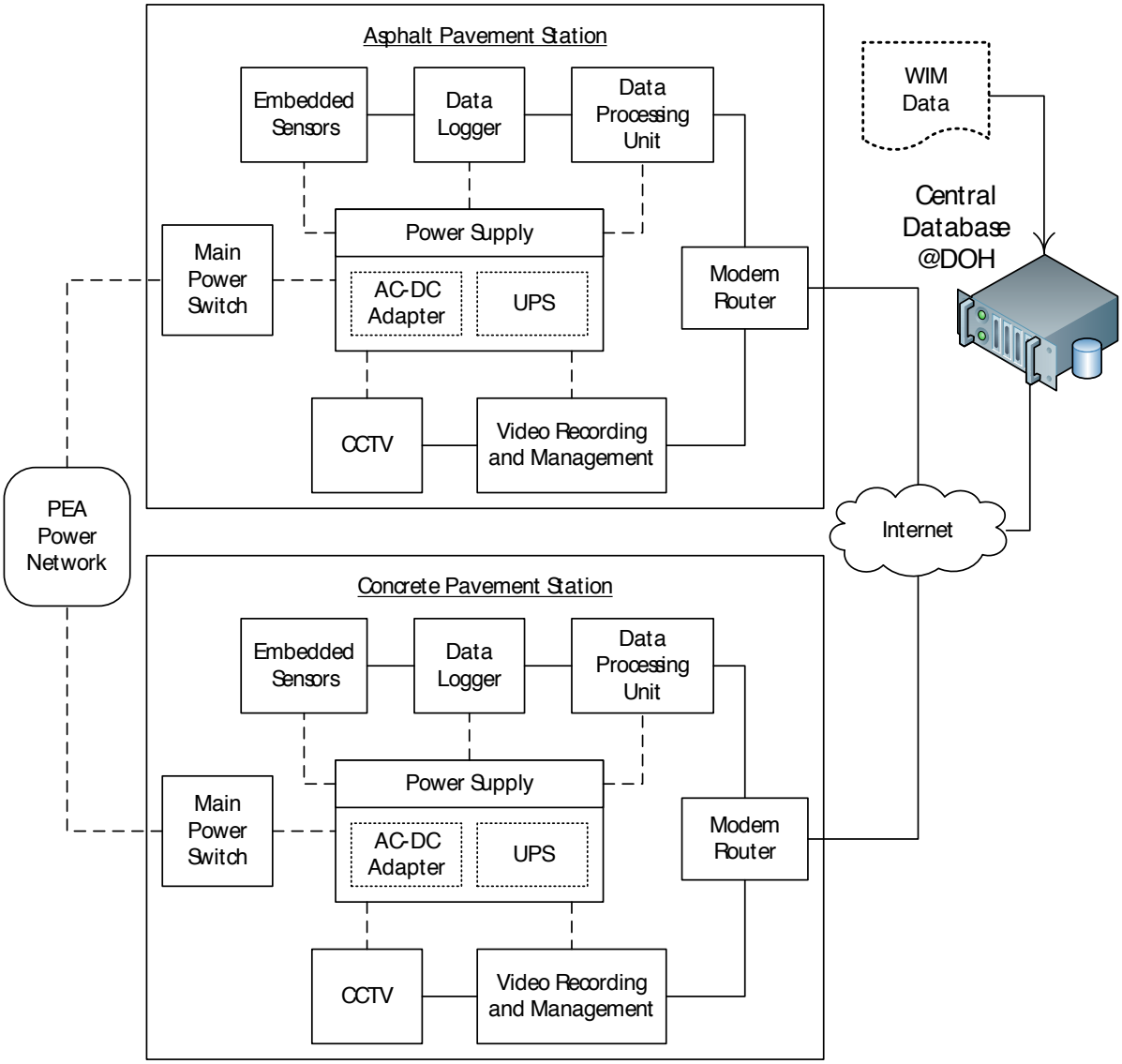
ที่ปรึกษาได้ดำเนินการสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด จำนวน 1 แปลง เพื่อทำการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง จำนวน 1 แปลง บนทางหลวงหมายเลข 32 บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) ต.หาดอาษา อ.สรรพยา จ.ชัยนาท ซึ่งเป็นพื้นที่ในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงชัยนาท รายละเอียดการดำเนินงานสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัดฯ มีดังต่อไปนี้

5.1 แนวทางการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน

ที่ปรึกษาจะดำเนินการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยมีภาพรวมการติดตั้งและเชื่อมโยงอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บข้อมูลจากระบบเครื่องมือตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1) การติดตั้งตู้จัดเก็บอุปกรณ์ (Outdoor Cabinet)
   - ก่อสร้างพื้นคอนกรีต รั้ว และโครงหลังคาสำหรับตู้จัดเก็บอุปกรณ์
   - ติดตั้งตู้จัดเก็บอุปกรณ์แบบป้องกันความชื้นและระบายความร้อน
2) การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า
   - เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าจากโครงข่ายระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมายังแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต
   - ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมระบบไฟฟ้าสำหรับแปลงตรวจวัดฯ
3) การเชื่อมโยงระบบเครือข่าย
   - เชื่อมต่อระบบเครือข่ายความเร็วสูงจาก Internet Service Provider (ISP) มายังแปลงตรวจวัดฯ
   - ติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณเครือข่ายในแปลงตรวจวัดฯ
4) การติดตั้งชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply System)
   - ติดตั้งชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ
   - เชื่อมโยงอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟกับอุปกรณ์ควบคุมระบบไฟฟ้า
5) การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน (Embedded Sensors)
   - ขุดรื้อผิวทางและโครงสร้างทาง
   - ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง ดังรายละเอียดใน ตารางที่ 2.1
   - ติดตั้งและเชื่อมต่อสายไฟฟ้าและสายสัญญาณกับเครื่องมือตรวจวัดฯ
   - ฝังกลบ บดอัด และซ่อมแซมทางหลวงให้กลับคืนสู่สภาพเดิม
   - ติดตั้งป้ายและบริหารการจราจรในระหว่างการก่อสร้าง
6) การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)
   - ติดตั้งและตั้งค่า (Configuration) อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)
   - เชื่อมต่อสายสัญญาณจากเครื่องมือตรวจวัดฯ กับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)
   - ทดสอบการเชื่อมต่อข้อมูลและปรับเทียบ (Calibration) เครื่องมือตรวจวัดฯ

7) การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)
   - ติดตั้งและเดินสายสัญญาณหน่วยประมวลผลภาคสนาม
   - เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบเครือข่ายเข้ากับหน่วยประมวลผลภาคสนาม
   - ตั้งค่า (Configuration) หน่วยประมวลผลภาคสนาม
8) การติดตั้งฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บผลการตรวจวัดในภาคสนาม
   - ออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บข้อมูลผลการตรวจวัดฯ บนหน่วยประมวลผลภาคสนาม
   - เชื่อมโยงข้อมูลจากอุปกรณ์บันทึกข้อมูลมายังหน่วยประมวลผลภาคสนาม
9) การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV)
   - เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและเดินสายสัญญาณสำหรับกล้องวงจรปิด
   - ติดตั้งและตั้งค่า (Configuration) กล้องวงจรปิด
10) การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management)
   - เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและเดินสายสัญญาณสำหรับอุปกรณ์บันทึกภาพ
   - ติดตั้งและตั้งค่า (Configuration) อุปกรณ์บันทึกภาพ
   - เชื่อมต่อสัญญาณจากกล้องวงจรปิดเข้ากับอุปกรณ์บันทึกภาพ
   - เชื่อมต่อระบบเครือข่ายเข้ากับอุปกรณ์บันทึกภาพ
11) การติดตั้งระบบติดตามและประเมินสมรรถนะทางหลวง
   - ออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูลกลาง (Central Database) สำหรับจัดเก็บข้อมูลจากแปลงตรวจวัดถนนลาดยางและถนนคอนกรีต
   - เชื่อมโยงข้อมูลจากหน่วยประมวลผลภาคสนามมายังฐานข้อมูลกลาง
   - พัฒนาเว็บแอพพลิเคชัน (Web Application) สำหรับสืบค้นและแสดงผลข้อมูลในการติดตามและประเมินสมรรถนะทางหลวง
12) การบูรณาการข้อมูลจากสถานีตรวจสอบน้ำหนัก
   - ศึกษาแนวทางในการนำข้อมูลจากระบบ Weigh In Motion (WIM) ของสำนักงานควบคุมน้ำหนักและยานพาหนะ เพื่อนำเข้า (Data Import) ฐานข้อมูลกลาง (Central Database) สำหรับใช้ในการติดตามและประเมินสมรรถนะทางหลวงร่วมกับข้อมูลผลการตรวจวัดจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต



รูปที่ 5.1 ภาพรวมการติดตั้งและเชื่อมโยงอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บข้อมูลจากระบบเครื่องมือตรวจวัด

5.2 รวบรวมข้อมูลแปงตรวจวัด

ข้อมูลลักษณะทางภูมิศาสตร์ รูปแบบโครงสร้างชั้นทาง ลักษณะทางเรขาคณิต สภาพผิวทาง ข้อมูลประวัติสายทาง (Road Inventory) และข้อมูลปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (Truck Traffic Volume) ย้อนหลังอย่างน้อย 1 ปี โดยอ้างอิงจากฐานข้อมูลสถานีตรวจสอบน้ำหนักในบริเวณใกล้เคียงหรือจากฐานข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องของแปลงตรวจวัดฯ มีดังต่อไปนี้

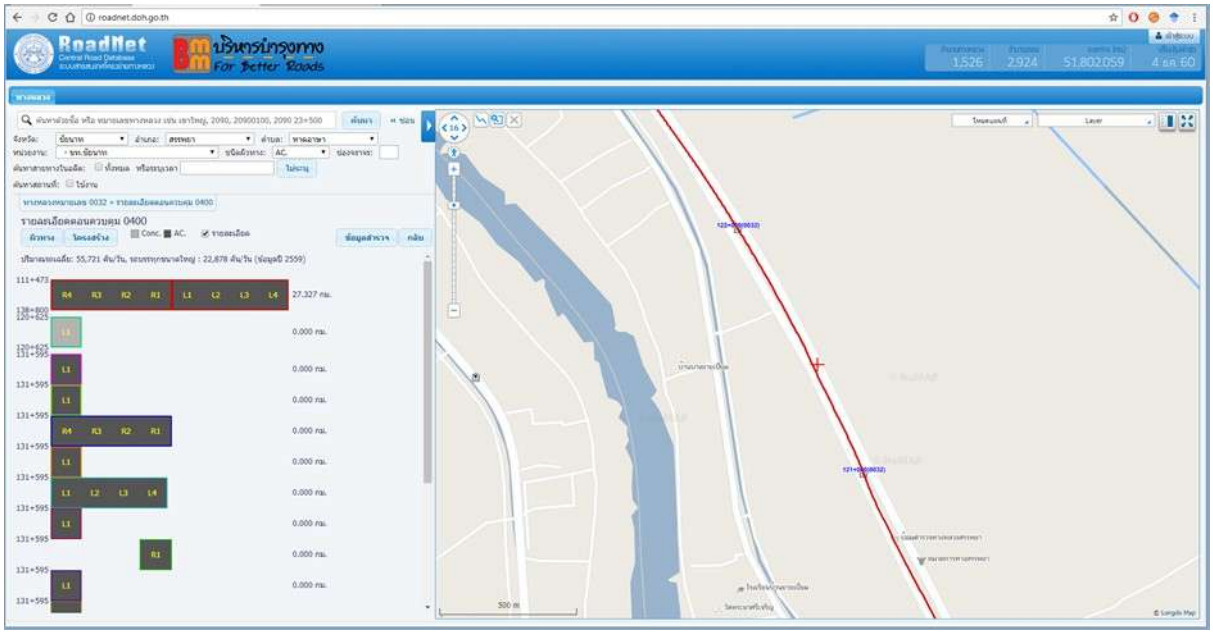
- **สถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)**
  - ทางหลวงหมายเลข 32 ก.ม. 120+250
  - ตอน 0400 ต.หาดอาษา อ.สรรพยา จ.ชัยนาท
  - พิกัด: 15.1474864, 100.254791
  - ชนิดผิวทาง: AC, มาตรฐานชั้นทาง : พิเศษ, จำนวนช่องจราจร : 8
  - อุปกรณ์สถานีฯ: เครื่องชั่ง Static, WIM, ระบบคัดแยกอัตโนมัติ
  - ปริมาณรถเฉลี่ย: 55,721 คัน/วัน (ข้อมูลจาก สป. ตอน 0400 ปี 2559)

- รถบรรทุกขนาดใหญ่: 22,878 คัน/วัน (ข้อมูลจาก สป. ตอน 0400 ปี 2559)
- จำนวนรถบรรทุกเข้าชั่งน้ำหนัก: 516,300 คัน/วัน (ข้อมูลจาก สคน. ปี 2559)
- ระยะทางจากกรุงเทพฯ: 175 กม.
- ข้อมูลสถิติการเข้าชั่งน้ำหนักยานพาหนะสถานีตรวจสอบสรรพยา (ขาเข้า) ประจำปี 2555 – 2560 ดังแสดงในตารางที่ 5.1
- ข้อมูลรายละเอียดตอนควบคุมแสดงในรูปที่ 5.2
- ข้อมูลผิวทางแสดงในรูปที่ 5.3
- ข้อมูลโครงสร้างและกายภาพแสดงในรูปที่ 5.4
- ตำแหน่งจุดติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแสดงใน รูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.8
- รูปแบบโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางแสดงใน รูปที่ 5.9

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลสถิติการเข้าชั่งฯสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) ประจำปี 2555 – 2560

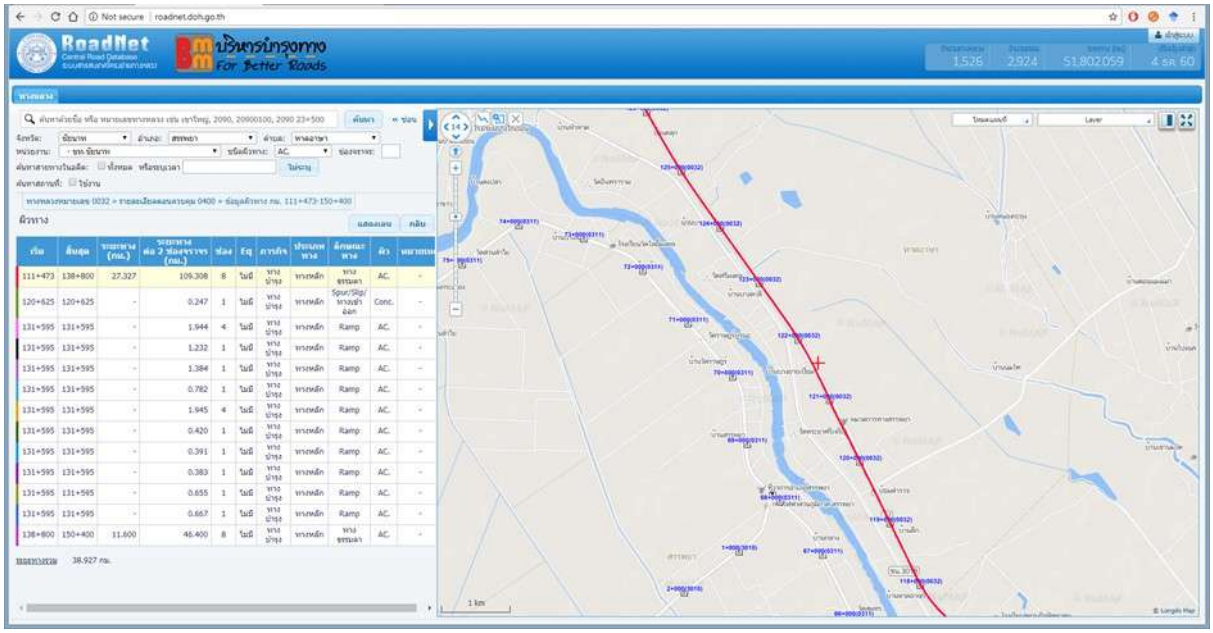
ปี 2555		ปี 2556		ปี 2557		ปี 2558		ปี 2559		ปี 2560		รวม		%
เข้าชั่ง	เกิน	เข้าชั่ง	เกิน	เข้าชั่ง	เกิน	เข้าชั่ง	เกิน	เข้าชั่ง	เกิน	เข้าชั่ง	เกิน	เข้าชั่ง	เกิน	
601,030	135	706,542	109	744,039	94	503,476	55	516,300	40	635,283	30	3,706,670	463	0.0125

ที่มา : สำนักงานควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ กรมทางหลวง



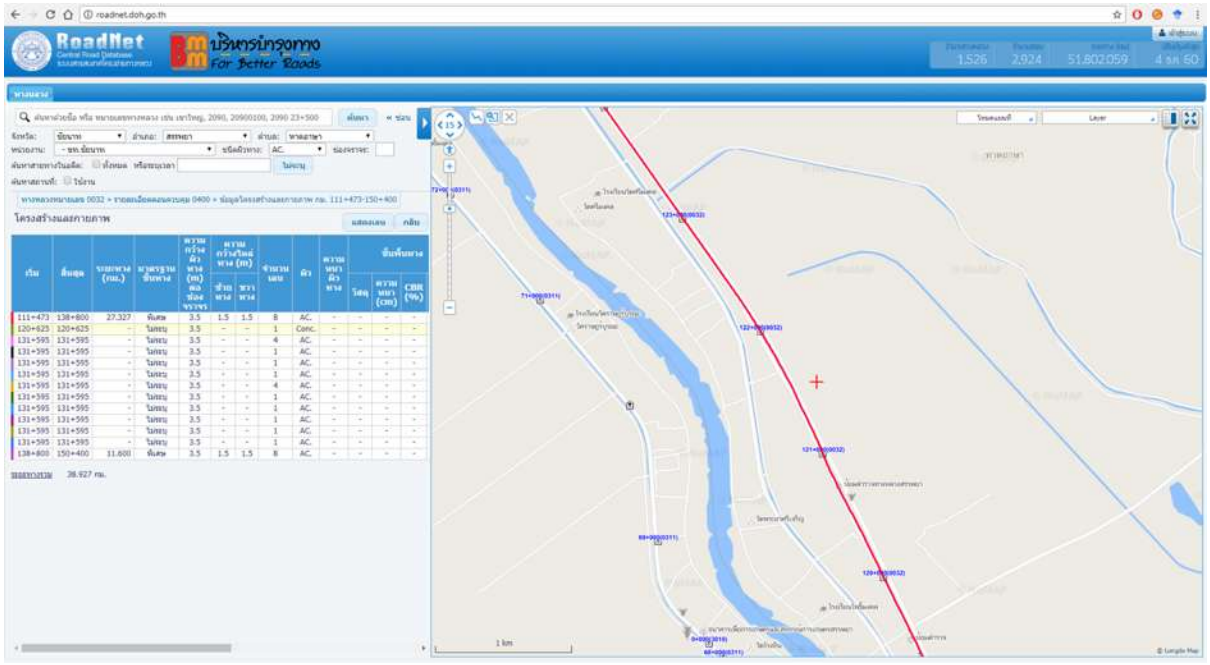
รูปที่ 5.2 ข้อมูลรายละเอียดตอนควบคุมสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)

ที่มา : ระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง (Roadnet) ของสำนักบริหารบำรุงทาง



รูปที่ 5.3 ข้อมูลผิวทางสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)

ที่มา : ระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง (Roadnet) ของสำนักบริหารบำรุงทาง



รูปที่ 5.4 ข้อมูลโครงสร้างและกายภาพสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)

ที่มา : ระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง (Roadnet) ของสำนักบริหารบำรุงทาง



รูปที่ 5.5 แผนที่ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)



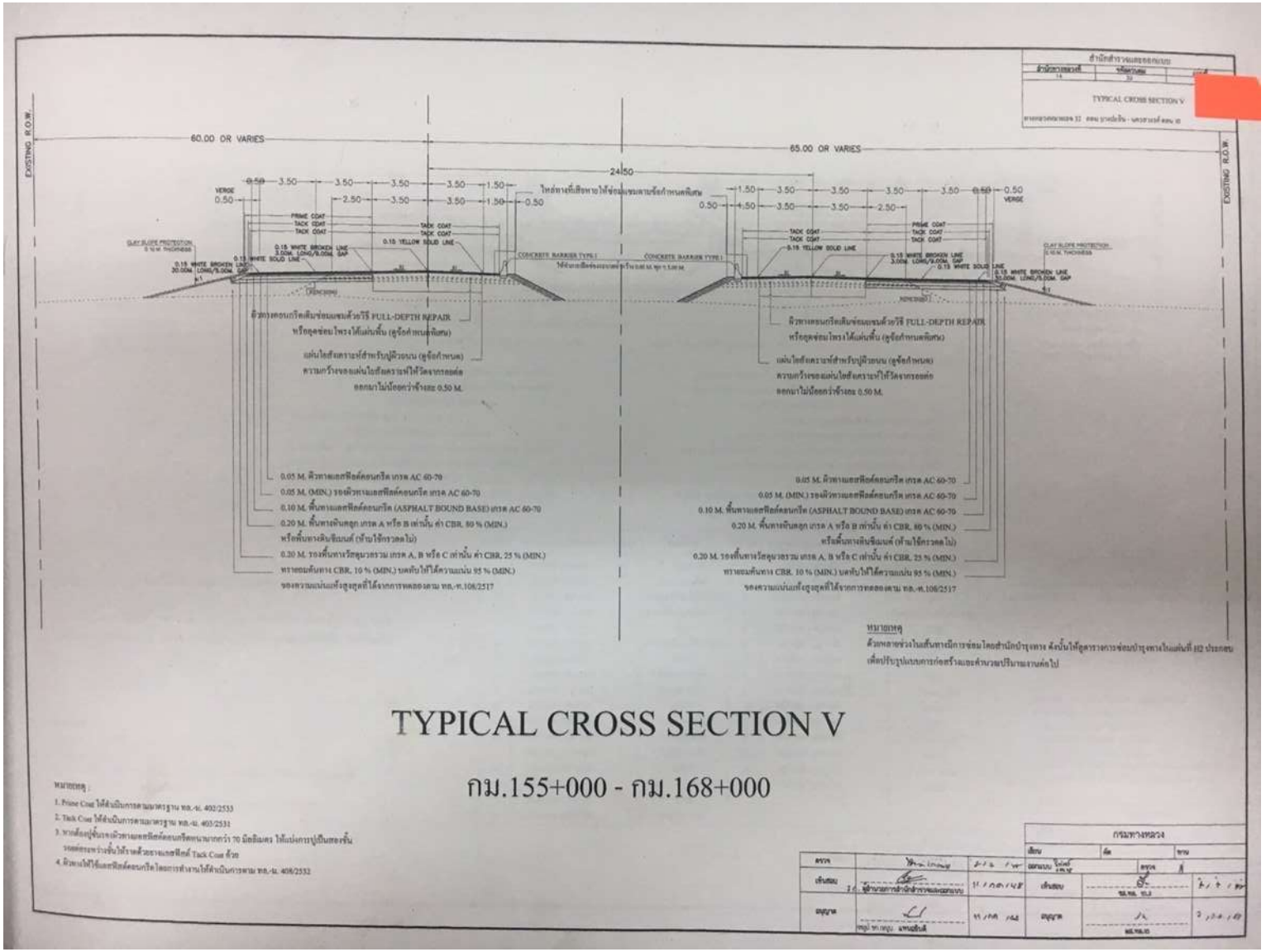
รูปที่ 5.6 บริเวณด้านหน้าสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)



รูปที่ 5.7 บริเวณเครื่องชั่ง WIM ก่อนถึงสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)



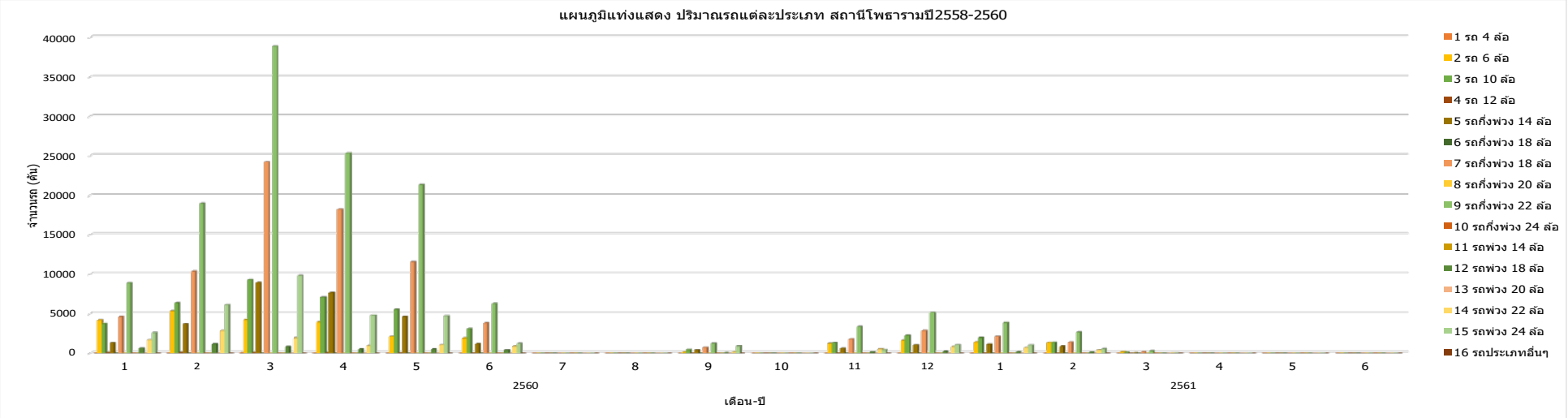
รูปที่ 5.8 บริเวณแปลงโครงสร้างถนนลาดยางก่อนถึงบริเวณเครื่องชั่ง WIM สรรพยา (ขาเข้า)



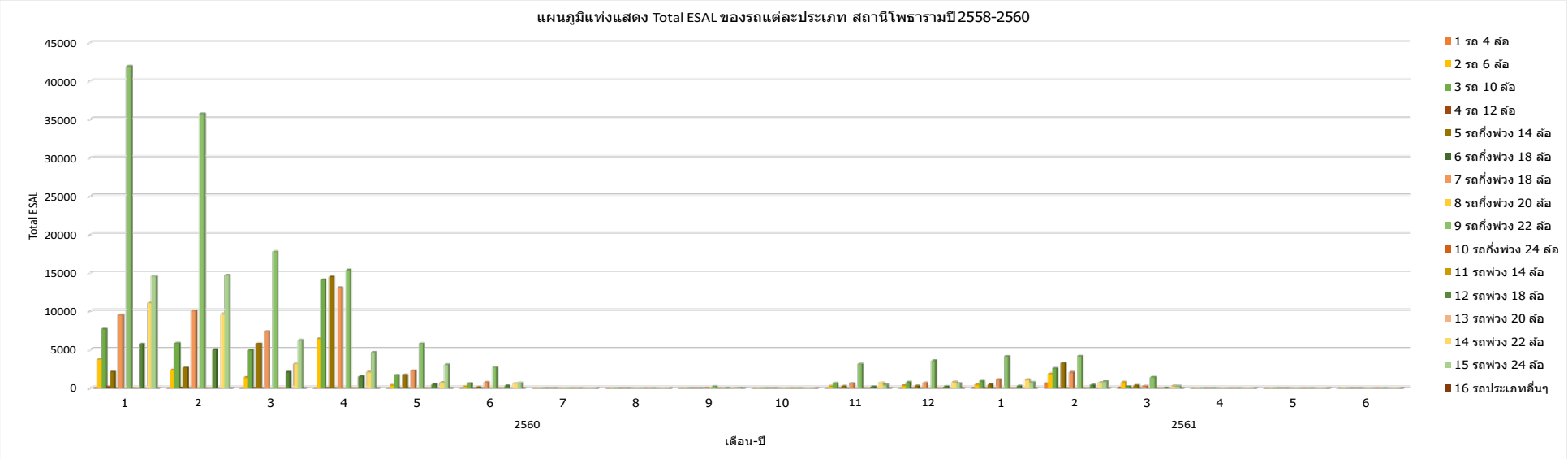
รูปที่ 5.9 รูปแบบโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยาง

5.3 การบูรณาการข้อมูลจากสถานีตรวจสอบน้ำหนัก

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการใช้ข้อมูลจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสำนักงานควบคุมน้ำหนักและยานพาหนะ เพื่อนำเข้า (Data Import) ฐานข้อมูลกลาง (Central Database) สำหรับใช้ในการติดตามและประเมินสมรรถนะทางหลวงร่วมกับข้อมูลผลการตรวจวัดจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยข้อมูลที่ได้จากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางบริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) ในรูปแบบกราฟแสดงในรูปที่ 5.10 ถึง รูปที่ 5.19



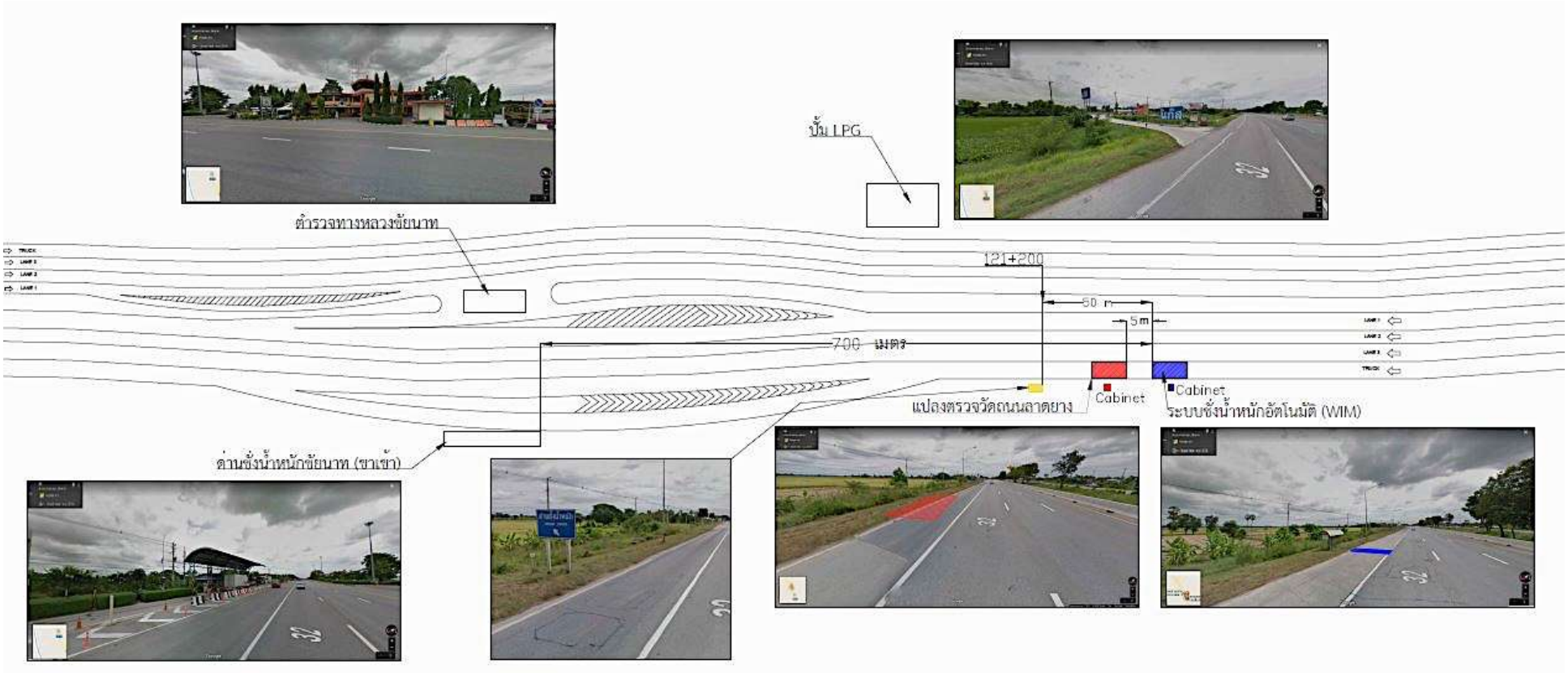
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงปริมาณของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) (ปี 2560 – 2561)



รูปที่ 5.3 กราฟแสดง Total ESAL ของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) (ปี 2560 – 2561)

5.4 การจัดทำแบบแปลนการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน

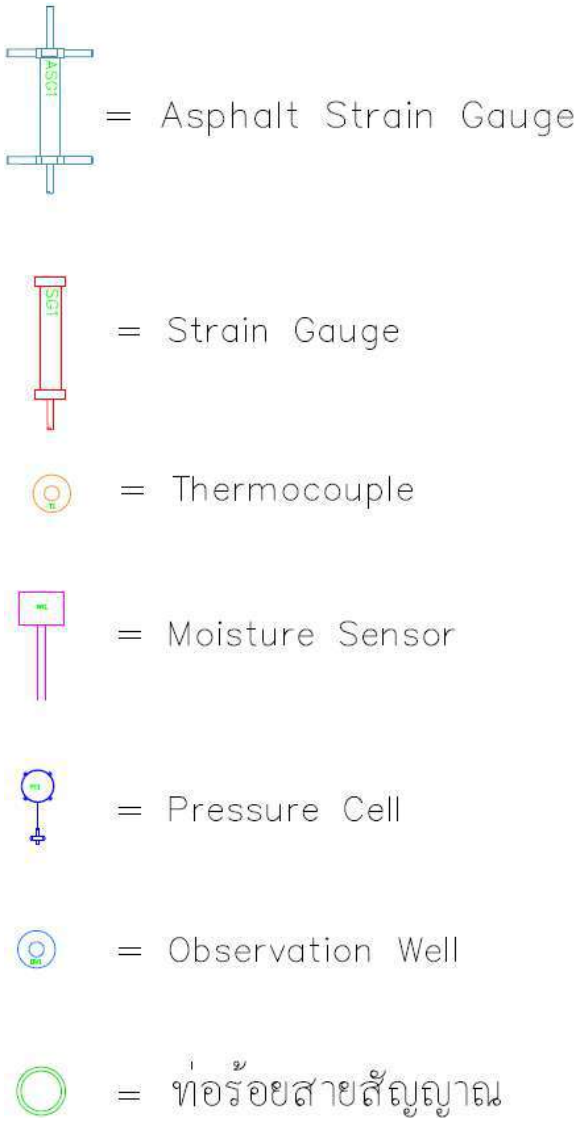
ที่ปรึกษาได้จัดทำแบบแปลนแสดงรายละเอียดการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนลาดยางบริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) ดังแสดงในรูปที่ 5.4



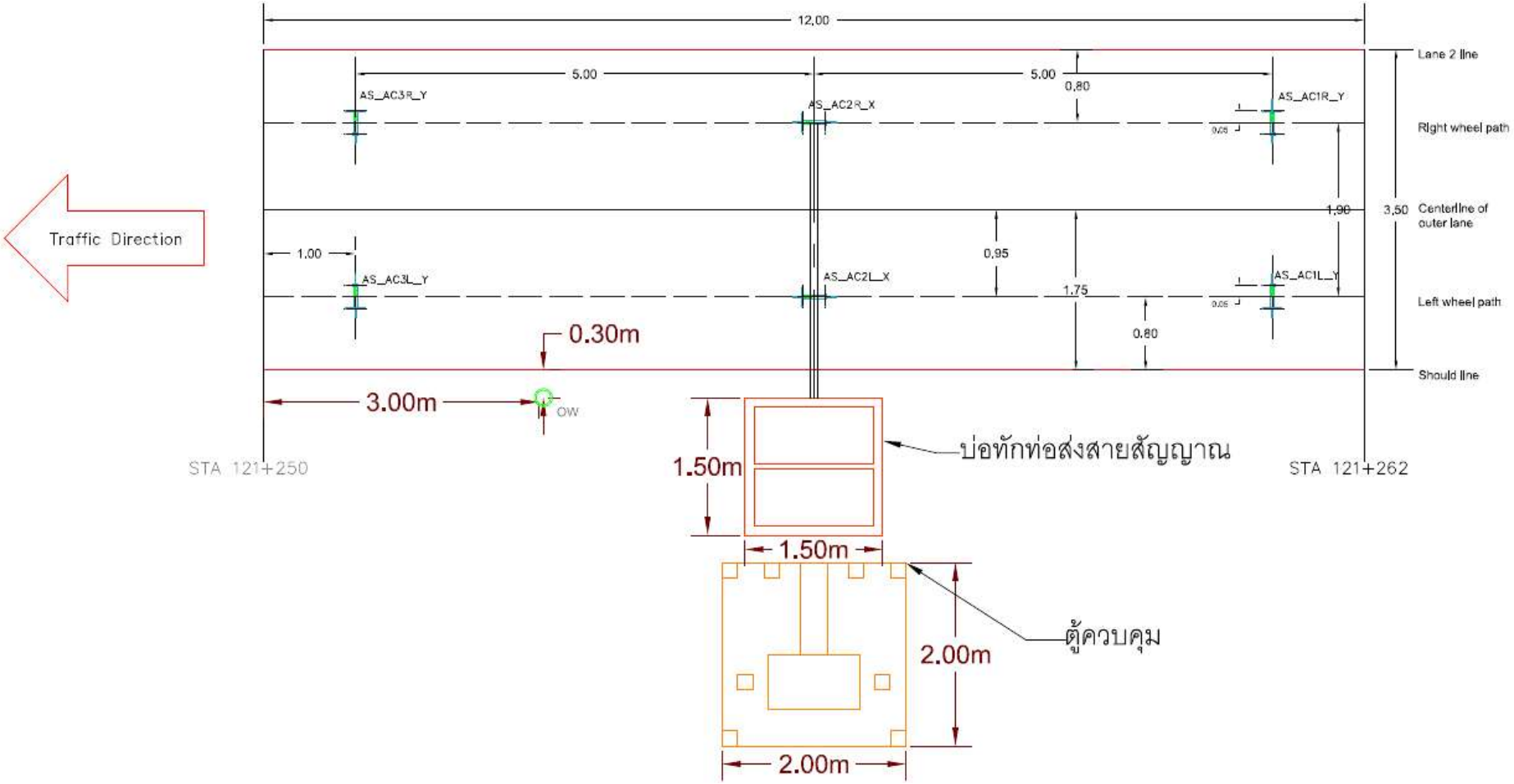
รูปที่ 5.4 แบบแปลนตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)

5.5 การจัดทำแผนผังงานวางระบบและขั้นตอนการติดตั้ง

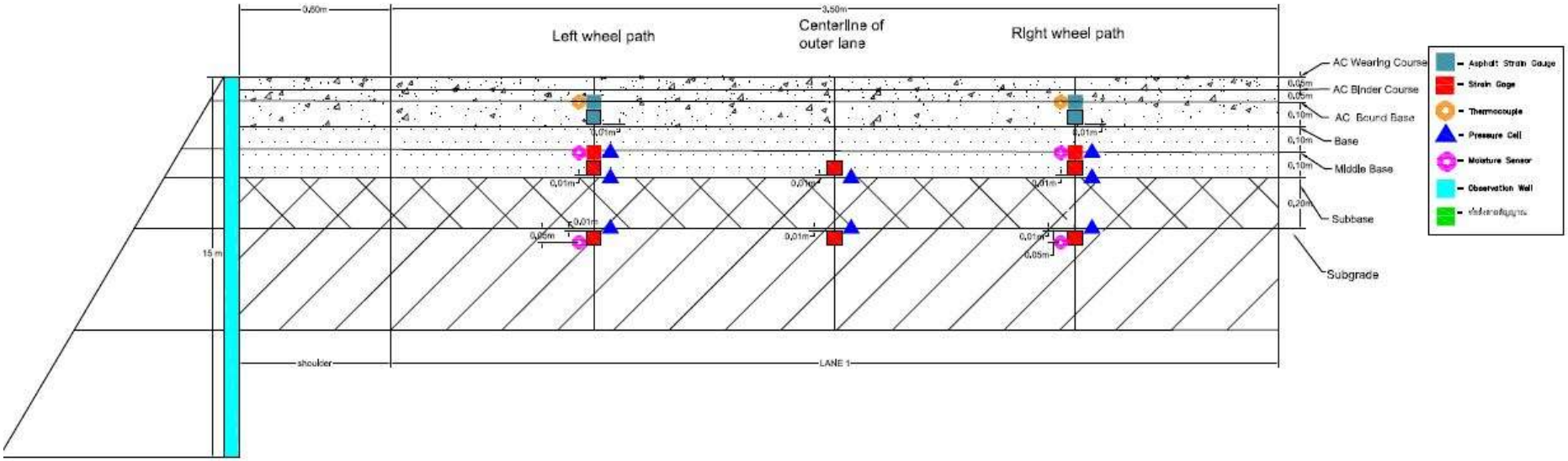
ที่ปรึกษาได้จัดทำแผนผังงานวางระบบระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System) และระบบสายสัญญาณสำหรับเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างระบบเครื่องมือตรวจวัดฯ โดยสัญลักษณ์เครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนแสดงในรูปที่ 5.13 กับระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามสำหรับในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางดังแสดงในรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.22 โดยอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ระบบจัดเก็บและประมวลผลภาคสนามจะติดตั้งอยู่ภายในตู้จัดเก็บอุปกรณ์ภาคสนาม (Outdoor Cabinet) ดังแสดงในรูปที่ 5.23 และระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบสำรองไฟฟ้า (Power Supply System) แสดงรายละเอียดในรูปที่ 5.24



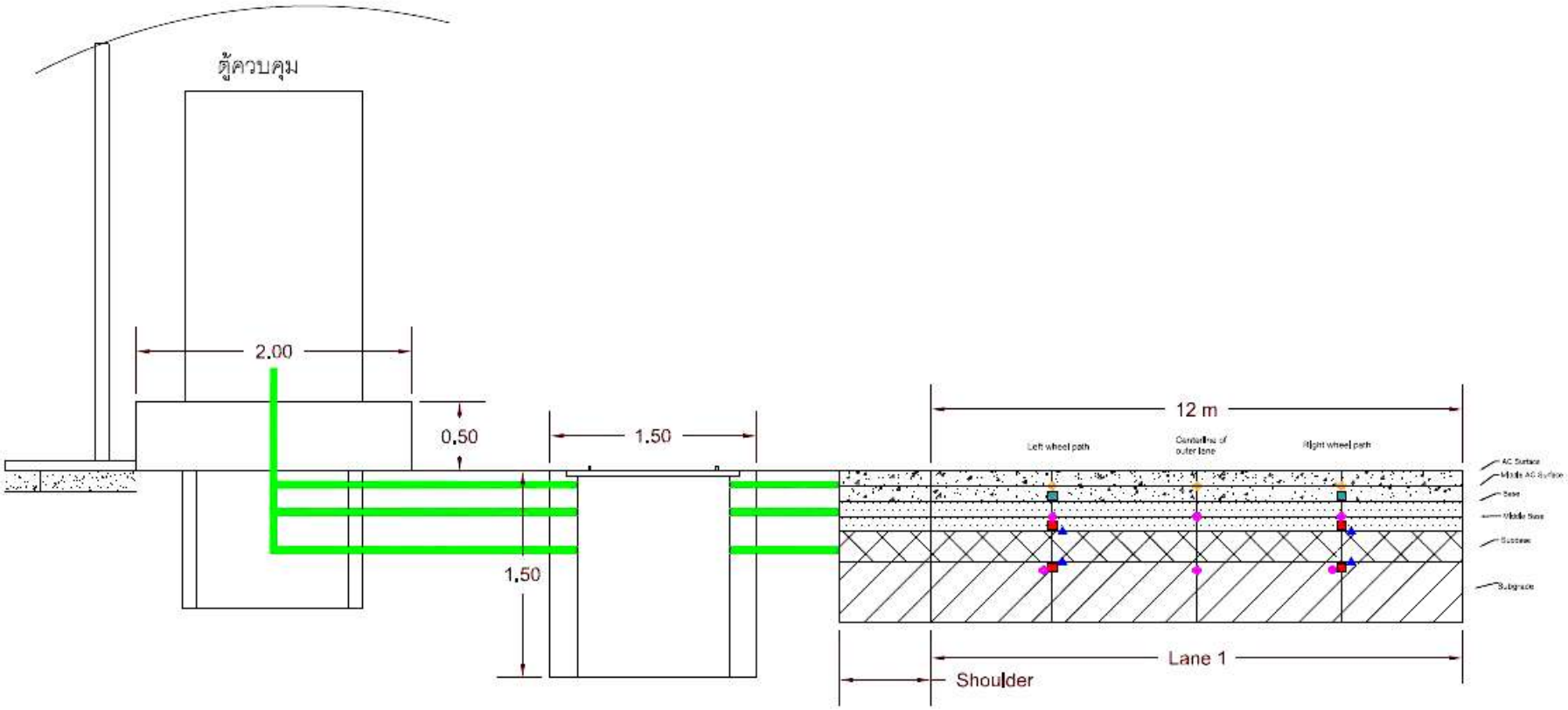
รูปที่ 5.13 สัญลักษณ์เครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนลาดยาง



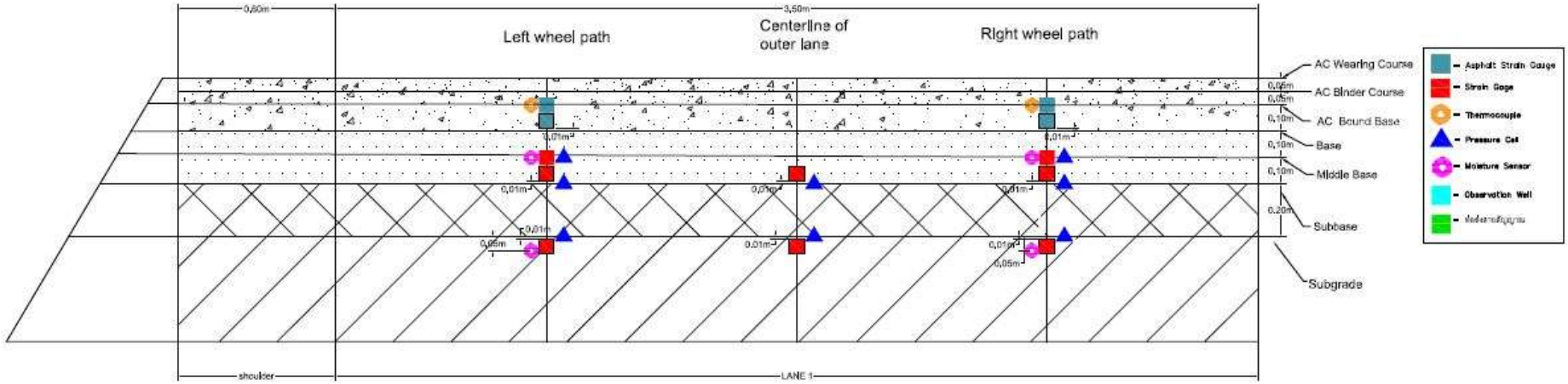
รูปที่ 5.14 แบบแปลนภาพรวมการติดตั้งแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง



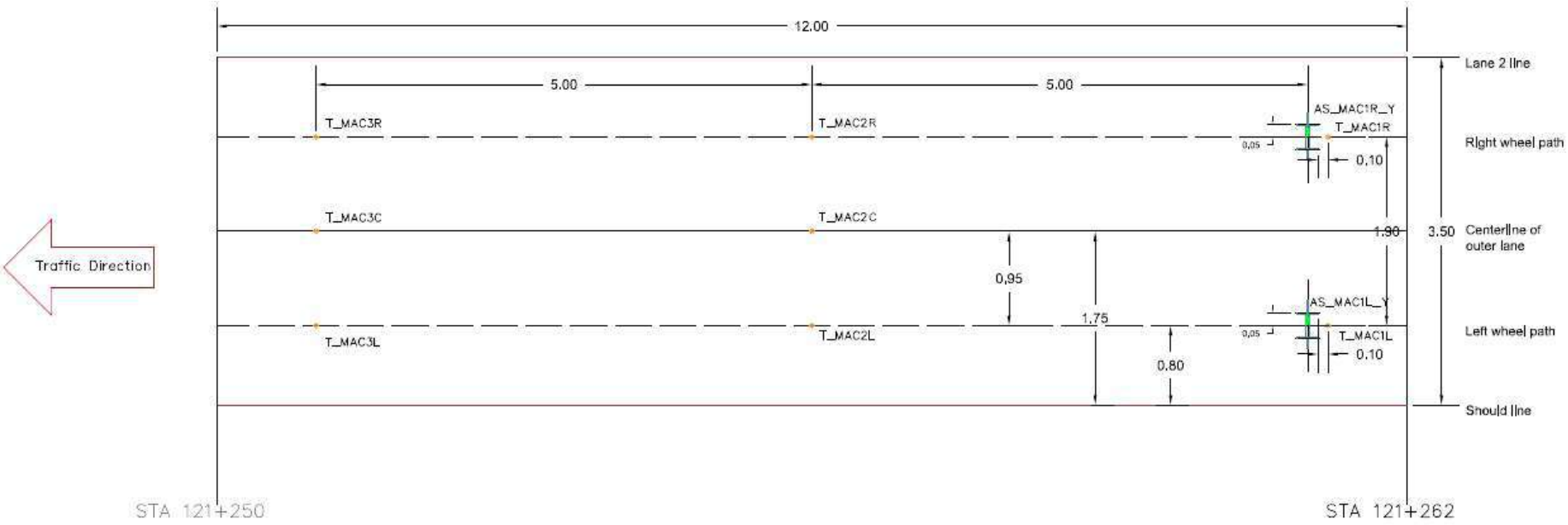
รูปที่ 5.15 รูปตัด A ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง



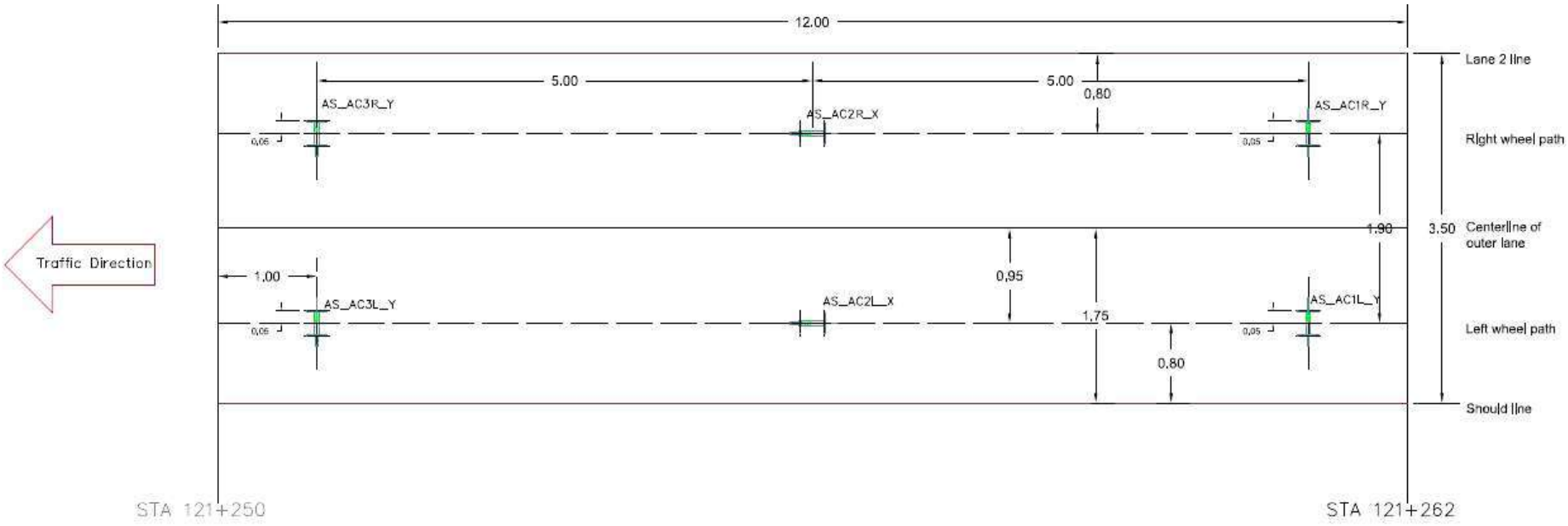
รูปที่ 5.16 รูปตัด B ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง



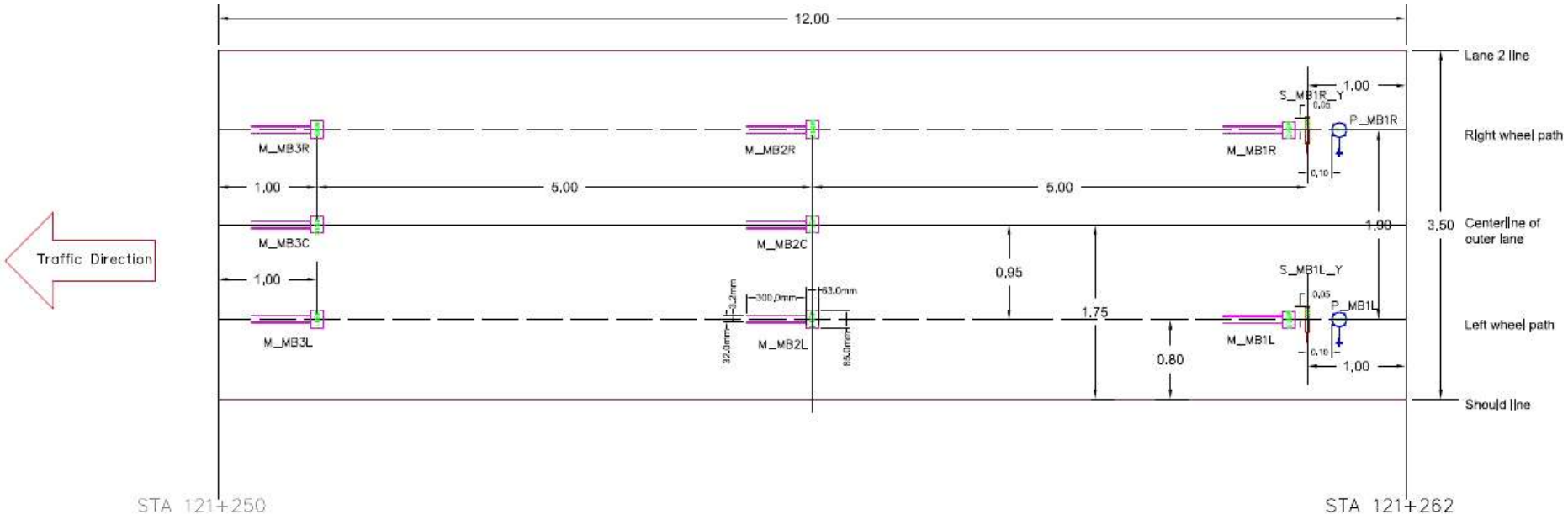
รูปที่ 5.17 รูปตัด C ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง



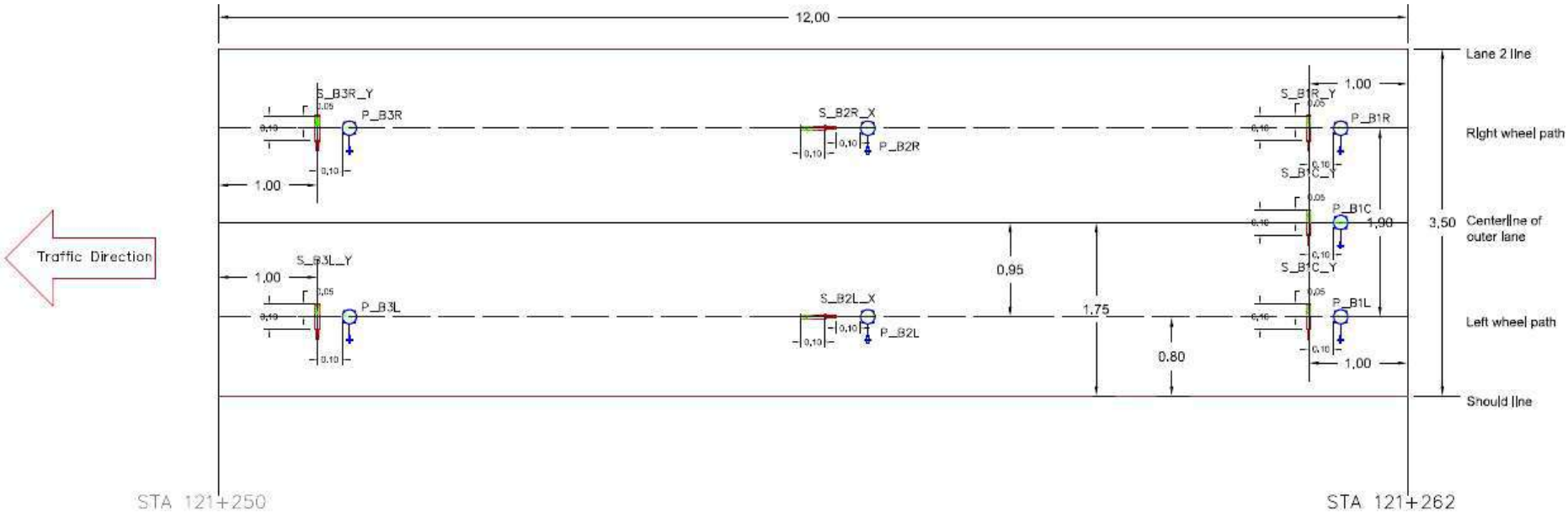
รูปที่ 5.18 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระหว่างกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC



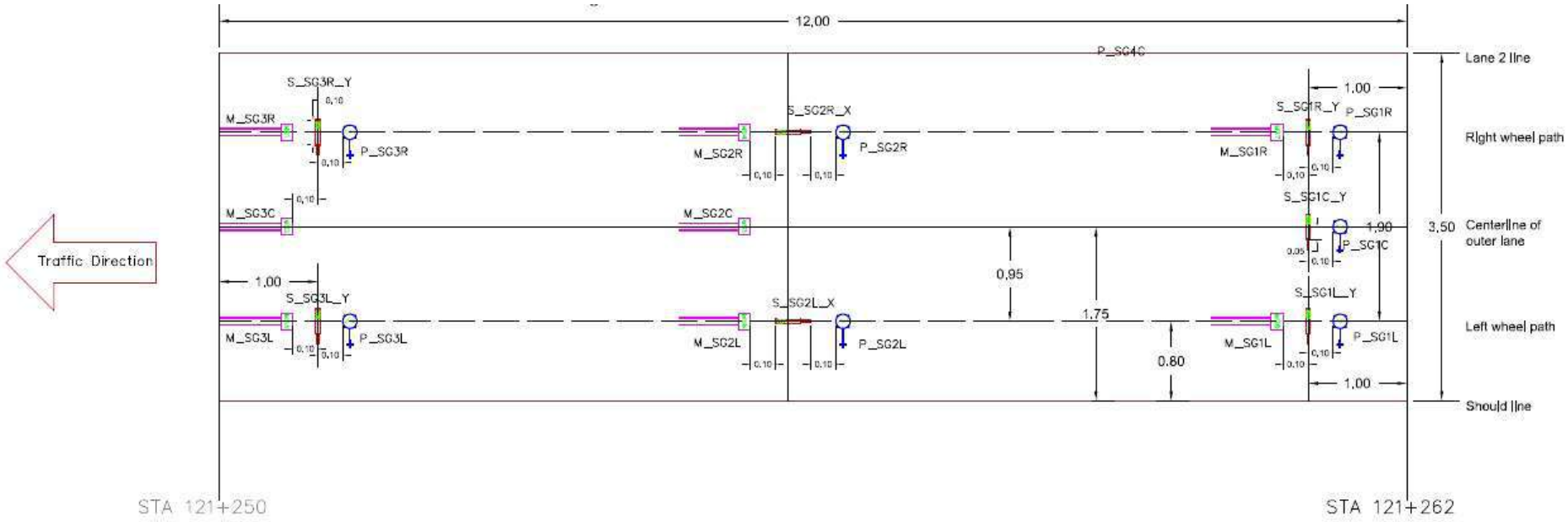
รูปที่ 5.19 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับใต้ชั้นผิวทาง AC



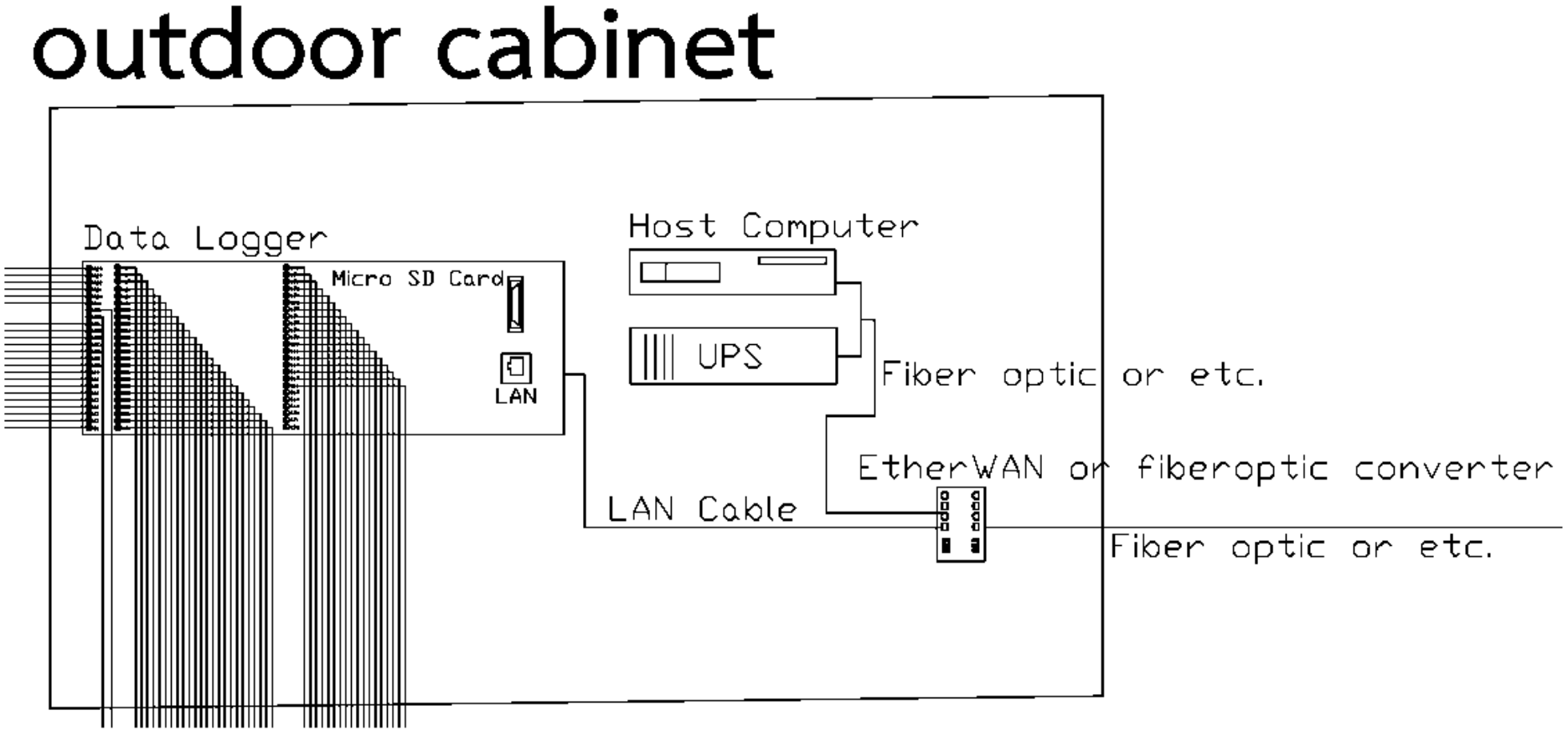
รูปที่ 5.20 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับกึ่งกลางชั้น Base



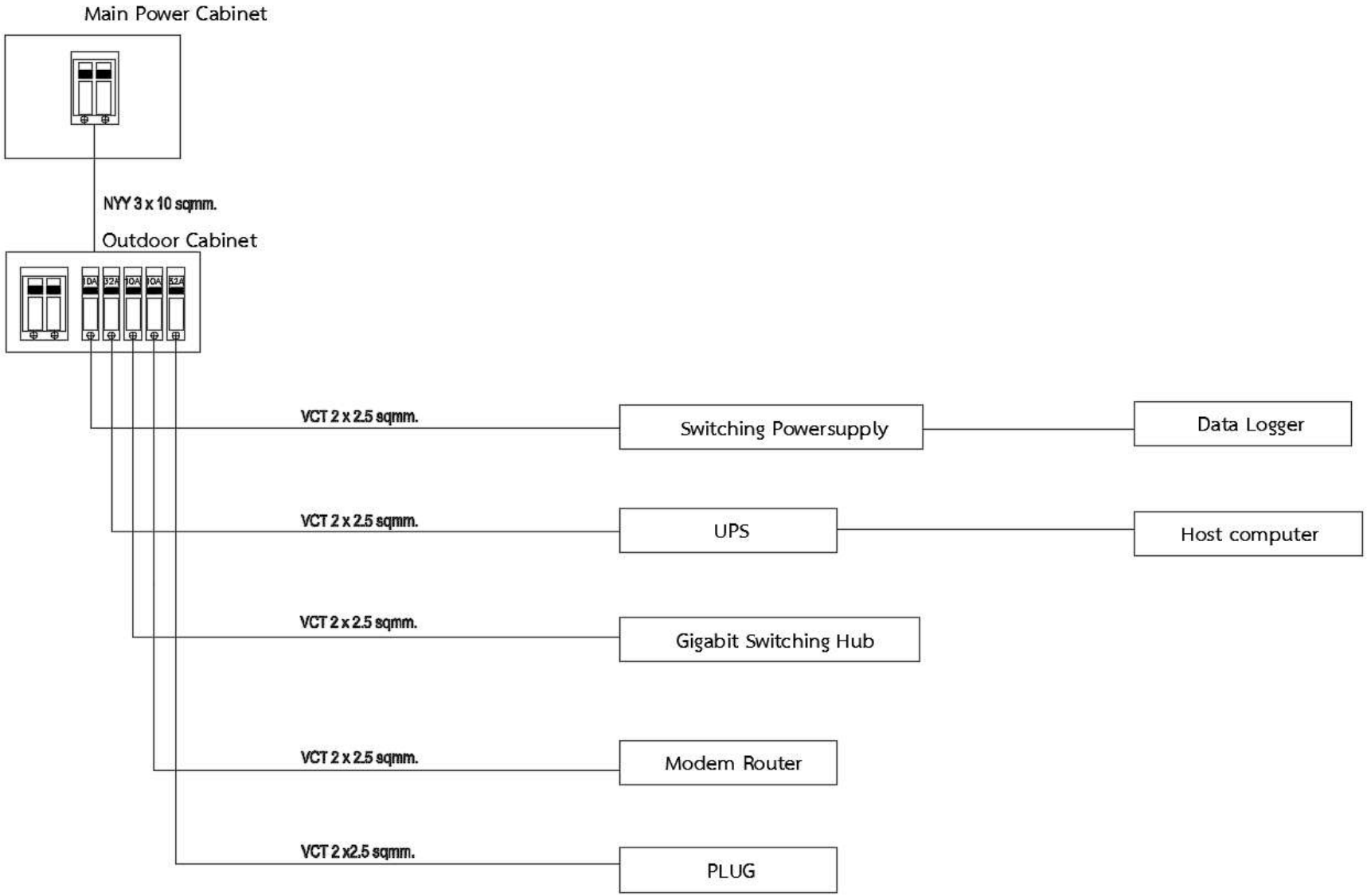
รูปที่ 5.21 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับใต้ชั้น Base



รูปที่ 5.22 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางชั้น Subgrade



รูปที่ 5.23 แบบขยายอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามภายในตู้จัดเก็บอุปกรณ์ภาคสนาม



รูปที่ 5.24 แผนผังงานวางระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบสำรองไฟฟ้า

6. การติดตั้งและทดสอบเครื่องมือตรวจวัด

ที่ปรึกษาจะดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางบริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) โดยมีแนวทางการดำเนินงานดังต่อไปนี้

6.1 การจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จะดำเนินการติดตั้ง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการจัดหาระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณ และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ตามรายการใน ตารางที่ 2.1 และระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามและชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟตามรายการใน ตารางที่ 2.2 โดยใน ตารางที่ 6.1 แสดงรายการเครื่องมือและอุปกรณ์แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางบริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) ซึ่งมีรายละเอียดคุณสมบัติของระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณ อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ระบบจัดเก็บประมวลผลข้อมูลภาคสนาม และชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟนำเสนอในภาคผนวก ค

ตารางที่ 6.1 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

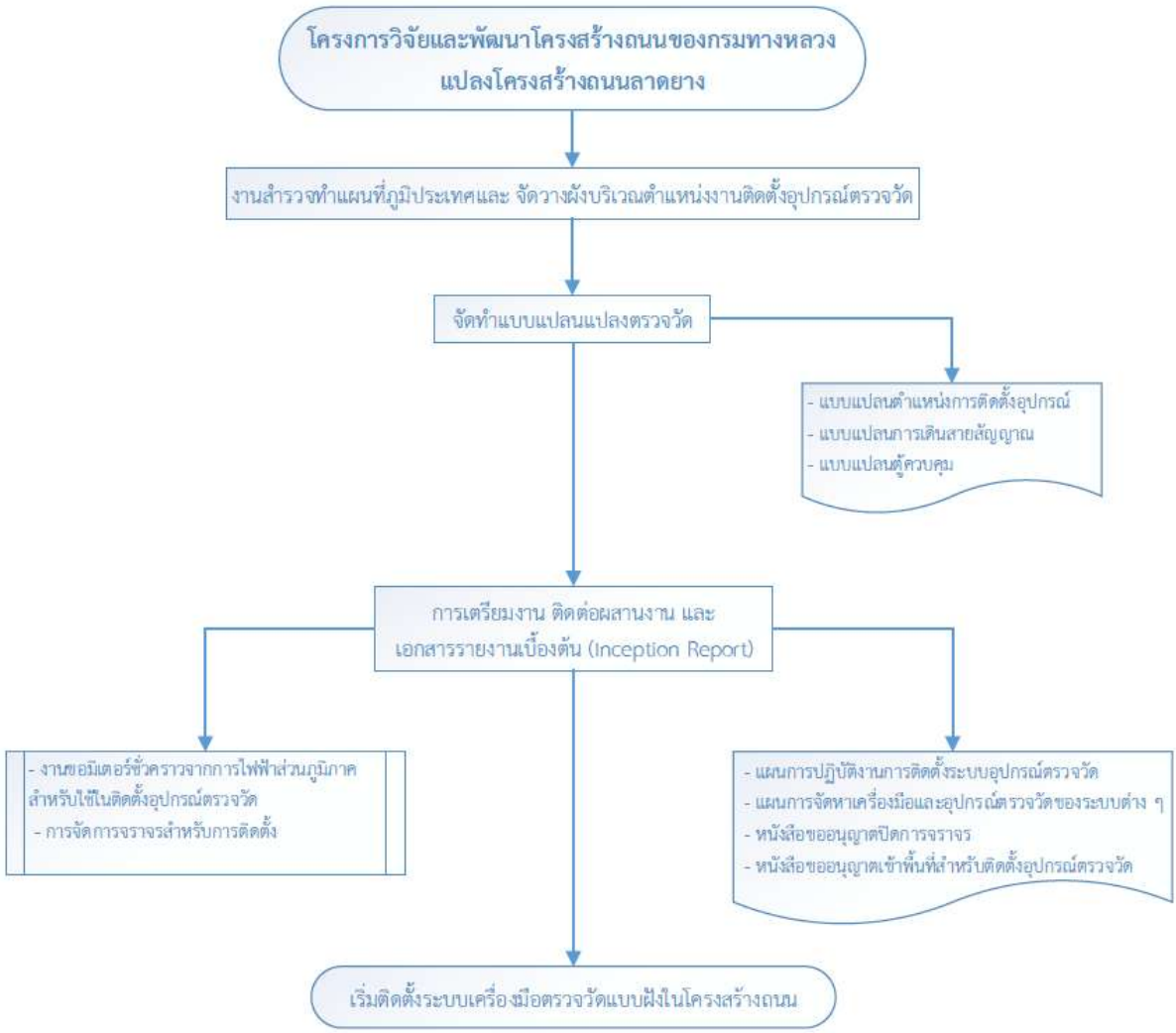
รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จะดำเนินการติดตั้ง	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ตามข้อกำหนด (TOR)
1	**ระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนลาดยาง**		
1.1	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) แบบ / รุ่น : KM-100HAS ยี่ห้อ / ประเทศ : TML / Japan จำนวน : 8 ชุด	5. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ได้ 5,000 Microstrain 6. สามารถทนต่ออุณหภูมิได้ 180 องศาเซลเซียส 7. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ 2.5 mV/V 8. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้	1. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ไม่น้อยกว่า 1,200 Microstrain 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูงถึง 180 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ไม่มากกว่า 3 mV/V 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
1.2	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) แบบ / รุ่น : KM-100B ยี่ห้อ / ประเทศ : TML / Japan จำนวน : 16 ชุด	5. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ได้ 5,000 Microstrain 6. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 80 องศาเซลเซียส 7. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ได้ 2.5 mV/V 8. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้	1. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ไม่น้อยกว่า 1,000 Microstrain 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ไม่น้อยกว่า 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ไม่มากกว่า 3 mV/V 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
1.3	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) แบบ / รุ่น : 3500-1 ยี่ห้อ / ประเทศ : Geokon / U.S.A จำนวน : 16 ชุด	6. สามารถตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure) ได้ 600 กิโลปาสคาล 7. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 80 องศาเซลเซียส 8. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ 2 mV/V 9. ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม Stainless Steel 10. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้	1. สามารถตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure) ไม่น้อยกว่า 200 กิโลปาสคาล 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ไม่น้อยกว่า 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ไม่มากกว่า 2 mV/V 4. ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม เช่น โลหะสแตนเลส เป็นต้น 5. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้

รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จะดำเนินการติดตั้ง	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ตามข้อกำหนด (TOR)
1.4	อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) แบบ / รุ่น : M101 ยี่ห้อ / ประเทศ : Solinst / Canada จำนวน : 1 ชุด	5. มีความละเอียดของเส้นบอกระดับน้ำ 1 มิลลิเมตร 6. สามารถตรวจวัดระดับน้ำได้ 30 เมตร 7. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม Stainless Steel 8. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้	1. มีความละเอียดของเส้นบอกระดับน้ำ ไม่มากกว่า 1 มิลลิเมตร 2. สามารถตรวจวัดระดับน้ำได้ไม่น้อยกว่า 15 เมตร 3. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม เช่น โลหะสแตนเลส เป็นต้น 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
1.5	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) แบบ / รุ่น : Type K ยี่ห้อ / ประเทศ : TML / Japan จำนวน : 8 ชุด	4. สามารถตรวจวัดอุณหภูมิ ในช่วง 0 ถึง 200 องศาเซลเซียส 5. มีฉนวนป้องกันการเกิดสนิมและการผุกร่อน 6. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้	1. สามารถตรวจวัดอุณหภูมิ ในช่วง 0 ถึง 200 องศาเซลเซียส หรือดีกว่า 2. มีฉนวนป้องกันการเกิดสนิมและการผุกร่อน 3. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
1.6	อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) แบบ / รุ่น : CS650 ยี่ห้อ / ประเทศ : Campbell / U.S.A จำนวน : 16 ชุด	4. สามารถวัดค่าความชื้น ระหว่าง 5 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ 5. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 70 องศาเซลเซียส 6. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้	1. สามารถวัดค่าความชื้น ระหว่าง 5 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ หรือดีกว่า 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ไม่น้อยกว่า 70 องศาเซลเซียส 3. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้
1.7	อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) แบบ / รุ่น : CR6 ยี่ห้อ / ประเทศ : Campbell / U.S.A จำนวน : 1 ชุด	8. มีความเร็วในการอ่านค่าสัญญาณและบันทึก 100 Hz 9. มีหน่วยความจำสำหรับจัดเก็บข้อมูล 16 GB 10. สามารถรองรับช่องสัญญาณได้ 70 ช่องสัญญาณ 11. มีช่องสำหรับถ่ายโอนข้อมูลแบบ RS-232 และแบบ Ethernet 12. สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -40° ถึง +70 องศาเซลเซียส 13. มีโปรแกรมควบคุมการทำงานระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัดโดยมีลิขสิทธิ์จากผู้ผลิต 14. มีหนังสือรับรองจากผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้	1. มีความเร็วในการอ่านค่าสัญญาณและบันทึก ไม่น้อยกว่า 100 Hz 2. มีหน่วยความจำสำหรับจัดเก็บข้อมูล ไม่น้อยกว่า 16 GB 3. สามารถรองรับช่องสัญญาณได้ไม่น้อยกว่า 66 ช่องสัญญาณ 4. มีช่องสำหรับถ่ายโอนข้อมูลแบบ RS-232 หรือแบบ Ethernet 5. สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส หรือดีกว่า 6. มีโปรแกรมควบคุมการทำงานระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัดโดยมีลิขสิทธิ์จากผู้ผลิต 7. มีหนังสือรับรองจากผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้

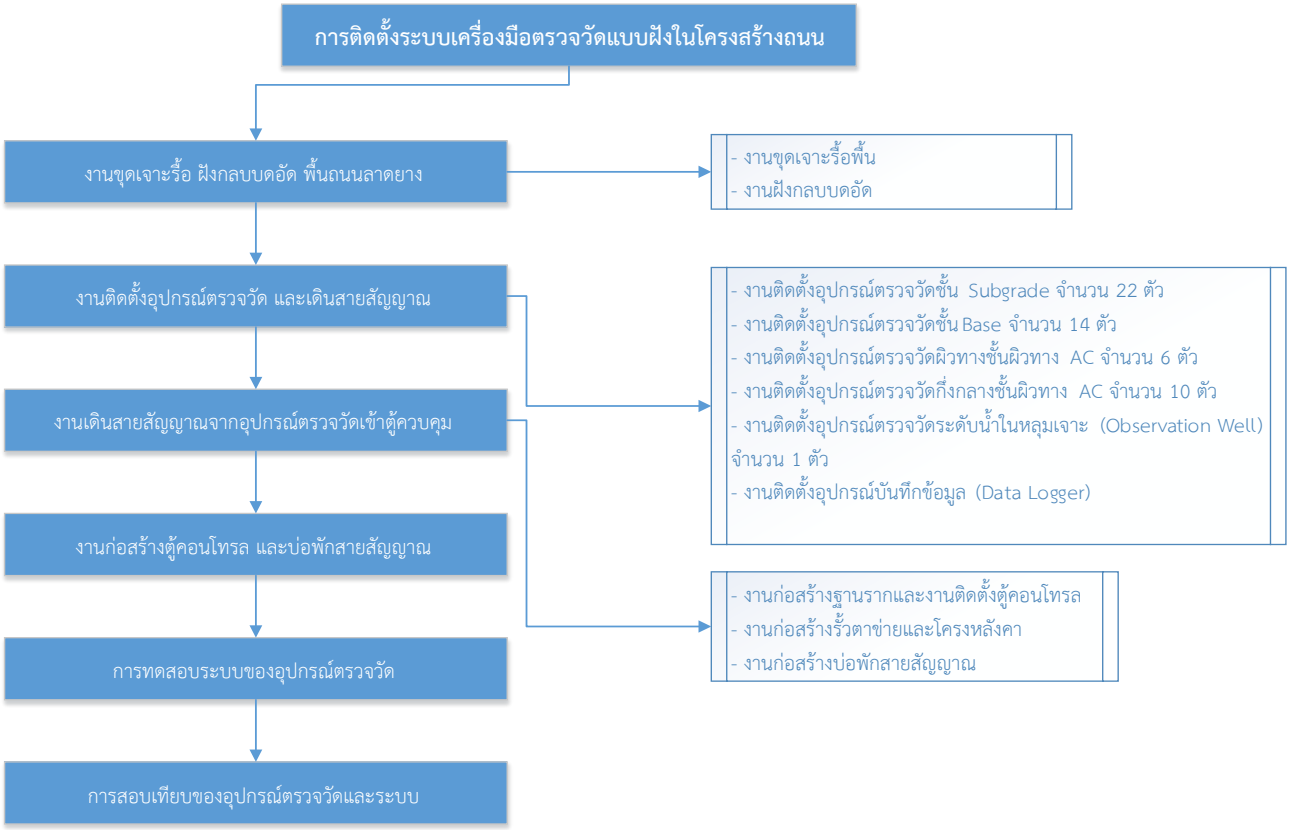
รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จะดำเนินการติดตั้ง	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ตามข้อกำหนด (TOR)
2	**ชุดอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System)**		
2.1	หน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) แบบ / รุ่น : NIFE300P2 ยี่ห้อ : Nexcom จำนวน : 1 ชุด	7. สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -5 ถึง 55 องศาเซลเซียส 8. มีระบบ Shock Protection และ Vibration Protection 9. มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ Intel® Core™ i5-6500TE มีความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.3 GHz 10. มีหน่วยความจำหลัก (RAM) แบบ DDR4 ขนาด 8 GB 11. มีหน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard Disk) ความจุรวม 500 GB 12. มีพอร์ต RS232, USB 3.0 และ HDMI	1. สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส 2. มีระบบ Shock Protection และ Vibration Protection 3. มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ที่มีความเร็วสัญญาณนาฬิกาพื้นฐานไม่น้อยกว่า 2.0 GHz 4. มีหน่วยความจำหลัก (RAM) แบบ DDR4 ขนาดไม่น้อยกว่า 8 GB 5. มีหน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard Disk) ความจุรวมไม่น้อยกว่า 250 GB 6. มีพอร์ต RS232, USB 3.0 และ HDMI เป็นอย่างน้อย
2.2	กล้องวงจรปิด (CCTV) แบบ / รุ่น : DS-2CD2010F-I(W) ยี่ห้อ : Hikvision จำนวน : 1 ชุด	5. เป็นกล้องวงจรปิดแบบ Network Camera 6. เป็นกล้องชนิด Day & Night และมีชุดเซ็นเซอร์รับภาพขนาด 1/3 นิ้ว 7. มีระบบ Wide Dynamic Range (WDR) 8. รองรับเทคโนโลยีบีบอัดภาพแบบ H.264	1. เป็นกล้องวงจรปิดแบบ Network Camera หรือ IP Camera 2. เป็นกล้องชนิด Day & Night มีชุดเซ็นเซอร์รับภาพขนาดไม่เล็กกว่า 1/3 นิ้ว 3. มีระบบ Wide Dynamic Range (WDR) สำหรับกรณีที่มีแสงน้อย 4. รองรับเทคโนโลยีบีบอัดภาพแบบ H.264
2.3	อุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) แบบ / รุ่น : DS-7604NI-E1/4P ยี่ห้อ : Hikvision จำนวน : 1 ชุด	5. เป็นเครื่องบันทึกภาพที่สามารถทำงานร่วมกับกล้อง Network Camera หรือ IP Camera 6. รองรับการบันทึกภาพแบบ H.264 และ H.264+ 7. สามารถเชื่อมต่อผ่านพอร์ต RJ45 10/100/1000 Mbps 8. มี Hard disk แบบ SATA ขนาดความจุรวมขนาด 2 TB	1. เป็นเครื่องบันทึกภาพที่สามารถทำงานร่วมกับกล้อง Network Camera หรือ IP Camera 2. รองรับการบันทึกภาพแบบ H.264 หรือดีกว่า 3. สามารถเชื่อมต่อผ่านพอร์ต RJ45 10M/100M/1000M หรือ 10/100 Mbps 4. มี Hard disk แบบ SATA หรือดีกว่า ขนาดความจุรวมไม่น้อยกว่า 2 TB
3.	**ชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply System)**-		
3.1	อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) แบบ / รุ่น : Adapter 12V 6A จำนวน : 1 ชุด	4. รองรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าในช่วง 100-240VAC 5. มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) 12 โวลต์ 6. มีค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) 6 แอมป์	7. รองรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Full-range Voltage Input) ในช่วง 100-240VAC 8. มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) 12 โวลต์ 9. มีค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) 6 แอมป์
3.2	อุปกรณ์ UPS แบบ / รุ่น : PS3000RT3-230 ยี่ห้อ : Liebert® PSI จำนวน : 1 ชุด	3. มีค่ากำลังไฟฟ้า 3000 VA (2,700 Watts) 4. มีระบบป้องกันไฟกระชาก (Surge Protection) ขนาด 220J	10. มีค่ากำลังไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 3000 VA (2,100 Watts) 11. มีระบบป้องกันไฟกระชาก (Surge Protection)

6.2 ขั้นตอนและแผนการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัด

ภาพรวมการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางบริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ขั้นตอนติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 6.1 ขั้นตอนติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (ต่อ)

แนวทางการขุดรื้อ ฝังกลบ และบดอัดแต่ละชั้นทาง สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางบริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนัก สรรพยา (ขาเข้า) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ตีกรอบ ขอบเขตพื้นที่สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด
2) ทำความสะอาดพื้นที่ด้วยไม้กวาดหรือเครื่องเป่าลม
3) ใช้เลื่อยตัดผิวทางตามรอยเส้นกรอบ ให้ผิวทางแยกขาดจากกัน เครื่องมืออาจเป็นแบบติดกับรถบดล้อเหล็กหรือเป็นแบบรถเข็นขนาดเล็ก หรือจะมีทั้ง 2 แบบก็ได้ หรือมีแบบอื่นๆ ซึ่งสามารถตัดแนวรอยต่อได้เรียบร้อย
4) ขุด สกัด รื้อเอาผิวทาง และวัสดุชั้นทางที่ชำรุดเสียหายในบริเวณที่ขุดซ่อมออกให้ถึงชั้น Subgrade สำหรับตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ ตัดแต่งขอบผิวทางและหลุมให้เรียบโดยตั้งฉากกับผิวทางและชั้นทางเดิมทำความสะอาดก้นหลุมและนำเศษวัสดุที่หลุดร่วนออก
5) พื้นทางจะต้องเรียบสม่ำเสมอ ได้ระดับและความลาดตามรูปแบบก่อนทำชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตทับ กรณีพื้นทางมีความเสียหายเป็นคลื่น เป็นหลุมบ่อ มีจุดอ่อนตัว (Soft Spot) หรือไม่ถูกต้องตามรูปแบบ ให้แก้ไขให้ถูกต้อง
6) บดทับก้นหลุมให้แน่นและเรียบเสมอกัน และใช้ไม้บรรทัดวัดความเรียบ (Straight-edge) ต้องเป็นไม้บรรทัดวัดความเรียบที่มีขนาดเหมาะสม ความยาว 3.00 เมตร
7) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด ชั้น Subgrade
8) บดอัดด้วยวัสดุคัดเลือกตามมาตรฐานกรมทางหลวง ด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน ต้องมีขนาดน้ำหนักเหมาะสมที่จะใช้บดทับแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่รถบดไม่สามารถเข้าไปดำเนินการได้ หรือใช้ในงานซ่อมขนาดเล็ก หรือ เครื่องมือกระทุ้งแอสฟัลต์คอนกรีต

(Hand Tamper) ต้องเป็นแบบและมีขนาดน้ำหนักเหมาะสม ที่จะใช้กระทุ้งอัดแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่เครื่องบดทับขนาดเล็กเข้าไปบดทับไม่ได้ หรือใช้งานซ่อมขนาดย่อย

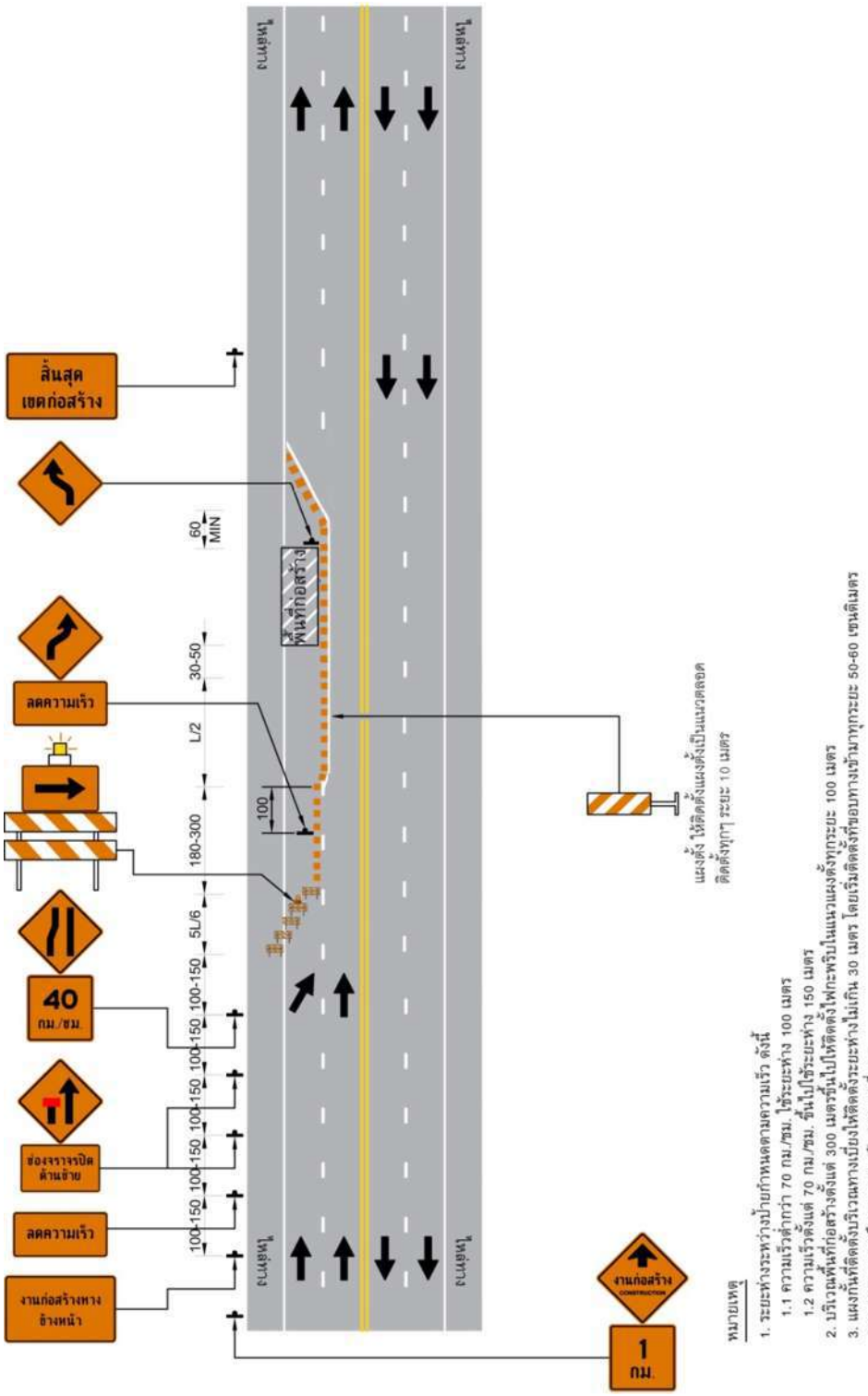
9) บดอัดด้วยวัสดุรองพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง ด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน ต้องมีขนาดน้ำหนักเหมาะสมที่จะใช้บดทับแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่รถบดไม่สามารถเข้าไปดำเนินการได้ หรือใช้ในงานซ่อมขนาดเล็ก หรือ เครื่องมือกระทุ้งแอสฟัลต์คอนกรีต (Hand Tamper) ต้องเป็นแบบและมีขนาดน้ำหนักเหมาะสม ที่จะใช้กระทุ้งอัดแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่เครื่องบดทับขนาดเล็กเข้าไปบดทับไม่ได้ หรือใช้งานซ่อมขนาดย่อย
10) บดทับก้นหลุมให้แน่นและเรียบเสมอกัน และใช้ไม้บรรทัดวัดความเรียบ (Straight-edge) ต้องเป็นไม้บรรทัดวัดความเรียบที่มีขนาดเหมาะสม ความยาว 3.00 เมตร
11) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับใต้ชั้น Base
12) บดอัดด้วยวัสดุพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง ด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน ต้องมีขนาดน้ำหนักเหมาะสมที่จะใช้บดทับแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่รถบดไม่สามารถเข้าไปดำเนินการได้ หรือใช้ในงานซ่อมขนาดเล็ก หรือ เครื่องมือกระทุ้งแอสฟัลต์คอนกรีต (Hand Tamper) ต้องเป็นแบบและมีขนาดน้ำหนักเหมาะสม ที่จะใช้กระทุ้งอัดแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่เครื่องบดทับขนาดเล็กเข้าไปบดทับไม่ได้ หรือใช้งานซ่อมขนาดย่อย
13) บดทับก้นหลุมให้แน่นและเรียบเสมอกัน และใช้ไม้บรรทัดวัดความเรียบ (Straight-edge) ต้องเป็นไม้บรรทัดวัดความเรียบที่มีขนาดเหมาะสม ความยาว 3.00 เมตร
14) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด ชั้น Middle base
15) บดอัดด้วยวัสดุพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวง ด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน มีขนาดน้ำหนักเหมาะสมที่จะใช้บดทับแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่รถบดไม่สามารถเข้าไปดำเนินการได้ หรือใช้ในงานซ่อมขนาดเล็ก หรือ เครื่องมือกระทุ้งแอสฟัลต์คอนกรีต (Hand Tamper) ต้องเป็นแบบและมีขนาดน้ำหนักเหมาะสม ที่จะใช้กระทุ้งอัดแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่เครื่องบดทับขนาดเล็กเข้าไปบดทับไม่ได้ หรือใช้งานซ่อมขนาดย่อย
16) บดทับก้นหลุมให้แน่นและเรียบเสมอกัน และใช้ไม้บรรทัดวัดความเรียบ (Straight-edge) ต้องเป็นไม้บรรทัดวัดความเรียบที่มีขนาดเหมาะสม ความยาว 3.00 เมตร
17) ทำการ Prime Coat บนพื้นทางที่เติมลงไปใหม่ขอบพื้นที่ติดตั้งอุปกรณ์ทุกด้าน
18) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับใต้ชั้นผิวทาง AC
19) บดอัดชั้น Asphalt Concrete Bound Base ด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน มีขนาดน้ำหนักเหมาะสมที่จะใช้บดทับแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่รถบดไม่สามารถเข้าไปดำเนินการได้ หรือใช้ในงานซ่อมขนาดเล็ก หรือ เครื่องมือกระทุ้งแอสฟัลต์คอนกรีต (Hand Tamper) ต้องเป็นแบบและมีขนาดน้ำหนักเหมาะสม ที่จะใช้กระทุ้งอัดแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่เครื่องบดทับขนาดเล็กเข้าไปบดทับไม่ได้ หรือใช้งานซ่อมขนาดย่อย
20) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC
21) บดอัดชั้น Asphalt Concrete Binder Course ด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน มีขนาดน้ำหนักเหมาะสมที่จะใช้บดทับแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่รถบดไม่สามารถเข้าไปดำเนินการได้ หรือใช้ในงานซ่อมขนาดเล็ก หรือ เครื่องมือกระทุ้งแอสฟัลต์คอนกรีต (Hand Tamper) ต้องเป็นแบบและมีขนาดน้ำหนักเหมาะสม ที่จะใช้กระทุ้งอัดแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่เครื่องบดทับขนาดเล็กเข้าไปบดทับไม่ได้ หรือใช้งานซ่อมขนาดย่อย
22) บดอัดชั้น Asphalt Concrete Wearing Course ด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน มีขนาดน้ำหนักเหมาะสมที่จะใช้บดทับแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่รถบดไม่สามารถเข้าไปดำเนินการได้ หรือใช้ในงานซ่อมขนาดเล็ก หรือ เครื่องมือกระทุ้งแอสฟัลต์คอนกรีต (Hand Tamper)

ต้องเป็นแบบและมีขนาดน้ำหนักเหมาะสม ที่จะใช้กระทุ้งอัดแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณที่เครื่องบดทับขนาดเล็กเข้าไปบดทับไม่ได้ หรือใช้งานซ่อมขนาดย่อย

23) การบดทับผิวทาง โดยเลือกใช้เครื่องจักรบดทับชนิดต่างๆ ตามขนาดและความเหมาะสมของพื้นที่ ที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ การบดทับ Premix ชนิดผสมร้อน

- บดทับขั้นต้น (Initial Breakdown Rolling) ด้วยรถบดล้อเหล็กหรือรถบดสั่นสะเทือน 1 เที่ยว
- ตรวจสอบระดับและความเรียบของผิวทางด้วยไม้บรรทัดวัดความเรียบ หากต้องเสริมแต่งปรับระดับใหม่ให้ดำเนินการต่อเนื่องทันที แล้วบดทับขั้นต้นใหม่
- บดทับต่อด้วยการบดทับขั้นกลาง (Intermediate Rolling) ด้วยรถบดล้อยางประมาณ 6-10 เที่ยว
- บดทับขั้นสุดท้าย (Finish Rolling) ด้วยรถบดล้อเหล็กโดยไม่สั่นสะเทือน จนได้ผิวทางที่เรียบและแน่นได้ระดับที่ต้องการ

แนวทางการบริหารจัดการจราจรระหว่างการติดตั้งสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางจะต้องทำการปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุดและไหล่ทาง ดังแสดงในรูปที่ 6.2 เพื่อดำเนินการดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.2 แนวทางการบริหารจัดการจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

1) ปรับพื้นที่หาค่าระดับของฐานโครงสร้าง,วางบ่อพักสายสัญญาณ, วางบ่อพักรองรับตู้คอนโทรล และติดตั้งแบบสำหรับเทคอนกรีตรอบฐานตู้คอนโทรลบริเวณช่องจราจรที่ 1 และไหล่ทาง นับจากทางซ้ายมือ จะต้องทำการปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุด ระยะเวลา 8 ชั่วโมง จำนวน 1 วัน
2) เทคอนกรีตรอบฐานตู้คอนโทรลและบ่มคอนกรีต บริเวณช่องจราจรที่ 1 และไหล่ทาง นับจากทางซ้ายมือ จะต้องทำการปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุด ระยะเวลา 8 ชั่วโมง จำนวน 1 วัน
3) งานติดตั้งตู้คอนโทรลและ งาน Road site แล้วเสร็จบริเวณช่องจราจรที่ 1 และไหล่ทาง นับจากทางซ้ายมือ จะต้องทำการปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุด ระยะเวลา 8 ชั่วโมง จำนวน 2 วัน
4) การจัดการจราจร กั้นแบริเออสำหรับพื้นที่การทำงานและงานขุดเจาะรื้อพื้นถนนลาดยาง ขนาด 12 x 3.5 x 0.70 เมตร พร้อมปรับระดับพื้นฐานรากและบดอัด
5) ทดสอบ Control Test ชั้น Subgrade ตามรายการตรวจสอบวัสดุคุณภาพชั้นทาง ปรับระดับ + บดอัด ชั้น Subgrade (กรณีผลทดสอบ Control Test ไม่ผ่าน) ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Subgrade และทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Subgrade (ก่อนกลบ)บริเวณช่องจราจรที่ 1 และไหล่ทาง นับจากทางซ้ายมือ จะต้องทำการปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุด ระยะเวลา 8 ชั่วโมง จำนวน 1 วัน
6) ทำระดับสำหรับงานฝังกลบชั้น Subbase ตามแบบ งานฝังกลบชั้น Subgrade ด้วยวัสดุรองพื้นทาง พร้อมบดอัด ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงให้อยู่ในระดับชั้น Subbase สำหรับติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัด ทดสอบ Control Test ชั้น Subbase ตามรายการตรวจสอบวัสดุคุณภาพชั้นทาง ปรับระดับ + บดอัด ชั้น Subbase (กรณีผลทดสอบ Control Test ไม่ผ่าน) และ ทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Subgrade (หลังกลบ)บริเวณช่องจราจรที่ 1 และไหล่ทาง นับจากทางซ้ายมือ จะต้องทำการปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุด ระยะเวลา 8 ชั่วโมง จำนวน 1 วัน
7) ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Subbase ตามแบบ ทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Subbase (ก่อนกลบ) ทำระดับสำหรับงานฝังกลบชั้น Middle Base ตามแบบและงานฝังกลบชั้น Subbase ด้วยวัสดุพื้นทาง พร้อมบดอัด ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงให้อยู่ในระดับชั้น Middle Base สำหรับติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดบริเวณช่องจราจรที่ 1 และไหล่ทาง นับจากทางซ้ายมือ จะต้องทำการปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุด ระยะเวลา 8 ชั่วโมง จำนวน 1 วัน
8) ทดสอบ Control Test ชั้น Middle Base ตามรายการตรวจสอบวัสดุคุณภาพชั้นทาง ปรับระดับ + บดอัด ชั้น Middle Base (กรณีผลทดสอบ Control Test ไม่ผ่าน) ทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Subbase (หลังกลบ) ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Middle Base ตามแบบและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Middle Base (ก่อนกลบ)
9) ทำระดับสำหรับงานฝังกลบชั้น Base ตามแบบ งานฝังกลบชั้น Middle Base ด้วยวัสดุพื้นทาง พร้อมบดอัด ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงให้อยู่ในระดับชั้น Base สำหรับติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัด ทดสอบ Control Test ชั้น Base ตามรายการตรวจสอบวัสดุคุณภาพชั้นทาง ปรับระดับ + บดอัด ชั้น Base (กรณีผลทดสอบ Control Test ไม่ผ่าน) และทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Middle Base (หลังกลบ)บริเวณช่องจราจรที่ 1 และไหล่ทาง นับจากทางซ้ายมือ จะต้องทำการปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุด ระยะเวลา 8 ชั่วโมง จำนวน 1 วัน
10) ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Base ตามแบบ ทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Base (ก่อนกลบ) ทำระดับสำหรับงานฝังกลบชั้น Middle AC ตามแบบงานฝังกลบชั้น Base ด้วยวัสดุ Hot Mix Asphalt พร้อมบดอัด ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงให้อยู่ในระดับชั้น Middle AC สำหรับติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัด ทดสอบ Control Test ชั้น Middle AC

ตามรายการตรวจสอบวัสดุคุณภาพชั้นทางและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Base (หลังกลบ)บริเวณช่องจราจรที่ 1 และไหล่ทาง นับจากทางซ้ายมือ จะต้องทำการปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุด ระยะเวลา 8 ชั่วโมง จำนวน 1 วัน

11) ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Middle AC ตามแบบ ทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Middle AC (ก่อนกลบ) งานฝังกลบชั้น Middle AC ด้วยวัสดุ Hot Mix Asphalt พร้อมบดอัด ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงให้อยู่ในระดับชั้น AC Surface ทดสอบ Control Test ชั้น AC Surface ตามรายการตรวจสอบวัสดุคุณภาพชั้นทางและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนชั้น Middle AC (หลังกลบ)บริเวณช่องจราจรที่ 1 และไหล่ทาง นับจากทางซ้ายมือ จะต้องทำการปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุด ระยะเวลา 8 ชั่วโมง จำนวน 1 วัน
12) ทดสอบระบบ All System ของเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนลาดยางและเปิดการจราจรตามปกติ

6.3 การติดตั้งและทดสอบเครื่องมือตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางเพื่อตรวจวัดพฤติกรรมติดตาม และเก็บบันทึกข้อมูลการตอบสนองของโครงสร้างถนนภายใต้สภาพการจราจรและน้ำหนักของยานพาหนะ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.3.1 การประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการทำหนังสือขออนุญาตเข้าพื้นที่ประกอบด้วย หนังสือที่ ศธ 0513.10826/61-0088 ลงวันที่ 10 พฤษภาคม 2561 ถึง ประธานคณะกรรมการกำกับโครงการ และหนังสือที่ ศธ 0513.10826/61-0089 ลงวันที่ 10 พฤษภาคม 2561 ถึง ผู้อำนวยการสำนักควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ และหนังสือที่ ศธ 0513.10826/61-0090 ลงวันที่ 10 พฤษภาคม 2561 ถึง ผู้อำนวยการแขวงทางหลวงชัยนาท ดังแสดงในภาคผนวก ฉ และเข้าไปนำเสนอภาพรวมโครงการ แผนการติดตั้งอุปกรณ์ การบริหารจราจร และรับข้อเสนอแนะจากแขวงทางหลวงชัยนาทในฐานะเจ้าของพื้นที่ โดยแขวงทางหลวงชัยนาทได้เน้นย้ำเรื่องการติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความปลอดภัย ให้ดำเนินการติดตั้งแผงกั้นจราจร ครอบคลุมพื้นที่แปลงทดสอบ ติดตั้งไฟเตือนและป้ายเบี่ยงการจราจร จัดหาคนเพื่ออำนวยการจราจรบริเวณจุดเริ่มปิดช่องจราจร รวมถึงติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการล่วงหน้าก่อนเข้าดำเนินการ เพื่อให้ผู้ใช้เส้นทางได้รับทราบข้อมูลช่วงเวลาที่จะปิดหรือเบี่ยงการจราจร ดังแสดงในรูปที่ 6.3



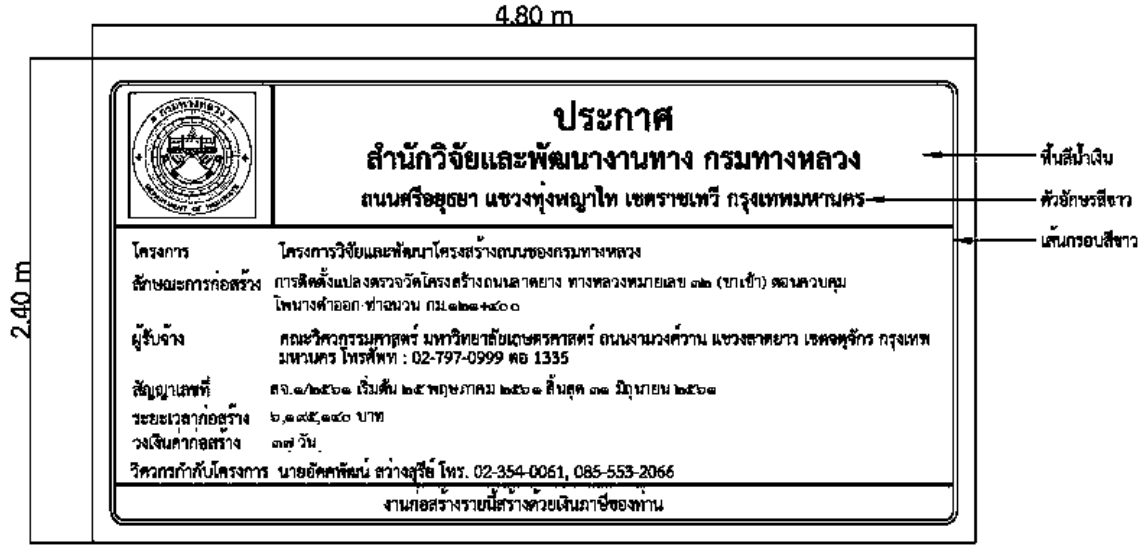
รูปที่ 6.3 ประชุมร่วมกับแขวงทางหลวงชัยนาท

6.3.2 การติดตั้งป้ายและอุปกรณ์การบริหารจราจร

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างกิจกรรมการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยมีลักษณะและรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แผ่นวัสดุที่ใช้ทำป้ายเป็นไปตามมาตรฐานป้ายจราจรในงานก่อสร้าง บูรณะและบำรุงรักษาทางหลวงของกรมทางหลวง
- สีป้ายเป็นสีน้ำเงิน มีตัวอักษรและตัวเลขสีขาว แผ่นวัสดุสะท้อนแสงที่ใช้ในการผลิตป้ายเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.
- แบบของตัวอักษรและตัวเลข และการจัดระยะห่างระหว่างตัวอักษร ให้ใช้ตามหนังสือมาตรฐานตัวอักษรและตัวเลขสำหรับป้ายจราจรของกรมทางหลวง หรือปรับเพิ่มลดขนาดตัวอักษรตามความเหมาะสม

แบบป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างการติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 6.4 แบบป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้ง



รูปที่ 6.5 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้งสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการปิดการจราจรจำนวน 1 ช่องทางซ้ายสุดจากไหล่ทางโดยใช้แผงกั้นจราจรชนิดคอนกรีต (Concrete Barrier) ดังแสดงในรูปที่ 6.6 โดยติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืนดังแสดงในรูปที่ 6.7 นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งป้ายจราจรอำนวยความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้ทางดังแสดงในรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.6 การปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 6.7 การติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืน

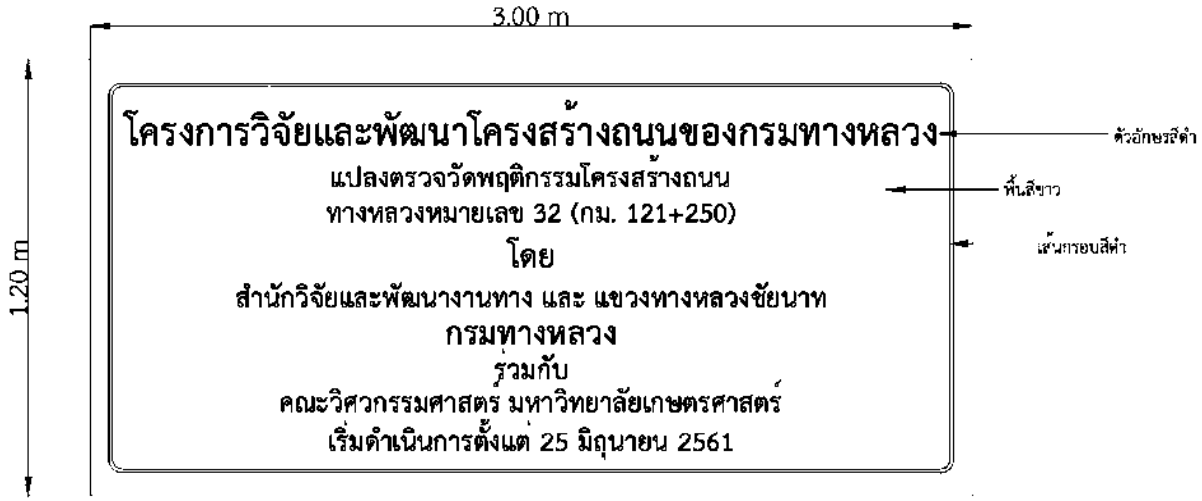


รูปที่ 6.8 การติดตั้งป้ายจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

ภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแปลงโครงสร้างถนนลาดยางแล้วเสร็จ ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้ง ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวร โดยมีลักษณะและรูปแบบเป็นดังแสดงรูปที่ 6.9 และรูปที่ 6.10 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แผ่นวัสดุที่ใช้ทำป้ายเป็นไปตามมาตรฐานป้ายจราจรในงานก่อสร้าง บูรณะและบำรุงรักษาทางหลวงของกรมทางหลวง
- ใช้สีป้ายเป็นสีขาว มีตัวอักษรและตัวเลขสีดำ แผ่นวัสดุสะท้อนแสงที่ใช้ในการผลิตป้ายเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.
- แบบของตัวอักษรและตัวเลข และการจัดระยะห่างระหว่างตัวอักษร ให้ใช้ตามหนังสือมาตรฐานตัวอักษรและตัวเลขสำหรับป้ายจราจรของกรมทางหลวง หรืออาจพิจาณาปรับเพิ่มลดขนาดตัวอักษรตามความเหมาะสม

แบบป้ายโครงการถาวร แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 6.9 แบบป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวร



รูปที่ 6.10 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

6.3.3 การขุดรื้อผิวทาง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการขุดรื้อ ฝังกลบ และบดอัดแต่ละชั้นทาง สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3) งานขุดเจาะรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางจนถึงชั้น subgrade ขนาด 3.50 x 12.00 ม. บริเวณช่องจราจรที่ 1 นับจากไหล่ทาง ตัดแต่งขอบผิวทางและหลุมให้เรียบโดยให้ตั้งฉากกับผิวทางและชั้นทางเดิม จากนั้นทำความสะอาดก้นหลุมพร้อมทั้งนำเศษวัสดุที่หลุดร่วนออก ดังแสดงในรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 งานขุดรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางช่องจราจรที่ 1

4) งานขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางประกอบด้วยชั้น Base และ Subbase จนถึงชั้น Subgrade ดังแสดงในรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 งานขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางจนถึงชั้น Subgrade

6.3.4 การบดอัดชั้น Subgrade

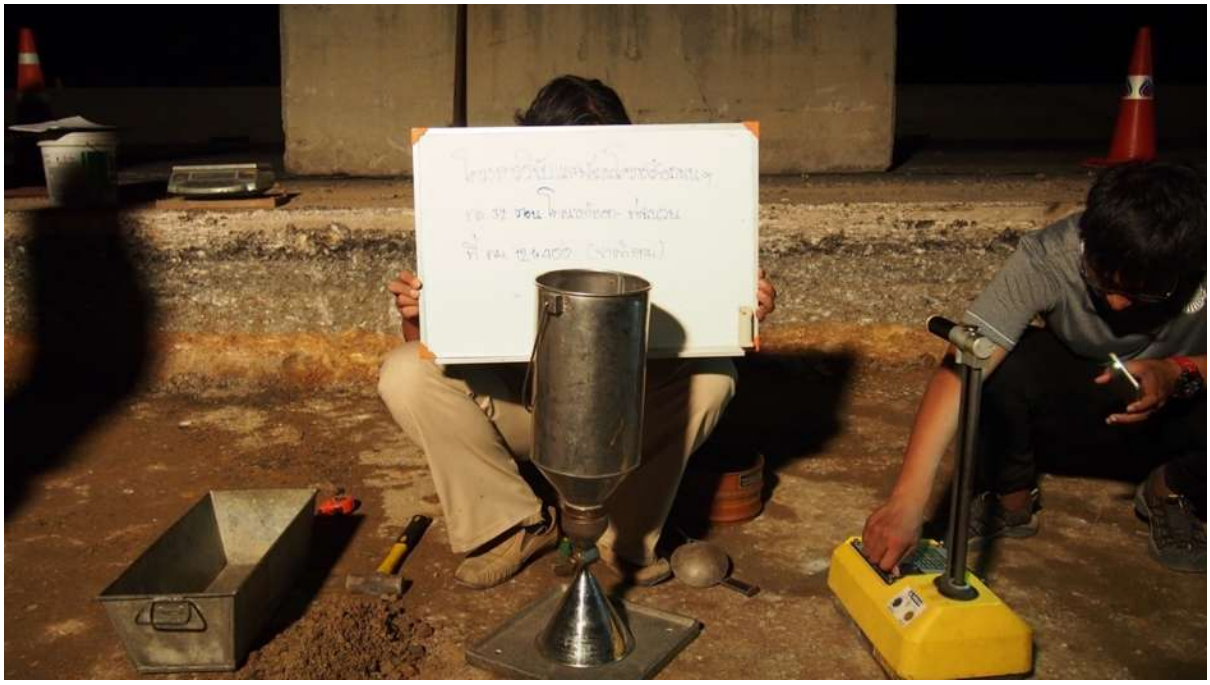
ที่ปรึกษาได้ดำเนินการปรับระดับชั้น Subgrade เดิมให้เรียบได้ระดับ พร้อมทั้งบดอัดให้แน่นโดยใช้เครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน พร้อมทั้งได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างวัสดุไปทดสอบคุณสมบัติและทดสอบความแน่นภายหลังการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ 6.13 ถึง รูปที่ 6.16



รูปที่ 6.13 งานบดอัดชั้น Subgrade



รูปที่ 6.14 งานตรวจสอบระดับชั้น Subgrade



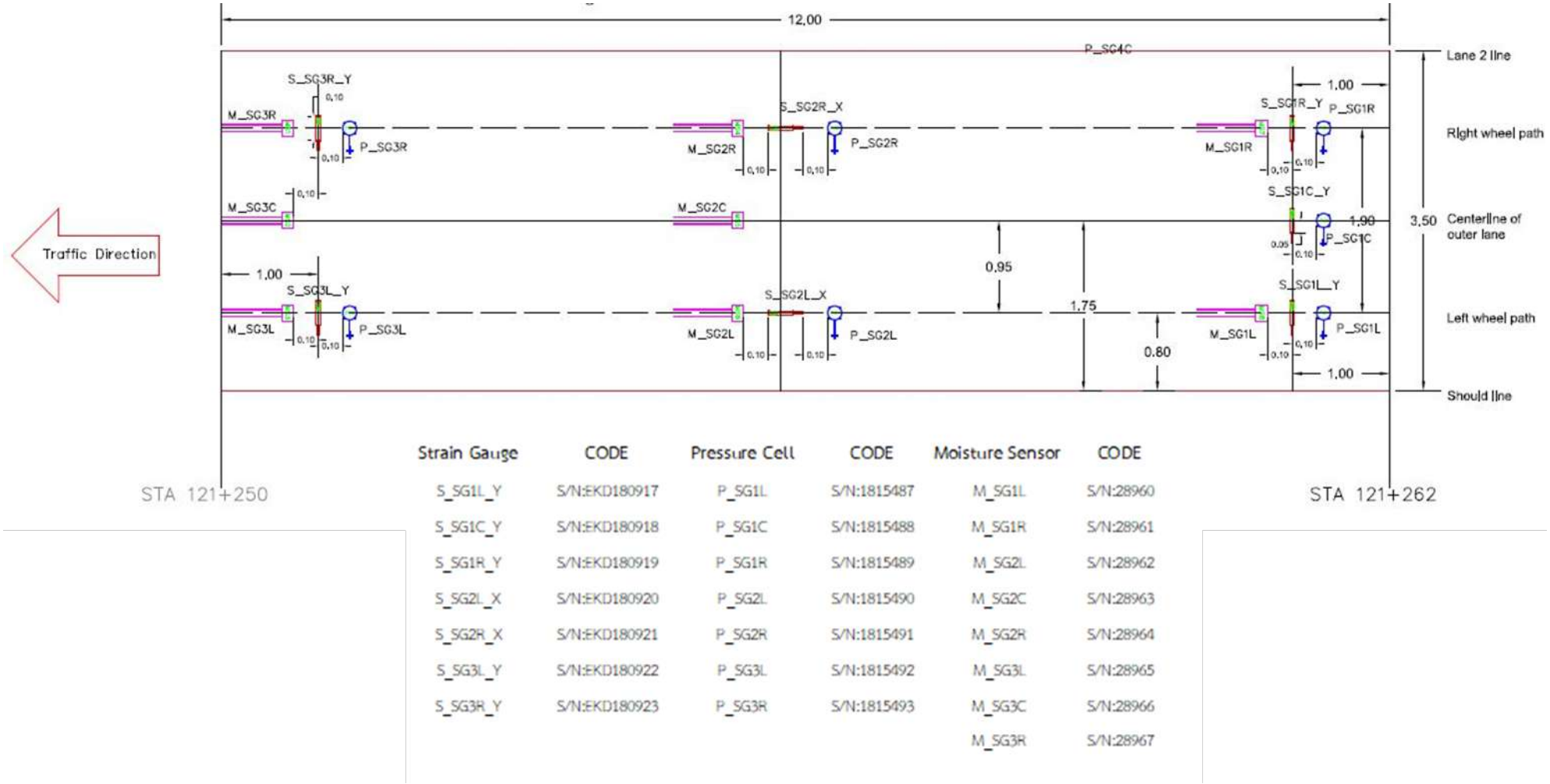
รูปที่ 6.15 การทดสอบความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Field Desity Test) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 6.16 การตรวจสอบค่าการบดอัดด้วยเครื่อง Nuclear Density Gage ในชั้น Subgrade

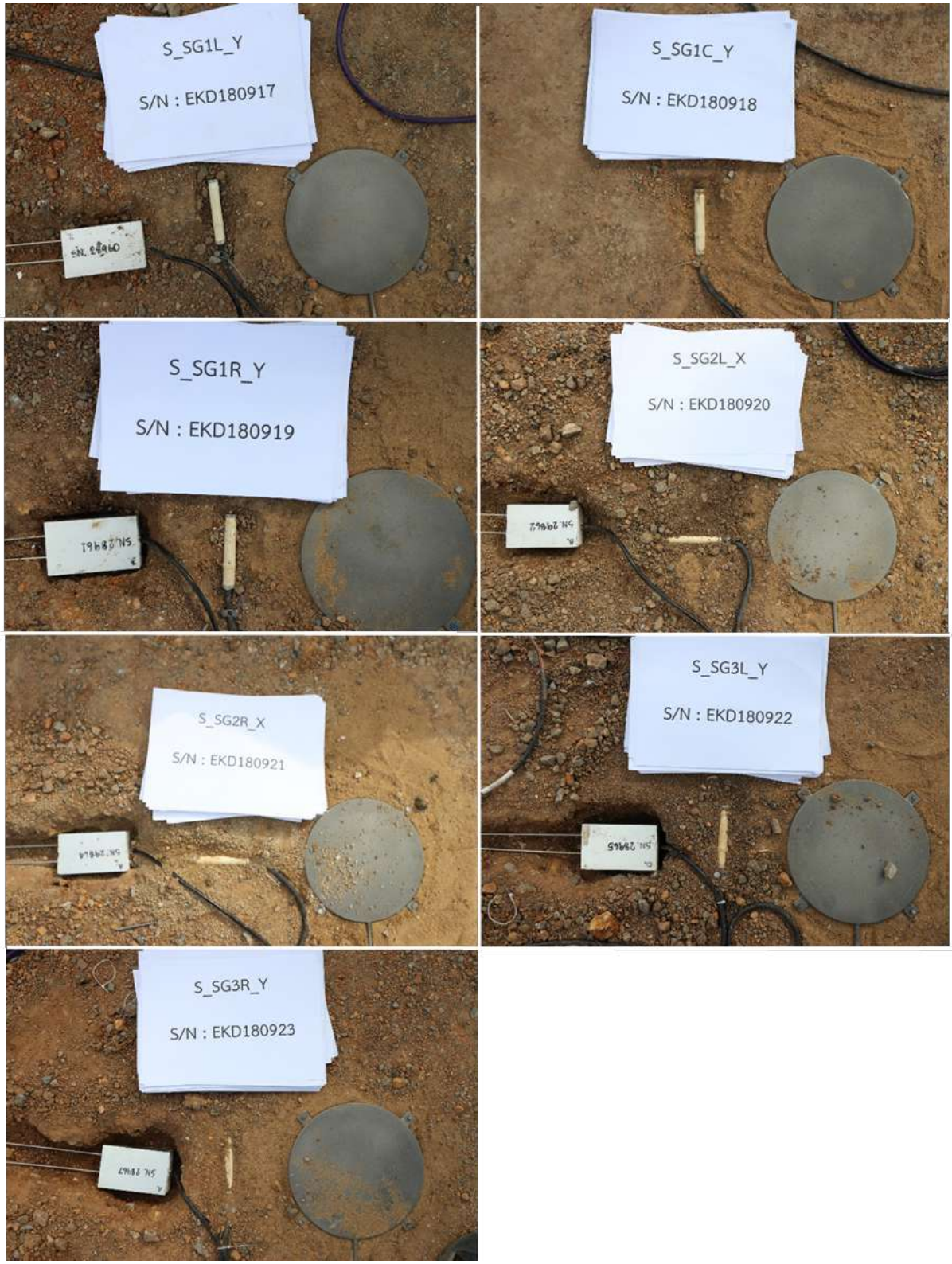
6.3.5 การติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับชั้น Subgrade

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับชั้น Subgrade จำนวน 22 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 6.17 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 7 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.18 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 7 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.19 และอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงรูปที่ 6.20 นอกจากนี้ที่ปรึกษาได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 6.21 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



Strain Gauge	CODE	Pressure Cell	CODE	Moisture Sensor	CODE
S_SG1L_Y	S/N:EKD180917	P_SG1L	S/N:1815487	M_SG1L	S/N:28960
S_SG1C_Y	S/N:EKD180918	P_SG1C	S/N:1815488	M_SG1R	S/N:28961
S_SG1R_Y	S/N:EKD180919	P_SG1R	S/N:1815489	M_SG2L	S/N:28962
S_SG2L_X	S/N:EKD180920	P_SG2L	S/N:1815490	M_SG2C	S/N:28963
S_SG2R_X	S/N:EKD180921	P_SG2R	S/N:1815491	M_SG2R	S/N:28964
S_SG3L_Y	S/N:EKD180922	P_SG3L	S/N:1815492	M_SG3L	S/N:28965
S_SG3R_Y	S/N:EKD180923	P_SG3R	S/N:1815493	M_SG3C	S/N:28966
				M_SG3R	S/N:28967

รูปที่ 6.17 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับชั้น Subgrade



รูปที่ 6.18 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับชั้น Subgrade



รูปที่ 6.19 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับชั้น Subgrade



รูปที่ 6.20 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในระดับชั้น Subgrade



รูปที่ 6.21 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 22 ตัว ในระดับชั้น Subgrade ลงท่อ PE

6.3.6 การฝังกลบและบดอัดชั้น Subbase จนถึงระดับใต้ชั้น Base

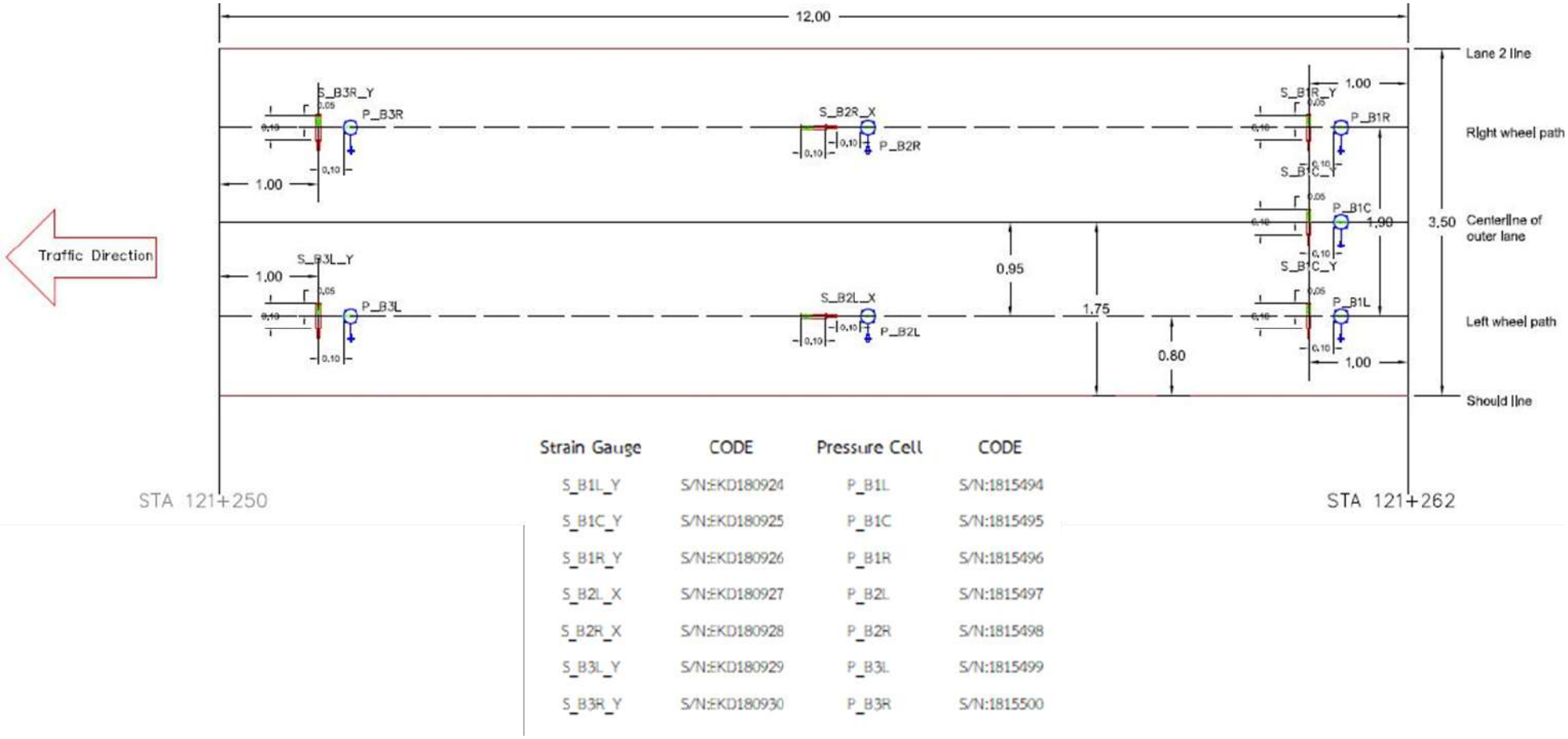
ที่ปรึกษาได้ดำเนินการฝังกลบชั้น Subbase ความหนา 20 ซม. จนถึงระดับใต้ชั้น Base พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.22 การฝังกลบและบดอัดชั้น Subbase จนถึงระดับใต้ชั้น Base

6.3.7 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณในระดับใต้ชั้น Base

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับใต้ชั้น Base จำนวน 14 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 6.23 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 7 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.24 และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 7 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.25 นอกจากนี้ที่ปรึกษาได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 6.26 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



Strain Gauge	CODE	Pressure Cell	CODE
S_B1L_Y	S/N:EKD180924	P_B1L	S/N:1815494
S_B1C_Y	S/N:EKD180925	P_B1C	S/N:1815495
S_B1R_Y	S/N:EKD180926	P_B1R	S/N:1815496
S_B2L_X	S/N:EKD180927	P_B2L	S/N:1815497
S_B2R_X	S/N:EKD180928	P_B2R	S/N:1815498
S_B3L_Y	S/N:EKD180929	P_B3L	S/N:1815499
S_B3R_Y	S/N:EKD180930	P_B3R	S/N:1815500

รูปที่ 6.23 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับใต้ชั้น Base



รูปที่ 6.24 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับใต้ชั้น Base



รูปที่ 6.25 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับใต้ชั้น Base



รูปที่ 6.26 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับใต้ชั้น Base ลงท่อ PE

6.3.8 การฝังกลบและบดอัดชั้น Base จนถึงระดับกึ่งกลางชั้น Base

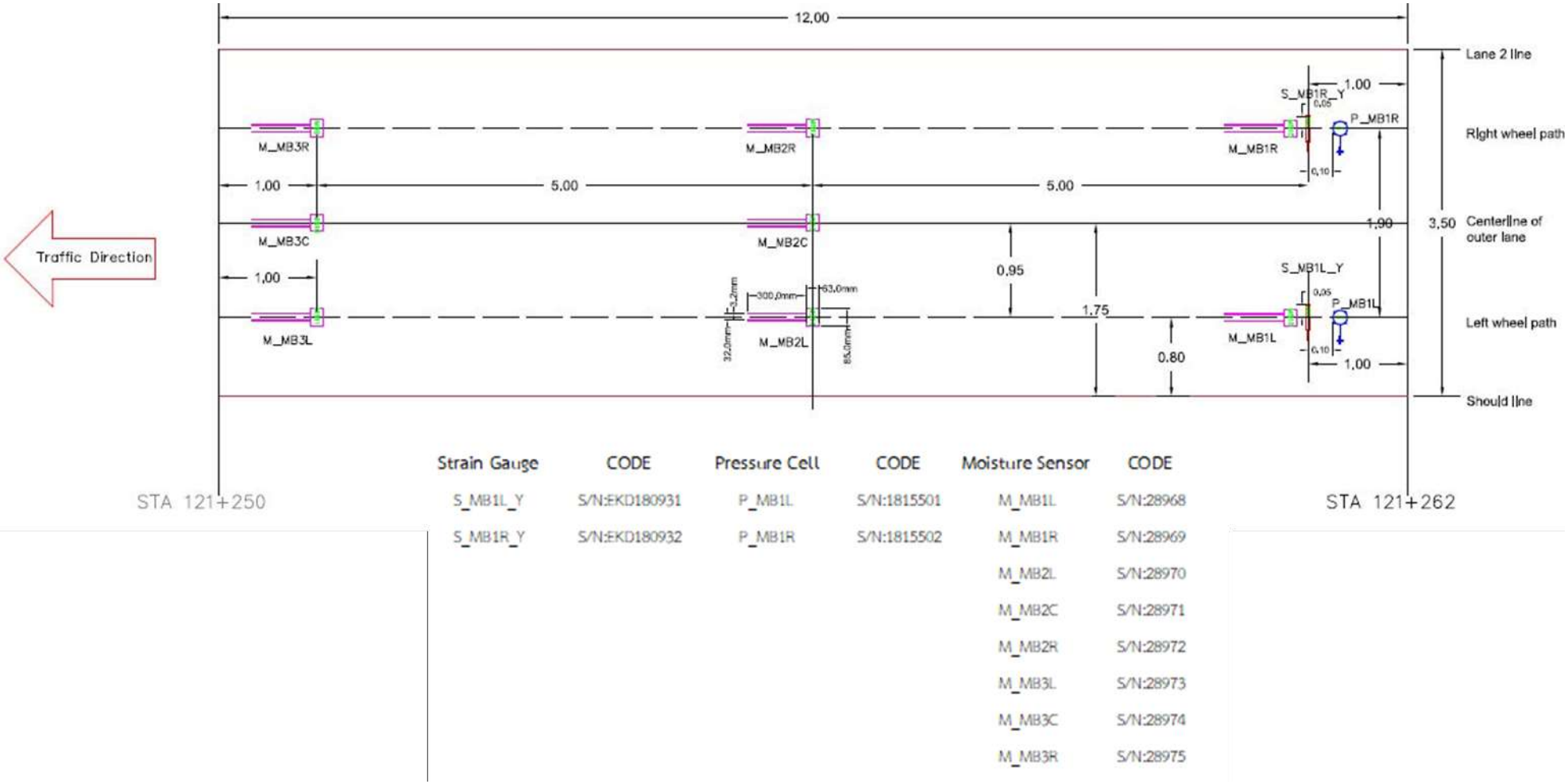
ที่ปรึกษาได้ดำเนินการฝังกลบชั้น Base ความหนา 10 ซม. จนถึงระดับกึ่งกลางชั้น Base พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 6.27



รูปที่ 6.27 การฝังกลบและบดอัดชั้น Base จนถึงระดับกึ่งกลางชั้น Base

6.3.9 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้น Base

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับกึ่งกลางชั้น Base จำนวน 12 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 6.28 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.29 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.30 และอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) จำนวน 8 ตัวดังแสดงในรูปที่ 6.31 นอกจากนี้ที่ปรึกษาได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 6.32 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



Strain Gauge	CODE	Pressure Cell	CODE	Moisture Sensor	CODE
S_MB1L_Y	S/N:EKD180931	P_MB1L	S/N:1815501	M_MB1L	S/N:28968
S_MB1R_Y	S/N:EKD180932	P_MB1R	S/N:1815502	M_MB1R	S/N:28969
				M_MB2L	S/N:28970
				M_MB2C	S/N:28971
				M_MB2R	S/N:28972
				M_MB3L	S/N:28973
				M_MB3C	S/N:28974
				M_MB3R	S/N:28975

รูปที่ 6.28 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้น Base



รูปที่ 6.29 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base



รูปที่ 6.30 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base



รูปที่ 6.31 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base



รูปที่ 6.32 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในระดับกึ่งกลางชั้น Base ลงท่อ PE

6.3.10 การฝังกลบและบดอัดจากระดับกึ่งกลางชั้น Base จนถึงระดับใต้ชั้นผิวทาง AC

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการฝังกลบจากระดับกึ่งกลางชั้น Base จนถึงระดับใต้ชั้นผิวทาง AC ชั้น ความหนา 10 ซม. พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 6.33 หลังจากนั้นลงชั้น Prime Coat ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 6.34



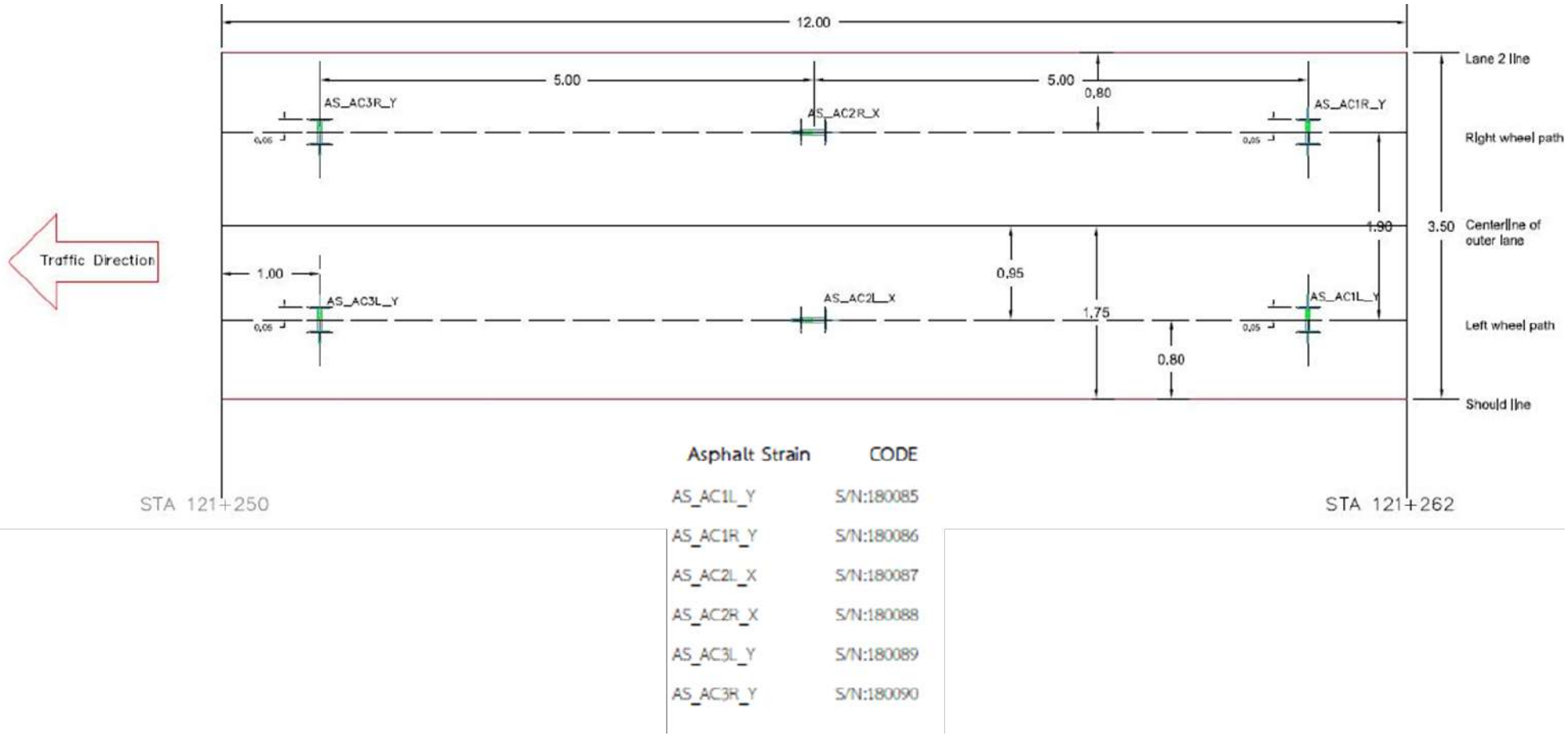
รูปที่ 6.33 การฝังกลบและบดอัดจากระดับกึ่งกลางชั้น Base จนถึงระดับใต้ชั้นผิวทาง AC



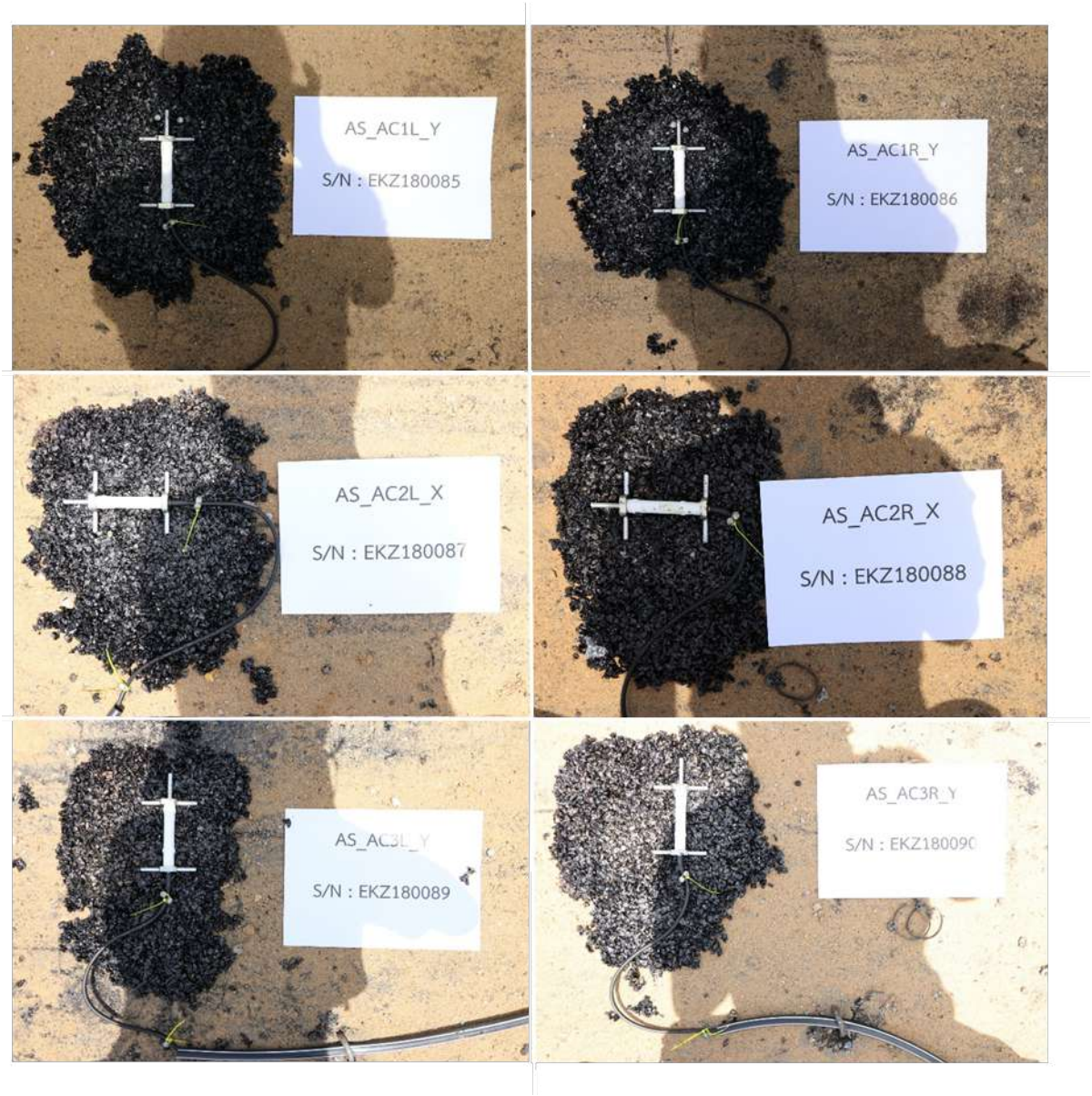
รูปที่ 6.34 ชั้น Prime Coat

6.3.11 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC จำนวน 6 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 6.35 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) จำนวน 6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.36 นอกจากนี้ที่ปรึกษาได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 6.37 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 6.35 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 6.36 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 6.37 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC ลงท่อ PE

6.3.12 การกลบและบดอัดชั้น Asphalt Concrete Bound Base

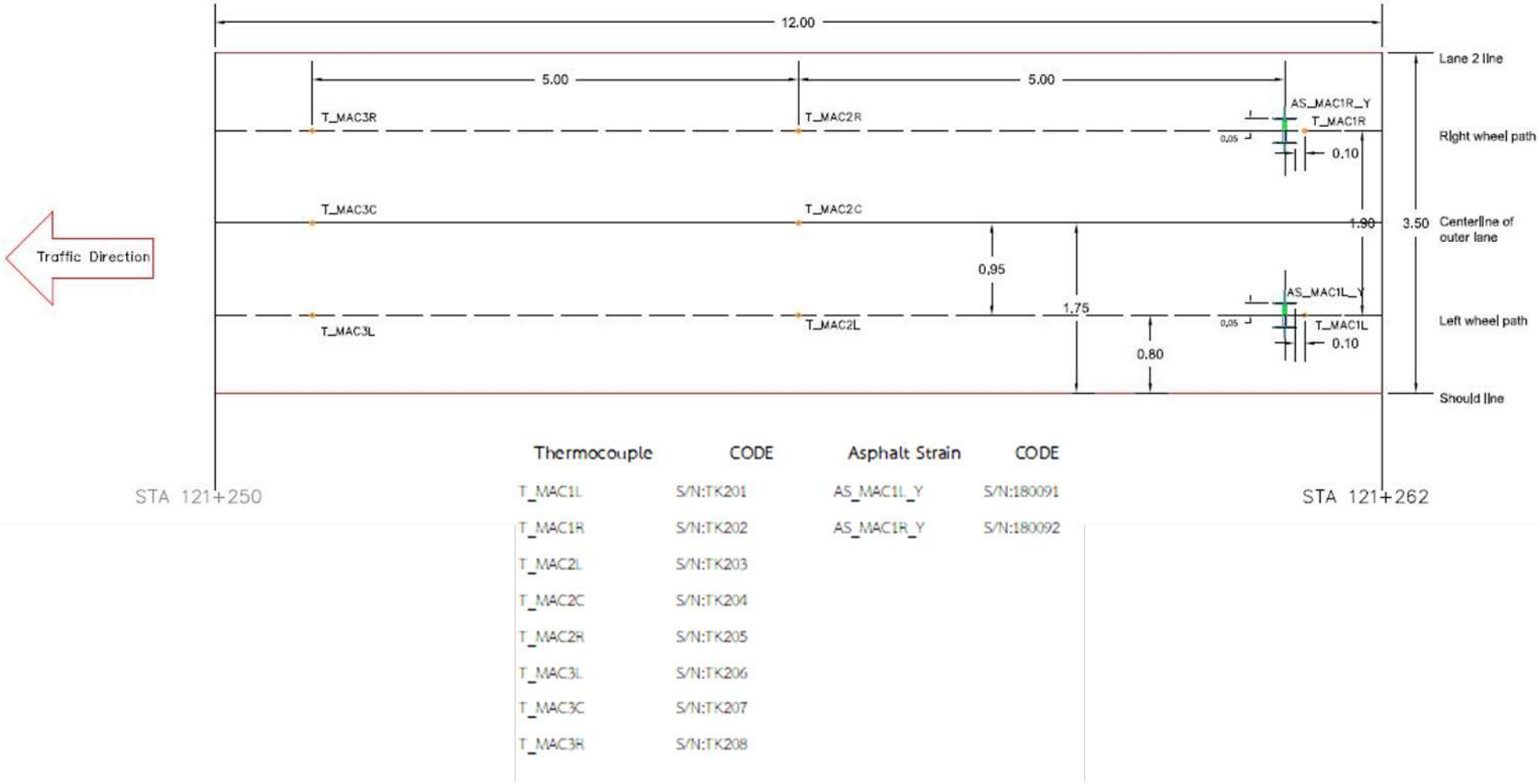
ที่ปรึกษาได้ดำเนินการฝังกลบและบดอัดจากระดับชั้น AC Bound Base จากใต้ระดับชั้นผิวทาง AC จนถึงระดับกึ่งกลางชั้น AC ซึ่งประกอบชั้น Asphalt Concrete Bound Base ความหนา 10 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 6.38



รูปที่ 6.38 ชั้น Asphalt Concrete Bound Base

6.3.13 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC จำนวน 10 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 6.39 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) จำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.40 และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.41 นอกจากนี้ที่ปรึกษาได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 6.42 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 6.39 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 6.40 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 6.41 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 6.42 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC ลงท่อ PE

6.3.14 การฝังกลบและบดอัดชั้นผิวทาง AC จนแล้วเสร็จ

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการฝังกลบและบดอัดจากระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC จนแล้วเสร็จ ประกอบด้วยชั้น Asphalt Concrete Binder Course ความหนา 5 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 6.43 และ ชั้น Asphalt Concrete Wearing Course ความหนาอีก 5 ซม. ดังแสดงใน รูปที่ 6.44 จากนั้นที่ปรึกษาได้ตีเส้นเพื่อระบุตำแหน่งแนวล้อซ้าย แนวล้อขวา แนวกึ่งกลางแปลง และตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ลงบนผิวทาง AC ดังแสดงในรูปที่ 6.45



รูปที่ 6.43 ชั้น Asphalt Concrete Binder Course



รูปที่ 6.44 ชั้น Asphalt Concrete Wearing Course



รูปที่ 6.45 แนวเส้นบนผิวทาง AC เพื่อระบุตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดฯ

6.3.15 การติดตั้ง observation well

ที่ปรึกษาได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) จำนวน 2 จุด สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง ดังแสดงในรูปที่ 6.46 ถึง รูปที่ 6.47



รูปที่ 6.46 ขุดหลุมเจาะ ลึกขนาด 15 เมตร จำนวน 1 จุด



รูปที่ 6.47 เทพื้นคอนกรีตบริเวณรอบหลุมเจาะและติดตั้งเสาเหล็กกั้นบริเวณ จำนวน 1 จุด

6.3.16 การติดตั้ง data logger

การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) ติดตั้งภายใน Cabinet เพื่อป้องกันความชื้น ความร้อน และสภาพแวดล้อมที่จะให้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลเกิดความเสียหายขณะการใช้งานในภาคสนามได้ มีอัตราความถี่ในการเก็บข้อมูลสูงสุด 100 Hz ดังแสดงในรูปที่ 6.48



รูปที่ 6.48 การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)

การติดตั้ง data logger จะมีการเชื่อมต่อเข้ากับ UPS สำหรับในกรณีที่ไฟฟ้าขัดข้อง ไฟฟ้าตก หรือเกิดการกระชาก ระยะเวลาการ backup ก็จะขึ้นอยู่ตามขนาดของ UPS เมื่อไฟฟ้าติดระบบก็จะทำการชาร์ตไปเก็บไว้แบตเตอรี่ ในส่วนของข้อมูล data logger จะมี CF card สำหรับเก็บข้อมูล ในกรณีที่ไฟฟ้าดับข้อมูลที่ค้างอยู่ระหว่างการบันทึกจะถูกเก็บไว้ใน CF Card เมื่อไฟฟ้าติดระบบของ data logger จะกลับมาทำงานเป็นปกติ

เมื่อระบบขัดข้องระหว่างการใช้งานให้การทำการ on/off การจ่ายกระแสไฟฟ้า 12Vdc ให้กับ data logger อีกวิธีหนึ่งในกรณีที่ on/off แล้วระบบยังไม่สามารถทำงานได้ ให้ทำการลงระบบปฏิบัติการใหม่

ประมาณการระยะเวลาที่ Data Logger สามารถจัดข้อมูลผลการตรวจวัดทั้งหมด สำหรับแปลงลาดยางและแปลงคอนกรีตขึ้นอยู่กับการตั้งค่าความถี่ในการเก็บข้อมูล เช่น หากบันทึกค่าทุก 15 นาที จะมีระยะประมาณ 270 วัน (memory 16 GB) โดยผู้ใช้สามารถ Save ข้อมูลผลการตรวจวัดจาก Data logger ออกมาได้โดยใช้ Memory Card

วิธีการในการเชื่อมโยงข้อมูลจาก Data Logger ไปยัง Computer อีกเครื่องนึงจะเชื่อมต่อผ่าน RS232 หรือระบบ internet (เพิ่ม modem) แล้วแสดงผลผ่าน software (LoggerNet) ของ Campbell โดย

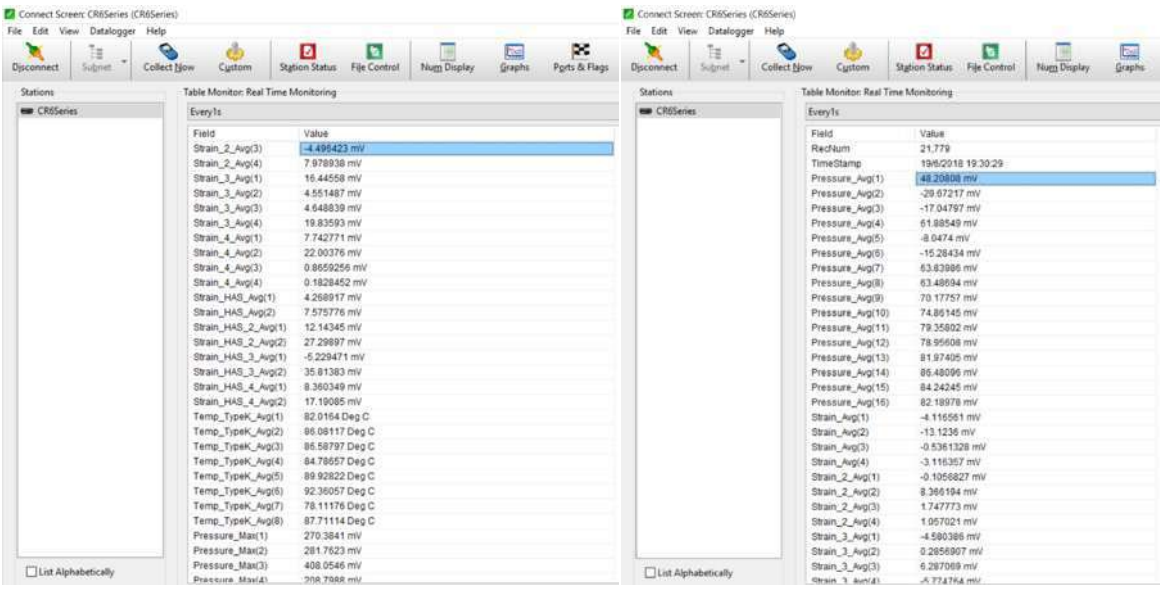
โปรแกรม LoggerNet จะสามารถดูข้อมูล บันทึกข้อมูล หรือตั้งค่าให้ CR6 ส่งข้อมูลแบบอัตโนมัติกลับมาที่คอมพิวเตอร์เครื่องนั้นๆได้ ไฟล์ที่บันทึกมาจะเป็นตามไปตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 6.49



รูปที่ 6.49 ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลจาก Data Logger

6.3.17 การทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดฯ ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

ภายหลังการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดฯ ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล รวมทั้งปูผิวทางและชั้นโครงสร้างทางของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางให้กลับคืนสู่สภาพเดิมแล้วเสร็จ ที่ปรึกษาได้ดำเนินการทดสอบสัญญาณตรวจวัดของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณภูมิ (Thermocouple) ซึ่งได้สัญญาณตรวจวัดของแต่ละเครื่องมือจะแสดงค่าบนหน้าจอโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 6.50 และสรุปผลการทดสอบในรูปที่ 6.49



รูปที่ 6.50 การทดสอบเครื่องมือตรวจวัดฯ ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) ที่ปรึกษาได้ดำเนินการใช้สายวัดระดับน้ำในหลุมเจาะวัดความลึกของน้ำใต้ดิน โดยผลความลึกของระดับน้ำใต้ดินที่ 10 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.51

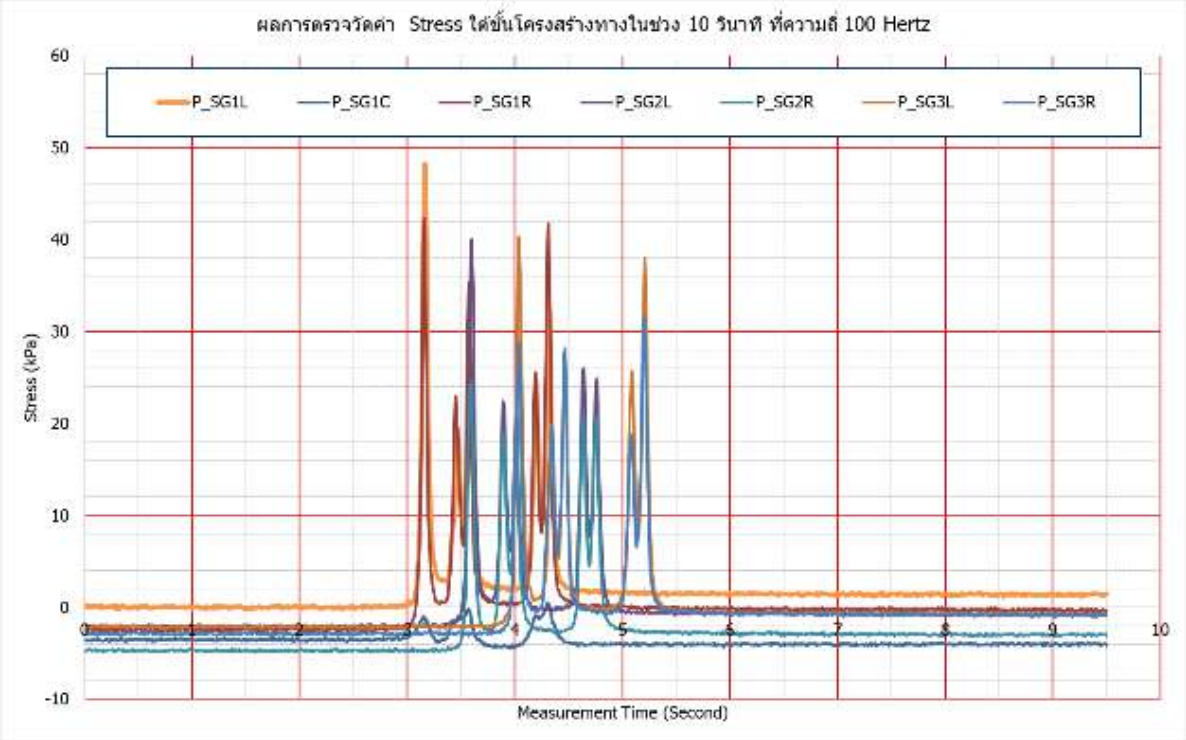


รูปที่ 6.51 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well)

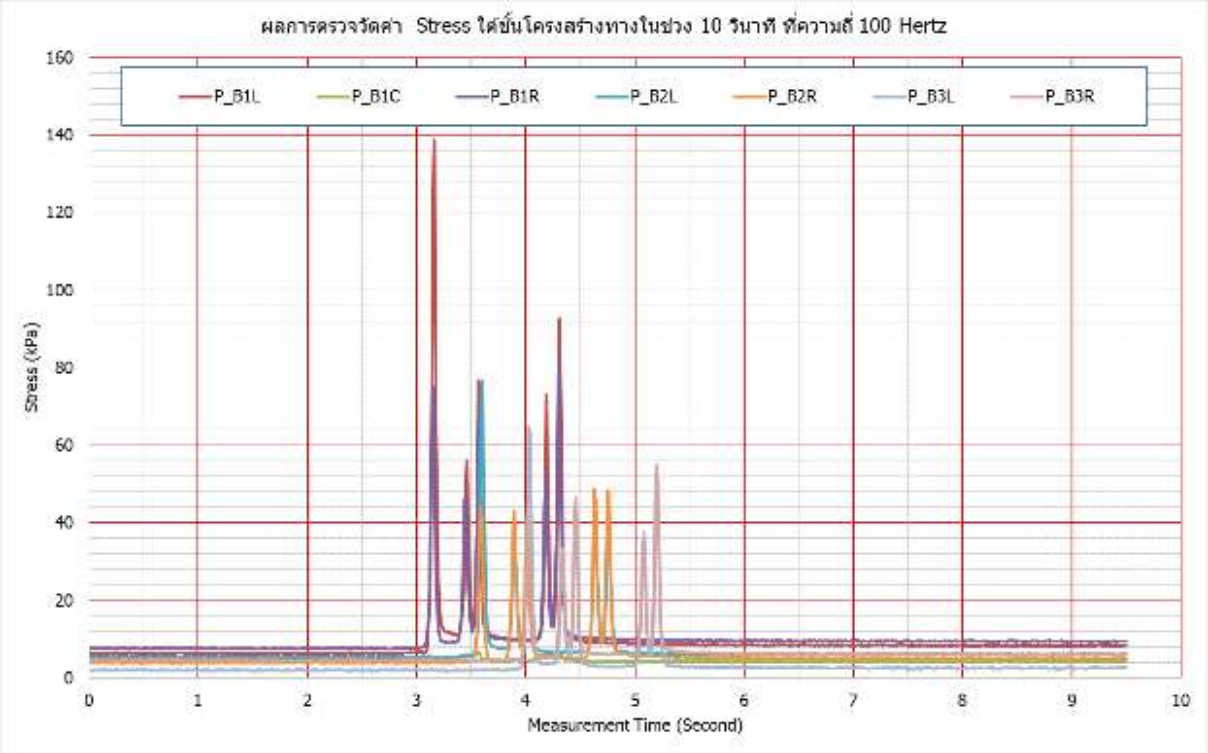
นอกจากนี้ที่ปรึกษาได้ทดสอบความเร็วในการอ่านค่าสัญญาณและบันทึก 100 Hz (100 ค่าในเวลา 1 วินาที) ของอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) โดยการตรวจวัดค่าสัญญาณเมื่อมีรถบรรทุกวิ่งผ่านแปลงทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.52 ซึ่งค่าสัญญาณที่ได้จากแต่ละอุปกรณ์ตรวจวัดฯ ถูกอ่านและบันทึกลงในอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) โดยภายหลังการทดสอบพบว่าอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) สามารถอ่านและบันทึกข้อมูลได้ 100 Hz ดังแสดงกราฟข้อมูลตรวจวัดในรูปที่ 6.53 ถึง รูปที่ 6.60 และตารางสรุปข้อมูลตรวจวัดในภาคผนวก ฌ



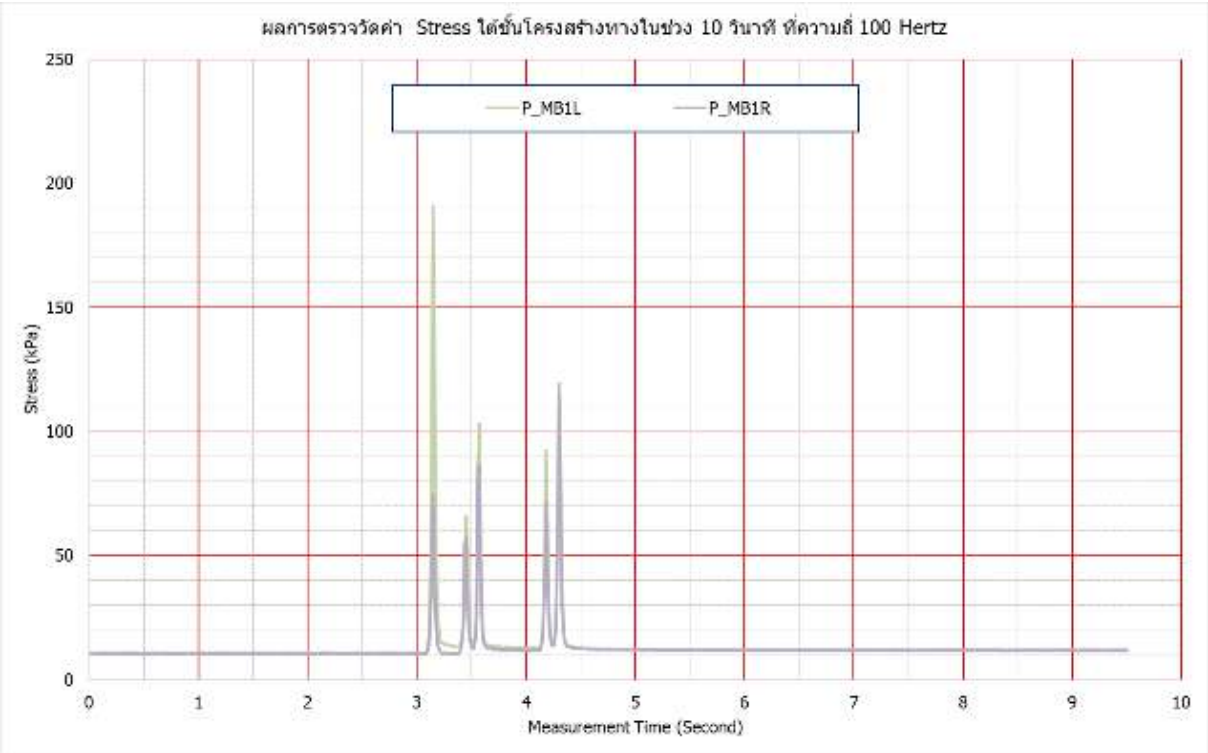
รูปที่ 6.52 การทดสอบความเร็วในการอ่านและบันทึก 100 Hz ของอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)



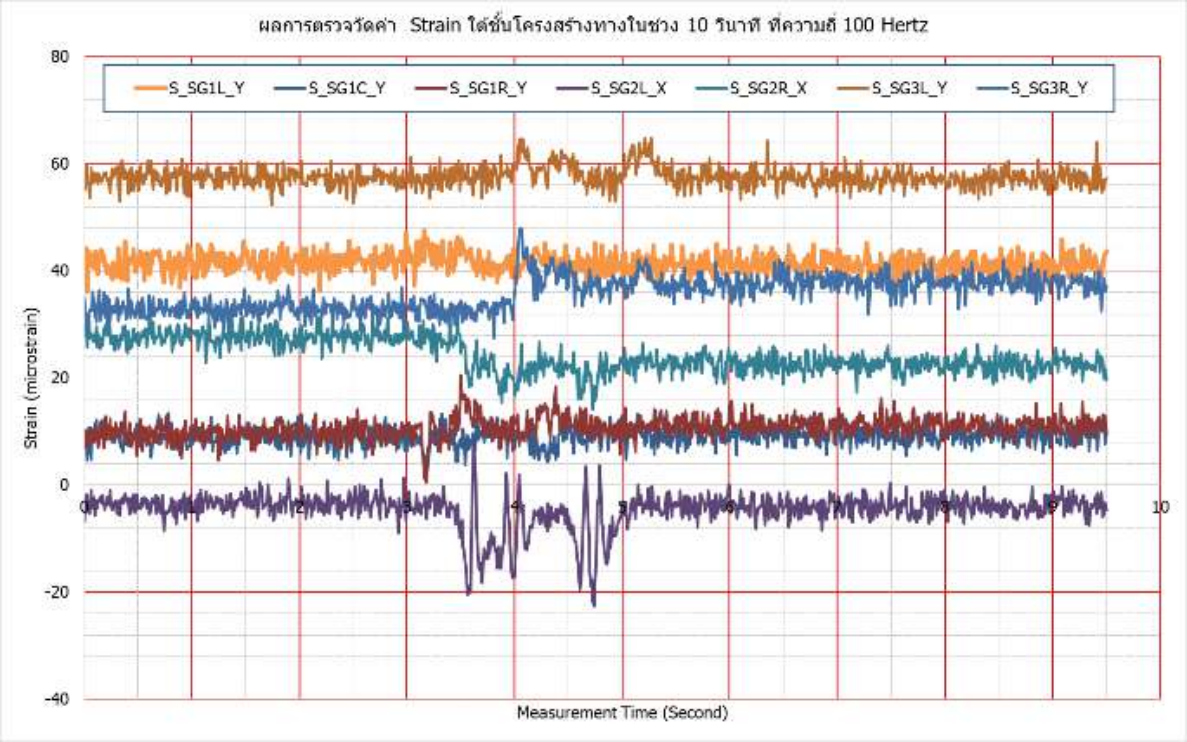
รูปที่ 6.53 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ชั้น Subgrade



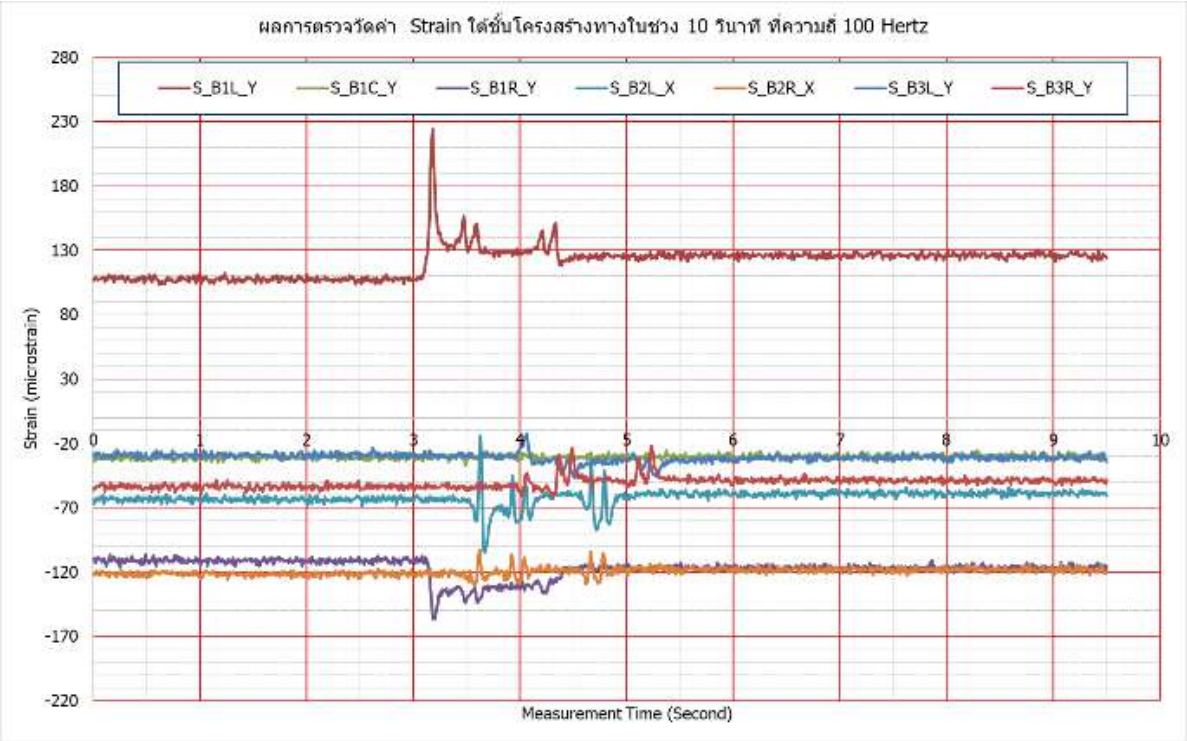
รูปที่ 6.54 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ระดับใต้ชั้น Base



รูปที่ 6.55 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ระดับกึ่งกลางชั้น Base



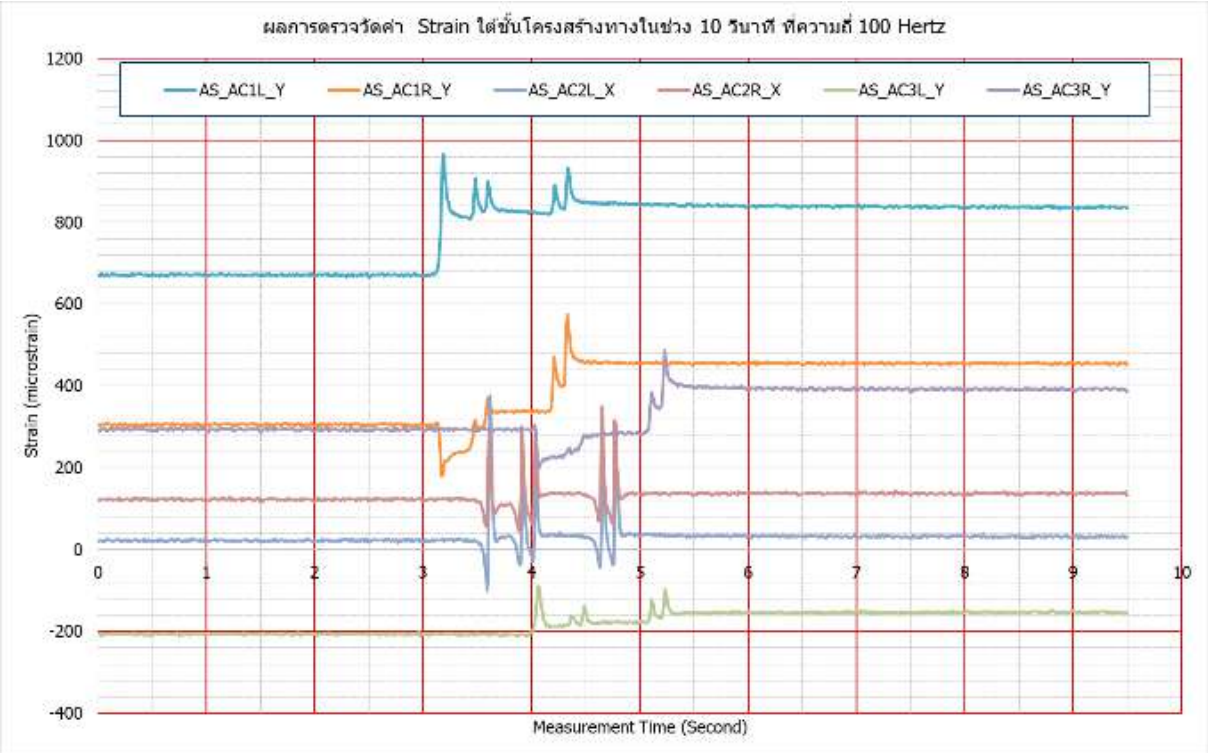
รูปที่ 6.56 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ชั้น Subgrade



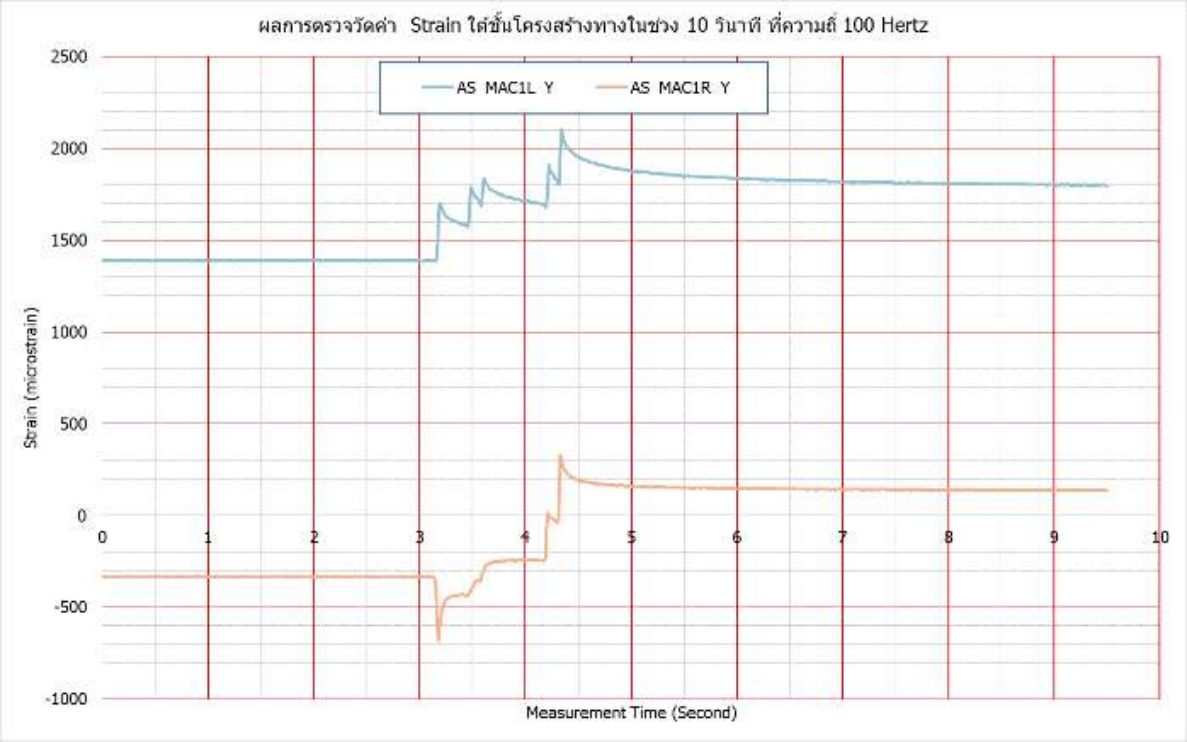
รูปที่ 6.57 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ระดับใต้ชั้น Base



รูปที่ 6.58 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ระดับกึ่งกลางชั้น Base



รูปที่ 6.59 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ระดับใต้ชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 6.60 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC

6.4 ข้อมูลผลการทดสอบวัสดุก่อสร้างสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

ที่ปรึกษาได้เลือกใช้วัสดุถมบดอัดโครงสร้างชั้นทางจากแหล่งวัสดุที่มีผลการรับรองคุณภาพของวัสดุ (General Test) จากกรมทางหลวง ดังแสดงในภาคผนวก ญ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- วัสดุประเภทหิน สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต สำหรับชั้น Asphalt Concrete Wearing Course และ Asphalt Concrete Binder Course ใช้จากแหล่งโรงโม่หินนันประเสริฐ อ.พะยุหะคีรี จ.นครสวรรค์
- วัสดุประเภทหิน สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต สำหรับชั้น Asphalt Bound Base โรงผสมแอสฟัลท์ หจก.จันทร์วงษ์ศิลา อ.ตาคลี จ.นครสวรรค์
- วัสดุประเภทหินคลุก สำหรับชั้นพื้นทาง (Base) ใช้จากแหล่งวัสดุ โรงโม่หินศิลาลานทอง2 ทล.1 กม.243+900 LT
- วัสดุประเภทลูกรัง สำหรับชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ใช้จากแหล่งวัสดุ แหล่งบ่อลูกรังบ้านกล้า ต.ธรรมามูล อ.เมือง จ.ชัยนาท

ในระหว่างก่อสร้างที่ปรึกษาได้ดำเนินการทดสอบวัสดุถมบดอัดที่แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง (Control Test) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ชั้นผิวทาง Asphalt Concrete Wearing Course (มาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532)
  - การทดสอบ Compaction โดยวิธี Marshall (มาตรฐาน ทล.-ท. 604/2517) ≥ 98%
- ชั้นผิวทาง Asphalt Concrete Binder Course (มาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532)
  - การทดสอบ Compaction โดยวิธี Marshall (มาตรฐาน ทล.-ท. 604/2517) ≥ 97%
- ชั้นผิวทาง Asphalt Concrete Bound Base (มาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532)
  - การทดสอบ Compaction โดยวิธี Marshall (มาตรฐาน ทล.-ท. 604/2517) ≥ 98%

- ชั้นพื้นทาง (Base) วัสดุประเภทหินคลุก (มาตรฐาน ทล.-ม. 201/2544)
  - การทดสอบ CBR (มาตรฐาน ทล.-ท. 109/2517) ≥ 80%
  - การทดสอบ Compaction ≥ 95% ของ Compaction สูงสุด (มาตรฐาน ทล.-ท. 108/2517)
  - การทดสอบ Liquid Limit (มาตรฐาน ทล.-ท. 102/2515) ≤ 25%
  - การทดสอบ Plastic Index (มาตรฐาน ทล.-ท. 103/2515) ≤ 6%
  - การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง (มาตรฐาน ทล.-ท. 205/2517) ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 = 8 - 20% และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 = 2 - 8%
- ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) วัสดุประเภทลูกรัง (มาตรฐาน ทล.-ม. 205/2532)
  - การทดสอบ CBR (มาตรฐาน ทล.-ท. 109/2517) ≥ 25%
  - การทดสอบ Compaction ≥ 95% ของ Compaction สูงสุด (มาตรฐาน ทล.-ท. 108/2517)
  - การทดสอบ Liquid Limit (มาตรฐาน ทล.-ท. 102/2515) ≤ 35%
  - การทดสอบ Plastic Index (มาตรฐาน ทล.-ท. 103/2515) ≤ 11%
  - การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง (มาตรฐาน ทล.-ท. 205/2517) ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 = 25 - 45% และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 = 5 - 20%

ผลการทดสอบวัสดุถมบดอัดที่แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง (Control Test) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง แสดงในภาคผนวก ญ

7. การติดตั้งระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามโครงสร้างถนนลาดยาง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามและชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ โดยตารางที่ 6.1 แสดงรายการองค์ประกอบของระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามและชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟที่จะดำเนินการติดตั้งโดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานในการติดตั้งระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามและชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ และการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าและเครื่อข่ายดังต่อไปนี้

7.1 การติดตั้งโครงสร้างและตู้อุปกรณ์ควบคุมในภาคสนาม

ที่ปรึกษาได้ติดตั้งตู้อุปกรณ์ควบคุมและบ่อพักสายสัญญาณ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 7.1 ถึงรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.1 ติดตั้งรั้วตาข่ายพร้อมโครงหลังคาเมทัลชีทและตู้ควบคุม



รูปที่ 7.2 บ่อพักสายสัญญาณ

7.2 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้อุปกรณ์

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) หน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) อุปกรณ์ UPS อุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) และระบบไฟฟ้าและเครือข่ายที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆภายในตู้ควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 ภาพรวมในตู้ควบคุม

7.3 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งและเดินสายสัญญาณหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) พร้อมดำเนินการตั้งค่าและเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบเครือข่ายเข้ากับหน่วยประมวลผลภาคสนาม ดังแสดงในรูปที่ 7.4`



รูปที่ 7.4 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)

7.4 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV) และอุปกรณ์บันทึกภาพ

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการติดตั้งและตั้งค่ากล้องวงจรปิด (CCTV) ที่รองรับ Digital WDR พร้อมเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าและสายสัญญาณ และเชื่อมต่อสัญญาณจากกล้องวงจรปิดและระบบเครือข่ายเข้ากับอุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) ดังแสดงในรูปที่ 7.5 และ รูปที่ 7.6



รูปที่ 7.5 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV)



รูปที่ 7.6 ภาพบันทึกจากกล้องวงจรปิด (CCTV)

7.5 การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าและเครือข่าย

ที่ปรึกษาได้ดำเนินขออนุญาตเพื่อเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าจากแนวสายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อใช้ให้ให้อุปกรณ์ต่างๆ ติดตั้งเครื่องสำรองไฟและอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า รวมถึงระบบเครือข่ายอินเตอร์เน็ตที่ใช้

ในการส่งข้อมูลจากภาคสนามมายังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย เพื่อประมวลข้อมูลและแสดงผลการตรวจวัดต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 7.7 ถึง รูปที่ 7.10



รูปที่ 7.7 การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 7.8 การเชื่อมต่อระบบเครือข่ายความเร็วสูงจากผู้ให้บริการ (Internet Service Provider : ISP)



รูปที่ 7.9 อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC)



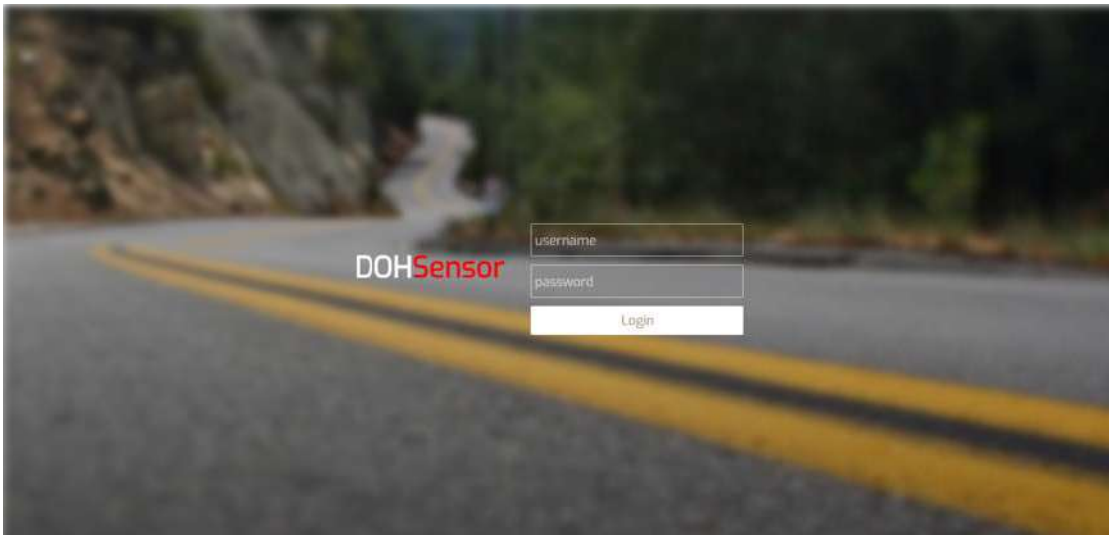
รูปที่ 7.10 อุปกรณ์ UPS สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

8. การติดตามและประเมินผลสมรรถนะทางหลวง (Highway Performance Monitoring)

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูลสำหรับติดตามสมรรถนะทางหลวง (Highway Performance Monitoring) เพื่อรองรับการบูรณาการข้อมูลจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต โดยฐานข้อมูลฯ สามารถรองรับการสืบค้นและนำเสนอข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายสำหรับผู้บริหาร เจ้าหน้าที่ นักวิจัย และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการติดตามตรวจสอบผลการตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างถนน (Pavement Response) ได้แก่ ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) อุณหภูมิ (Temperature) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) และข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลา (Traffic and Axle Load Data) ซึ่งมีรายละเอียดการใช้งาน ดังนี้

8.1 หน้าเข้าสู่ระบบ

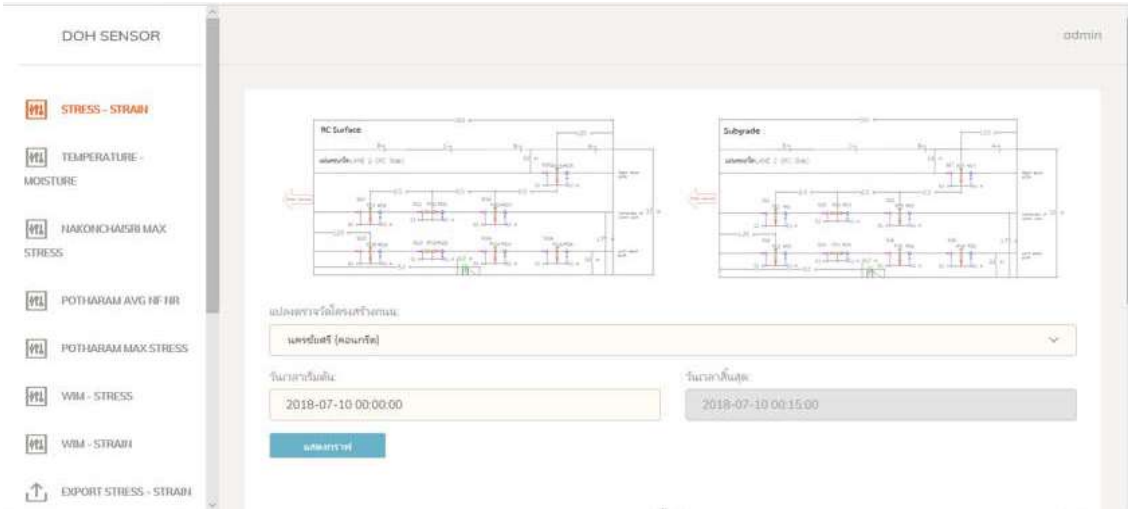
ผู้ใช้งานสามารถเข้าสู่ระบบ โดยการกรอก username กับ password และกด Login เพื่อเข้าใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 8.1



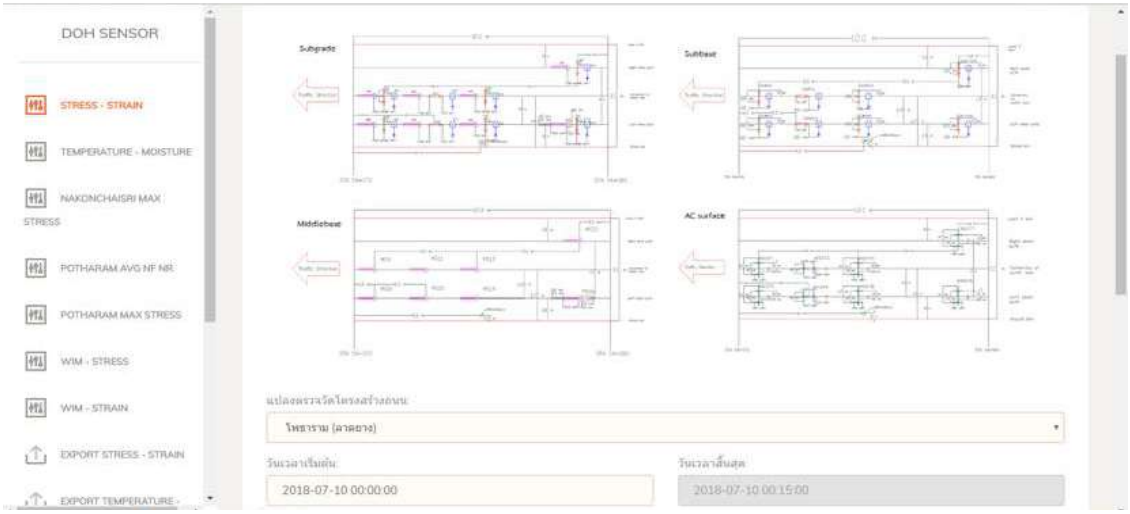
รูปที่ 8.1 หน้าเข้าสู่ระบบ

8.2 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain)

การแสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงได้ โดยเมื่อผู้ใช้งานเปลี่ยนตำแหน่งแปลงภาพแผนผังการติดตั้งจะเปลี่ยนตามตำแหน่งแปลงที่เลือก เช่น กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก นครชัยศรี (คอนกรีต) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.2 กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก โพธาราม (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.3 และกรณีที่ผู้ใช้งานเลือก สรรพยา (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.4



รูปที่ 8.2 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain

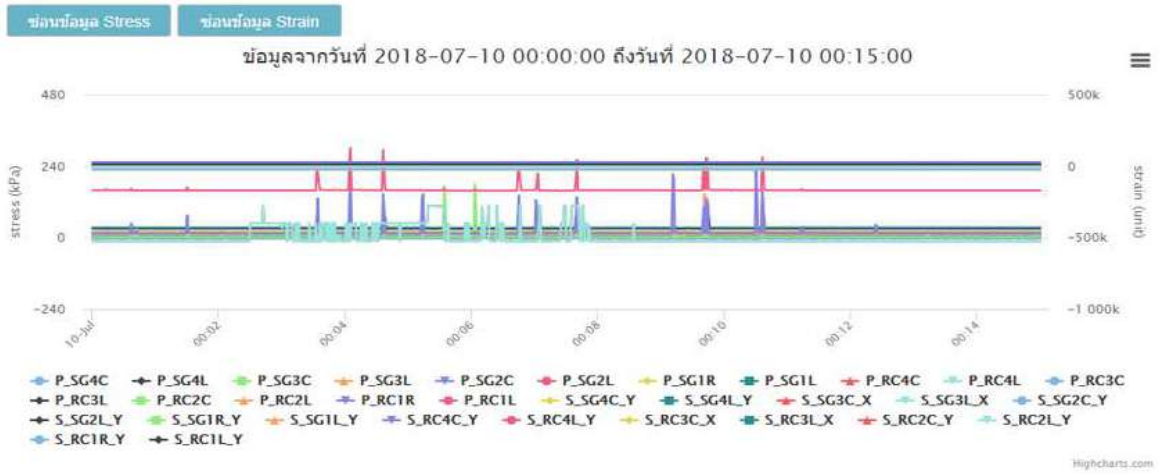


รูปที่ 8.3 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain

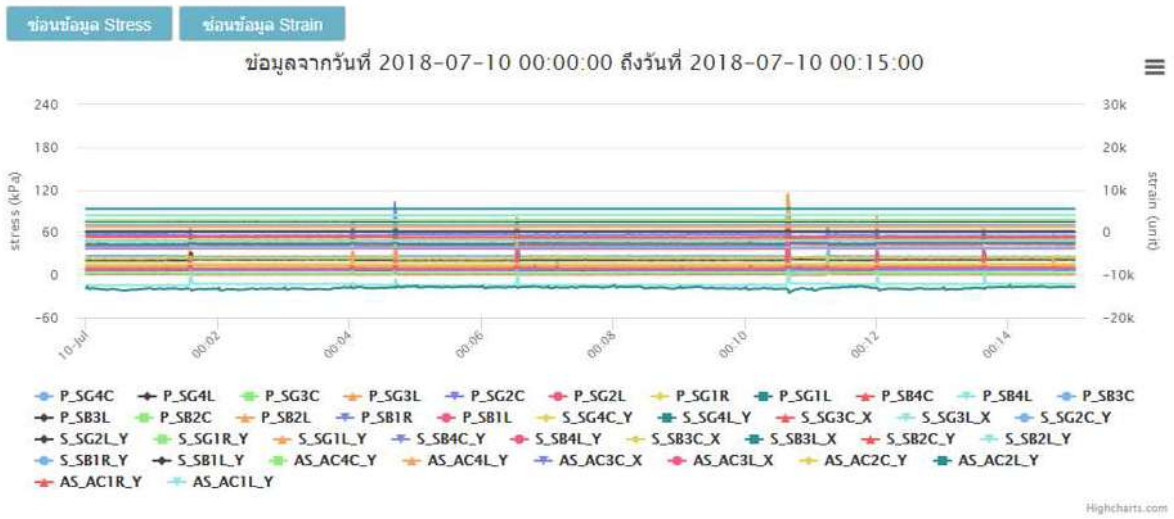


รูปที่ 8.4 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain

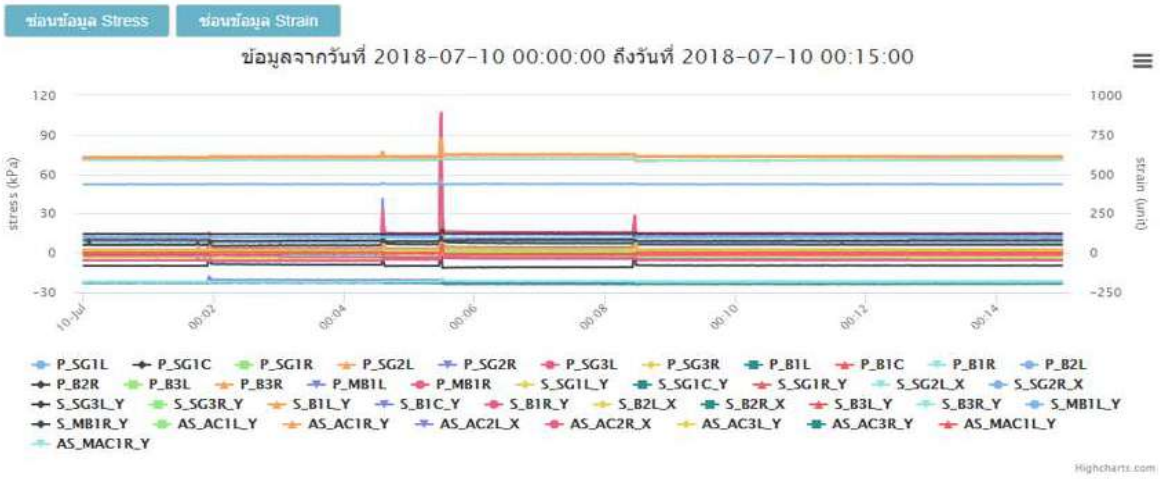
จากนั้นผู้ใช้งานต้องเลือกเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดที่จะแสดงข้อมูล โดยเมื่อผู้ใช้งานเลือกเวลาเริ่มต้น ระบบจะทำการระบุเวลาสิ้นสุดให้อัตโนมัติโดยเพิ่มเวลาจากเวลาเริ่มต้นไปอีก 15 นาที จากนั้นเมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มแสดงกราฟ ระบบจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) ดังแสดงในรูปที่ 8.5 ถึง รูปที่ 8.7



รูปที่ 8.5 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)

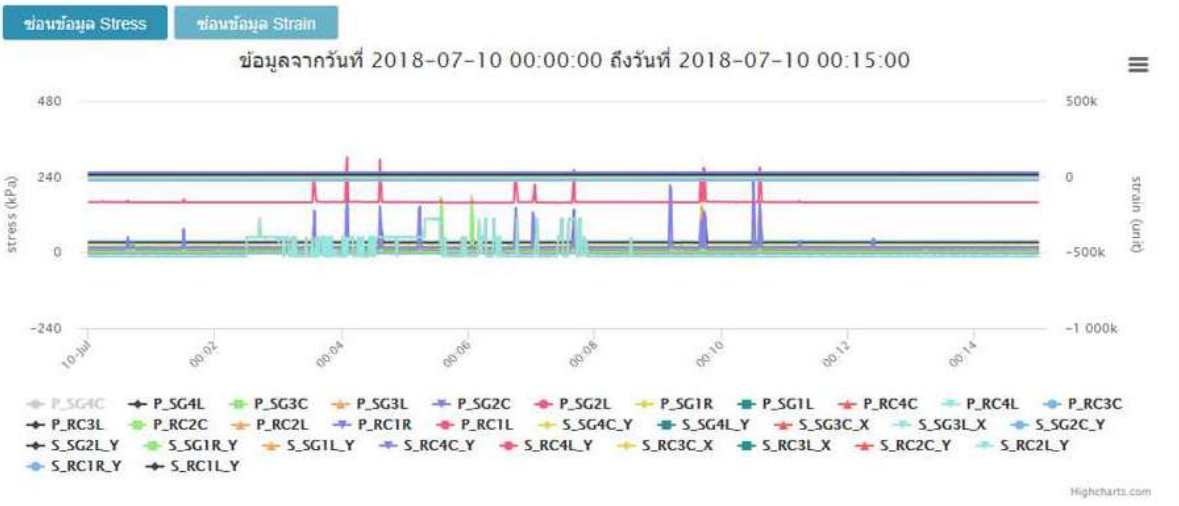


รูปที่ 8.6 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงโพธาราม(ลาดยาง)

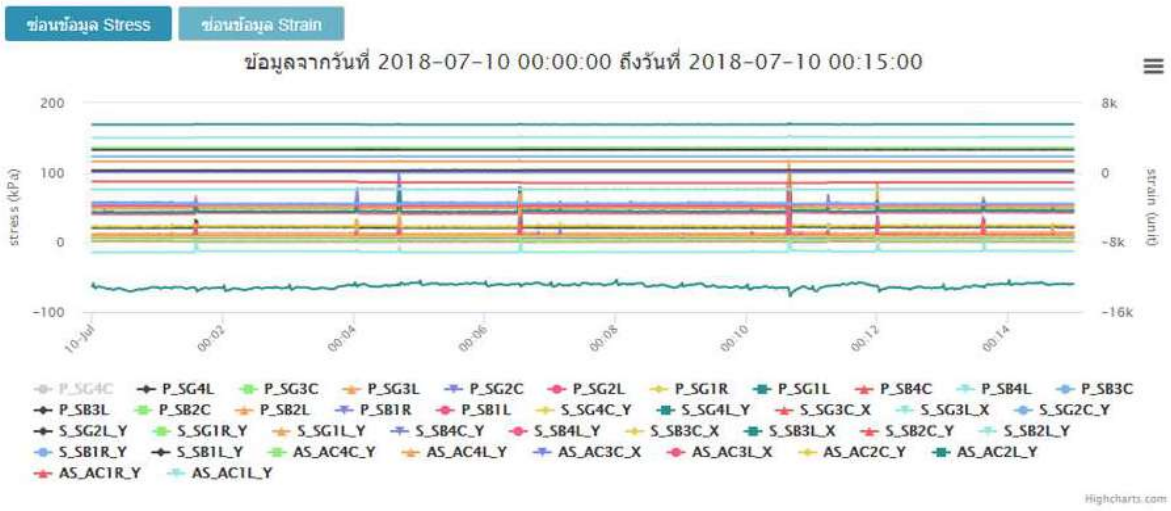


รูปที่ 8.7 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงสรรพยา(ลาดยาง)

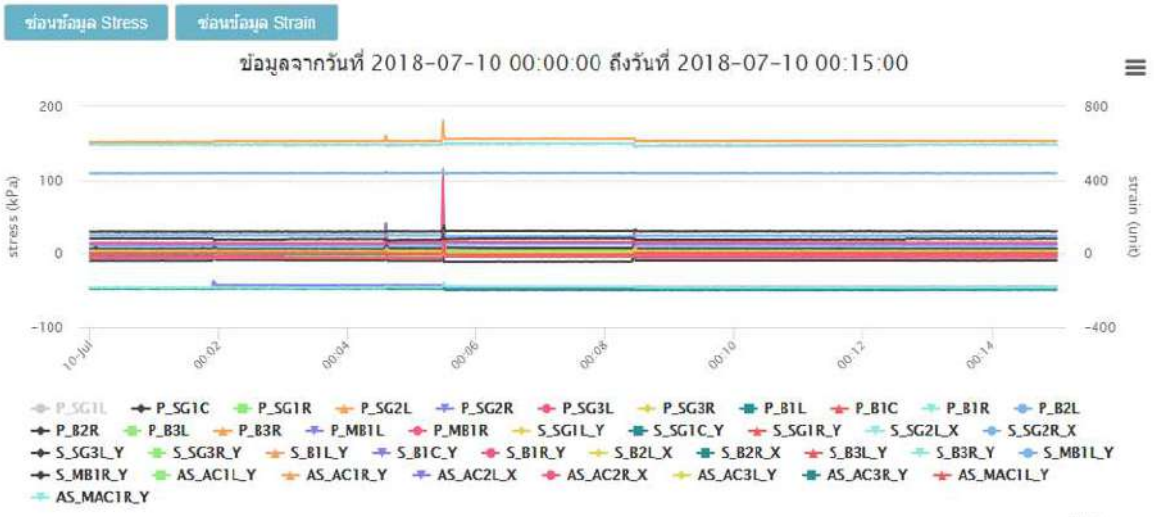
ผู้ใช้งานสามารถซ่อนหรือแสดงข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องการเห็นและไม่ต้องการเห็นโดยการกดปุ่มที่ค่าต้องการซ่อนหรือแสดง ดังแสดงในรูปที่ 8.8 ถึงรูปที่ 8.16



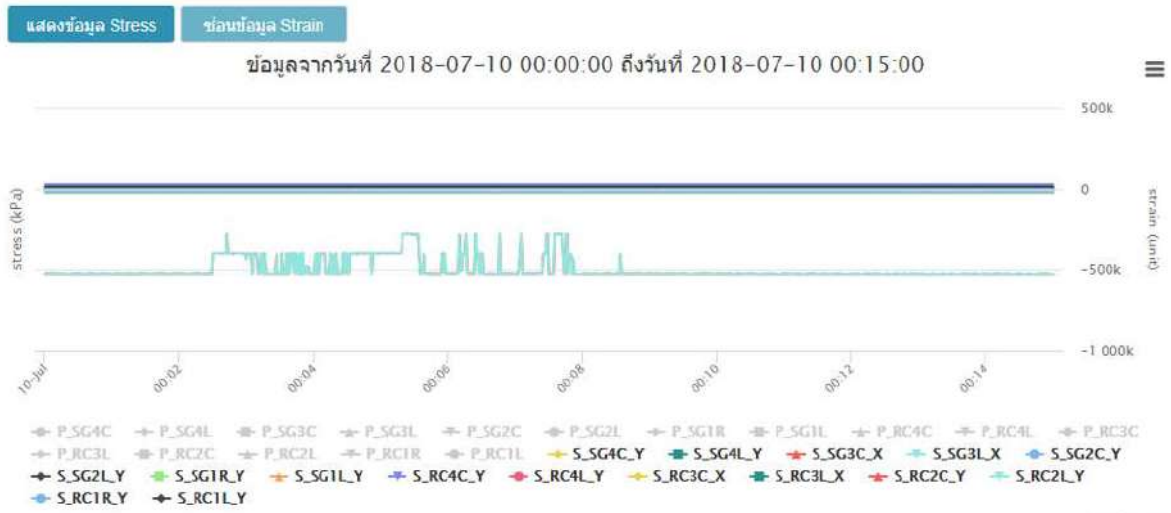
รูปที่ 8.8 การซ่อนข้อมูล Stess ของ P_SG4C แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)



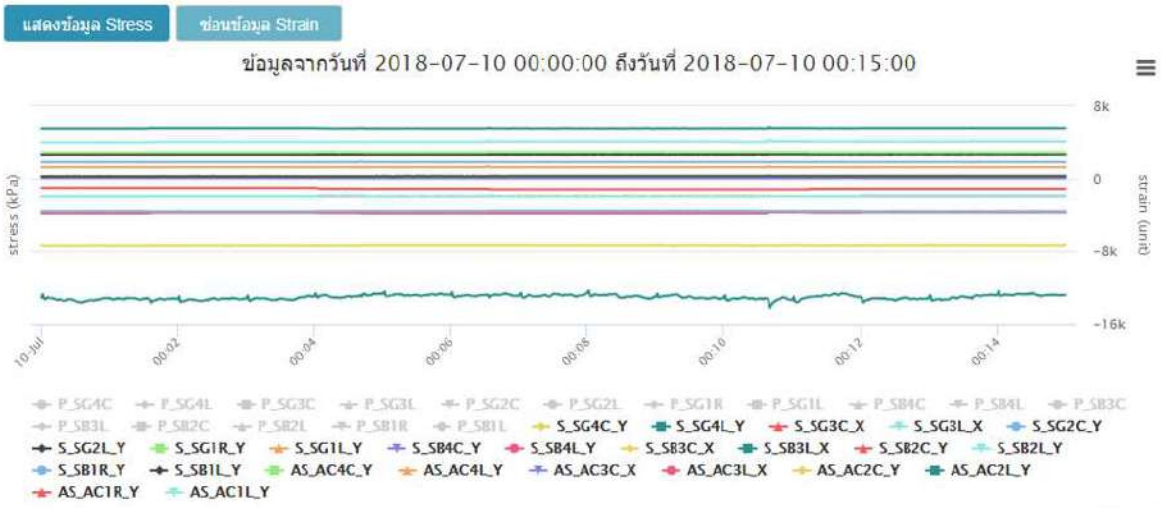
รูปที่ 8.9 การซ่อนข้อมูล Stess ของ P_SG4C แปลงโพธาราม(ลาดยาง)



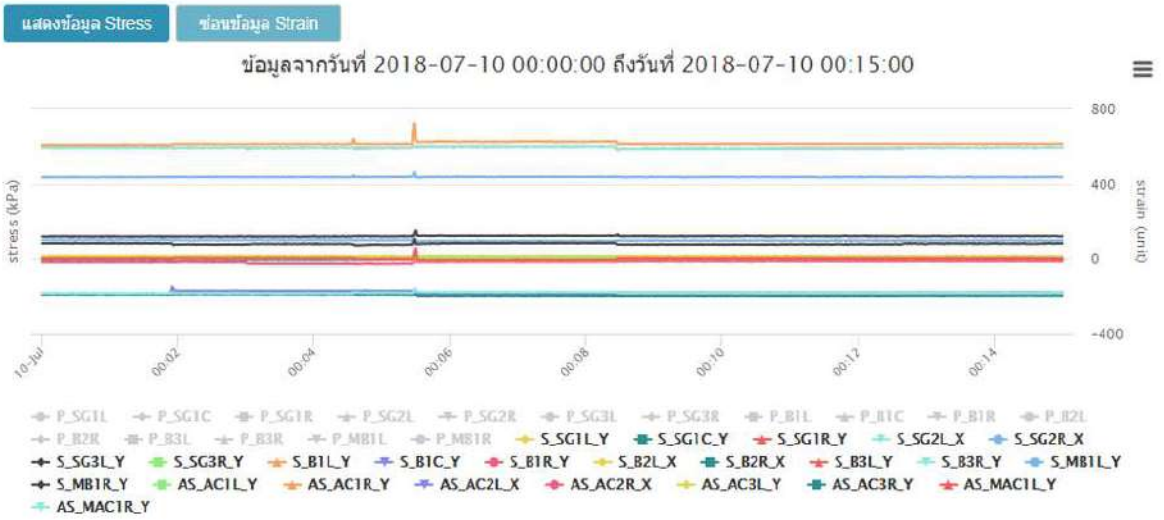
รูปที่ 8.10 การซ่อนข้อมูล Stess ของ P_SG1L ของแปลงสรรพยา(ลาดยาง)



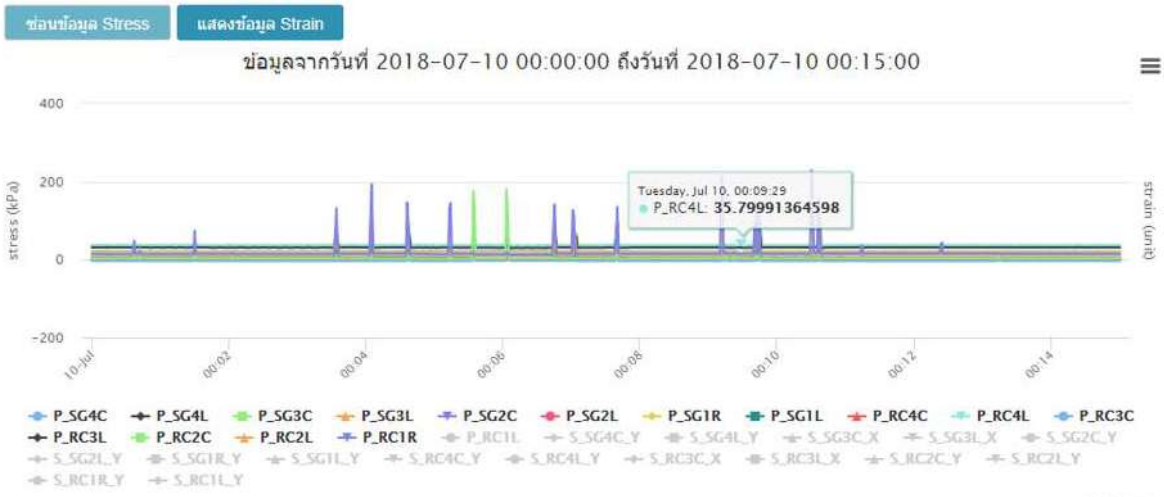
รูปที่ 8.11 การซ่อนข้อมูล Stess ทั้งหมด แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)



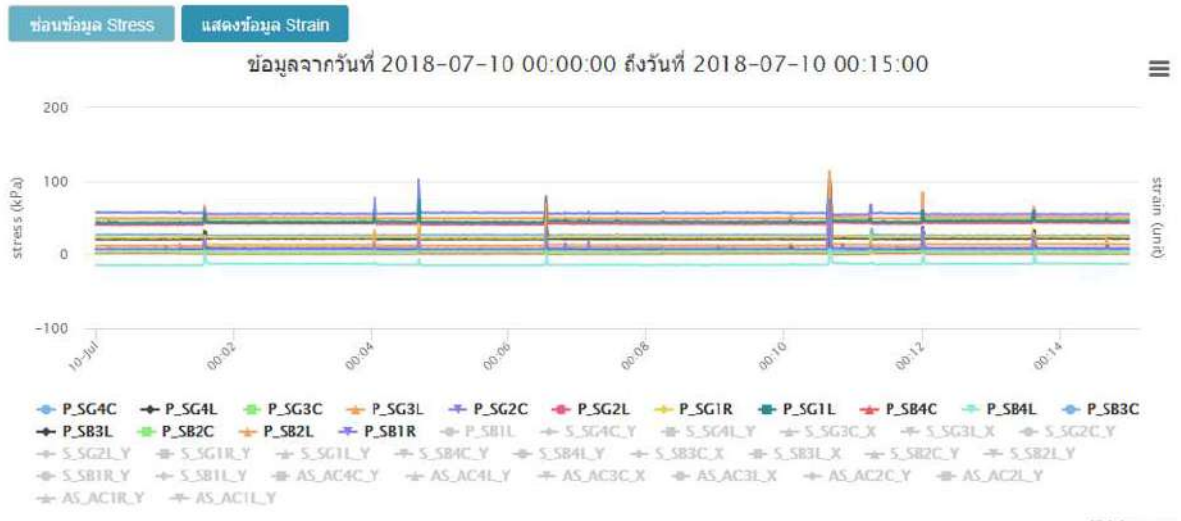
รูปที่ 8.12 การซ่อนข้อมูล Stess ทั้งหมด แปลงโพธาราม(ลาดยาง)



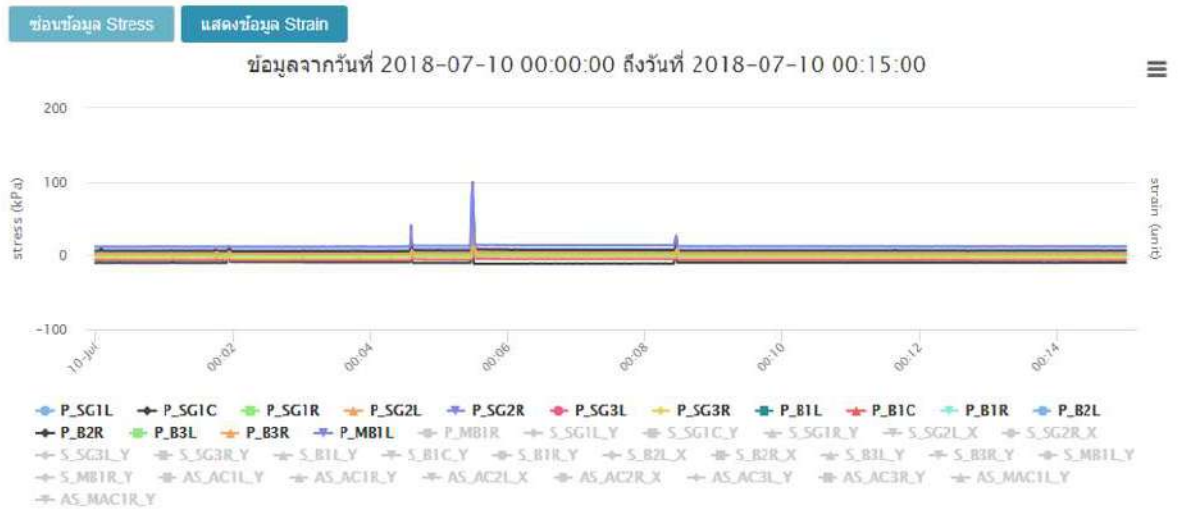
รูปที่ 8.13 การซ่อนข้อมูล Stess ทั้งหมด แปลงสรรพยา(ลาดยาง)



รูปที่ 8.14 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)



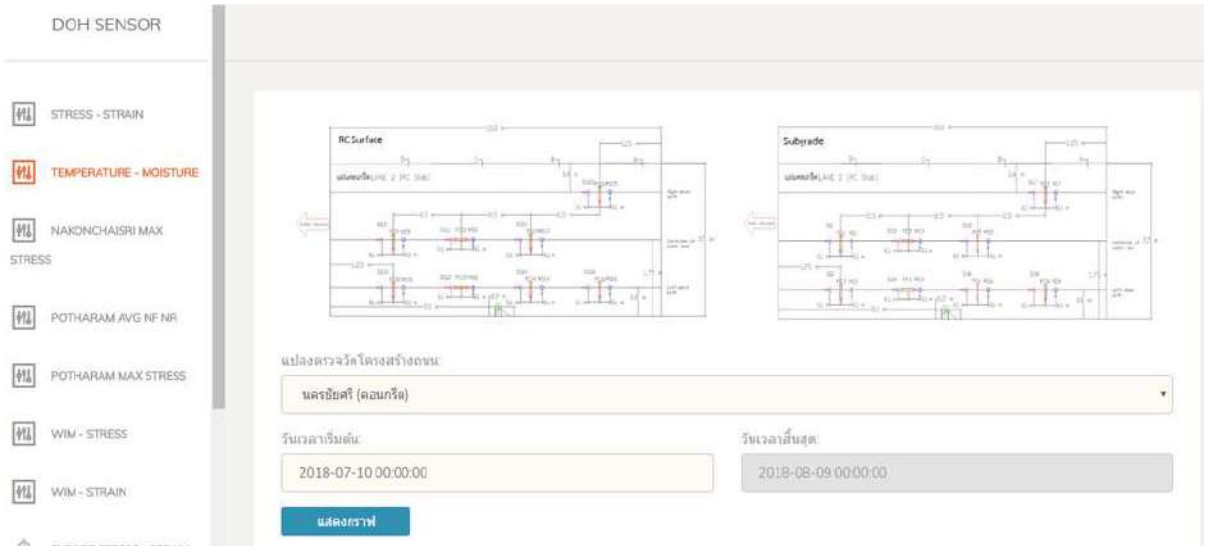
รูปที่ 8.15 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงโพธาราม(ลาดยาง)



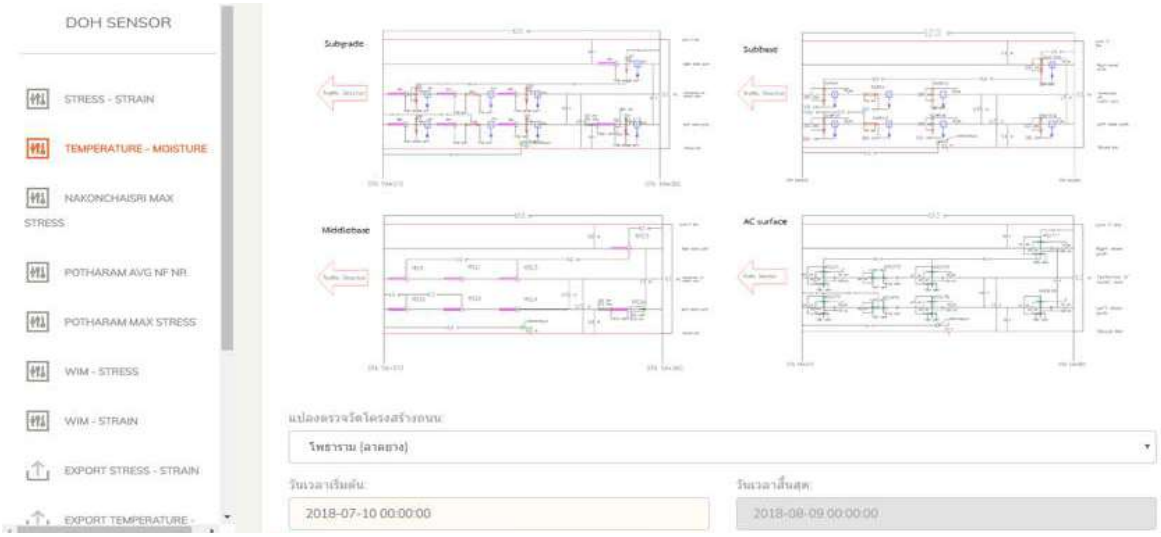
รูปที่ 8.16 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงสรรพยา(ลาดยาง)

8.3 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) และ ความชื้น (Moisture Content)

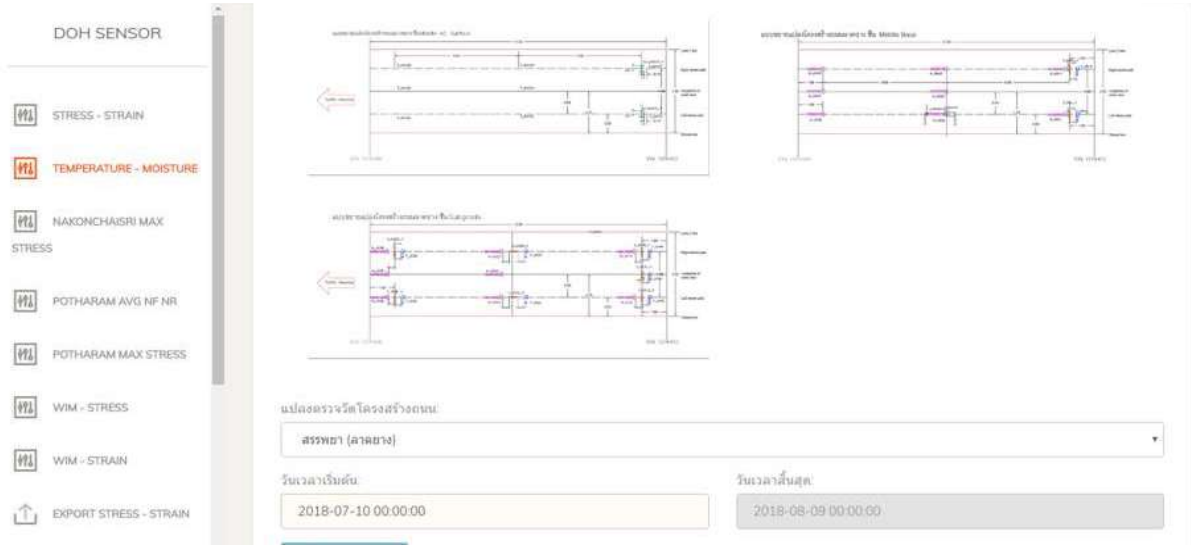
การแสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) และ ความชื้น (Moisture Content) ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงได้ โดยเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแปลงภาพแผนผังการติดตั้งจะเปลี่ยนตามตำแหน่งแปลงที่เลือก เช่น กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก นครชัยศรี (คอนกรีต) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.17 กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก โพธาราม (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.18 และกรณีที่ผู้ใช้งานเลือก สรรพยา (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.19



รูปที่ 8.17 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture

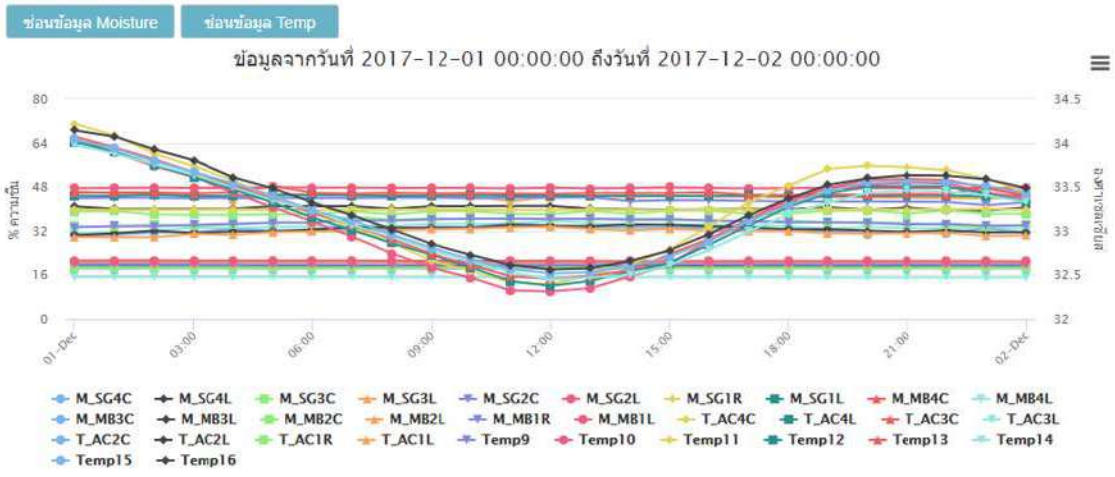


รูปที่ 8.18 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture

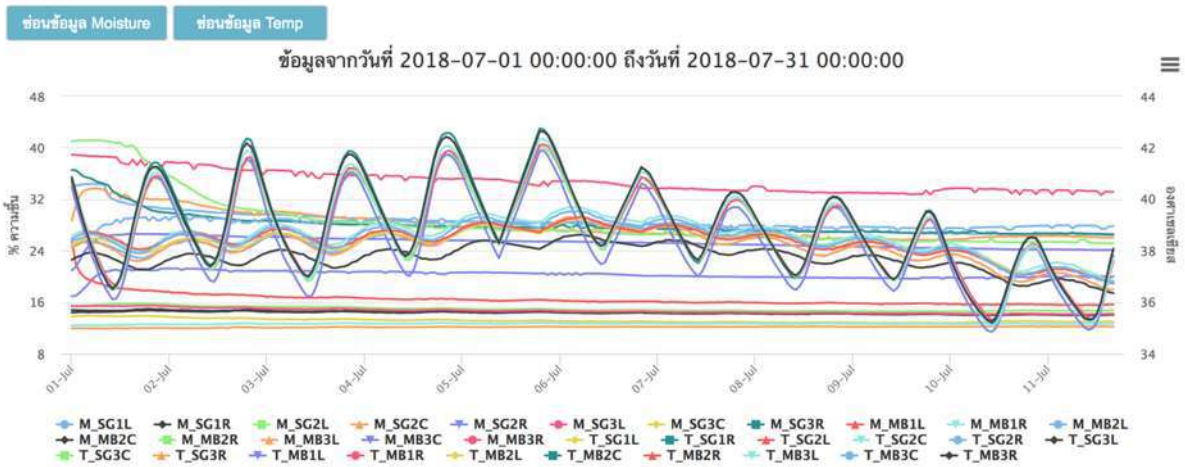


รูปที่ 8.19 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture

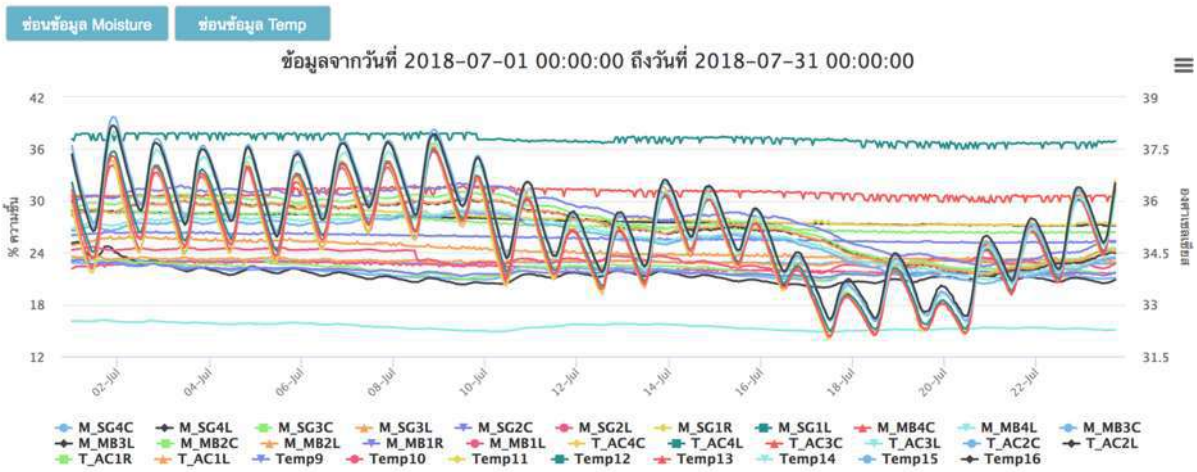
จากนั้นผู้ใช้งานต้องเลือกเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุด โดยเมื่อผู้ใช้งานเลือกเวลาเริ่มต้นระบบจะทำการระบุเวลาสิ้นสุดให้อัตโนมัติโดยเพิ่มเวลาจากเวลาเริ่มต้นไปอีก 1 วัน จากนั้นเมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มแสดงกราฟ ระบบจะแสดงกราฟข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) และ ความชื้น (Moisture Content) ดังแสดงในรูปที่ 8.20 ถึง รูปที่ 8.22



รูปที่ 8.20 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงนครชัยศรี (คอนกรีต)

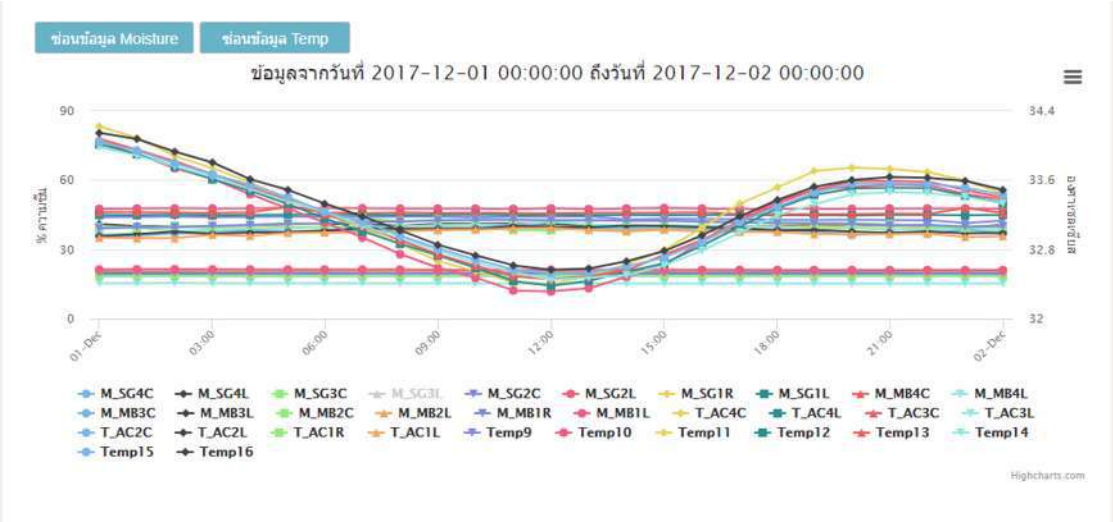


รูปที่ 8.21 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงโพธาราม (ลาดยาง)

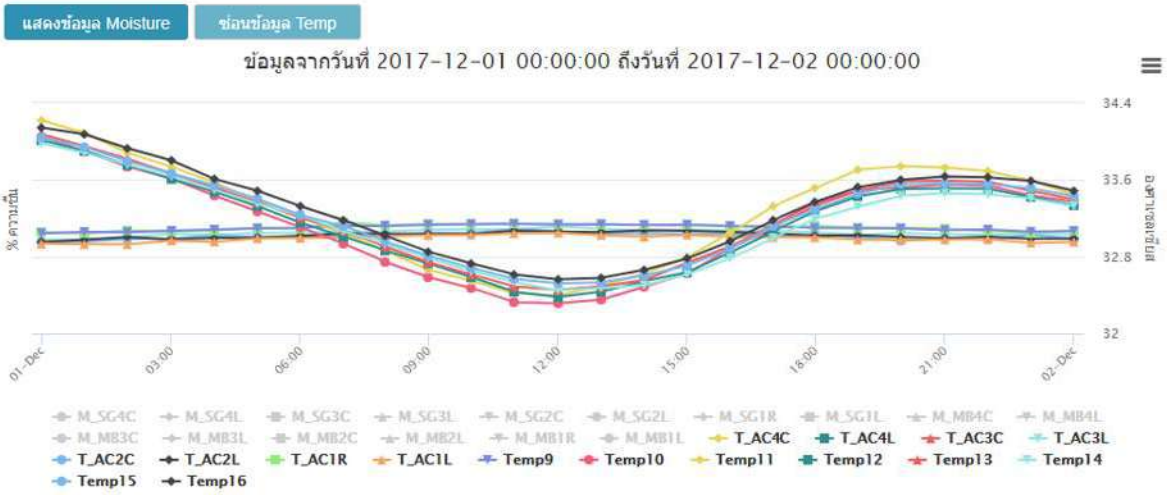


รูปที่ 8.22 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงสรรพยา (ลาดยาง)

ผู้ใช้งานสามารถซ่อนหรือแสดงข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องการเห็นและไม่ต้องการเห็นโดยการกดปุ่มที่ค่าต้องการซ่อนหรือแสดงดังแสดงในรูปที่ 8.23 ถึง รูปที่ 8.24



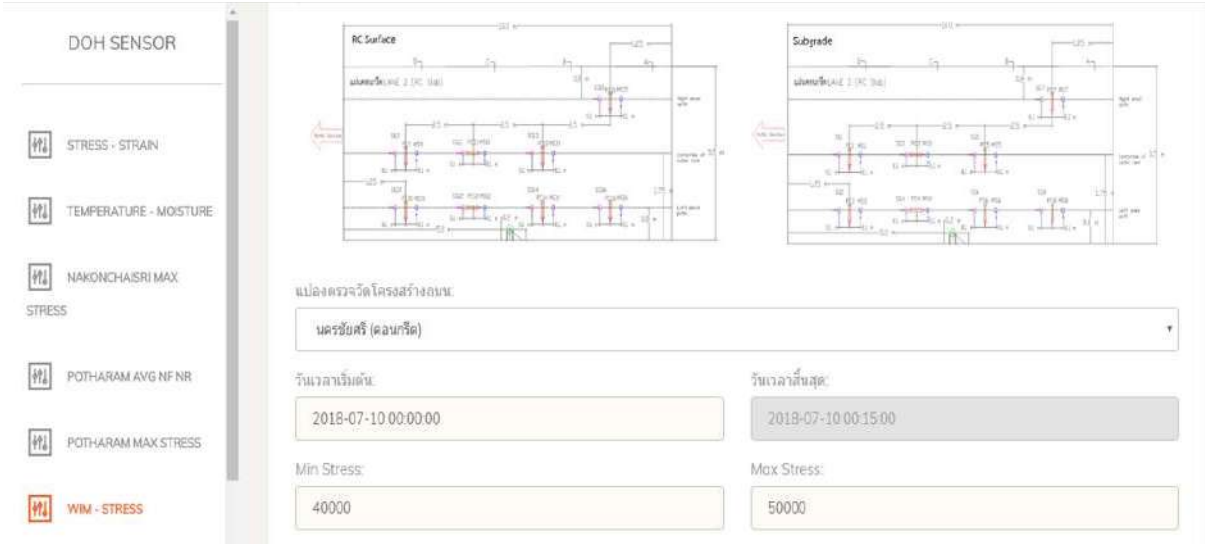
รูปที่ 8.23 การซ่อนข้อมูล Temperature-Moisture ของ M_SG3L



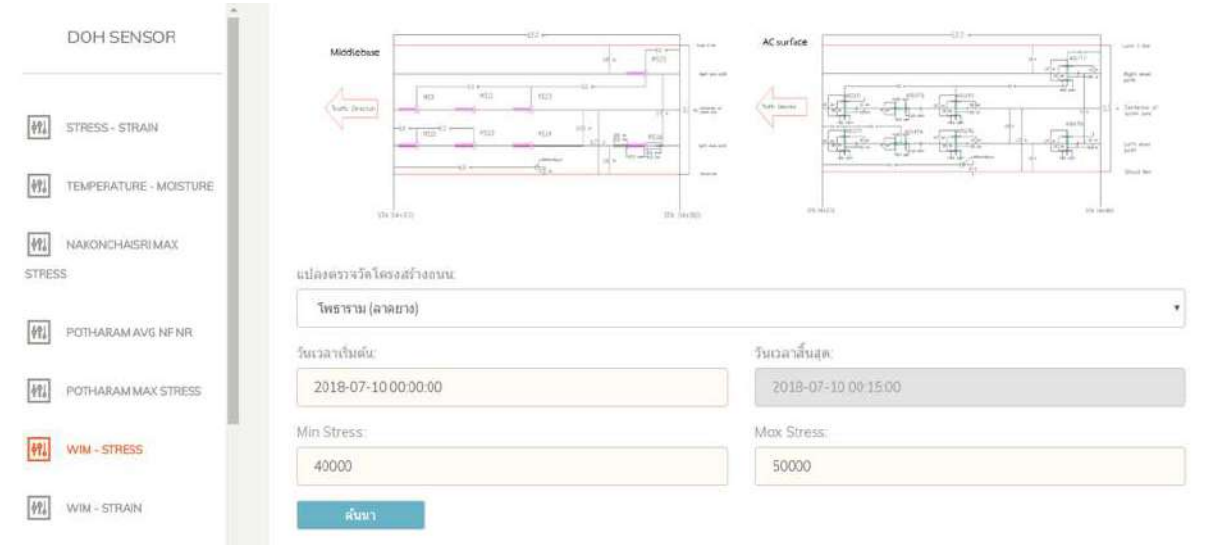
รูปที่ 8.24 การซ่อนข้อมูล Temperature-Moisture

8.4 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเค้น (Stress)

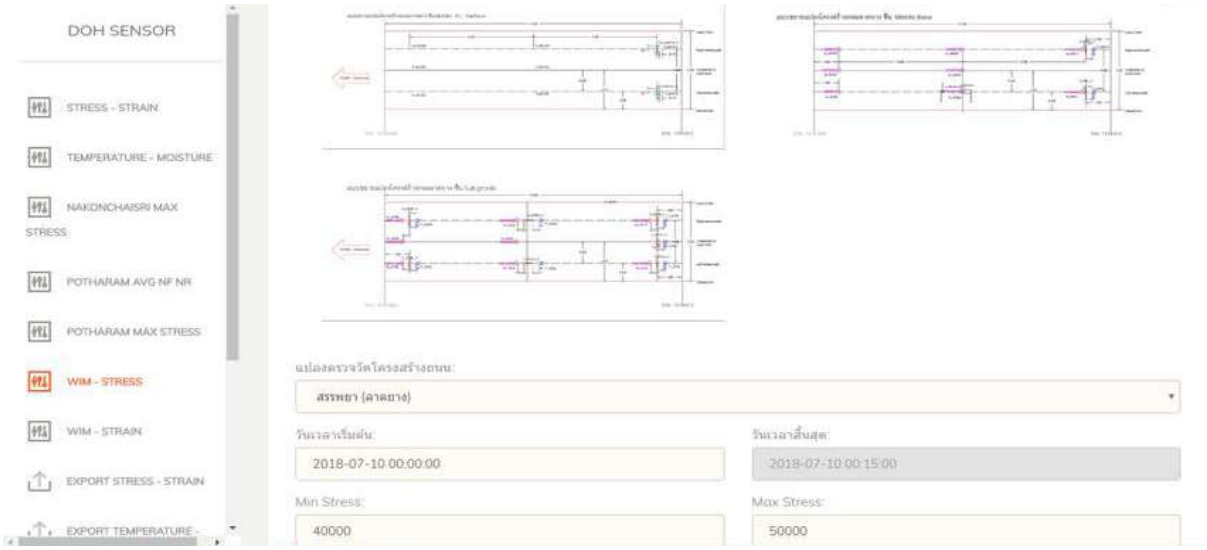
การแสดงข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเค้น (Stress) ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงได้ โดยเมื่อผู้ใช้งานเปลี่ยนตำแหน่งแปลงภาพแผนผังการติดตั้งจะเปลี่ยนตามตำแหน่งแปลงที่เลือก เช่น กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก นครชัยศรี (คอนกรีต) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.25 กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก โพธาราม (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.26 และกรณีที่ผู้ใช้งานเลือก สรรพยา (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.27



รูปที่ 8.25 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress

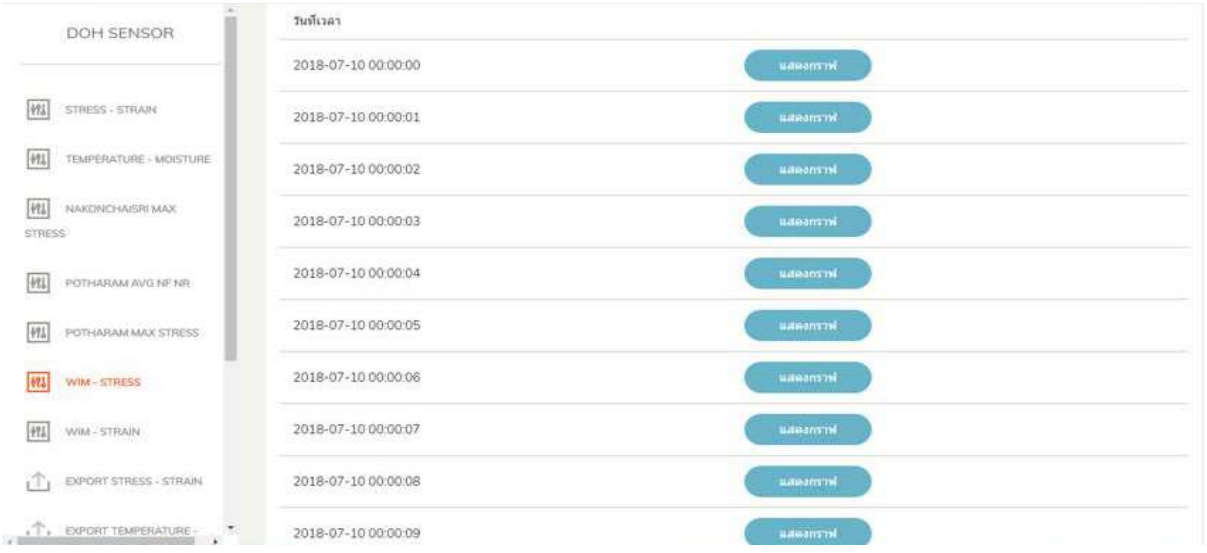


รูปที่ 8.26 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress

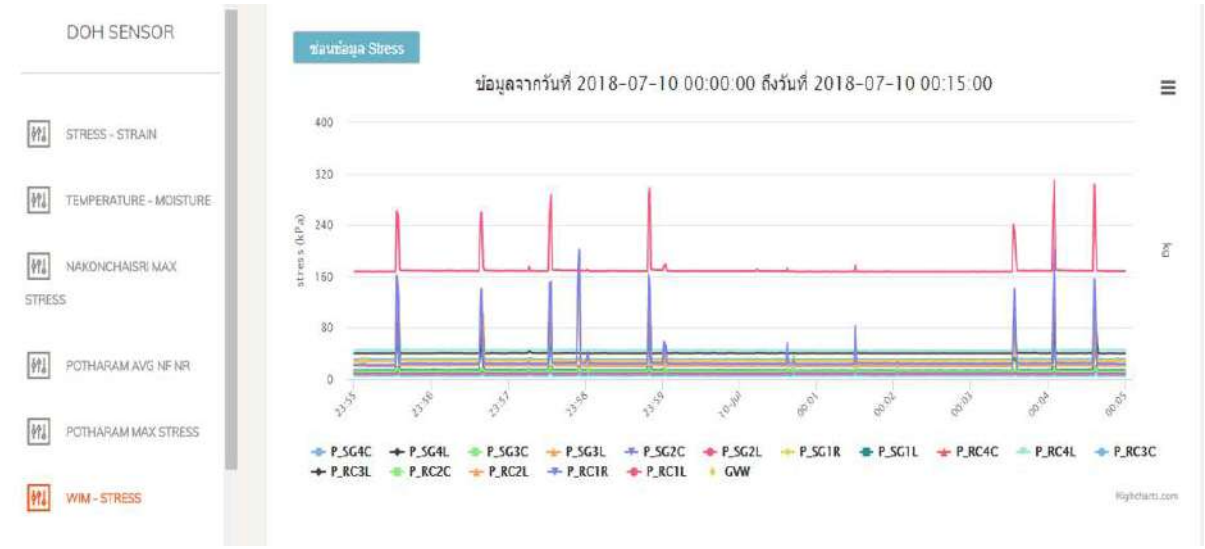


รูปที่ 8.27 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress

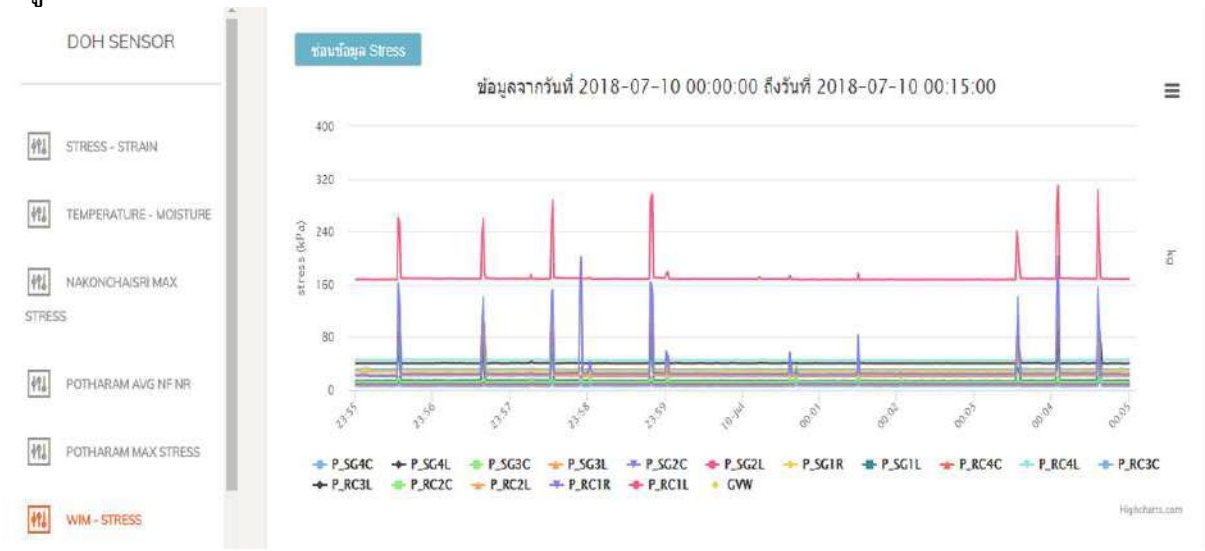
ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลง เวลา ค่าความเค้นต่ำที่สุด (Min Stress) และค่าความเค้นสูงที่สุด (Max Stress) ที่ต้องการดูข้อมูล เมื่อเลือกเวลาเริ่มต้นเวลาสิ้นสุดระบบจะทำการกำหนดเอง โดยการห่างออกจากเวลาเริ่มต้น 15 นาที จากนั้นกดปุ่มค้นหา ระบบจะแสดงข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเค้น (Stress) ที่มีค่าความเค้นต่ำที่สุด (Min Stress) และ ค่าความเค้นสูงที่สุด (Max Stress) และวันเวลาตามที่ผู้ใช้ระบุในช่วงนั้นว่ามีกี่ครั้ง ในแต่ละครั้งผู้ใช้งานสามารถกดปุ่มแสดงกราฟของข้อมูลในเวลาขณะนั้นที่ต้องการดูข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 8.28 โดยเมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มแสดงกราฟแล้วระบบจะทำการแสดงข้อมูล WIM-Stress ดังแสดงใน นอกจากนี้ผู้ใช้งานสามารถซ่อนหรือแสดงข้อมูลบางอย่างหรือทั้งหมดได้ ดังแสดงในรูปที่ 8.29 ถึง รูปที่ 8.33



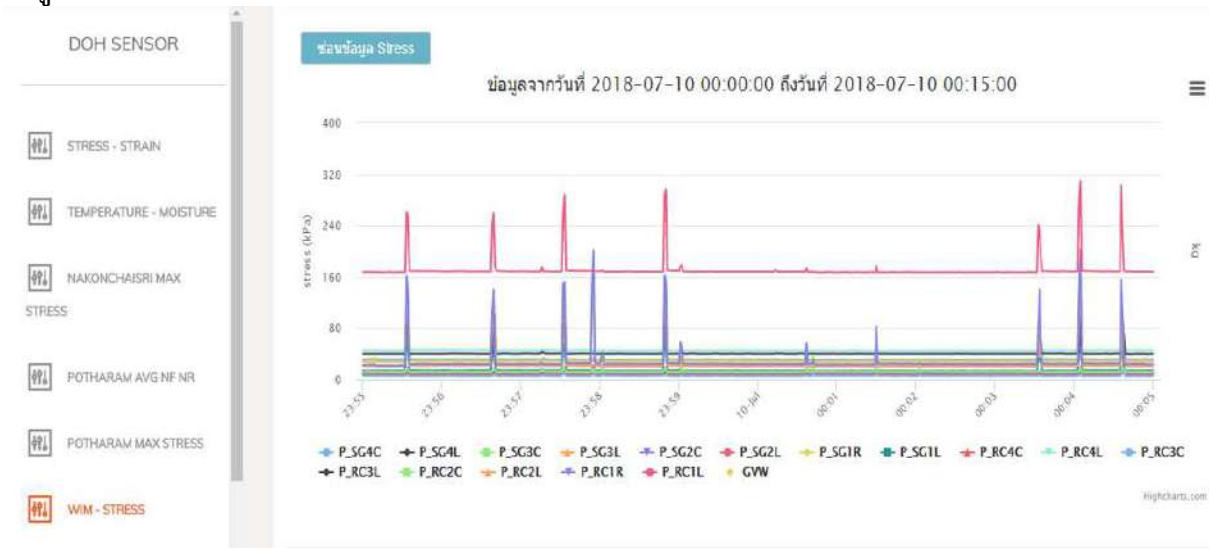
รูปที่ 8.28 ช่วงของข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress ตามที่ผู้ใช้งานเลือก



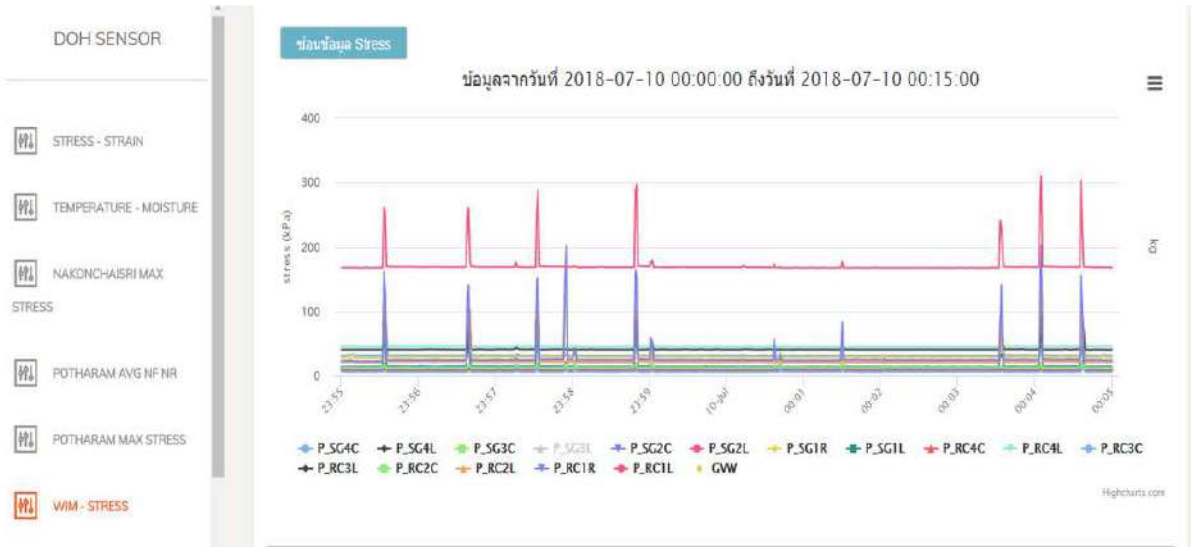
รูปที่ 8.29 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)



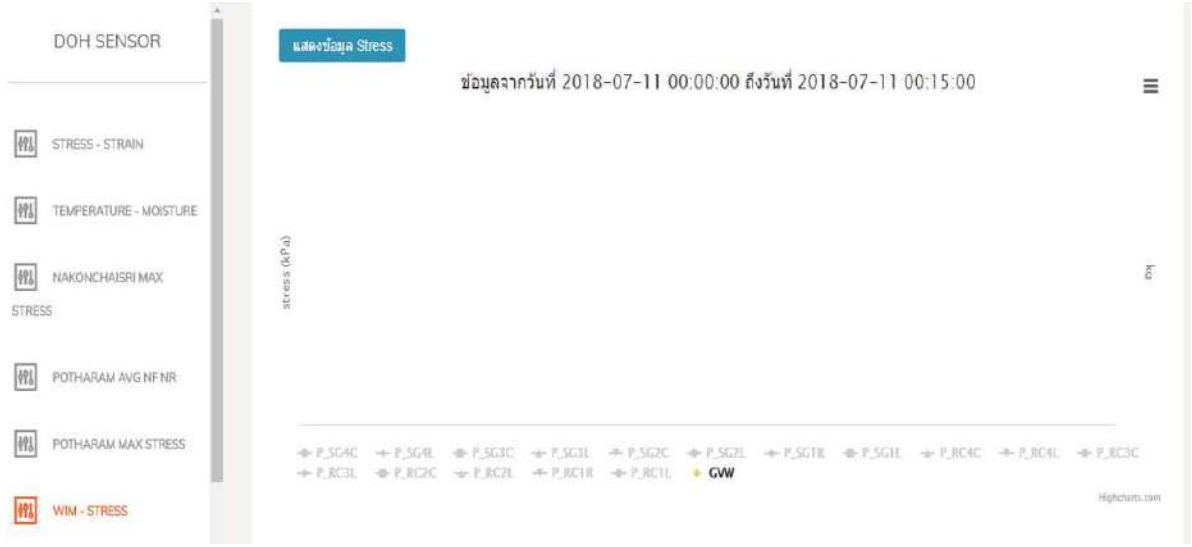
รูปที่ 8.30 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงโพธาราม(ลาดยาง)



รูปที่ 8.31 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงสรรพยา(ลาดยาง)



รูปที่ 8.32 การซ่อนข้อมูล Stess ของ P_SG3L ของกราฟ Traffic and Axle Load Data



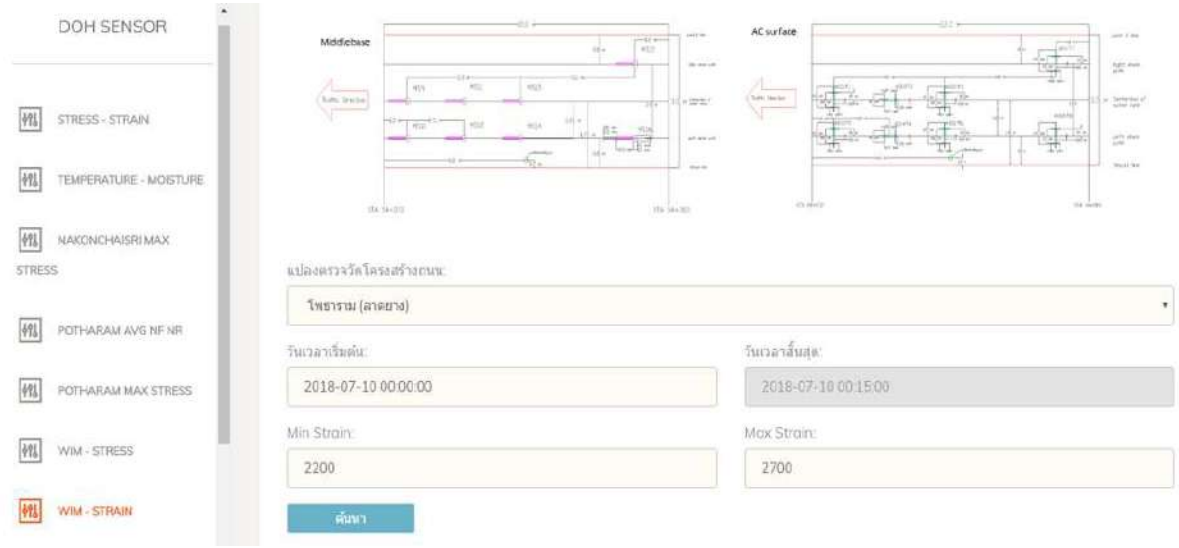
รูปที่ 8.33 การซ่อนข้อมูล Stess ทั้งหมดของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress

8.5 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลา (Traffic and Axle Load Data)และ ความเครียด (Strain)

การแสดงข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเครียด (Strain) ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงได้ โดยเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแปลงภาพแผนผังการติดตั้งจะเปลี่ยนตามตำแหน่งแปลงที่เลือก เช่น กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก นครชัยศรี (คอนกรีต) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.34 กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก โพธาราม (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.35 และกรณีที่ผู้ใช้งานเลือก สรรพยา (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 8.36



รูปที่ 8.34 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain

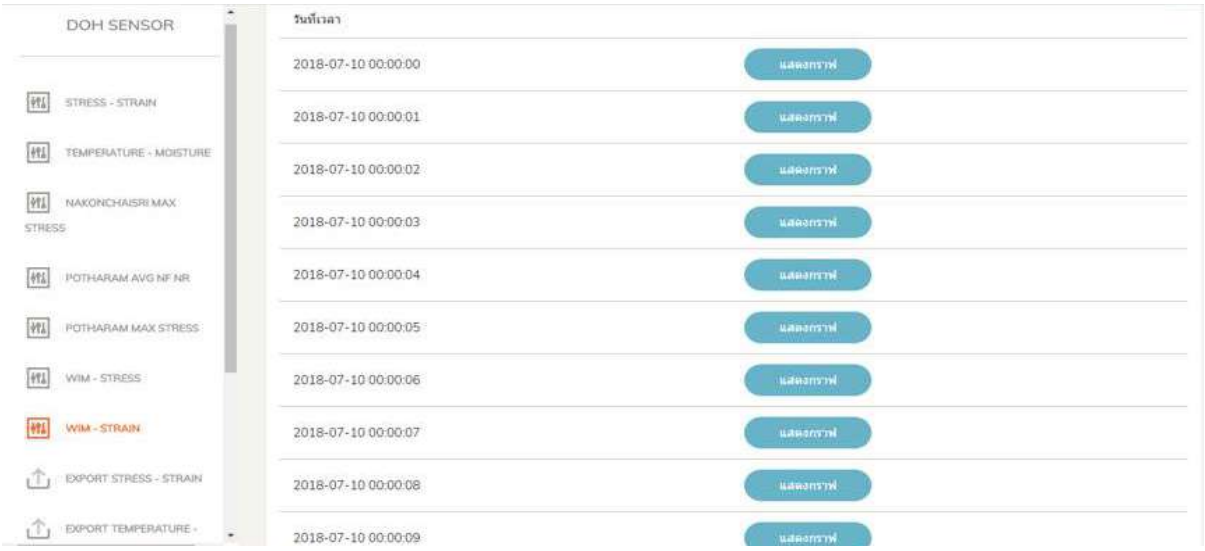


รูปที่ 8.35 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain

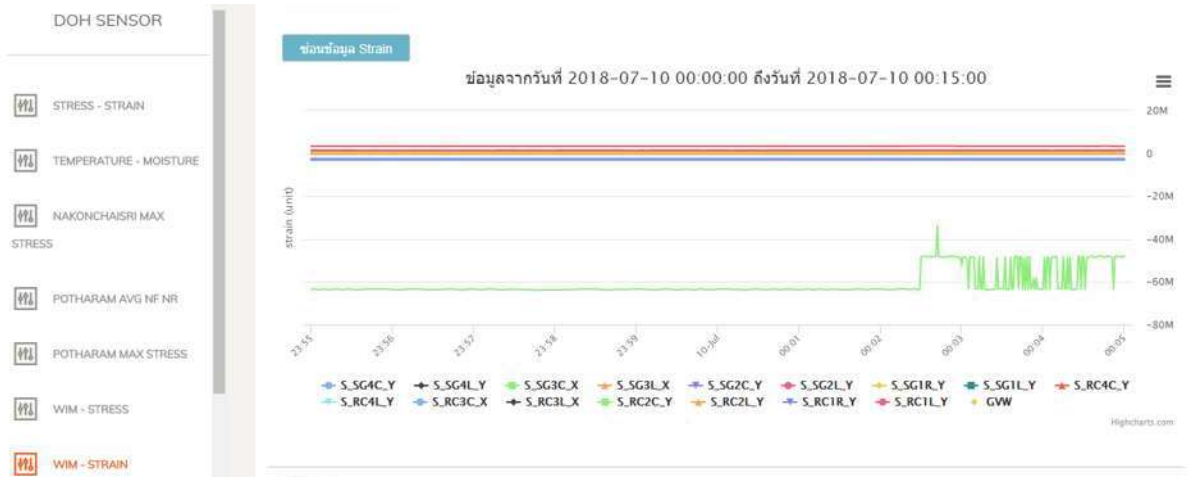


รูปที่ 8.36 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain

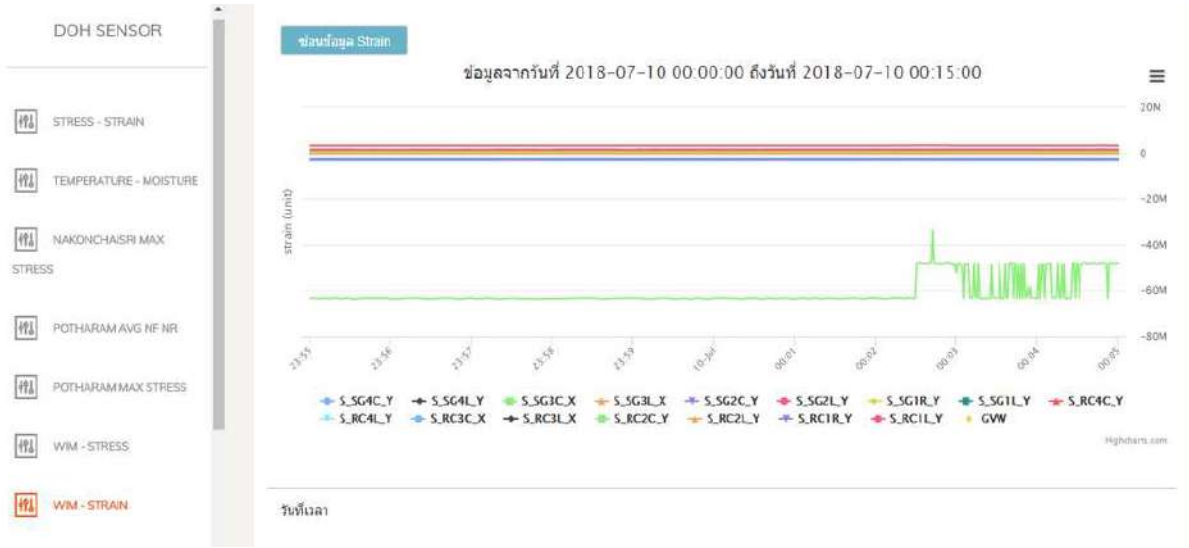
ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลง เวลา ค่าความเครียดต่ำที่สุด (Min Strain) และ ค่าความเครียดสูงที่สุด (Max Strain) ที่ต้องการดูข้อมูล เมื่อเลือกเวลาเริ่มต้นเวลาสิ้นสุดระบบจะทำการกำหนดเอง โดยการห่างออกจากเวลาเริ่มต้น 15 นาที จากนั้นกดปุ่มค้นหา ระบบจะทำการแสดงข้อมูลของน้ำหนักลงเพลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเครียด (Strain) ที่มีค่าความเครียดต่ำที่สุด (Min Strain) และ ค่าความเครียดสูงที่สุด (Max Strain) และวันเวลาตามที่ผู้ใช้ระบุในช่วงนั้นว่ามีกี่ครั้ง ในแต่ละครั้งสามารถกดปุ่มแสดงกราฟของข้อมูลในเวลาขณะนั้นที่ต้องการดูข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 8.37 โดยเมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มแสดงกราฟแล้วระบบจะทำการแสดงข้อมูล WIM-Stress ดังแสดงในรูปที่ 8.38 ถึง รูปที่ 8.40 นอกจากนี้ผู้ใช้งานสามารถซ่อนหรือแสดงข้อมูลบางอย่างหรือทั้งหมดได้ ดังแสดงในรูปที่ 8.41 ถึง รูปที่ 8.42



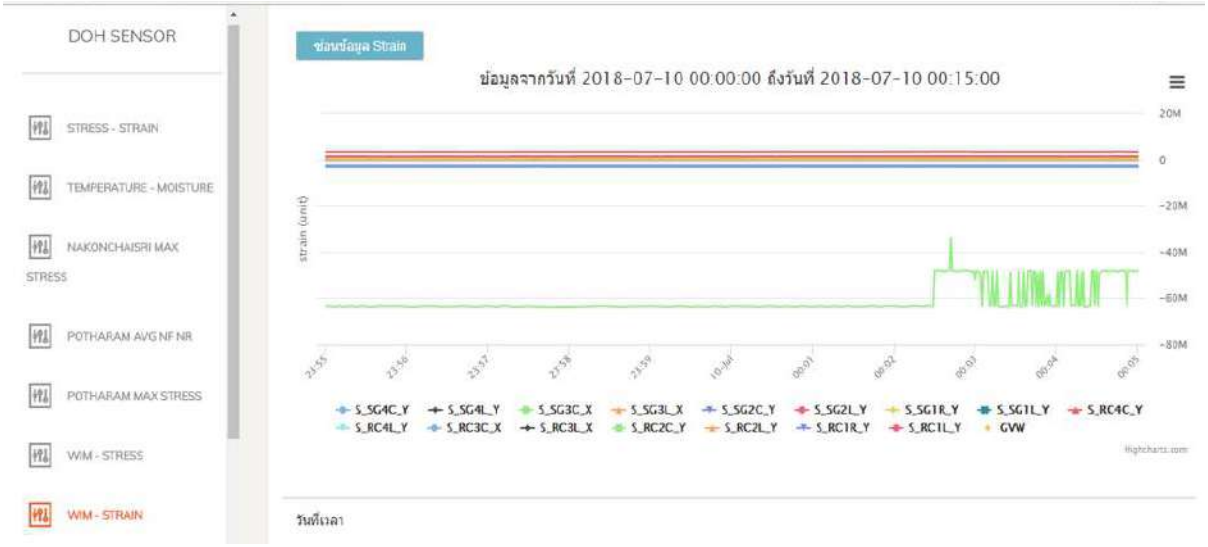
รูปที่ 8.37 ช่วงของข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain ตามที่ผู้ใช้งานเลือก



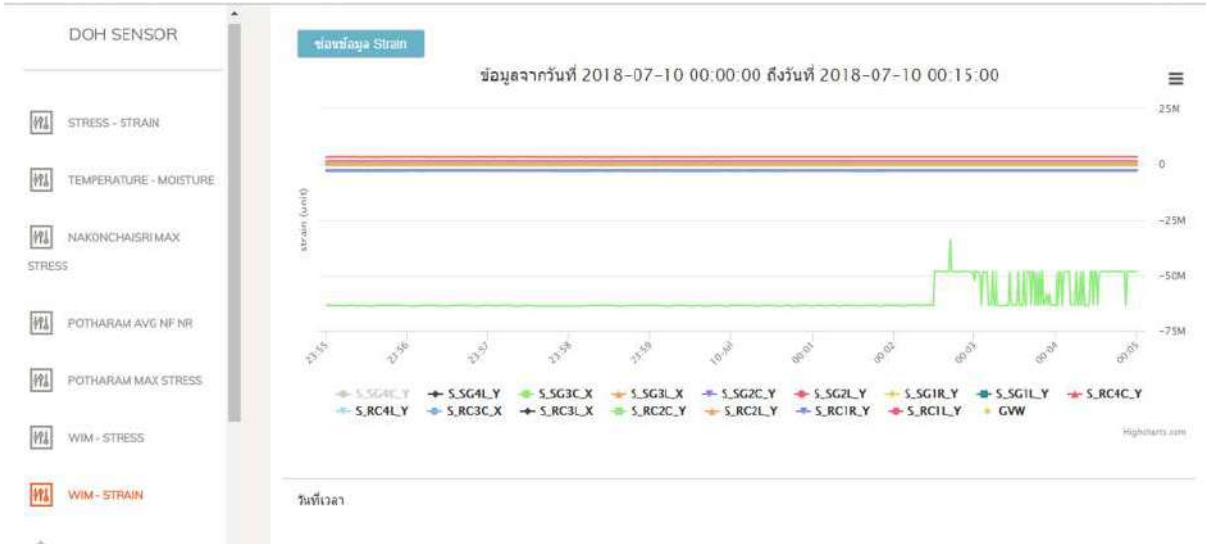
รูปที่ 8.38 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงนครชัยศรี (คอนกรีต)



รูปที่ 8.39 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงโพธาราม(ลาดยาง)



รูปที่ 8.40 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงสรรพยา(ลาดยาง)



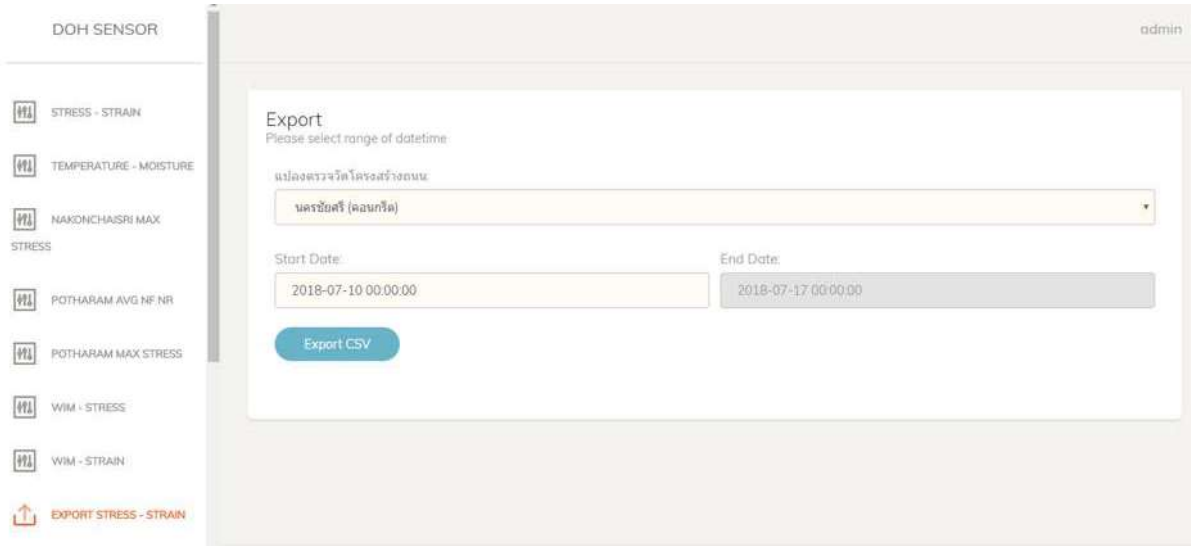
รูปที่ 8.41 การซ่อนข้อมูล Strain ของ S_SG4C_Y ของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain



รูปที่ 8.42 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมดของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain

8.6 การส่งออกข้อมูล (Export Data) ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain)

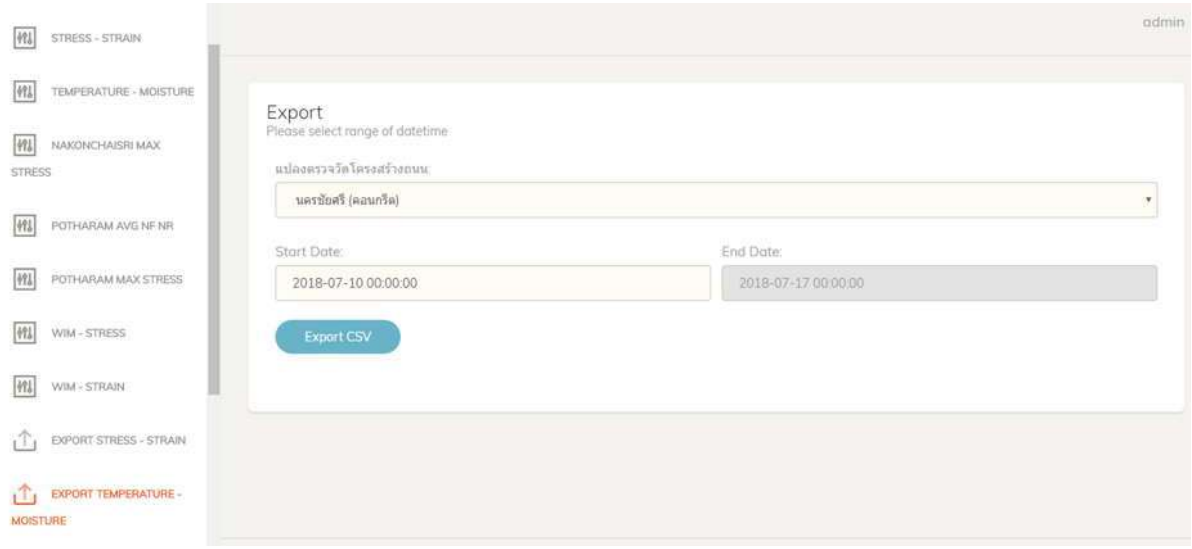
ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงและเวลา จากนั้นกดปุ่ม Export CSV ระบบจะทำการดาวน์โหลดไฟล์ CSV ซึ่งสามารถใช้ Microsoft Excel ในการเปิดได้ ดังแสดงในรูปที่ 8.43



รูปที่ 8.43 การ Export ข้อมูล Stress-Strain

8.7 การส่งออกข้อมูล (Export Data) อุณหภูมิ (Temperature) และ ความชื้น (Moisture Content)

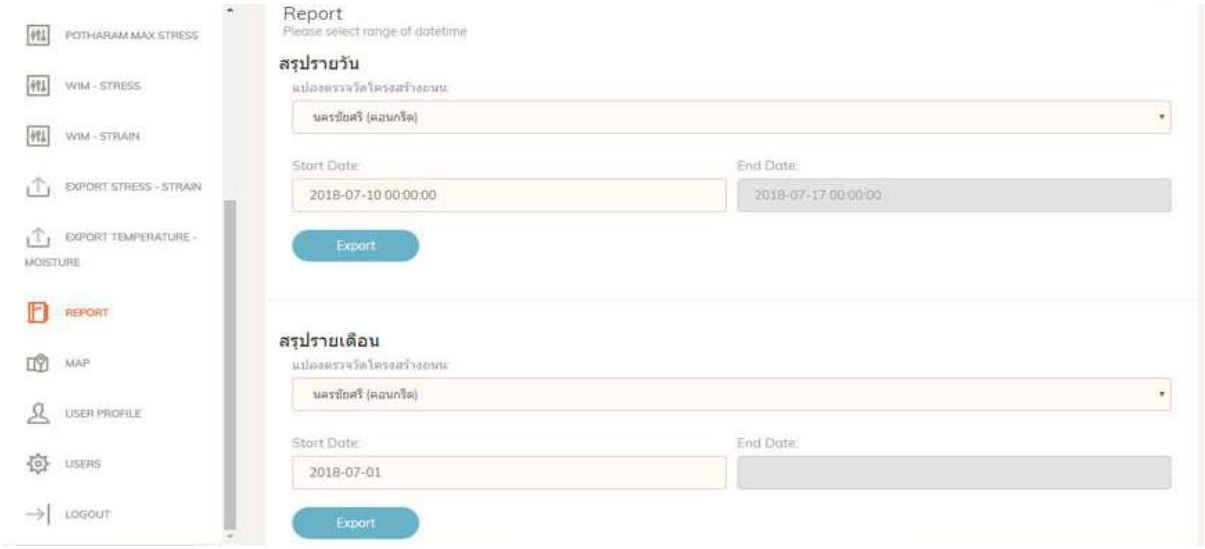
ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงและเวลา จากนั้นกดปุ่ม Export CSV ระบบจะทำการดาวน์โหลดไฟล์ CSV ซึ่งสามารถใช้ Microsoft Excel ในการเปิดได้ ดังแสดงในรูปที่ 8.44



รูปที่ 8.44 การ Export ข้อมูล Temperature-Moisture

8.8 รายงานสรุป (Report)

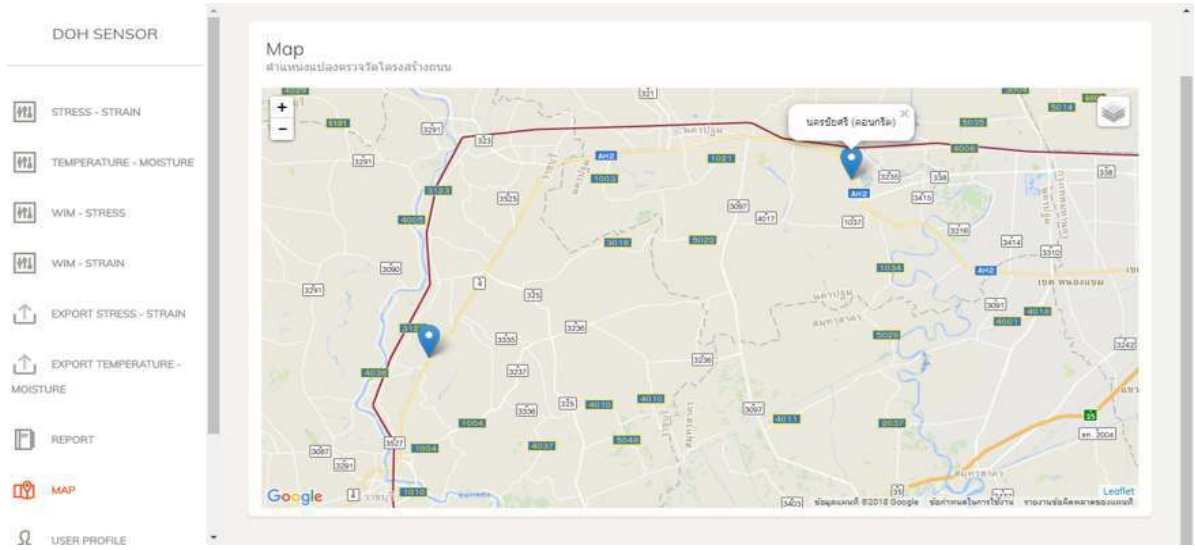
การดูรายงานสรุป (Report) ให้ผู้ใช้งานจะต้องเลือกตำแหน่งแปลงและเวลา โดยผู้ใช้งานสามารถเรียกดูสรุปทั้งแบบรายวันหรือรายเดือนก็ได้ จากนั้นเมื่อผู้ใช้งานกดปุ่ม Export ระบบจะทำการดาวน์โหลดไฟล์ CSV ซึ่งสามารถใช้ Microsoft Excel ในการเปิดได้ ดังแสดงในรูปที่ 8.45



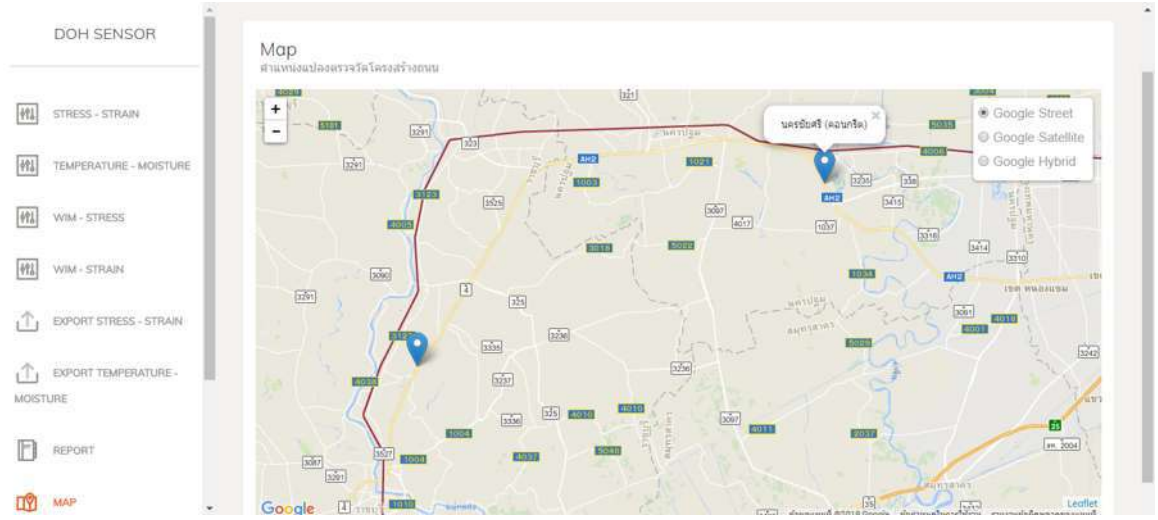
รูปที่ 8.45 รายงานสรุป (Report)

8.9 แผนที่ (Map)

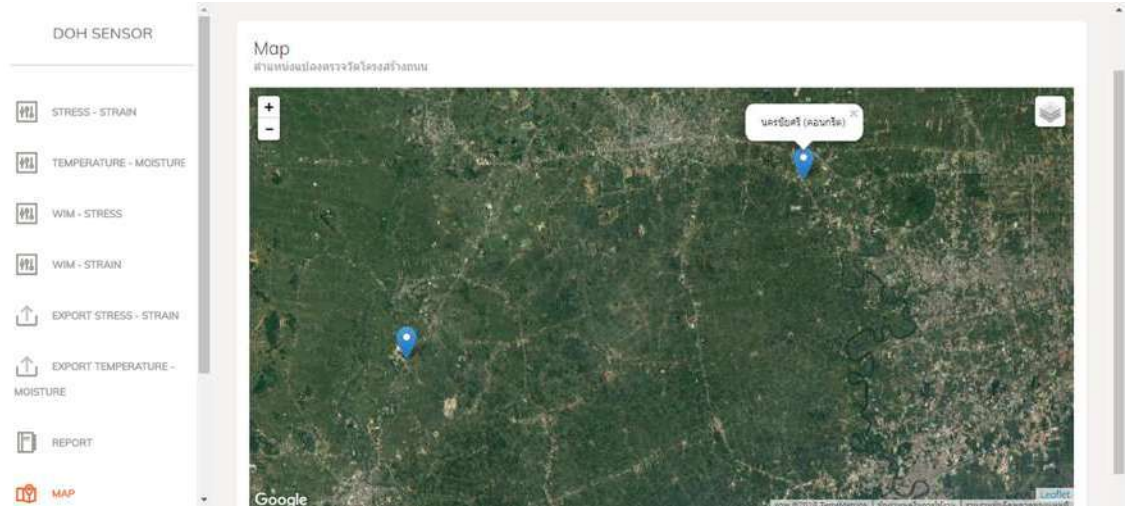
การเปิดแผนที่ (Map) ผู้ใช้งานสามารถเปิดดูตำแหน่งของแต่ละเส้นทางโดยจะโชว์รายละเอียดต่างๆ ได้ที่ Map ดังแสดงในรูปที่ 8.46 โดยผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนพื้นหลังการแสดงได้มีให้เลือก 3 ภาพแบบคือ Google Street และ Google Satellite และ Google Hybrid ดังแสดงในรูปที่ 8.47 ถึง รูปที่ 8.49



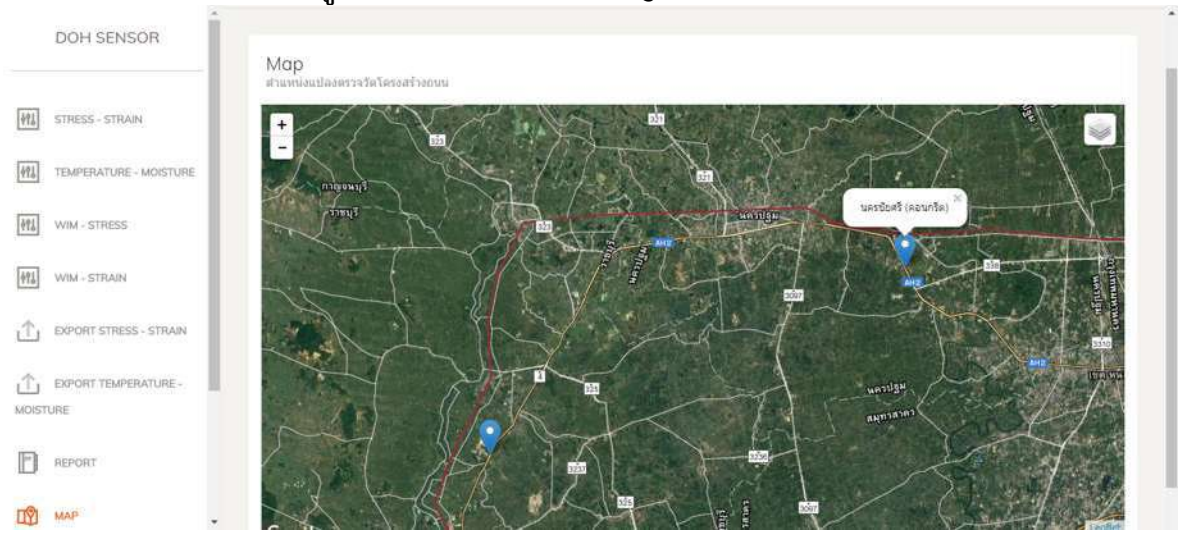
รูปที่ 8.46 แผนที่ (Map)



รูปที่ 8.47 แผนที่แบบ Google Street



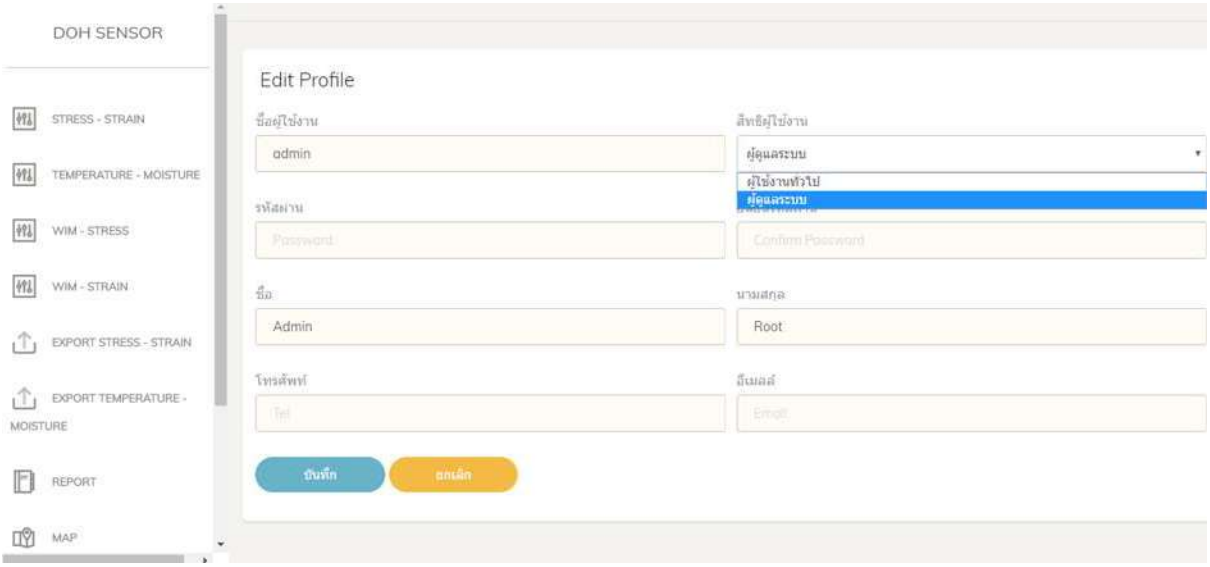
รูปที่ 8.48 แผนที่แบบ Google Satellite



รูปที่ 8.49 แผนที่แบบ Google Hybrid

8.10 ระบบรักษาความปลอดภัยโดยใช้รหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password)

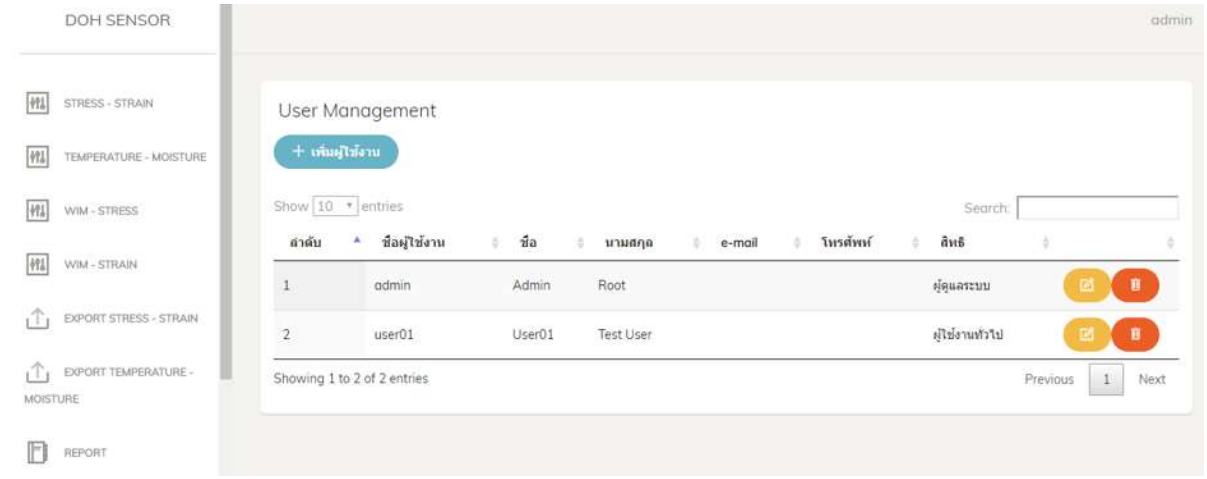
ผู้ใช้งานสามารถสร้างรหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password) เพื่อจำกัดสิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูล โดยผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนรหัสผ่านและข้อมูลส่วนตัวได้ด้วยตนเอง เมื่อแก้ไขแล้วเสร็จผู้ใช้งานต้องกดปุ่มบันทึกดังแสดงในรูปที่ 8.50



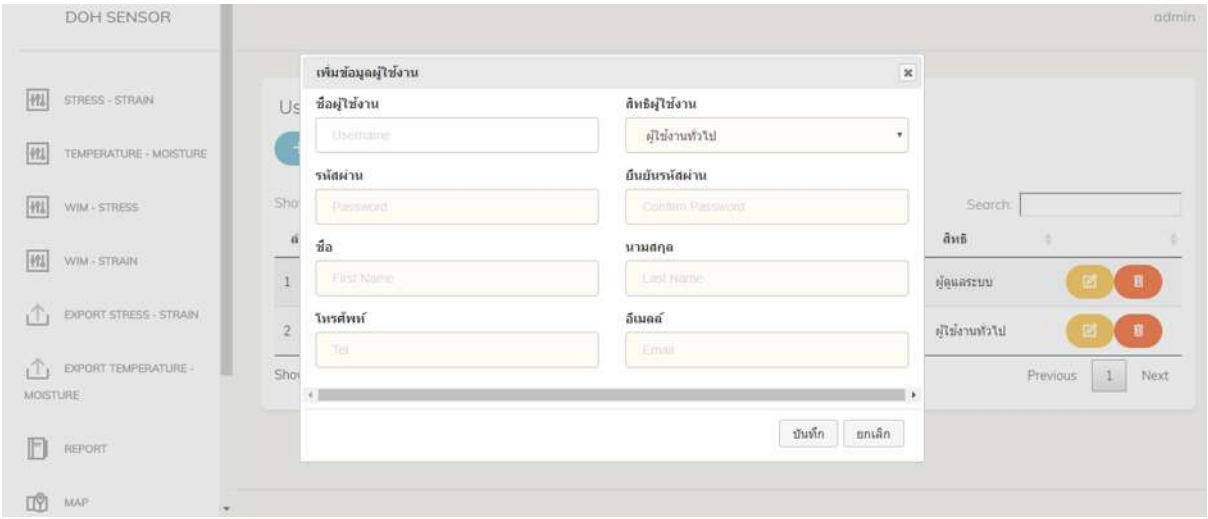
รูปที่ 8.50 ระบบรักษาความปลอดภัยโดยใช้รหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password)

8.11 ระบบบริหารบัญชีผู้ใช้งาน (User Account Management)

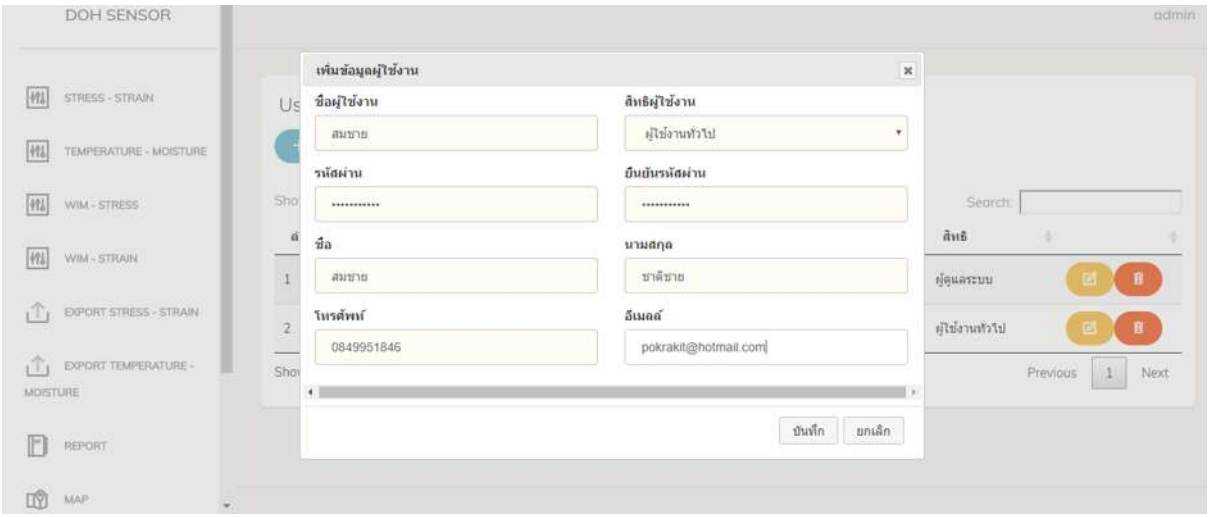
ผู้ใช้งานสามารถจัดการกับข้อมูลสมาชิกได้ เช่น เพิ่มสมาชิก แก้ไขข้อมูลส่วนตัว ลบสมาชิก ดังแสดงในรูปที่ 8.51 เมื่อต้องการเพิ่มผู้ใช้งาน ผู้ใช้งานสามารถกดปุ่มเพิ่มผู้ใช้งาน จากนั้นระบบจะแสดงหน้าต่างขึ้นมาให้กรอกข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 8.52 เมื่อผู้ใช้งานกรอกเสร็จแล้วให้กดปุ่ม บันทึก เป็นอันเสร็จขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 8.53 การเพิ่มผู้ใช้งานดังแสดงใน เมื่อเพิ่มผู้ใช้งานสำเร็จระบบจะมีรายชื่อผู้ใช้งานที่เพิ่มเข้ามาเพิ่มดังแสดงในรูปที่ 8.54 เมื่อต้องการแก้ไขข้อมูลผู้ใช้งานกดปุ่มแก้ไขข้อมูลผู้ใช้งานดังแสดงในรูปที่ 8.55 การลบข้อมูลผู้ใช้งานทำได้โดยการกดปุ่มลบข้อมูลผู้ใช้งาน จากนั้นระบบจะให้กดยืนยันการลบข้อมูลผู้ใช้งานดังแสดงในรูปที่ 8.56



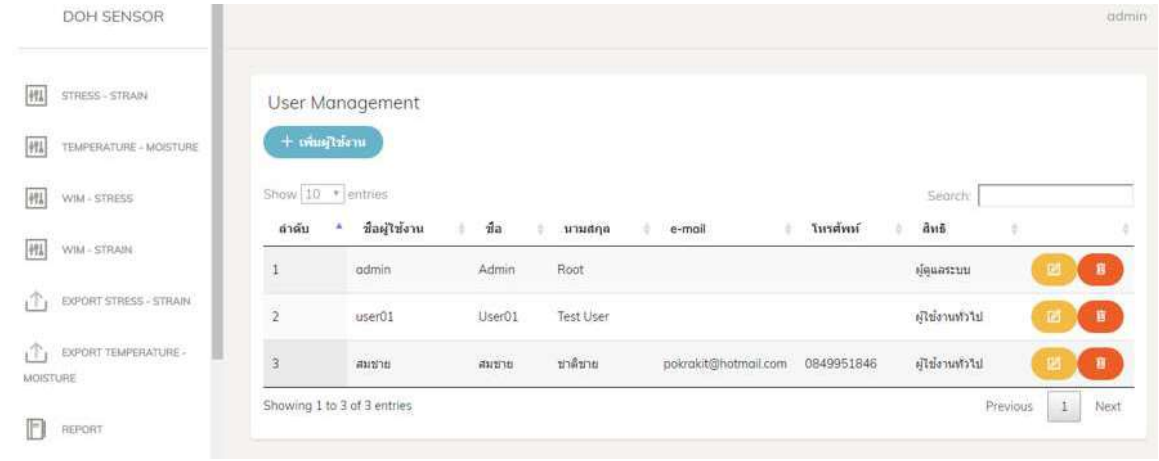
รูปที่ 8.51 User Management



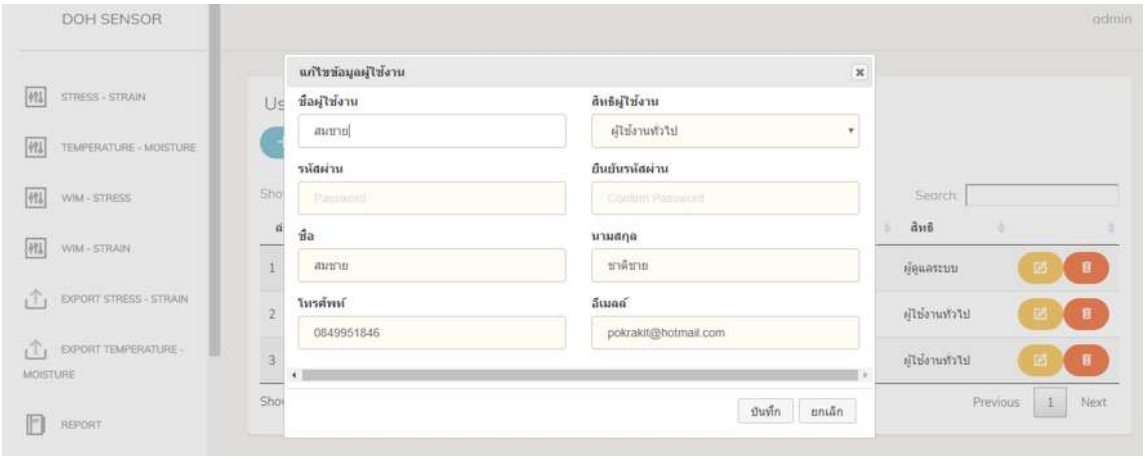
รูปที่ 8.52 เพิ่มผู้ใช้งาน



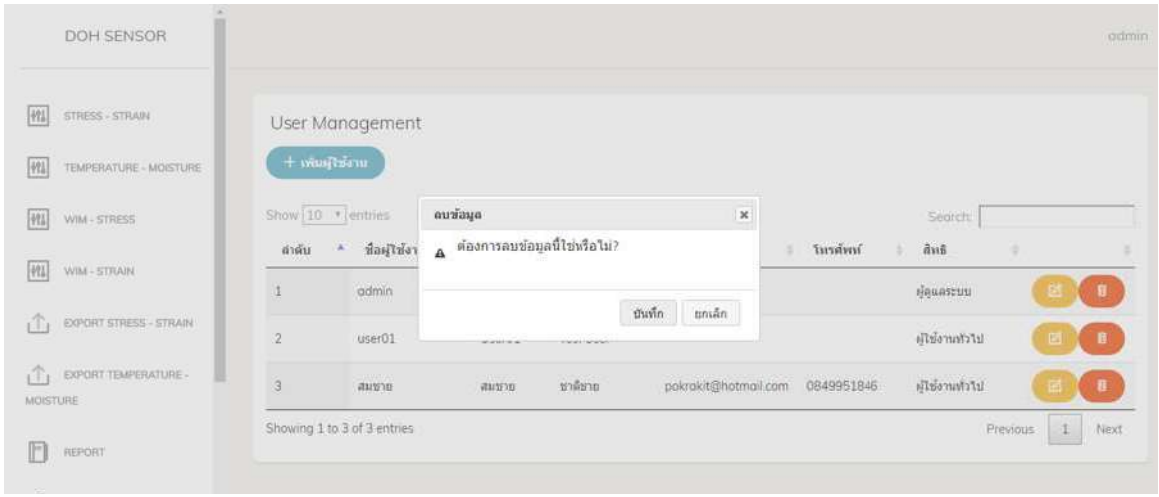
รูปที่ 8.53 กดปุ่มบันทึกเพื่อเพิ่มผู้ใช้งาน



รูปที่ 8.54 รายชื่อผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 8.55 การแก้ไขผู้ใช้งาน



รูปที่ 8.56 ข้อมูลผู้ใช้งานถูกลบ

9. การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance Model)

ปรึกษาได้ดำเนินการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองแสดงพฤติกรรมโครงสร้างถนนของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนน (Pavement Model) ซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จ จำนวน 2 แปลงในระยะที่หนึ่ง และที่ติดตั้งเพิ่มเติม จำนวน 1 แปลง รวมจำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง โดยแบบจำลองสามารถทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance Model) ภายใต้สภาพการใช้งาน เงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

9.1 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนนกับทฤษฎีหรือโปรแกรม

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากภาคสนามกับผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นทางภาคทฤษฎี เพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของเครื่องมือตรวจวัดที่ได้ดำเนินการติดตั้งไว้ใต้โครงสร้างชั้น และเพื่อที่จะเข้าใจถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของชั้นทางภายใต้แรงกระทำอันจะส่งผลให้การออกแบบ การประเมินสภาพและการทำนายอายุทางหลวงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

9.1.1 กรณีศึกษาเบื้องต้น

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบครั้งนี้นั้นได้จากการทดสอบในสนามโดยการวิ่งทดสอบของรถบรรทุก 6 ล้อ และรถบรรทุกกึ่งพ่วง 22 ล้อ อันนำมาซึ่งข้อมูลค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกดทับจากเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว เพลาเดี่ยว-ล้อคู่ เพลาคู่-ล้อคู่ และสามเพลา-ล้อคู่ที่น้ำหนักบรรทุกแตกต่างกัน โดยในการเปรียบเทียบนั้นจะใช้ข้อมูลตรวจวัดในกรณีรถหยุดนิ่งซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 รายละเอียดการทดสอบในสนาม

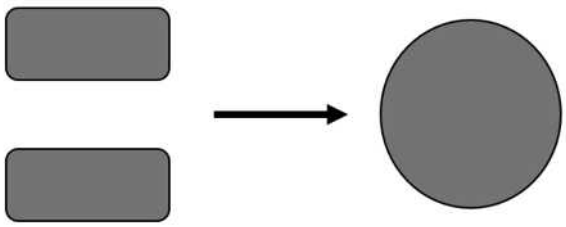
ประเภทรถบรรทุก	ประเภทเพลาทดสอบ	น้ำหนักบรรทุก	ความเร็ว (กม./ชม.)	แรงดันลมยาง
รถบรรทุก 6 ล้อ	เพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว เพลาเดี่ยว-ล้อคู่	4 ตัน 11 ตัน	หยุดนิ่ง, 20, 60 หยุดนิ่ง, 20, 60	120 ปอนด์/ตร.นิ้ว 120 ปอนด์/ตร.นิ้ว
รถกึ่งพ่วง 22 ล้อ	เพลาคู่-ล้อคู่ สามเพลา-ล้อคู่	10 ตัน 8.5 ตัน	หยุดนิ่ง, 20, 60 หยุดนิ่ง, 20, 60	130 ปอนด์/ตร.นิ้ว 130 ปอนด์/ตร.นิ้ว

ส่วนทฤษฎีที่นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเบื้องต้นนี้ประกอบไปด้วย

1. Boussinesq's Theory
2. Odemark's Method of Equivalent Thickness
3. Burmister's Multilayer (Three-Layer) System
4. Linear Elastic Analysis (LEA) Model
5. Finite Element Analysis (FEA)

9.1.2 สมมติฐานและคุณสมบัติวัสดุ

ค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นโครงสร้างทางนั้นเป็นผลเนื่องจากทั้งแรงกระทำที่เกิดขึ้นและคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาก่อสร้างชั้นทางแต่ละชั้น ในการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตมีการวิเคราะห์แรงกระทำเนื่องจากล้อรถในรูปแบบที่หลากหลายทั้งเป็นรูปวงรีหรือวงกลมที่มีจำนวนวงเท่ากับจำนวนล้อรถที่กดทับลงบนชั้นทางนั้น โดยในการวิเคราะห์ศึกษานี้ได้กำหนดให้ลักษณะการกระจายของแรงกระทำจากล้อรถลงสู่ชั้นทางเป็นรูปวงกลม 1 วง แทนจำนวนล้อรถ 2 ล้อ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9.1 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ อย่างไรก็ตามที่ปรึกษาได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี LEA Model ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำลงตามตำแหน่งล้อรถจริงด้วยเช่นกัน ส่วนการวิเคราะห์โดยวิธี Finite Element นั้นใช้การวิเคราะห์แบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่จำลองสภาพได้เหมือนสภาวะแวดล้อมและแรงกระทำต่างๆ ได้อย่างเสมือนจริงที่สุด



รูปที่ 9.1 ลักษณะการกระจายแรงรูปวงกลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลนี้

คุณสมบัติวัสดุชั้นทางที่นำมาวิเคราะห์นั้นประกอบไปด้วยค่าอีลาสติคโมดูลัส (Elastic Modulus, E) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากการทดสอบ Falling Weight Deflectometer โดยสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบกรมทางหลวง ค่าความหนาของชั้นโครงสร้างทาง (Thickness, h) และรวมถึงค่าความหนาเทียบเท่า (Equivalent Thickness, H_e) ในกรณีที่ทำการแปลงชั้นโครงสร้างทางหลายชั้นให้กลายเป็นโครงสร้างทางชั้นเดียวโดยวิธีการวิเคราะห์ของ Odemark โดยคุณสมบัติวัสดุชั้นทางสำหรับการคำนวณทางทฤษฎีดังแสดงในตารางที่ 9.2

ตารางที่ 9.2 คุณสมบัติวัสดุชั้นทางสำหรับการคำนวณทางทฤษฎี

ลำดับที่	ประเภท	ความหนา, h (cm)	Back Calculated Modulus from FWD (MPa)	Poisson's Ratio
1	Asphalt	20	1745	0.35
2	Base	20	170	0.35
3	Subbase	20	249	0.35
4	Subgrade	-	163	0.40

9.1.3 การเปรียบเทียบข้อมูลภาคสนามและการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้น้ำหนักบรรทุกจริง

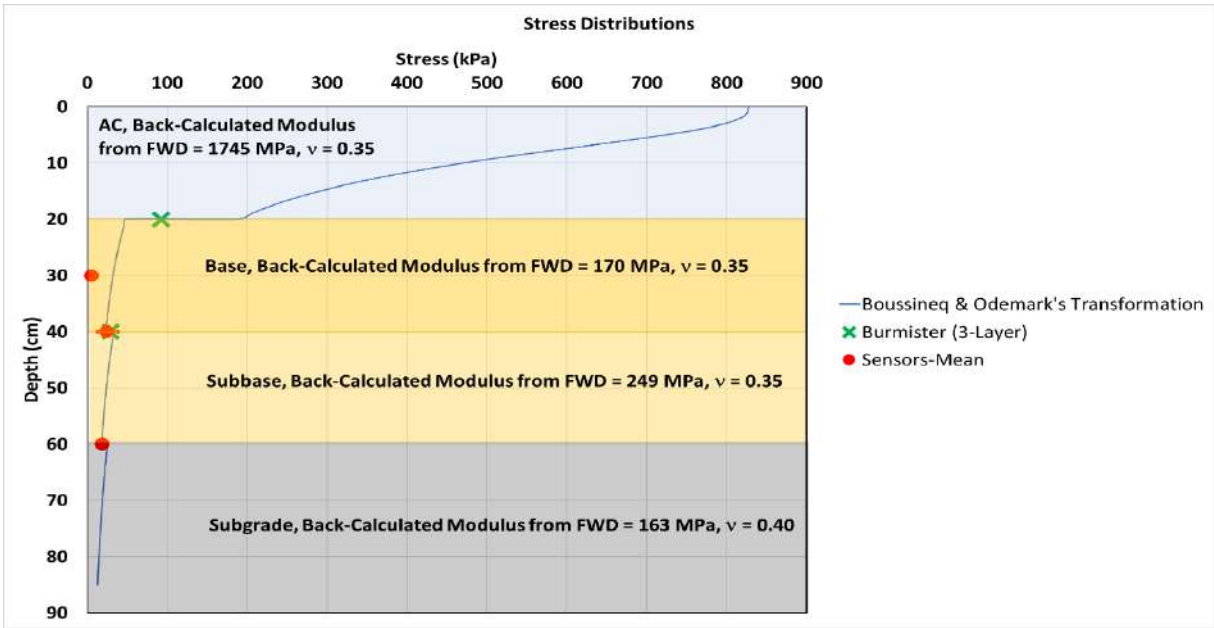
ที่ปรึกษาได้ทำการศึกษาถึงค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำจากรถบรรทุกโดยใช้การวิ่งทดสอบด้วยรถบรรทุก 6 ล้อ และรถกึ่งพ่วง 22 ล้อ เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของชั้นโครงสร้าง

ทางที่จะเกิดขึ้นและทราบถึงผลกระทบจากปัจจัยต่างๆในสภาพแวดล้อมใช้งานจริง โดยในการทดสอบนั้นได้ดำเนินการให้รถบรรทุกวิ่งเข้ามาจอดทับที่ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (ด้วยลักษณะเพลาที่แตกต่างกัน) และจอดค้างไว้ประมาณ 20-30 วินาที จากนั้นจึงนำรถออกจากแปลงทดสอบ เมื่อดำเนินการทดสอบในสนามแล้วเสร็จจึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความเค้นและความเครียดที่ตรวจวัดในสนามกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีต่อไป

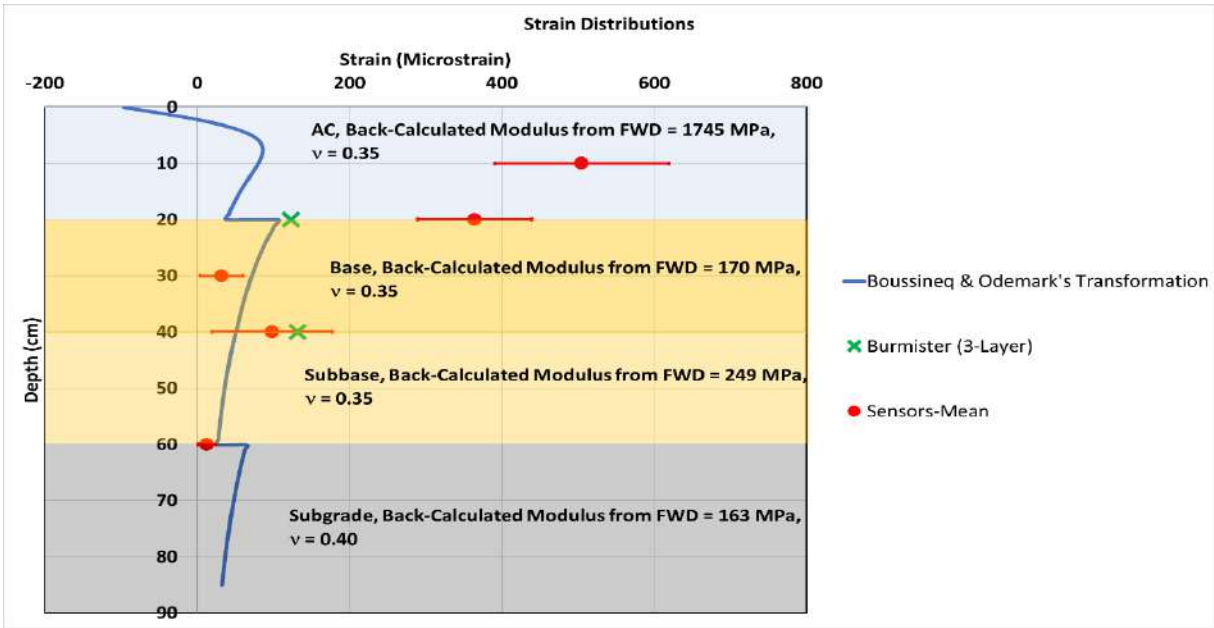
ทั้งนี้รูปที่ 9.2 ถึง รูปที่ 9.13 แสดงตัวอย่างการกระจายความเค้นในแนวดิ่งและความเครียดทั้งในแนวตั้งฉากและในแนวขนานกับทิศทางจราจรที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายลงเพลาประเภทต่างๆ ทั้งเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว เพลาเดี่ยว-ล้อคู่ เพลาคู่-ล้อคู่ และสามเพลา-ล้อคู่ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเค้นและความเครียดที่ตรวจวัดได้กับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของ Boussinesq and Odemark พบว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งในตำแหน่งใต้ชั้นพื้นทางและชั้นดินเดิมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎีซึ่งมีความแตกต่างกันสูงสุดเพียง 7 kPa เท่านั้นอย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบที่ตำแหน่งกึ่งกลางชั้นพื้นทางพบว่าค่าความแตกต่างนั้นเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 26-64 kPa ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าความเค้นที่ตรวจวัดได้จากตำแหน่งกึ่งกลางชั้นพื้นทางนั้นมีค่าต่ำกว่าที่คำนวณได้และยังนับว่ามีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นที่ตรวจวัดได้จากตำแหน่งใต้ชั้นพื้นทางเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเค้นในแนวดิ่งบริเวณส่วนบนของชั้นดินเดิมพบว่าความแตกต่างนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วงประมาณ 4-12 kPa เท่านั้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับทฤษฎีของ Burmister (3-Layer) พบว่าค่าความแตกต่างของความเค้นในแนวดิ่งบริเวณตำแหน่งใต้ชั้นพื้นทางมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 5-17 kPa ซึ่งนับว่าใกล้เคียงกับค่าเปรียบเทียบจากทฤษฎีของ Boussinesq and Odemark เป็นอย่างมาก

ในส่วนของค่าความเครียดในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรนั้นพบว่าค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้บริเวณตำแหน่งใต้ชั้นพื้นทางมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีของ Boussinesq and Odemark เช่นกัน โดยความแตกต่างมีค่าตั้งแต่ 45-82 microstrain ส่วนในตำแหน่งกึ่งกลางชั้นพื้นทางและตำแหน่งชั้นดินเดิมนั้นมีค่าความแตกต่างมากขึ้นมาอยู่ในช่วง 39-235 และ 47-133 microstrain ตามลำดับ โดยผลการเปรียบเทียบยังพบว่าค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้บริเวณชั้นผิวทางนั้นมีค่าแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้ค่อนข้างมากในระดับหลักร้อย microstrain ซึ่งพบว่าค่าความเครียดที่วัดได้ในสนามในกรณีเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยวนั้นมีลักษณะเป็น Tensile Strain ส่วนในกรณีล้อคู่ (ทั้งเพลาเดี่ยว เพลาคู่ และสามเพลา) นั้นมีลักษณะเป็น Compressive Strain อนึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับทฤษฎีของ Burmister พบว่าค่าความแตกต่างของความเครียดบริเวณตำแหน่งใต้ชั้นผิวทางและใต้ชั้นพื้นทางมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 241-576 และ 33-261 microstrain ตามลำดับ โดยพบว่าค่าความเครียดใต้ชั้นพื้นทางที่คำนวณได้จากทฤษฎีนี้มีค่าสูงกว่าที่คำนวณจากทฤษฎีของ Boussinesq and Odemark พอสมควร

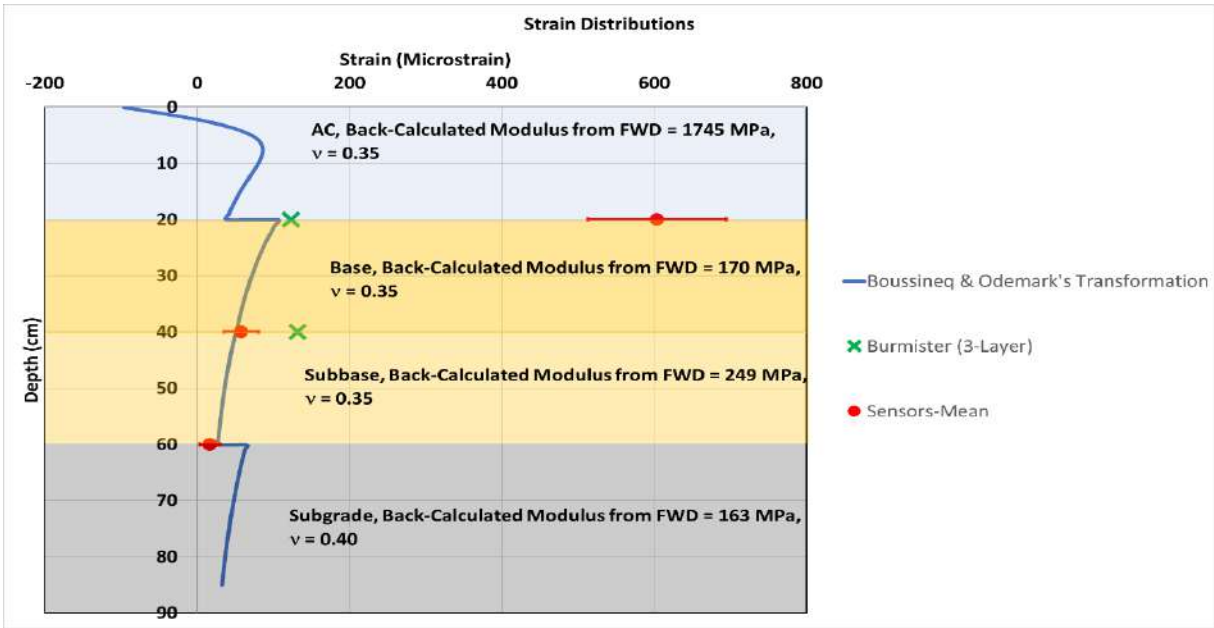
ในส่วนของค่าความเครียดในแนวขนานกับทิศทางจราจรนั้นพบว่าค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้บริเวณตำแหน่งใต้ชั้นพื้นทางมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎีเช่นกัน โดยความแตกต่างมีค่าตั้งแต่ 4-24 microstrain ส่วนในตำแหน่งกึ่งกลางชั้นพื้นทางในทิศทางนี้นั้นไม่มีผลตรวจวัดจากเครื่องมือตรวจวัด ในขณะที่ตำแหน่งชั้นดินเดิมนั้นมีค่าความแตกต่างมากขึ้นมาอยู่ในช่วง 43-119 microstrain โดยผลการเปรียบเทียบยังพบว่าค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้บริเวณชั้นผิวทางนั้นมีค่าแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้ค่อนข้างมากในระดับหลักร้อย microstrain เช่นเดียวกับการเปรียบเทียบในแนวตั้งฉาก อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความเครียดที่วัดได้ในสนามในทุกกรณีนั้นมีลักษณะเป็น Tensile Strain ซึ่งแตกต่างจากที่พบเจอในแนวตั้งฉากที่ตรวจพบเจอ Tensil Strain เฉพาะในรูปแบบเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยวเท่านั้น (รูปแบบอื่นในแนวตั้งฉากตรวจวัดได้เป็น Compressive Strain ทั้งสิ้น) ซึ่งพฤติกรรมที่แตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากตำแหน่งล้อที่กดทับบน Strain Gage ดังอธิบายไว้ในย่อหน้าถัดไป ในขณะที่เมื่อทำการเปรียบเปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับทฤษฎีของ Burmister พบว่าค่าความแตกต่างของความเครียดบริเวณตำแหน่งใต้ชั้นผิวทางและใต้ชั้นพื้นทางมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 78-490 และ 78-190 microstrain ตามลำดับ



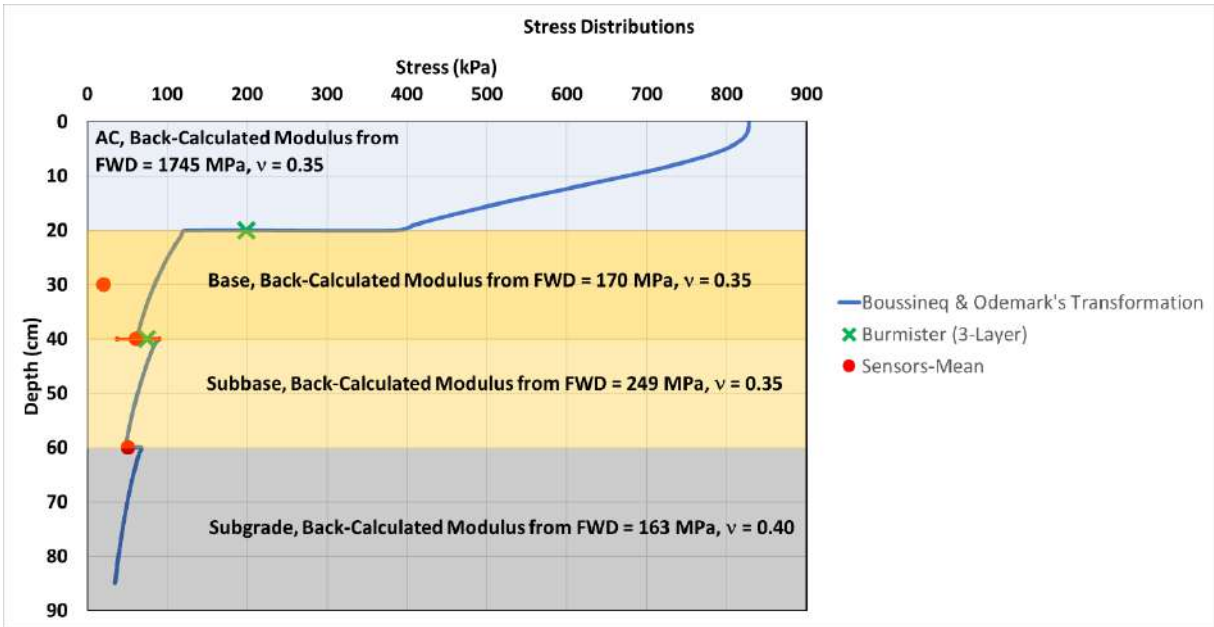
รูปที่ 9.2 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยว น้ำหนักเพลา 4 ตัน



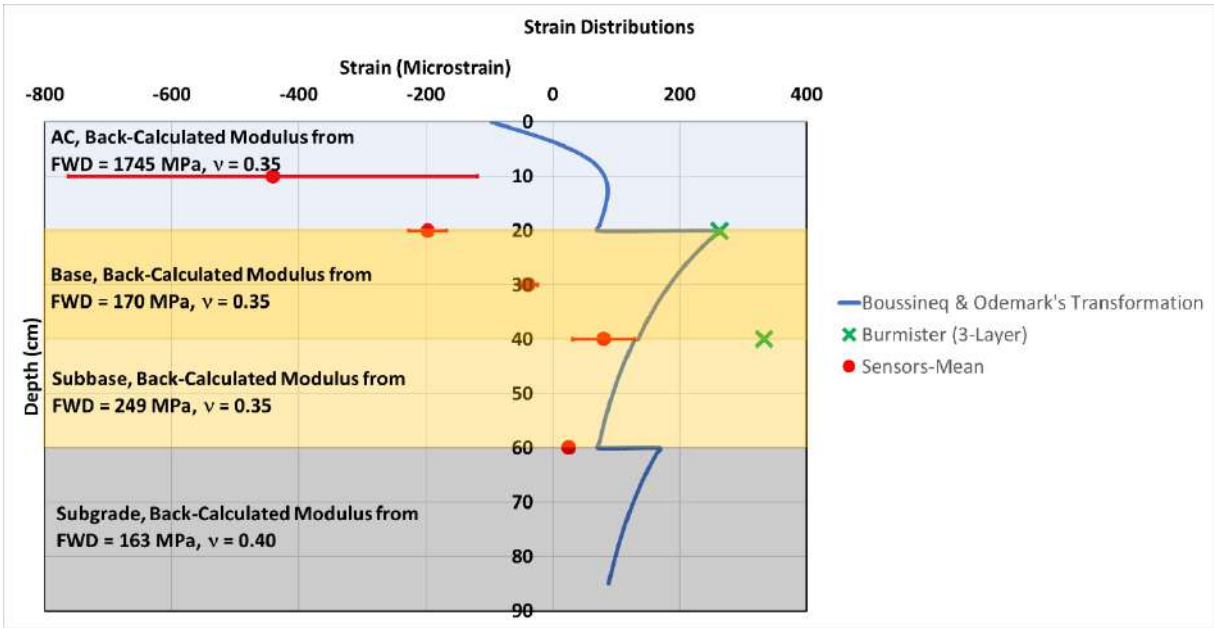
รูปที่ 9.3 การกระจายความเครียดในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยว น้ำหนักเพลา 4 ตัน



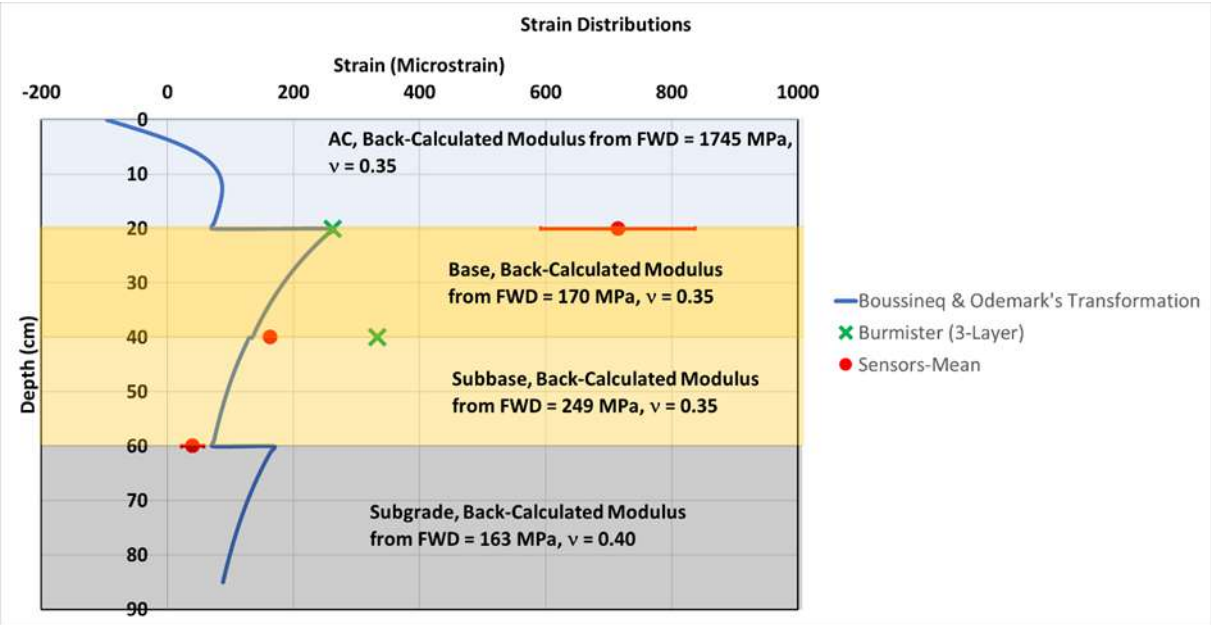
รูปที่ 9.4 การกระจายความเครียดในแนวขนานกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยว น้ำหนักเพลา 4 ตัน



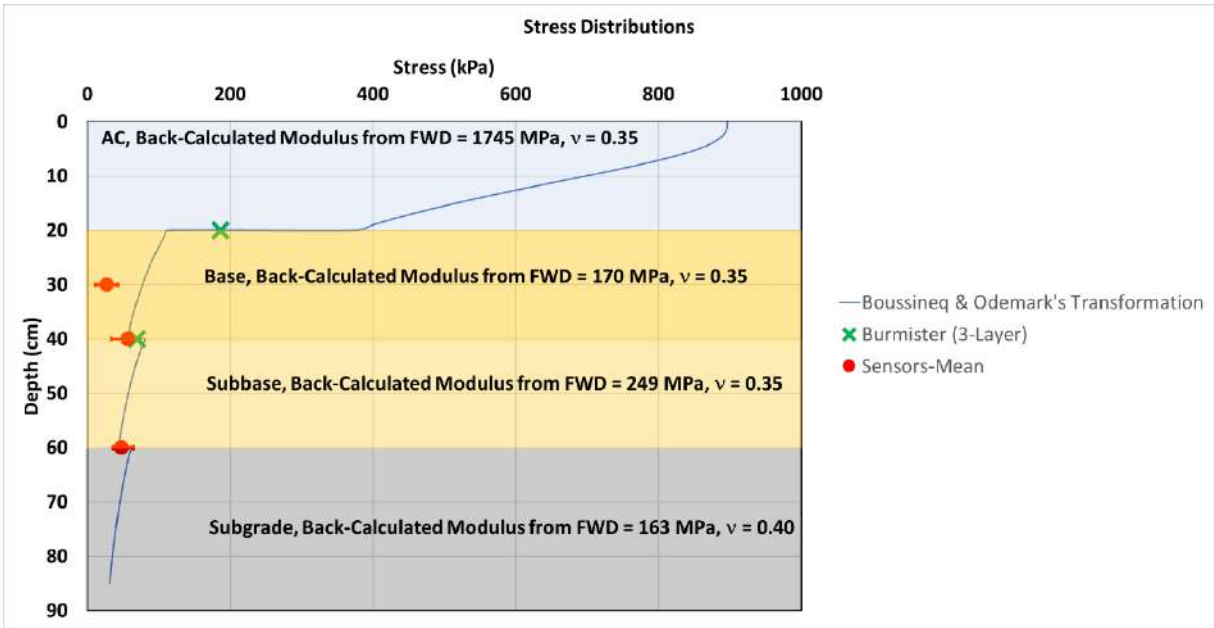
รูปที่ 9.5 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อคู่ น้ำหนักเพลา 11 ตัน



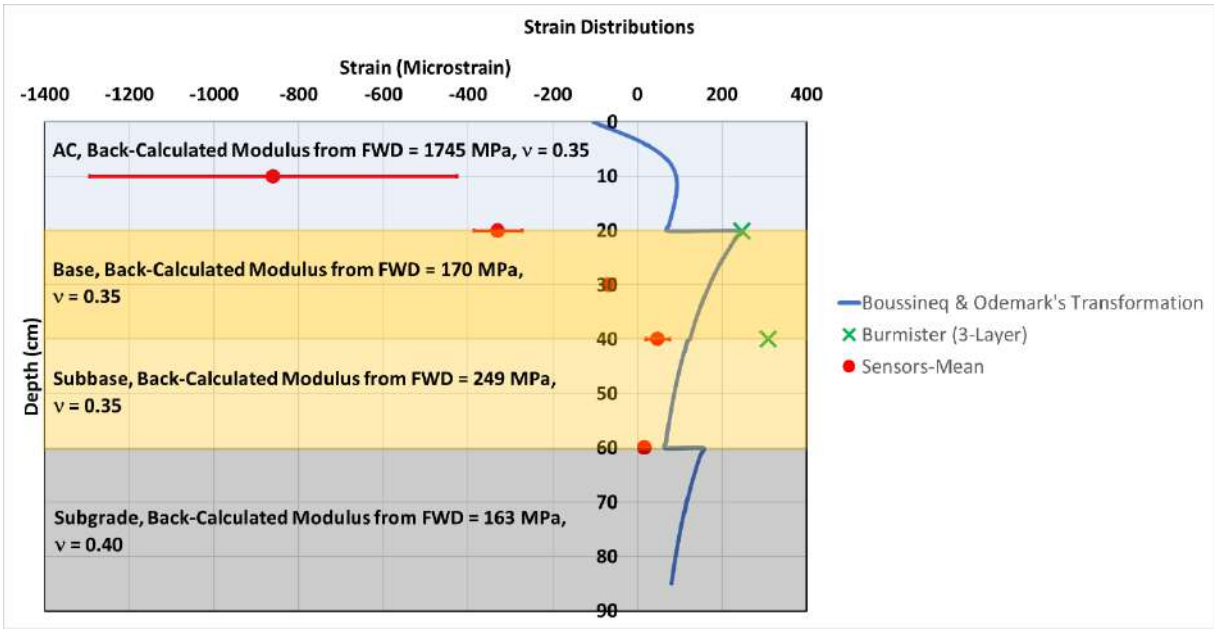
รูปที่ 9.6 การกระจายความเครียดในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อคู่ น้ำหนักเพลา 11 ตัน



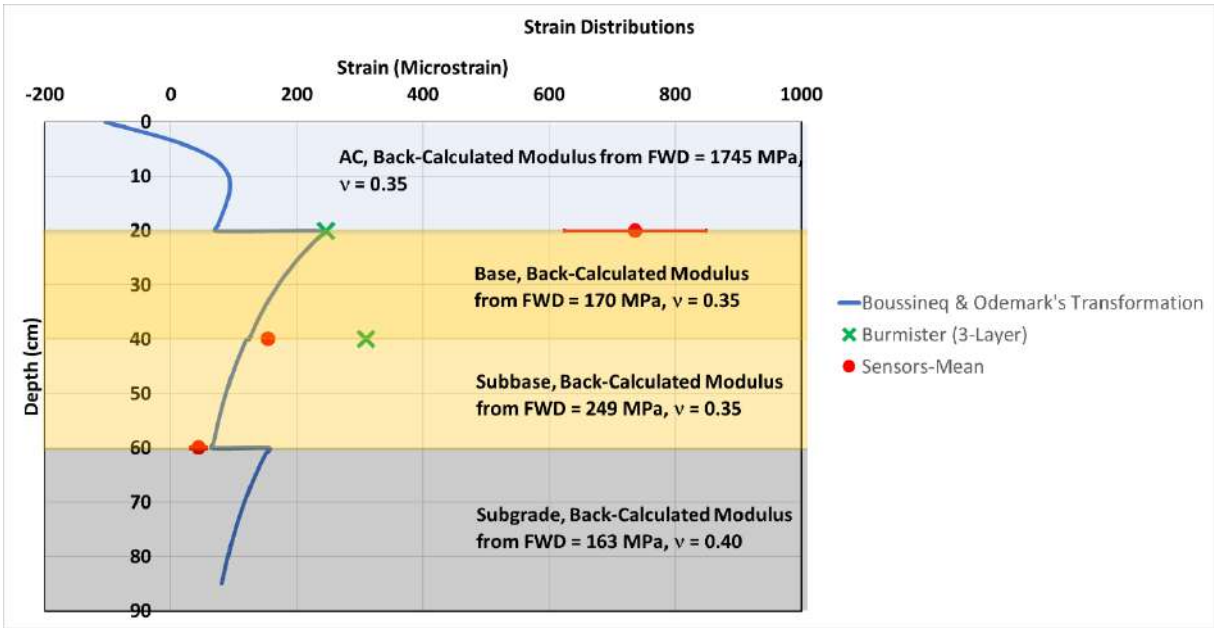
รูปที่ 9.7 การกระจายความเครียดในแนวขนานกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาเดี่ยวล้อคู่ น้ำหนักเพลา 11 ตัน



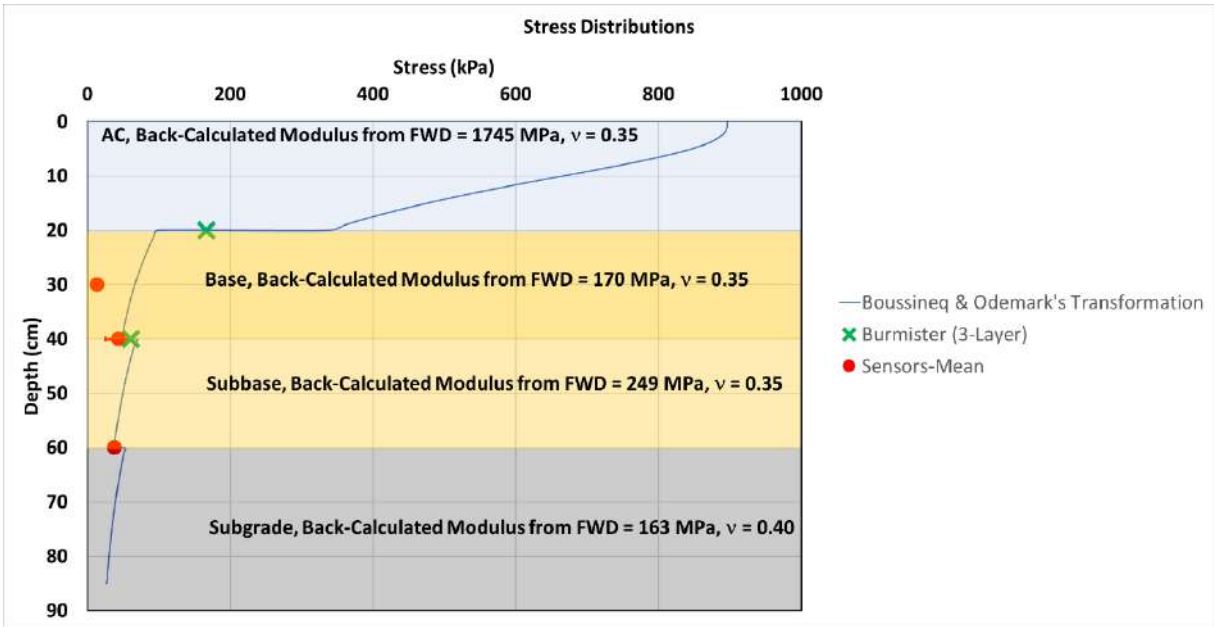
รูปที่ 9.8 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาคู่ล้อคู่ น้ำหนักเพลา 10 ตัน



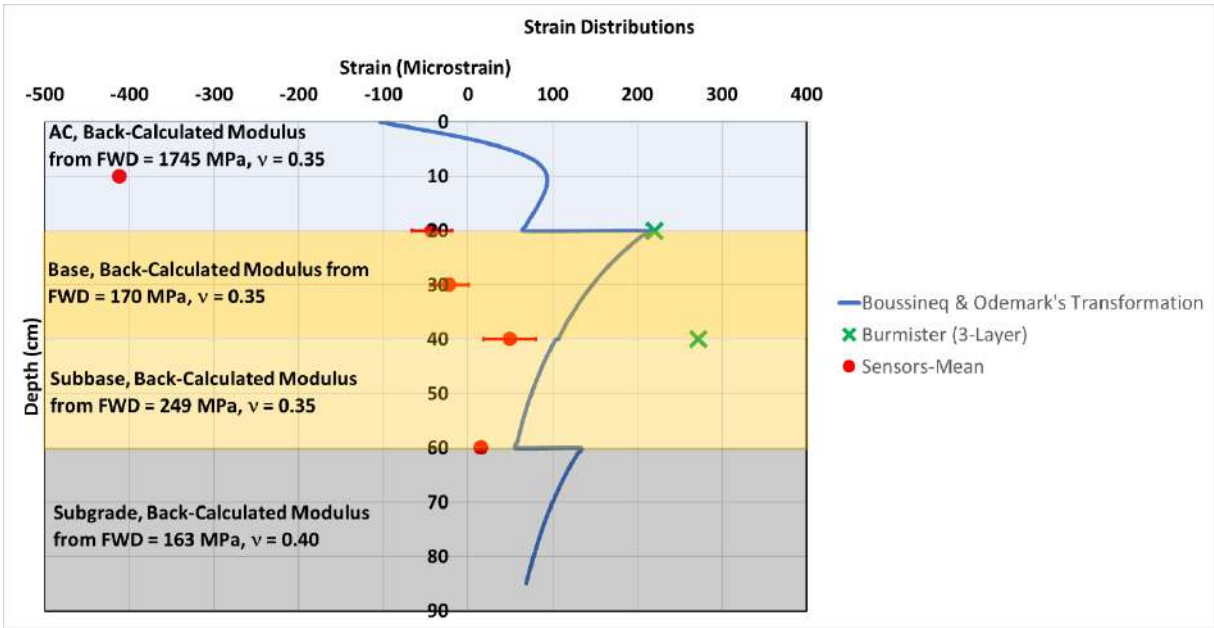
รูปที่ 9.9 การกระจายความเครียดในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาคู่ล้อคู่ น้ำหนักเพลา 10 ตัน



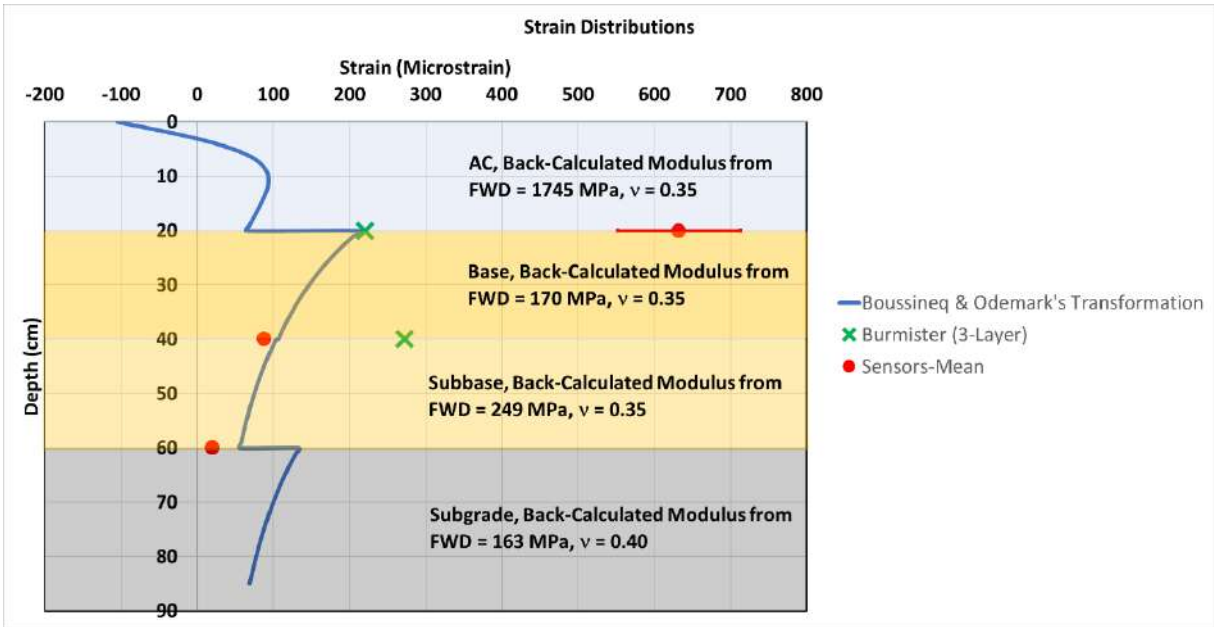
รูปที่ 9.10 การกระจายความเครียดในแนวขนานกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาคู่ล้อคู่ น้ำหนักเพลา 10 ตัน



รูปที่ 9.11 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่ น้ำหนักเพลา 8.5 ตัน



รูปที่ 9.12 การกระจายความเครียดในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่ น้ำหนักเพลา 8.5 ตัน



รูปที่ 9.13 การกระจายความเครียดในแนวขนานกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่ น้ำหนักเพลา 8.5 ตัน

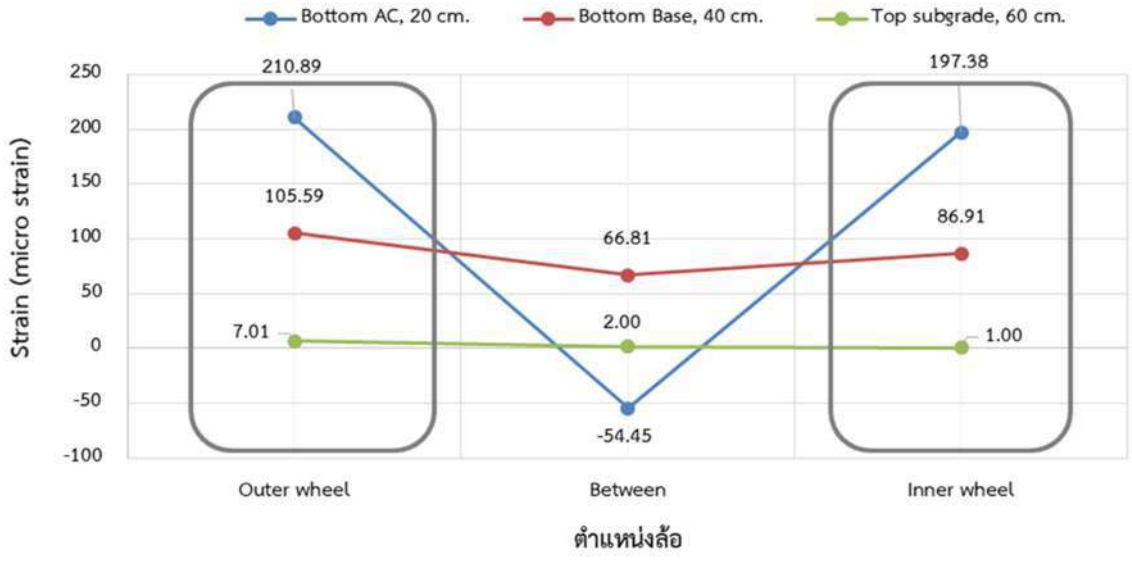
เนื่องจากผลการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นใต้ชั้นผิวทางมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ที่ปรึกษาจึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากตำแหน่งการกดทับของล้อรถ (กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อคู่) บน Strain Gage ทั้งที่ตำแหน่งใต้ล้อด้านนอก ด้านใน และที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อคู่ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 9.14 โดยใช้พิกัดน้ำหนักเพลาทดสอบทั้ง 4 และ 11 ตัน โดยผลการทดสอบทั้งสองกรณีแสดงให้เห็นว่าสำหรับ Strain Gage ที่ติดตั้งในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรนั้น ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อมีลักษณะเป็น Compressive Strain ส่วนค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งใต้ล้อมีลักษณะเป็น Tensile Strain ดังแสดงในรูปที่ 9.15 และ รูปที่ 9.16 และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ Strain Gage ที่ติดตั้งในแนวขนานกับทิศทางจราจรนั้นพบว่าค่าความเครียดที่เกิดขึ้นทั้งบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อ

และตำแหน่งใต้ล้อมีลักษณะเป็น Tensile Strain ทั้งสิ้นดังแสดงในรูปที่ 9.17 และ รูปที่ 9.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งกดทับบน Strain Gage ส่งผลอย่างมากต่อความแปรปรวนของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้ชั้นผิวทาง

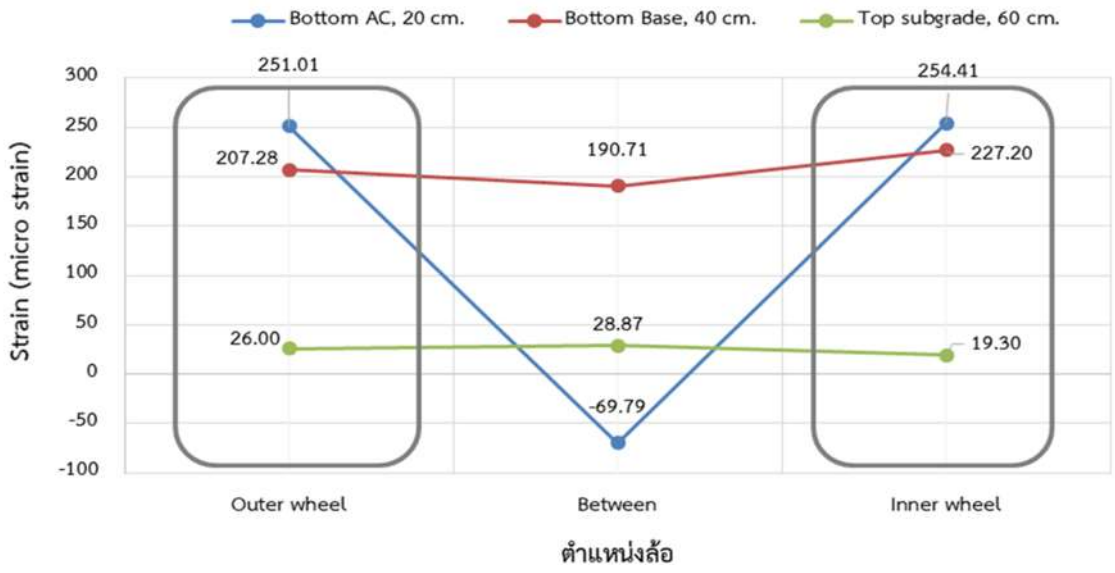
สุดท้ายนี้ผลการเปรียบเทียบทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นนั้นมีค่าความแปรปรวนของข้อมูลค่อนข้างน้อยและค่าที่ตรวจวัดได้ค่อนข้างสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ยกเว้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางชั้นพื้นทางที่มีค่าค่อนข้างต่ำกว่าที่คำนวณได้ ในขณะที่ค่าความเครียดนั้นมีความแปรปรวนสูงมากเนื่องจากขนาดของ Pressure Cell ที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ส่วนขนาด Strain Gage นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กทำให้โอกาสที่ล้อรถจะกดทับลงบนตำแหน่ง Strain Gage โดยสมบูรณ์นั้นเป็นไปได้ยากกว่า (โดยเฉพาะบริเวณใต้ชั้นผิวทาง) โดยพบว่าผลการเปรียบเทียบค่าความเค้นและความเครียดจากการตรวจวัดและจากการคำนวณทางทฤษฎีของแปลงทดสอบสรรพยานี้ มีลักษณะค่อนข้างสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบของแปลงทดสอบโพธาราม



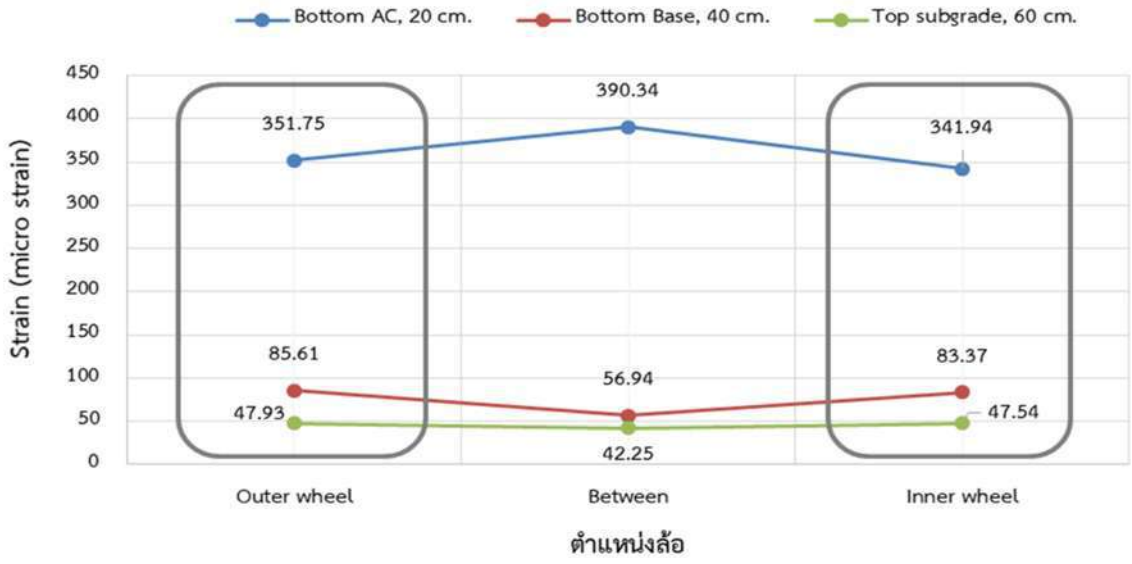
รูปที่ 9.14 ตำแหน่งกดทับของล้อรถบรรทุกบน Strain Gage ดังนี้ A) กึ่งกลางระหว่างล้อคู่ B) ใต้ล้อด้านใน C) ใต้ล้อด้านนอก



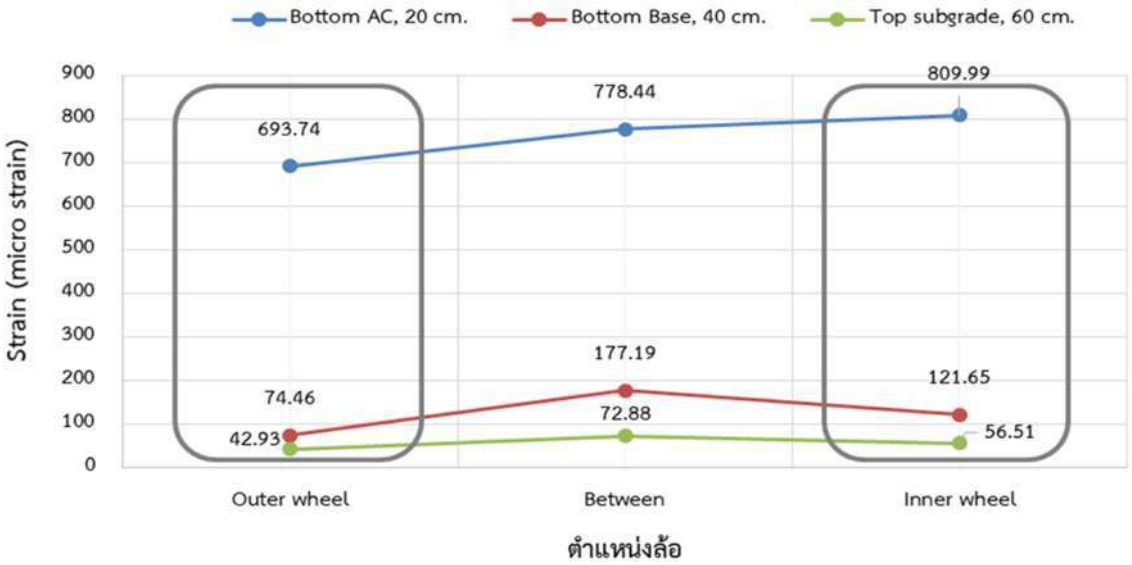
รูปที่ 9.15 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 4 ตัน



รูปที่ 9.16 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 11 ตัน



รูปที่ 9.17 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวขนานกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 4 ตัน

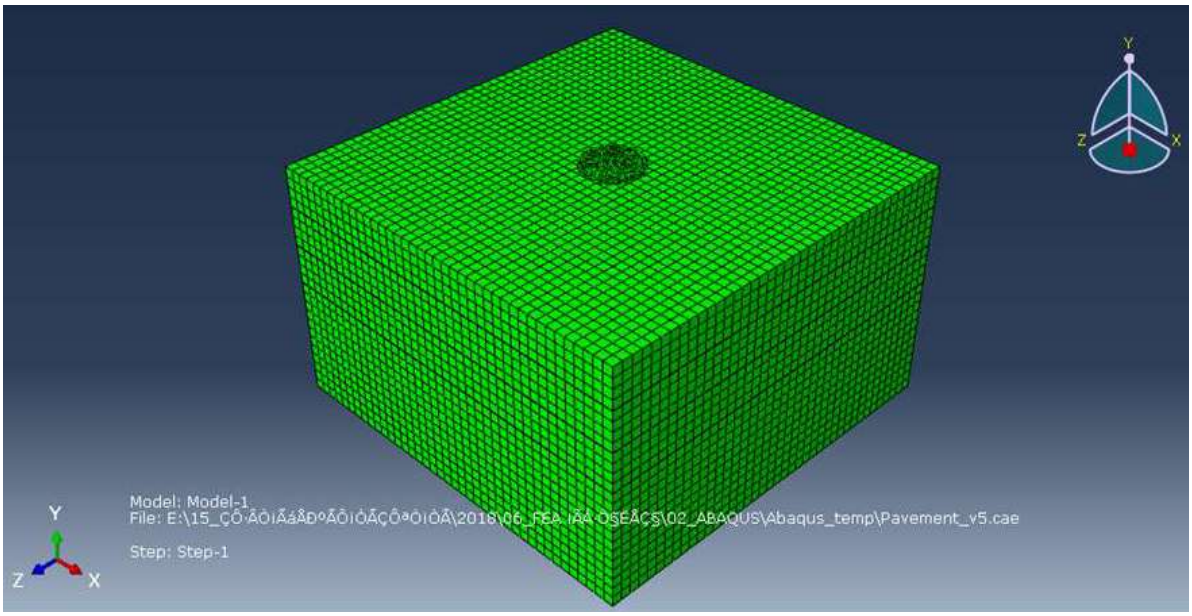


รูปที่ 9.18 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวขนานกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 11 ตัน

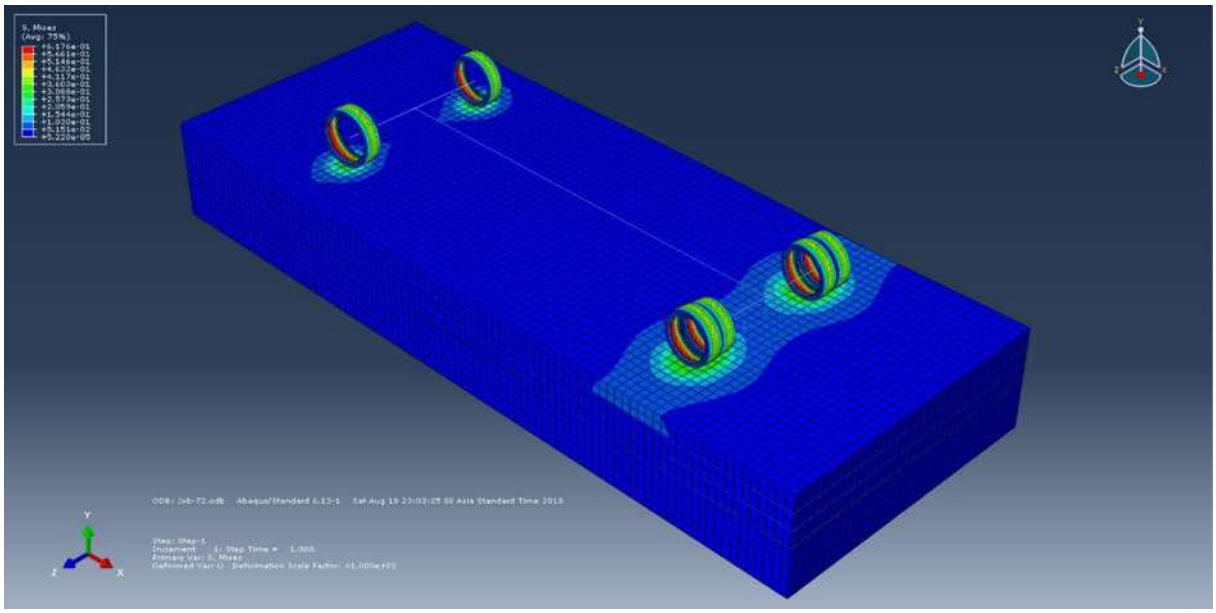
9.1.4 การพัฒนาแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์

เนื่องจากโครงการนี้ มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งในแนวขนานและแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจร ดังนั้น การใช้แบบจำลองแบบ 2 มิติ เช่น แบบจำลองชนิดระนาบความเครียด (2-D Plane Strain) หรือแบบจำลอง 2 มิติ ชนิด สมมาตรรอบแกน (Axi-symmetry) ไม่สามารถแสดงพฤติกรรมในแนวตั้งฉากกับระนาบของแบบจำลองได้ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ ที่ปรึกษาจึงเลือกพัฒนาแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ (3-D) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแปลงตรวจวัดในทุกระดับความลึก และทุกทิศทาง โดยพิจารณาตามตำแหน่งที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในสนาม มากำหนดระยะต่างๆ ในแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ และเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดพฤติกรรมของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้แรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกประเภทต่างๆ

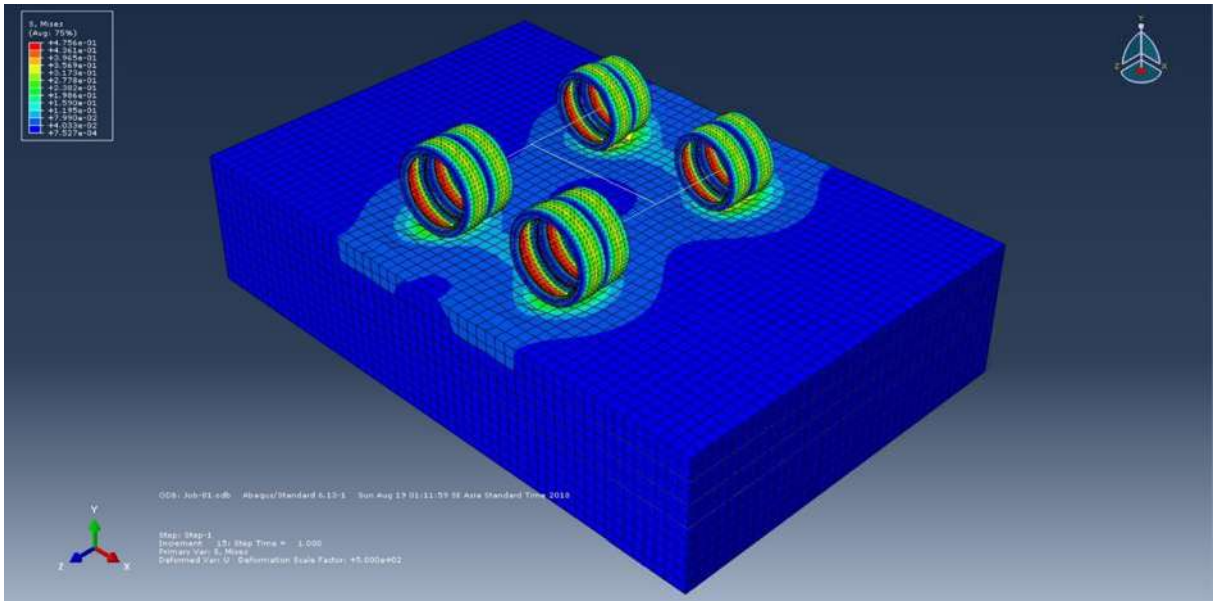
ที่ปรึกษาแบ่งการพัฒนาแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ออกเป็น 2 ระยะ ในระยะที่หนึ่ง ที่ปรึกษาได้ทำการศึกษารายละเอียดของแบบจำลอง ได้แก่ ชนิดของอิลิเมนต์ แบบ 3 มิติ ขนาดของอิลิเมนต์ รูปแบบการจำลองผิวสัมผัสระหว่างชั้นทาง เป็นต้น โดยใช้ข้อมูลผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) มาประกอบการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น (Patch Test) ของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง ขนาดกว้าง 2.0 เมตร ยาว 2.0 เมตร และลึก 1.0 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9.19 และในระยะที่สอง ที่ปรึกษาได้ทำการพัฒนาแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางดังแสดงในรูปที่ 9.20 ถึง รูปที่ 9.22



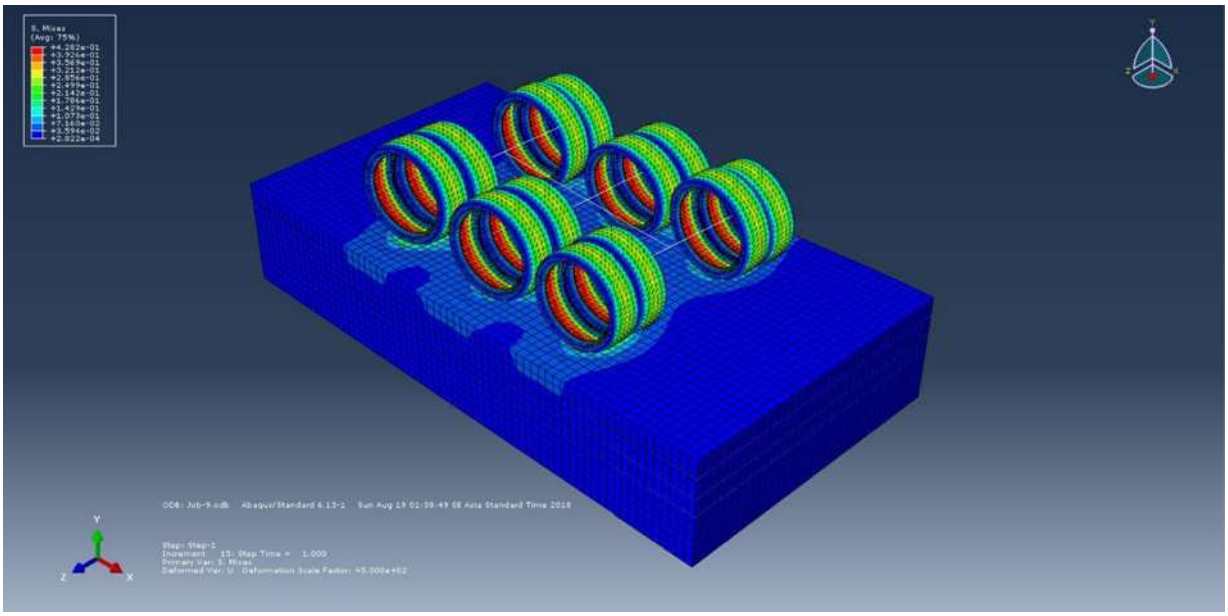
รูปที่ 9.19 แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น (Patch Test) สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้การทดสอบ FWD



รูปที่ 9.20 แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว และเพลาเดี่ยว-ล้อคู่

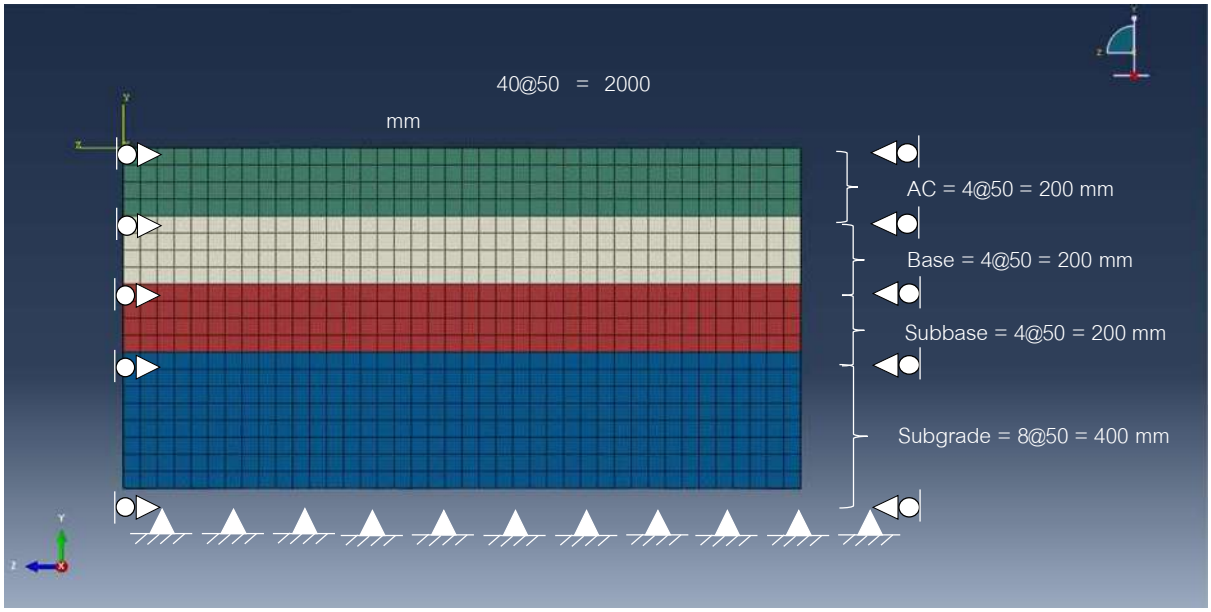


รูปที่ 9.21 แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกเพลาคู่-ล้อคู่



รูปที่ 9.22 แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกสามเพลา-ล้อคู่

ชนิดของอิลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางคือ ชนิด 8-Node Linear Brick, Reduced Integration (C3D8R) ซึ่งเป็นการสร้างรูปแบบอิลิเมนต์ตามที่ผู้ใช้กำหนด (User define) และยังช่วยการกำหนดพิกัดตำแหน่งอุปกรณ์ตรวจวัดได้ง่าย นอกจากนี้ที่ปรึกษายังได้ทำการศึกษาผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ของแบบจำลองต่อขนาดของอิลิเมนต์ (Mesh Size) เนื่องจากขนาดของอิลิเมนต์ (Element) มีผลต่อระยะเวลาในการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ ที่ปรึกษาได้พิจารณาขนาดของ Mesh Size เท่ากับ 10, 20 25, 50, 100 และ 200 มม. โดยพบว่า เมื่อ Mesh Size มีขนาดเล็กลง จะส่งผลให้ระยะเวลาในการประมวลผลเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ เช่น ค่าความเค้นแนวดิ่ง ค่าความเครียดแนวดิ่ง และค่าการทรุดตัว พบว่า แบบจำลองที่ใช้ Mesh Size ขนาดเล็ก จะให้ค่าความเครียดแนวดิ่งน้อยกว่าแบบจำลองที่ใช้ Mesh Size ขนาดใหญ่ ทั้งนี้ค่าการทรุดตัวไม่ต่างกัน ในท้ายสุดเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด ที่ปรึกษาจึงเลือกใช้ขนาดของ Mesh Size เท่ากับ 50 มม. สำหรับการกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขสภาพการยึดรั้ง (Boundary Condition) ในการวิเคราะห์ให้เหมาะสมและสอดคล้องกับสภาพปัญหา ได้แก่ การกำหนดข้อจำกัดในการเคลื่อนตัว (Displacement Constraint) หรือแรงกระทำภายนอกที่กระทำให้สอดคล้องสภาพการใช้งานจริง ที่ปรึกษาได้กำหนดการยึดรั้งแบบ Roller Support บริเวณด้านข้างของแบบจำลอง โดยกำหนดให้โครงสร้างชั้นทางมีระยะตามยาวเป็นอนันต์ (Infinite Distance) และกำหนดการยึดรั้งแบบยึดแน่น (Fixed Support) ใต้ชั้นดินเดิม (Subgrade) ทั้งนี้จากการศึกษาของ Kuo และคณะ (1995) สรุปได้ว่าการจำลองสภาพการยึดรั้งดังกล่าวสามารถใช้ในแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ โดยไม่กระทบกับผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ขอบเขตและเงื่อนไขสภาพการยึดรั้ง (Boundary Condition) สำหรับแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 9.23



รูปที่ 9.23 ขอบเขตและเงื่อนไขสภาพการยึดรั้งสำหรับแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนท์ 3 มิติ

- **คุณสมบัติของวัสดุและตัวแปรต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์**

ในขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยระเบียบวิธีการไฟไนท์อิลิเมนต์ จะมีการพัฒนาสร้างแบบจำลองสำหรับวัสดุชั้นทางชนิดต่างๆ ที่ประกอบเป็นโครงสร้างถนน โดยแบบจำลองจะถูกแบ่งเป็นอิลิเมนต์ (ชิ้นส่วน) แต่ละชิ้นส่วนจะมีค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองตามชนิดของวัสดุชั้นทางที่จำลองอยู่ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์จะได้สมการตัวแทนของชิ้นส่วนย่อยนั้น เมื่อนำสมการของทุกชิ้นส่วนย่อยมาประกอบกัน แล้วให้แรงกระทำที่ถูกต้องและเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม แล้วทำการแก้สมการพร้อมกันจะได้คำตอบ ซึ่งโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์จะช่วยในการสร้างสมการย่อย และแก้สมการคำตอบสุดท้าย โดยผู้ใช้โปรแกรมต้องกำหนดขนาด ลักษณะ ขอบเขตของปัญหาให้เหมาะสม กำหนดพฤติกรรมของวัสดุที่สมเหตุสมผล ผ่านทางแบบจำลองวัสดุย่อส่วนหรือค่าตัวแปรจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมา พร้อมทั้งคุณสมบัติที่ถูกต้อง ในส่วนนี้จะอธิบายการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุชั้นทาง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- **ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต** (Asphalt Concrete)

แบบจำลองพฤติกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตต้องสะท้อนถึงการเสียรูปถาวรต่อน้ำหนักบรรทุกที่กระทำซ้ำได้อย่างสมเหตุสมผล จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการจำลองพฤติกรรมแบบ Elasto-Plastic ซึ่งสะท้อนการเสียรูปถาวรได้ โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆประกอบการวิเคราะห์สภาวะพลาสติก เช่น Yield Surface, Plastic Potential, Creep Deformation และ Consistency Condition เป็นต้น ทำให้ยากแก่การแก้ปัญหาเชิงตัวเลขในแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ ซึ่งค่าตัวแปรเหล่านี้ต้องมีการทดสอบแบบจำลองแบบย่อส่วนเพื่อศึกษาหาค่าตัวแปรที่ซับซ้อนดังกล่าว แต่เนื่องจากไม่ได้ระบุไว้ในข้อกำหนดว่าด้วยการทดสอบเพื่อหาค่าตัวแปรเหล่านี้ ที่ปรึกษาจึงจำเป็นต้องศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อประยุกต์ใช้ในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสำหรับโครงการนี้ จากข้อมูลผลการศึกษาที่รวบรวมทั้งหมด พบว่ายังไม่มีแบบจำลองใดที่สามารถจำลองพฤติกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตภายใต้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic Load) และสามารถนำมาประยุกต์ร่วมกับระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ปัญหาจริงอย่างถูกต้องได้ ซึ่งแต่ละแบบจำลองต่างมีข้อจำกัดต่างๆกันไป

สำหรับโครงการนี้ ที่ปรึกษาได้ตัดสินใจเลือกใช้แบบจำลองในตระกูลของพลาสติกซิตี้เป็นฐานในการพัฒนา เพื่อแก้ปัญหาในเรื่องของการนำมาประยุกต์ร่วมกับระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ปัญหาจริง

ในอนาคต โดยที่ปรึกษาได้มีฐานโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณร่วมกับโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ทำให้สามารถที่จะพัฒนาต่อยอดได้ จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในอดีต (Perkins 2001) พบว่าการใช้แบบจำลอง Constitutive Model สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต แบบ Elasto-Plastic โดยมีสมมุติฐานว่าคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเท่ากันทุกทิศทุกทาง (Isotropic Material) ได้นำมาใช้อธิบายการเกิดการเสียรูปแบบถาวรของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแบ่งกระบวนการวิเคราะห์ค่าความเครียด (ε_{ij}) ออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ความเครียดแบบอีลาสติก และแบบพลาสติก ดังสมการที่ (26)

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{e} + \varepsilon_{ij}^{p} \tag{26}$$

โดยที่ ε_{ij}^{e} คือ ความเครียดแบบอีลาสติก (Recoverable Deformation)

ε_{ij}^{p} คือ ความเครียดแบบพลาสติก (Irrecoverable Deformation)

แบบจำลองดังกล่าวนี้ได้อธิบายตามหลักการของ Yield Surface, Plastic Potential Function และ Yield Function โดยอาศัยกฎเกณฑ์ที่เรียกว่า Hardening Rule โดยกำหนดสภาวะ ณ ตำแหน่งของ Yield Surface ค่าของ Yield Function จะมีค่าเป็นศูนย์ดังสมการที่ (27) และสภาวะการถอนแรงกระทำจะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ดังสมการที่ (28)

$$f = 0 \text{ และ } \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} > 0 \tag{27}$$

$$f < 0 \text{ หรือ } f = 0 \text{ และ } \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} < 0 \tag{28}$$

โดยที่ f คือ Yield Function

ค่าการเปลี่ยนแปลงความเครียดแบบพลาสติกได้กำหนดให้มีทิศทางตั้งฉากกับสมการของ Plastic Potential Function ดังสมการที่ (29) โดยเรียกหลักการนี้ว่า Normality Rule

$$\varepsilon_{ij}^{p} = \varphi \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \tag{29}$$

โดยที่ g คือ Plastic Potential Function ซึ่งในบางกรณีได้มีการกำหนดให้ฟังก์ชั่นความสัมพันธ์ของ Plastic Potential Function เป็นฟังก์ชั่นเดียวกับ Yield Function เรียกว่า Associate Flow Rule

ในปี 1997 Ramsamooj และคณะ ได้เสนอฟังก์ชั่นของ Plastic Potential Function สำหรับการทำนายการเสียรูปแบบถาวรสำหรับทำนายผลการทดสอบการให้แรงแบบกระทำซ้ำในการทดสอบ Cyclic Triaxial Compression Test ในช่วงของการทดสอบที่ค่าความเครียดมีค่าน้อย หรือที่จำนวนรอบการทดสอบต่ำ ดังสมการที่ (30) และ (31)

$$g = -\frac{\sigma_3^{1/2k}}{\sigma_1} \tag{30}$$

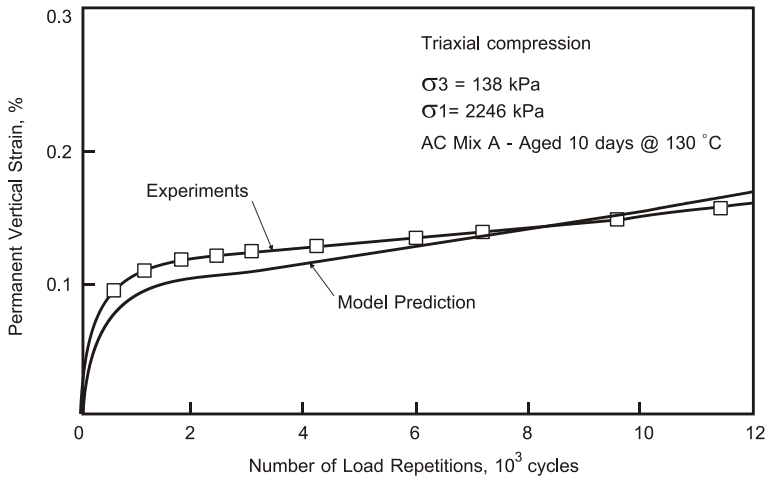
$$\frac{d\varepsilon_3^{p}}{d\varepsilon_1^{p}} = -\frac{\sigma_1}{2K\sigma_3} \tag{31}$$

โดยที่ $K = \tan^2(45 + \emptyset_f/2)$

ε_3^p = ความเครียดแบบพลาสติกในแนวระนาบ (Plastic Lateral Strain)

ε_1^p = ความเครียดแบบพลาสติกในแนวดิ่ง (Plastic Axial Strain)

ค่าความสัมพันธ์จากสมการที่ (29) จะใช้ในการทำนายค่าการเสียรูปแบบถาวรในช่วงของการทดสอบที่จำนวนรอบมีค่าน้อยเท่านั้น ส่วนเมื่อจำนวนรอบมีค่ามากขึ้น (การเสียรูปเพิ่มขึ้น) อิทธิพลของแบบจำลองความหนืดแบบอีลาสติกจะมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9.24 (Ramsamooj และคณะ 1997)



รูปที่ 9.24 แสดงผลการเปรียบเทียบการทำนายผลของค่าการเสียรูปแบบถาวรของแบบจำลองกับผลการทดสอบ (Ramsamooj และคณะ 1997)

จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมและทฎษฎีที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะที่จำเป็นในวิธีการวิเคราะห์ที่จะพัฒนาขึ้น ทั้งในแง่ของพฤติกรรมที่เกี่ยวข้อง และลักษณะการรับแรงกระทำ ที่ปรึกษาได้เลือกแบบจำลองประเภท Isotropic และ Linear-Elastic สำหรับจำลองคุณสมบัติของแบบจำลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างถนนลาดยางในสภาวะอีลาสติก และใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนารูปแบบจำลองของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ปรึกษาได้ศึกษาแบบจำลองจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จากนั้นได้ดำเนินการพัฒนาแบบจำลอง Linear-Elastic ในโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ ซึ่งสามารถใช้แบบจำลอง Isotropic และ Linear-Elastic โดยค่าคุณสมบัติและตัวแปรต่างๆที่ใช้สำหรับจำลองวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ได้จากผลการทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) รายละเอียดสรุปในภาคผนวก จ

- **พื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม (Base, Subbase, and Subgrade)**

พื้นทางและรองพื้นทาง (Base and Subbase Course) เป็นวัสดุมวลเม็ด (Granular Materials) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา มีการจำลองวัสดุชั้นทางให้มีพฤติกรรมแบบ Elasto-Plastic ซึ่งแบบจำลอง Mohr-Coulomb มีความเหมาะสมเพียงพอในการแสดงพฤติกรรมเป็นอีลาสติกที่ระดับความเค้นต่ำ เป็นพลาสติกที่ระดับความเค้นสูง มีสติฟเนสต่ำเมื่อใกล้วิบัติ หลังจากเลยจุดคราก (Yield) กลับมาเป็นอีลาสติกได้เมื่อถอนแรง (Unload) (Lin และ Liu 2003 และ Moayedi 2009)

สำหรับดินเดิม (Subgrade) จัดเป็นดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพียงพอหรือผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้ดีพอในการรองรับโครงสร้างถนนลาดยาง (Flexible Pavement) ดังนั้นแบบจำลอง Elasto-Plastic, Mohr-Coulomb จึงมีความเหมาะสมเพียงพอในการแสดงพฤติกรรมเป็นอีลาสติกที่ระดับความเค้นต่ำ และเป็นพลาสติกที่ระดับความเค้นสูง เช่นเดียวกับพื้นทางดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ที่ปรึกษาได้ทำการจำลองพฤติกรรมพื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม เป็นแบบ Elasto-Plastic โดยใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb

ในช่วงระยะแรกของการพัฒนาแบบจำลอง ที่ปรึกษาได้ใช้แบบจำลอง Elasto-Plastic, Mohr-Coulomb Model สำหรับพื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม ในโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ โดยมีค่าพารามิเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) อัตราส่วนปัวซองค์ (Poisson's Ratio) ค่า Cohesion ค่า Friction Angle และค่า Dilation Angle โดยค่าคุณสมบัติและตัวแปรต่างๆที่ใช้สำหรับจำลองวัสดุพื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม ได้จากผลการทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) รายละเอียดสรุปในภาคผนวก จ ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในแบบจำลอง Mohr-Coulomb คือ Cohesion, Friction Angle และ Dilation Angle จะใช้ค่าอ้างอิงจากงานวิจัยของ Moayedi และคณะ (2009)

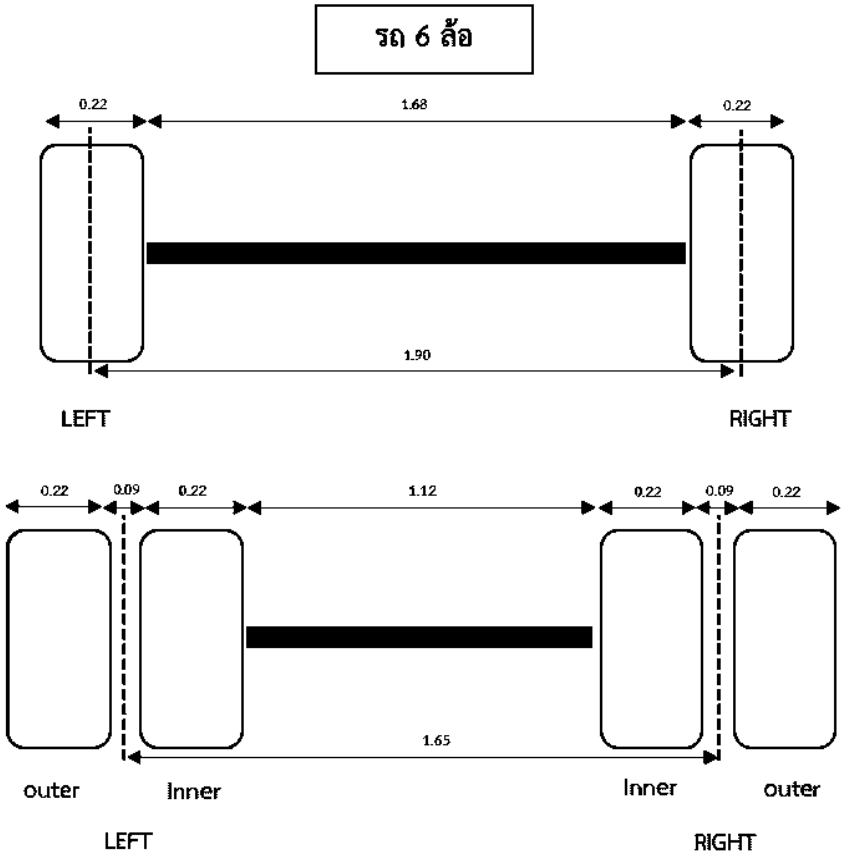
- **น้ำหนักบรรทุกและรูปแบบน้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์**

ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น ที่ปรึกษาได้พิจารณาน้ำหนักกระทำต่อแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ตามรูปแบบการทดสอบ FWD โดยกำหนดแรงกระทำเป็นแผ่นจานโลหะ (Metal Plate) รัศมีเท่ากับ 150 มม. น้ำหนักกระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่แผ่นจานโลหะ ขนาดหน่วยแรงเท่ากับ 0.756 MPa ตามวิธีการทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) ดังแสดงในรูปที่ 9.25

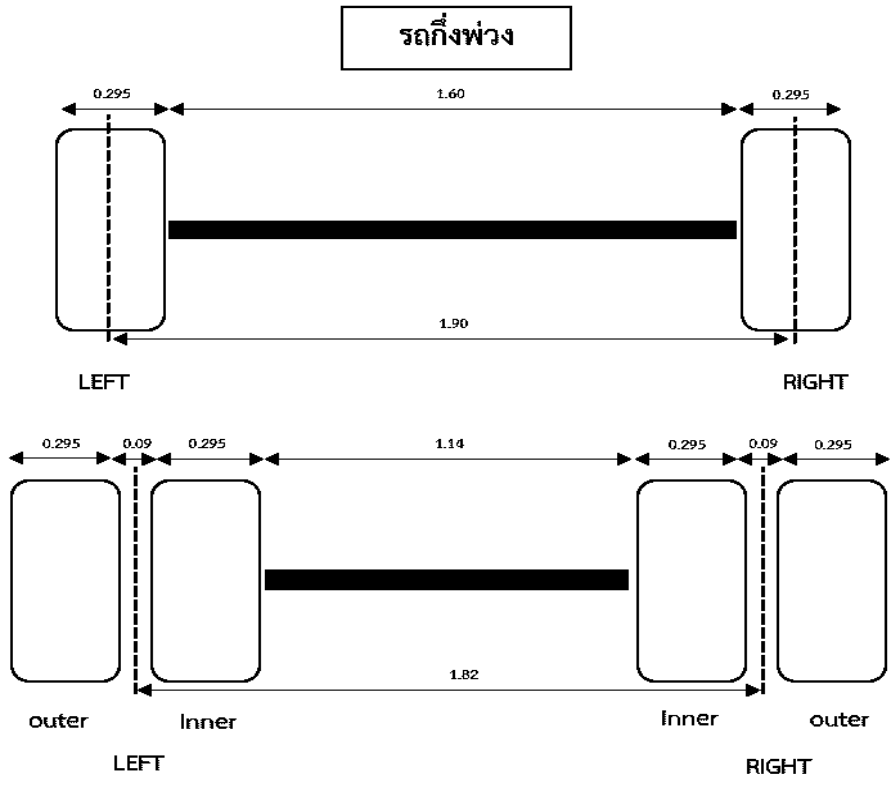


รูปที่ 9.25 การทดสอบ FWD

ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว เพลาเดี่ยว-ล้อคู่ เพลาคู่-ล้อคู่ และสามเพลา-ล้อคู่ ที่ปรึกษาได้พิจารณาน้ำหนักกระทำต่อแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ตามขนาดน้ำหนักบรรทุก ระยะห่างระหว่างเพลา และระยะห่างระหว่างล้อสำหรับรถบรรทุกที่ใช้ทดสอบจริง ดังแสดงในรูปที่ 9.26 และ รูปที่ 9.27 โดยมีรายละเอียดสรุปไว้ในรูปที่ 9.3



รูปที่ 9.26 ระยะห่างระหว่างเพลาและระยะห่างระหว่างล้อสำหรับเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว (แรงดันลมยาง 0.83 MPa) และเพลาเดี่ยว-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.83 MPa)



รูปที่ 9.27 ระยะห่างระหว่างเพลาและระยะห่างระหว่างล้อสำหรับเพลาคู่-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.90 MPa) และสามเพลา-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.90 MPa)

ตารางที่ 9.3 ข้อมูลน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์

ประเภทเพลาทดสอบ	น้ำหนักต่อเพลา	จำนวนล้อ/เพลา	น้ำหนักต่อล้อ	แรงดันลมยาง	พื้นที่	L	ความกว้าง = 0.6L	ความยาว = 0.8712L
เพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว	7	3.5	2.000	0.83	23630.5	212.6	128	185
เพลาเดี่ยว-ล้อคู่	11	4	2.750	0.83	32491.9	249.3	150	217
เพลาคู่-ล้อคู่	10	4	2.500	0.90	27240.7	228.3	137	199
สามเพลา-ล็อคู่	8.5	4	2.125	0.90	23154.6	210.5	126	183

ที่ปรึกษาได้กำหนดค่าตัวแปรสำหรับใช้ในแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ โดยพิจารณาจากผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในโครงการ ผลการทดสอบ FWD และอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา ค่าตัวแปรสำหรับใช้ในแบบจำลอง สรุปไว้ในตารางที่ 9.4

ตารางที่ 9.4 ค่าตัวแปรสำหรับใช้ในแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ

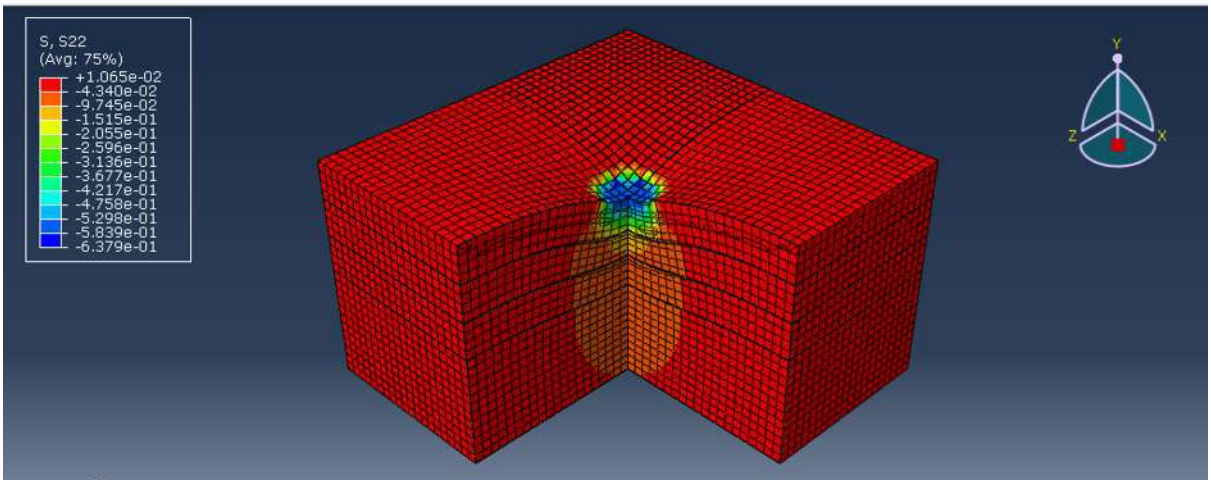
Material Input Parameters	AC Surface	Base	Subbase	Subgrade
Thickness (mm)	200	200	200	400
Elastic Modulus (MPa)	1,745	170	249	163
Poisson's Ratio	0.35	0.35	0.35	0.40
Unit Weight (kN/m^3)	25	22.7	22.7	19.8
Cohesion (kPa)**	-	30	30	8
Friction Angle **	-	43	43	36
Dilation Angle**	-	13	13	6

** อ้างอิงจากงานวิจัยของ Moayedi และคณะ (2009)

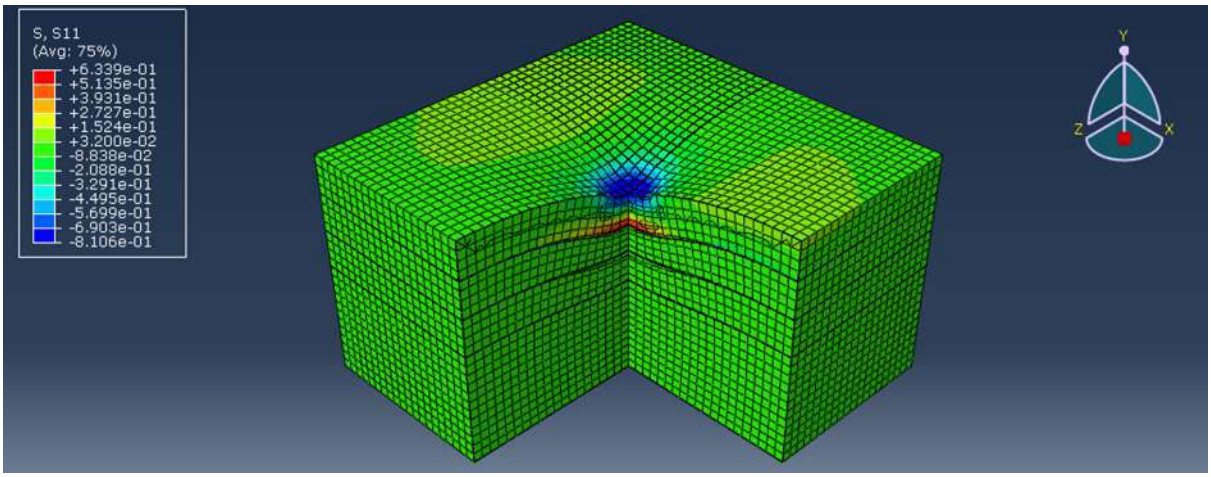
- **ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์**

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติ (3-D FEA Model) เบื้องต้น (Patch Test) สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้การทดสอบ FWD ขนาดกว้าง 2.0 เมตร ยาว 2.0 เมตร และลึก 1.0 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9.28 ถึง รูปที่ 9.31 กราฟแสดงหน่วยแรงในแนวดิ่ง หน่วยแรงในแนวราบ ความเครียดแนวดิ่ง และความเครียดแนวราบ ตามระดับความลึก ดังแสดงในรูปที่ 9.32 ถึง รูปที่ 9.35 จากกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ 3-D FEA Model กับผลการวิเคราะห์โดย Linear Elastic Analysis (LEA) พบว่า ทั้ง 3-D FEA Model และ LEA ให้ผลหน่วยแรงในแนวดิ่ง หน่วยแรงในแนวราบ ความเครียดแนวดิ่ง และความเครียดแนวราบสอดคล้องกัน นอกจากนี้ค่าการแอ่นตัว (Surface Deflection) ของแบบจำลอง 3-D FEA Model และ LEA ยังนำไปเปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ดังแสดงในรูปที่ 9.36 ผลการวิเคราะห์โดย 3-D FEA Model เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ LEA และผลการทดสอบ FWD แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้นสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง มีความเหมาะสมและสามารถนำไปใช้พัฒนาเป็นแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยครอบคลุมพื้นที่ซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในชั้นโครงสร้างทาง (A Full-Scale 3-D FEA Model) เพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกประเภทต่างๆ

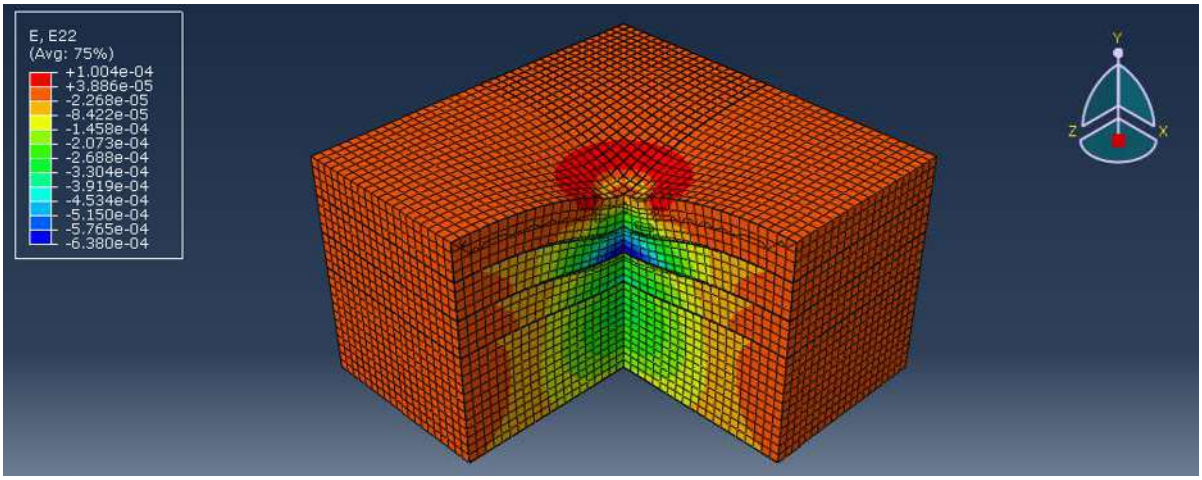
ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว เพลาเดี่ยว-ล้อคู่ เพลาคู่-ล้อคู่ และสามเพลา-ล้อคู่ แสดงด้วยกราฟหน่วยแรงในแนวดิ่ง หน่วยแรงในแนวราบ ความเครียดแนวดิ่ง และความเครียดแนวราบ ตามระดับความลึก ดังแสดงในรูปที่ 9.37 ถึง รูปที่ 9.52 จากกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ 3-D FEA Model กับผลการวิเคราะห์LEA พบว่า ทั้ง 3-D FEA Model และ LEA ให้ผลหน่วยแรงในแนวดิ่ง หน่วยแรงในแนวราบ ความเครียดแนวดิ่ง และความเครียดแนวราบสอดคล้องกันในทุกๆกรณี



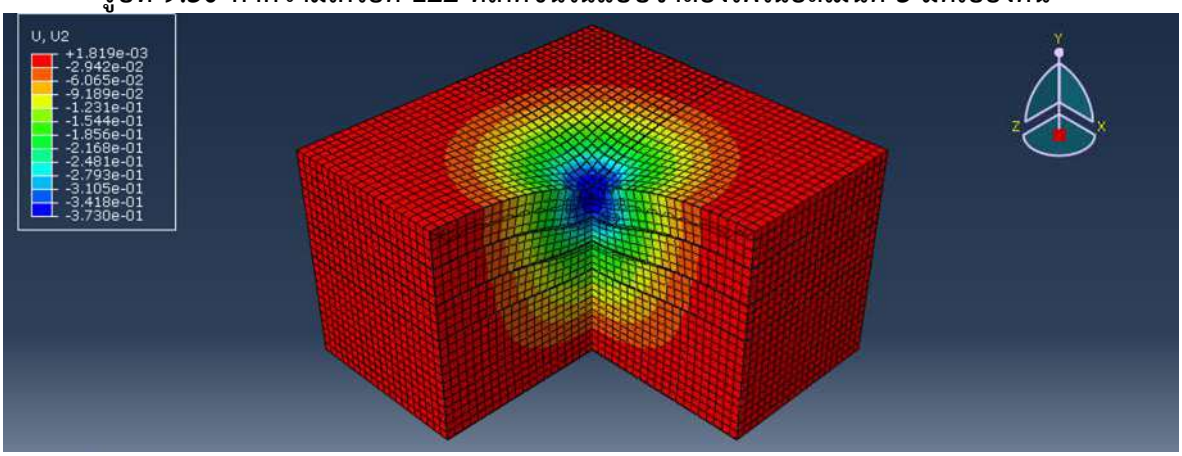
รูปที่ 9.28 ค่าหน่วยแรง S22 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น



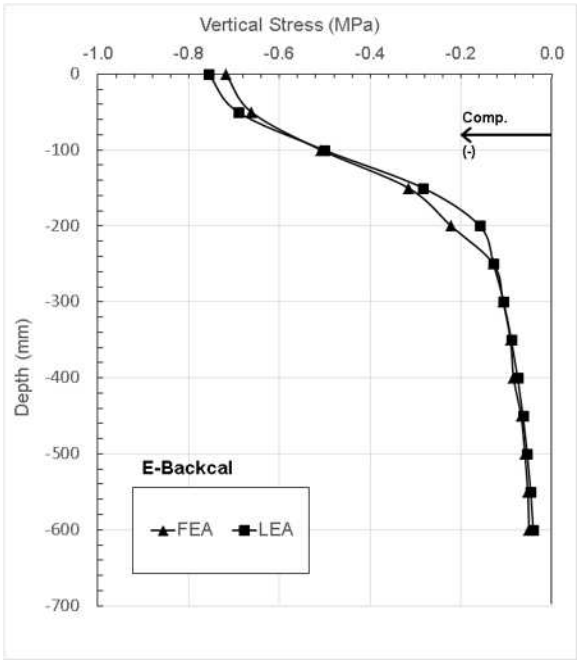
รูปที่ 9.29 ค่าหน่วยแรง S11 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น



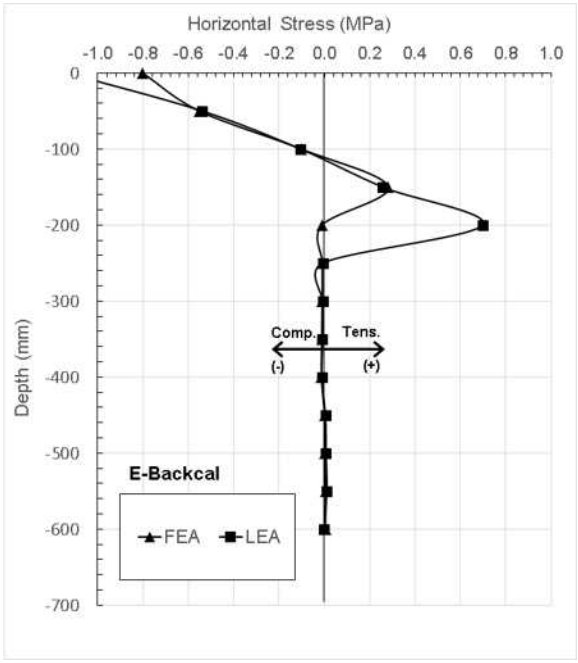
รูปที่ 9.30 ค่าความเครียด E22 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น



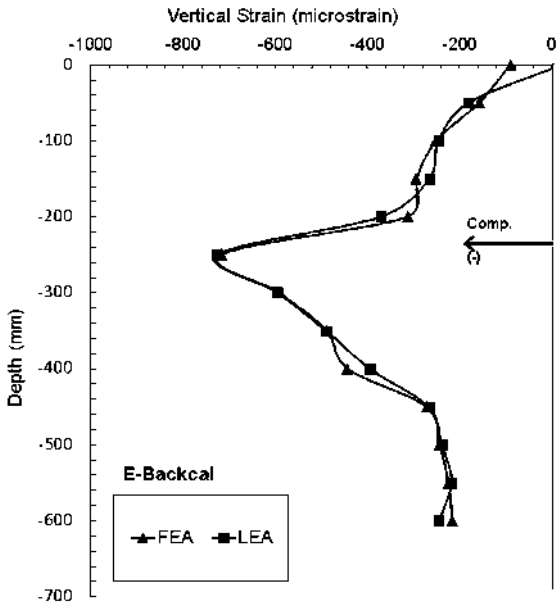
รูปที่ 9.31 ค่าการยุบตัว U2 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น



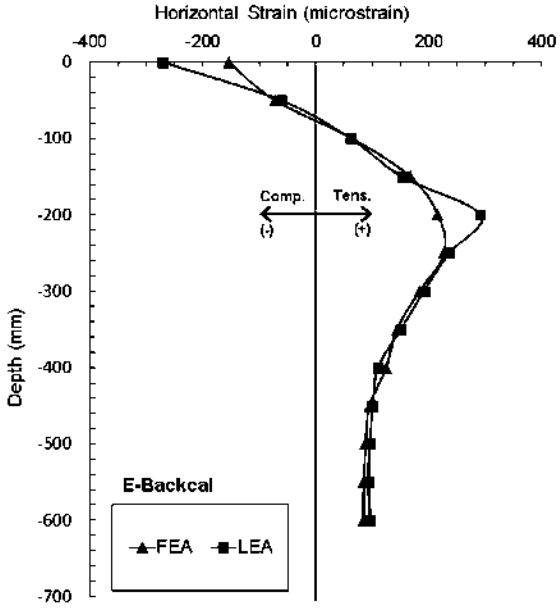
รูปที่ 9.32 กราฟแสดงหน่วยแรงในแนวดิ่งตามระดับความลึก



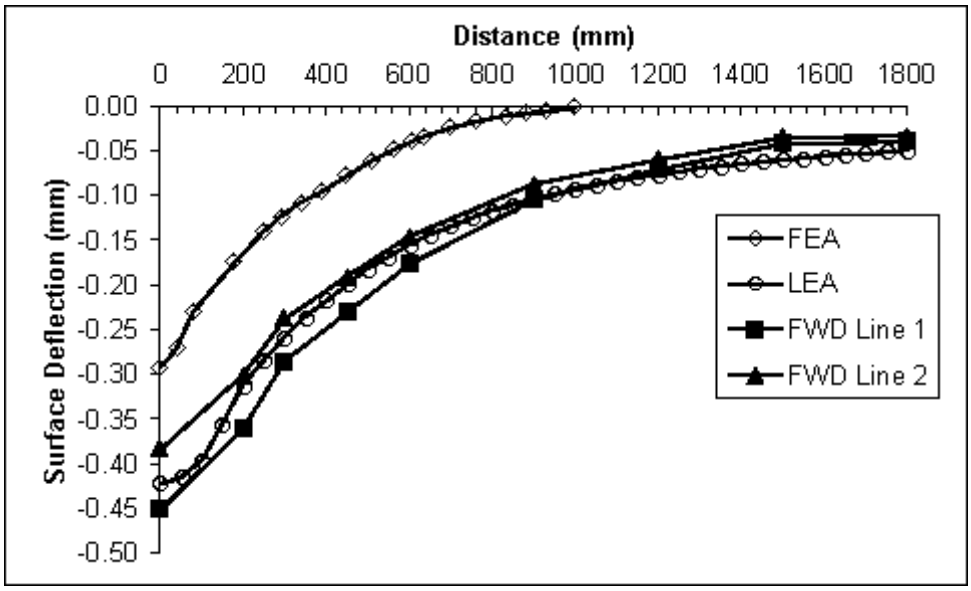
รูปที่ 9.33 กราฟแสดงหน่วยแรงในแนวราบตามระดับความลึก



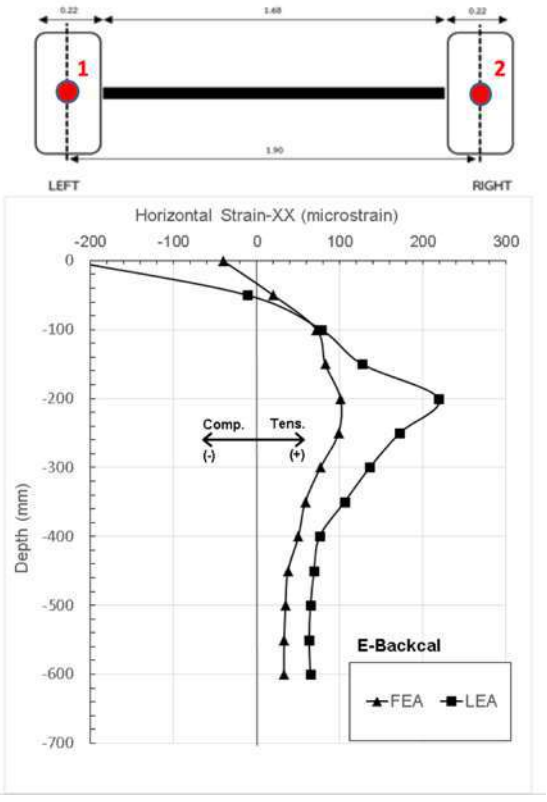
รูปที่ 9.34 กราฟแสดงความเครียดแนวดิ่งตามระดับความลึก



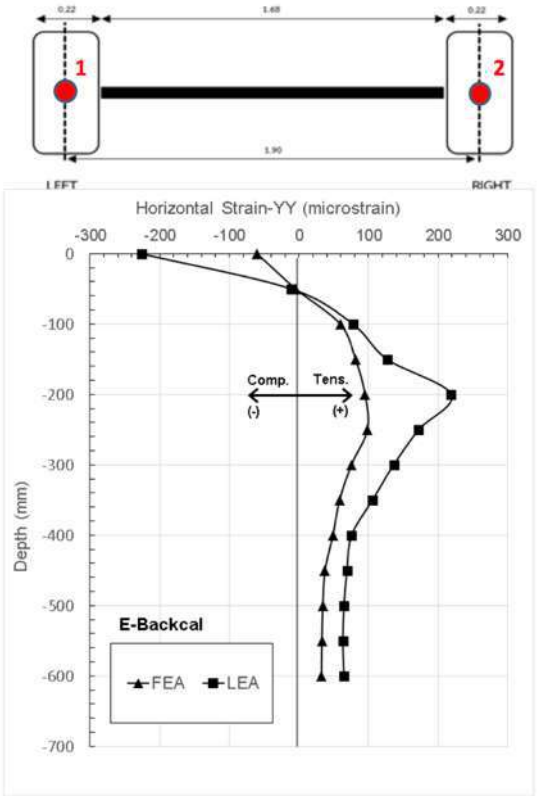
รูปที่ 9.35 กราฟแสดงความเครียดแนวราบตามระดับความลึก



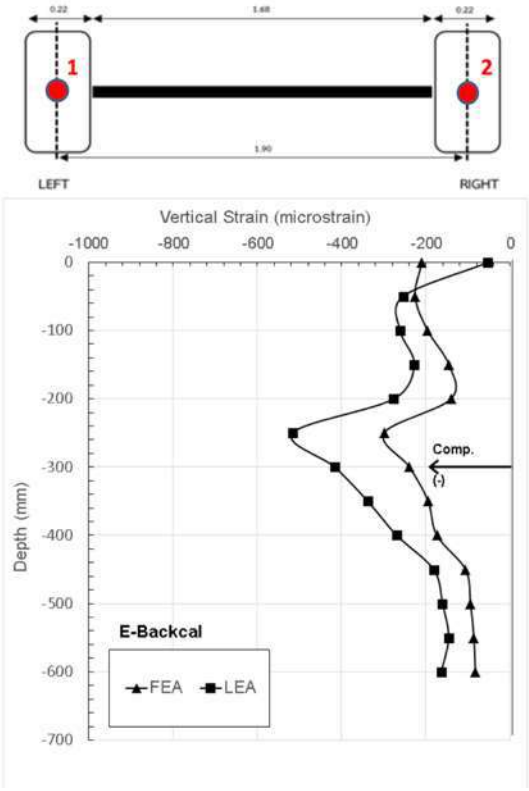
รูปที่ 9.36 ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น และ LEA เทียบกับค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ FWD



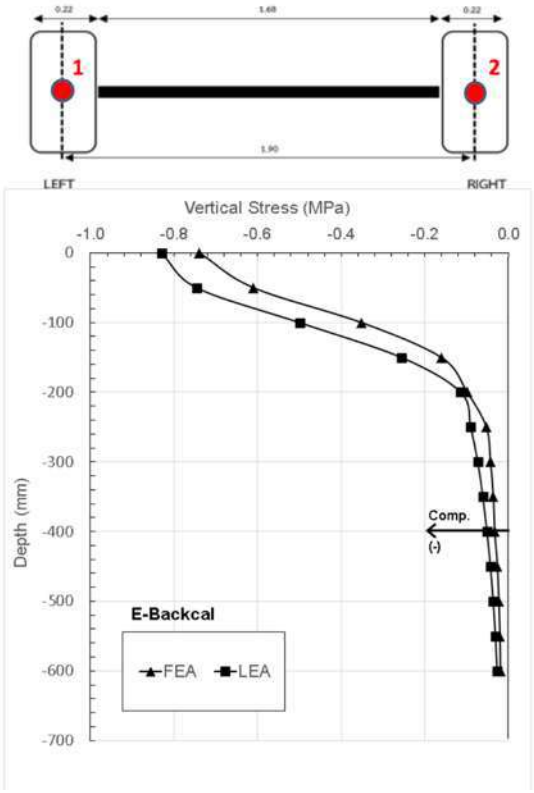
รูปที่ 9.37 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว



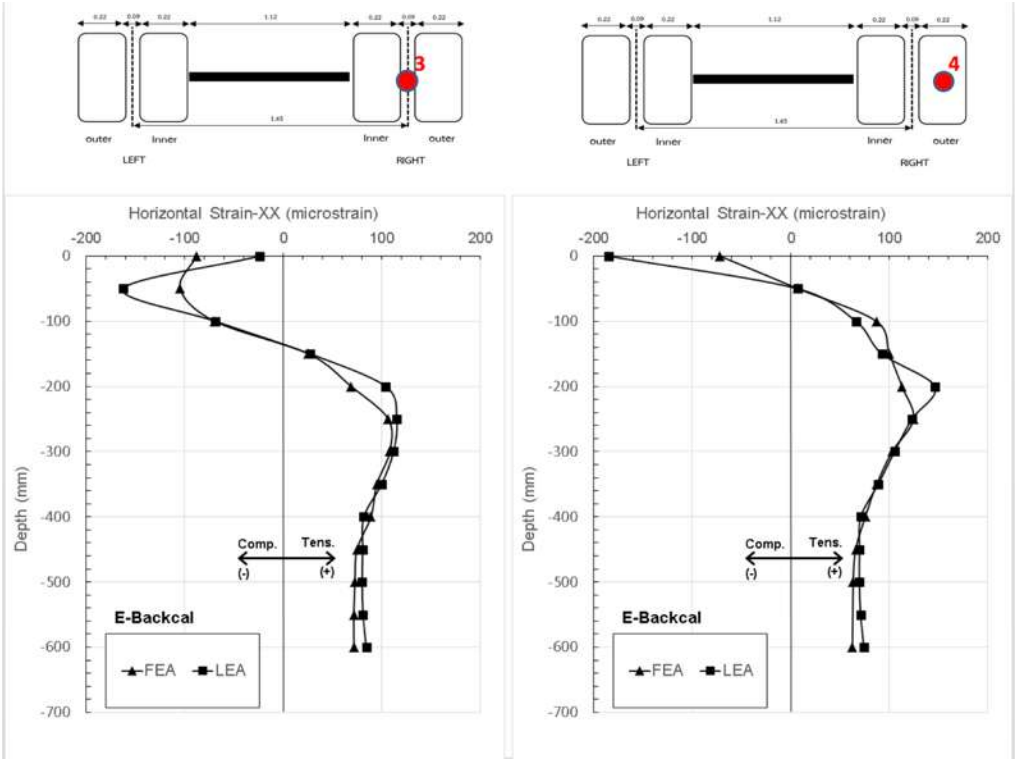
รูปที่ 9.38 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว



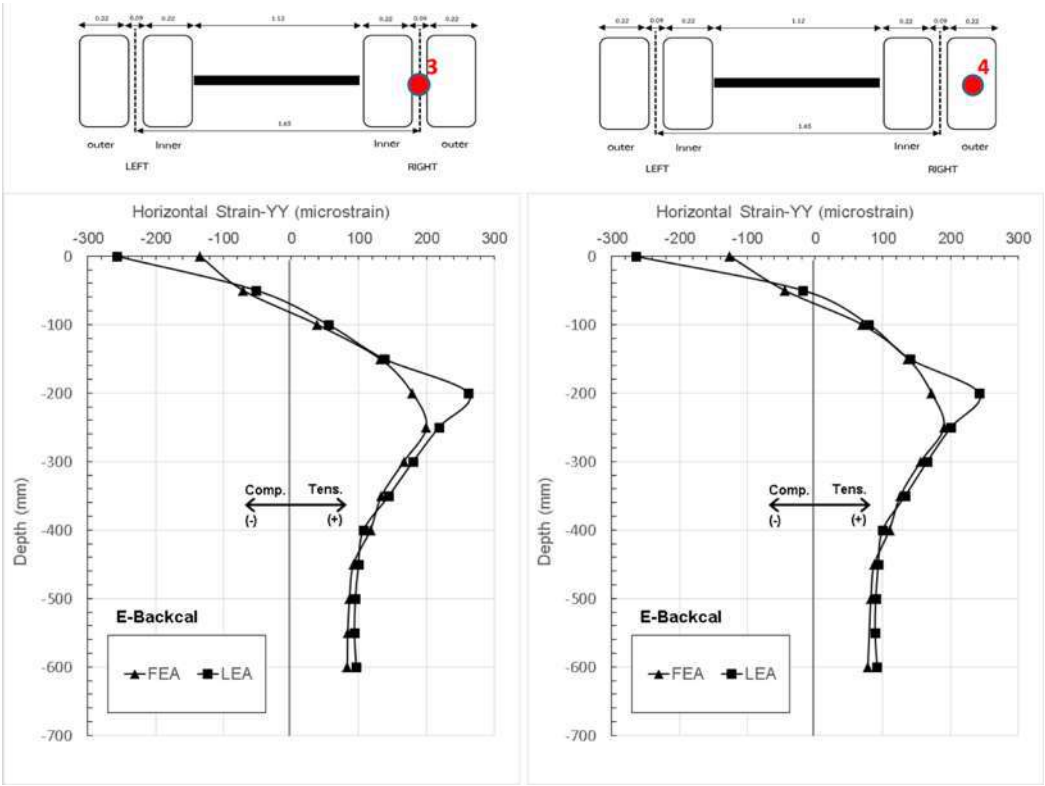
รูปที่ 9.39 ความเครียดแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว



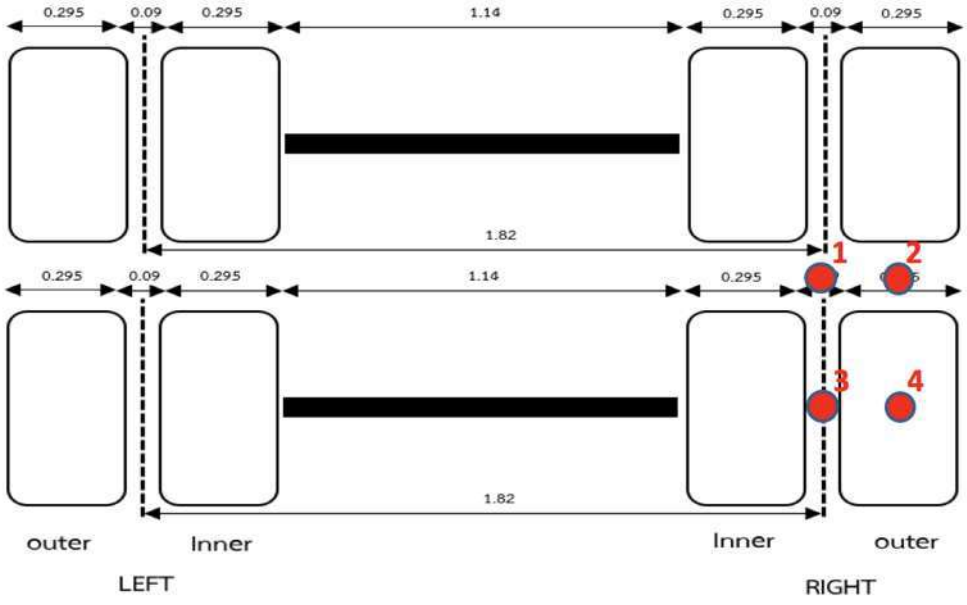
รูปที่ 9.40 ความเค้นแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว



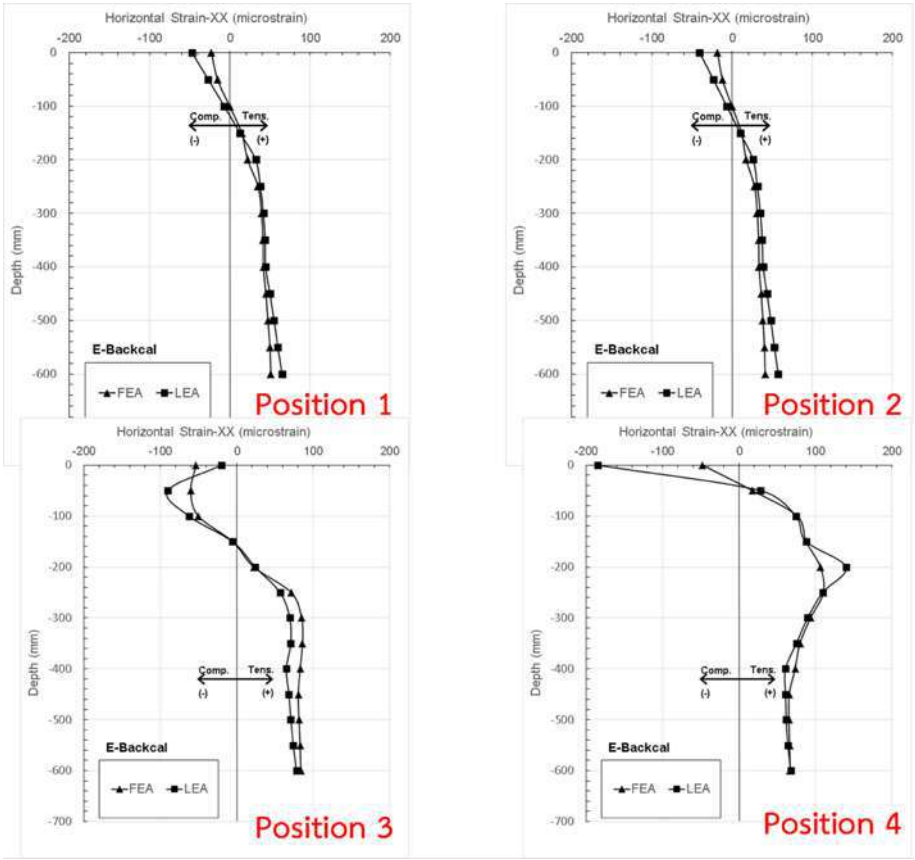
รูปที่ 9.41 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อคู่



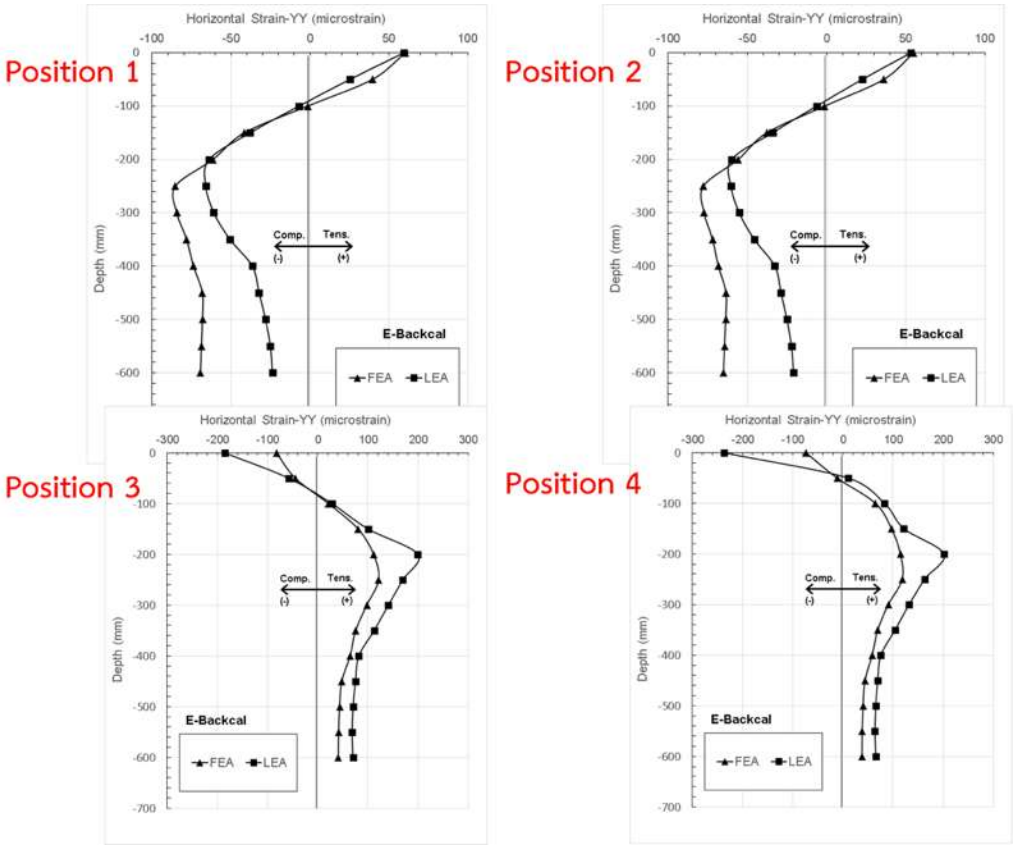
รูปที่ 9.42 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อคู่



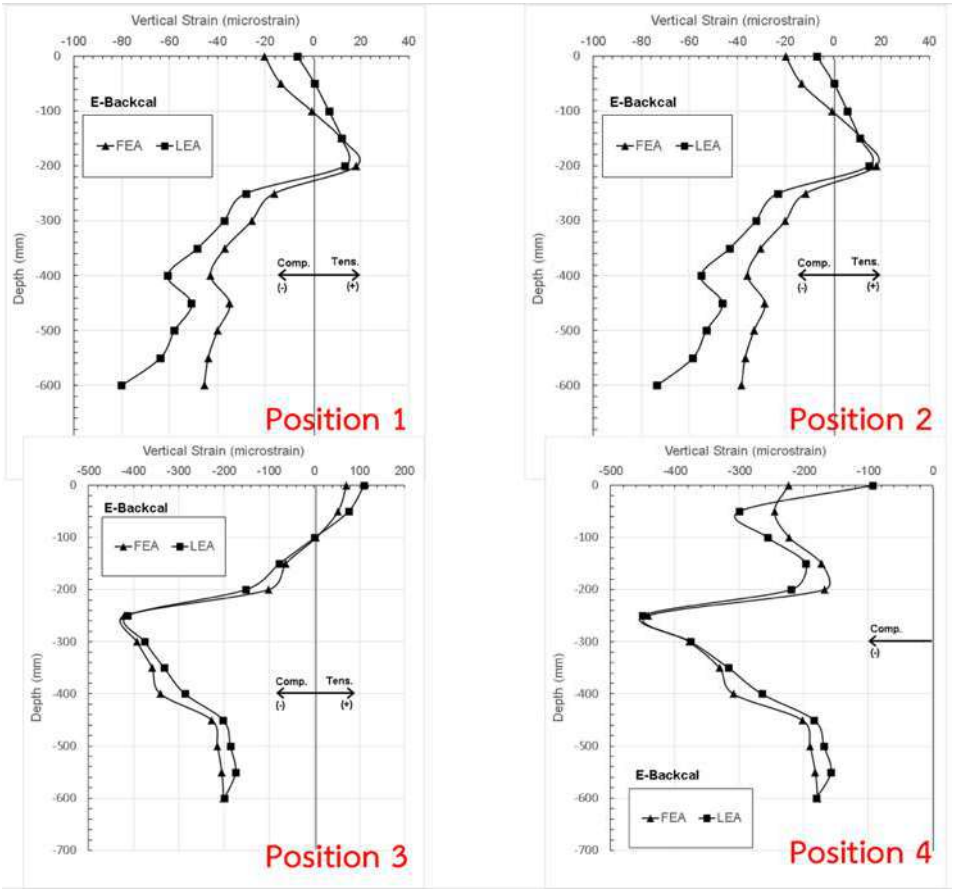
รูปที่ 9.43 ตำแหน่งล้อที่ใช้วิเคราะห์ กรณีเพลาคู่-ล้อคู่



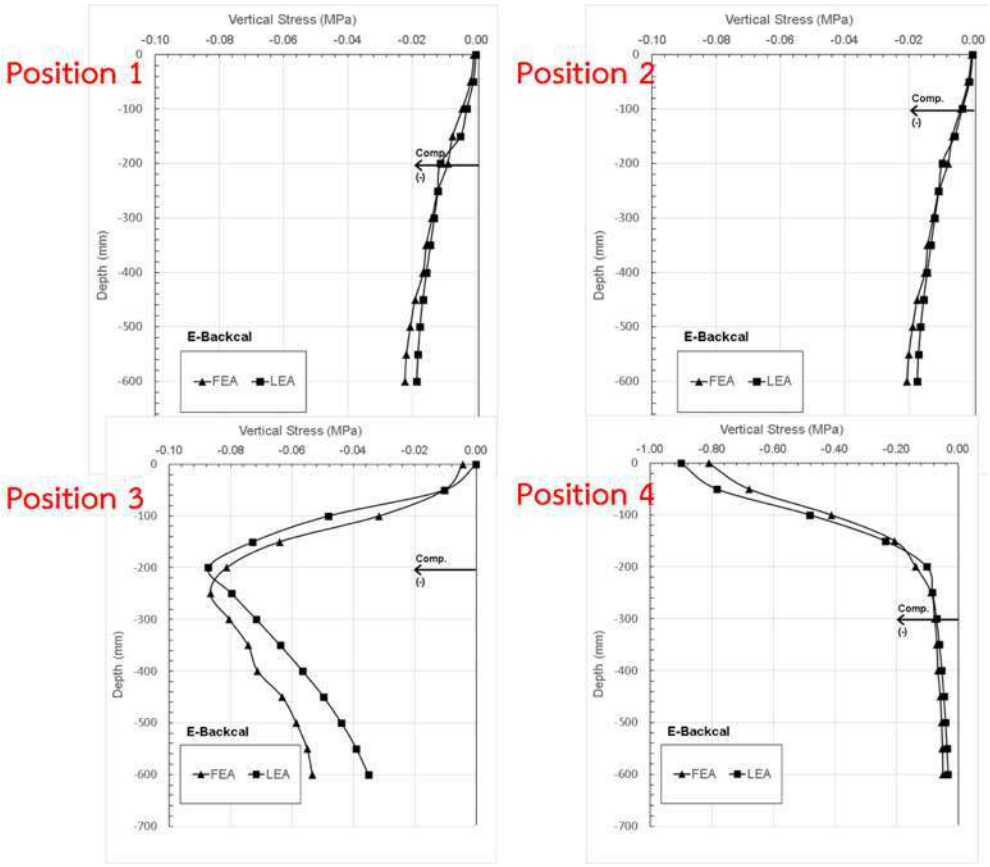
รูปที่ 9.44 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่



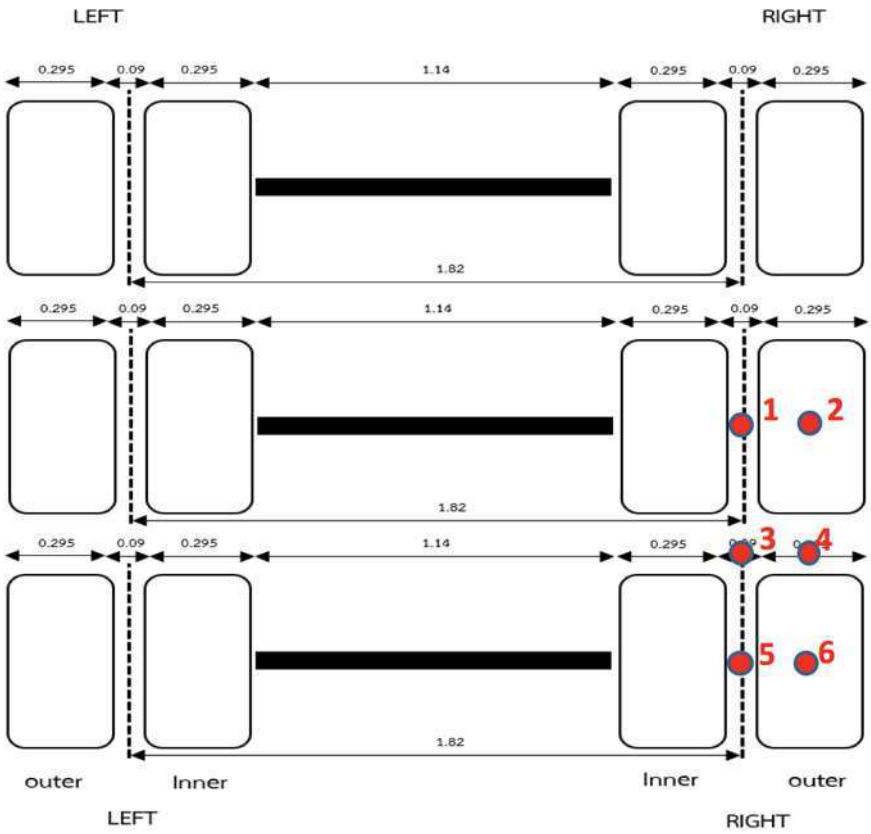
รูปที่ 9.45 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่



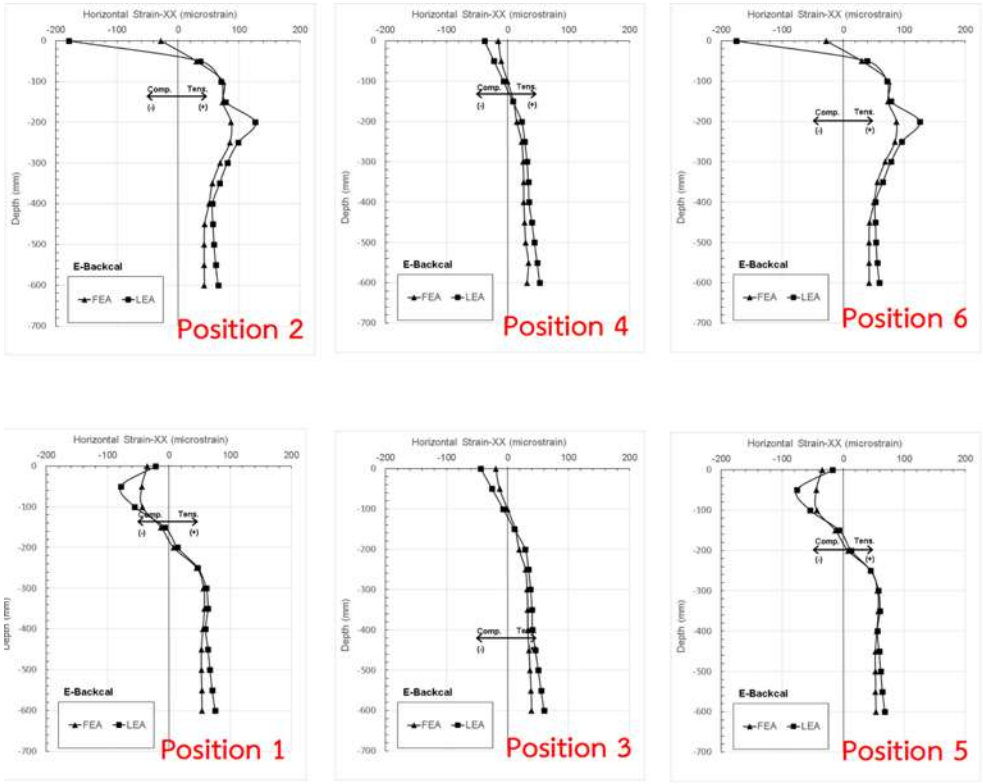
รูปที่ 9.46 ความเครียดแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่



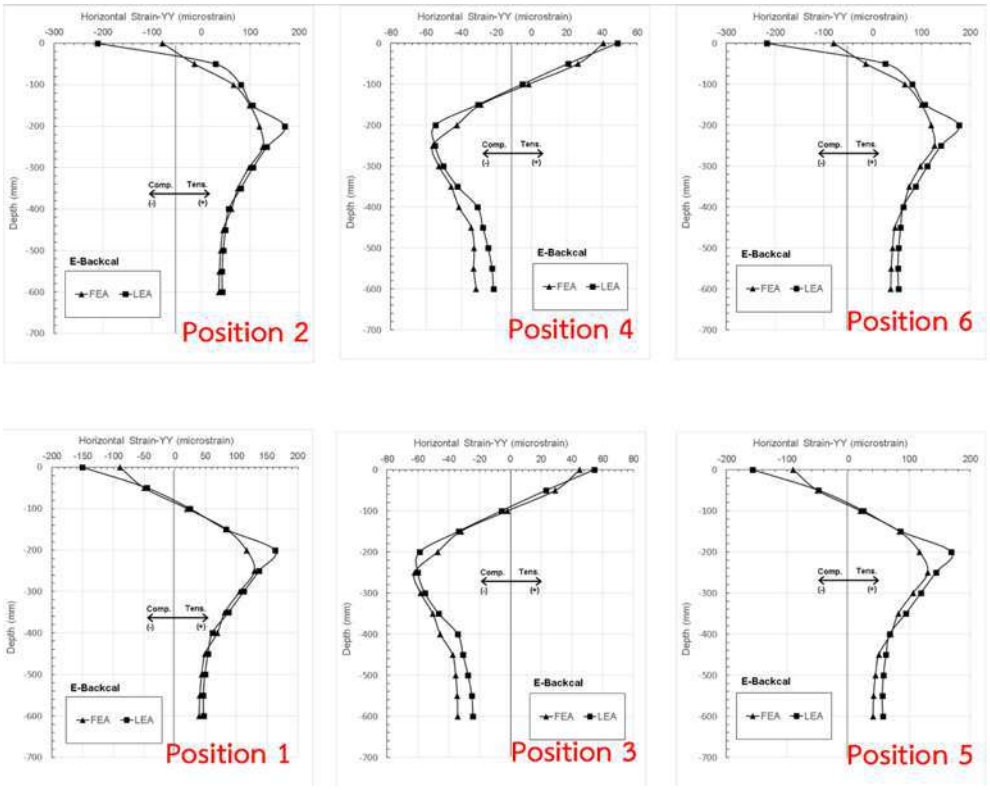
รูปที่ 9.47 ความเค้นแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่



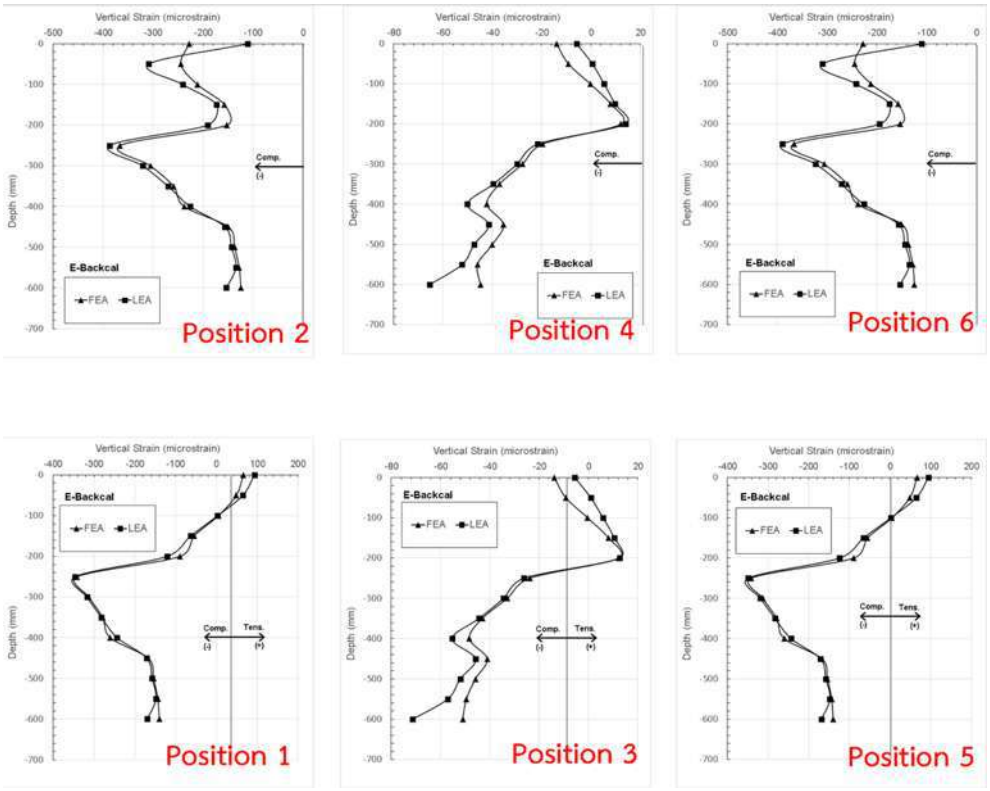
รูปที่ 9.48 ตำแหน่งล้อที่ใช้วิเคราะห์ กรณีสามเพลา-ล้อคู่



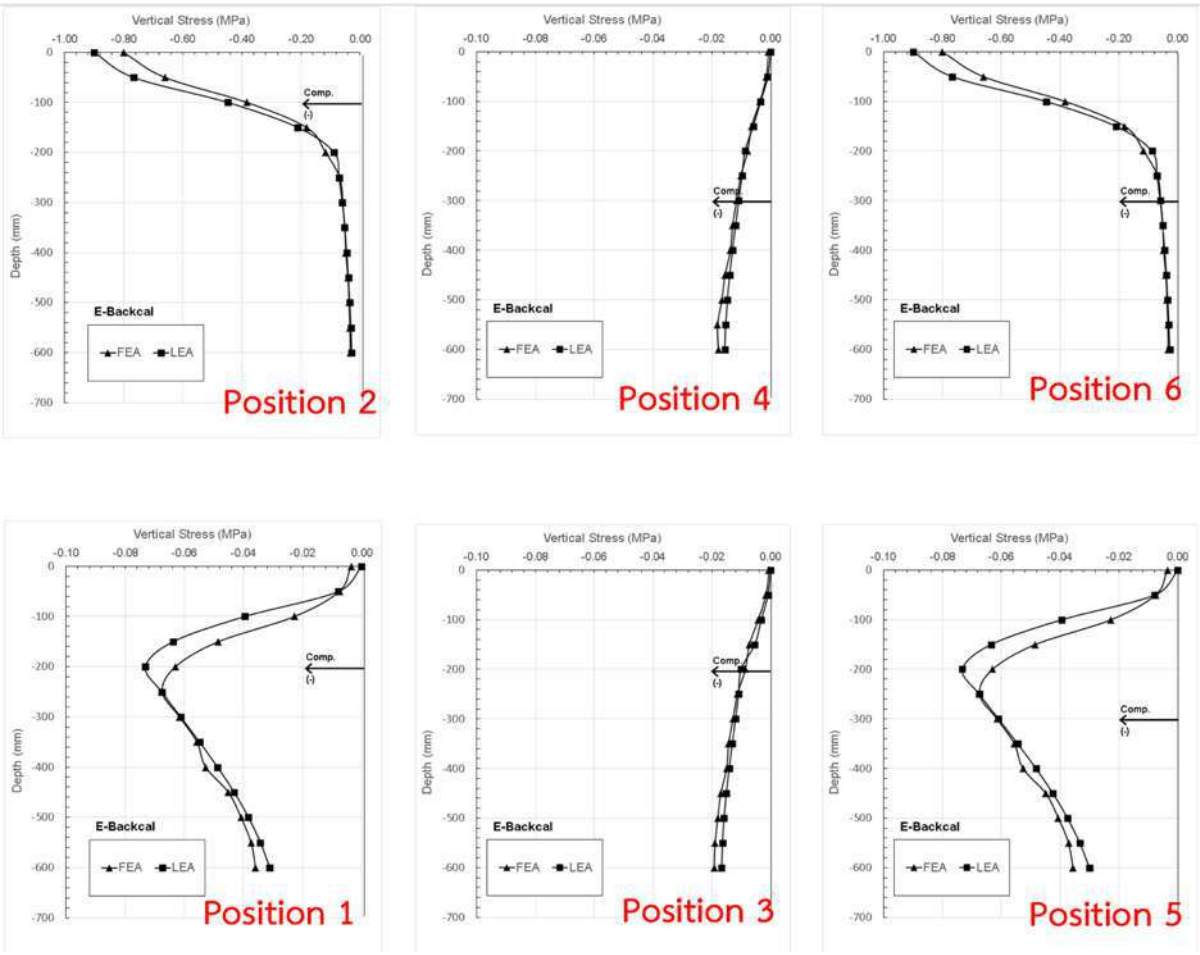
รูปที่ 9.49 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีสามเพลา-ล้อคู่



รูปที่ 9.50 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีสามเพลา-ล้อคู่



รูปที่ 9.51 ความเครียดแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีสามเพลา-ล้อคู่



รูปที่ 9.52 ความเค้นในแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีสามเพลา-ล้อคู่

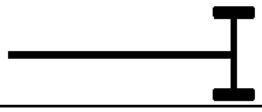
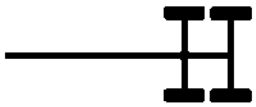
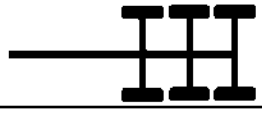
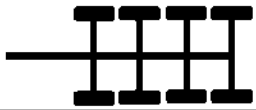
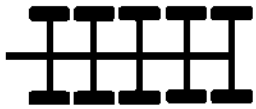
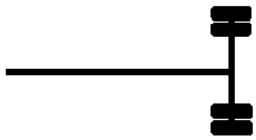
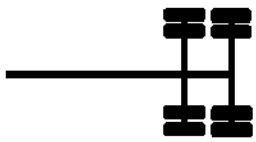
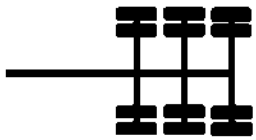
9.2 การวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลาย (Load Equivalency Factor, LEF)

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลาย (Load Equivalency Factor, LEF) ของรถบรรทุกตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์อัตราการทำลายจากทฤษฎี โดยมีรายละเอียดดังนี้

9.2.1 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน

น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน หมายถึง น้ำหนัก น้ำหนักบรรทุก หรือน้ำหนักลงเพลา ที่ห้ามเกินกว่าที่กำหนดไว้ตามกฎหมาย กรมทางหลวงประกาศน้ำหนักลงเพลาที่ยอมให้สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่ยานพาหนะสามารถเดินบนทางหลวง แบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลาและยาง สรุปไว้ในตารางที่ 9.5

ตารางที่ 9.5 น้ำหนักลงเพลาที่ยอมให้สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่ยานพาหนะสามารถเดินบนทางหลวง

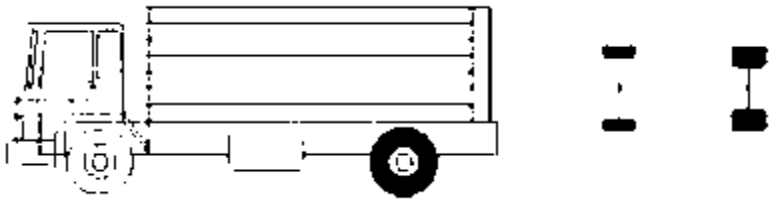
ชนิดของกลุ่มเพลา / ยาง	ภาพประกอบ	น้ำหนักลงเพลาไม่เกิน (กิโลกรัม)	น้ำหนักลงกลุ่มเพลาไม่เกิน (กิโลกรัม)
เพลาเดี่ยว / ยางเดี่ยว		7,000	7,000
เพลาคู่ / ยางเดี่ยว		6,500	13,000
3 เพลา / ยางเดี่ยว		6,300	18,900
4 เพลา / ยางเดี่ยว		6,300	25,200
5 เพลา / ยางเดี่ยว		6,300	31,500
เพลาเดี่ยว/ ยางคู่		11,000	11,000
เพลาคู่ / ยางคู่		10,000	20,000
3 เพลา / ยางคู่		8,500	25,500

○ น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เพลาเดี่ยว-ยางคู่

ยานพาหนะชนิดที่มี 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 6 เส้น ชนิดเพลาท้าย (เพลาที่ 2) ใช้ยางคู่ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาดังนี้

1) สำหรับรถขนส่งผู้โดยสารต้องมีน้ำหนักลงเพลาท้าย (เพลาที่ 2) ไม่เกิน 11,000 กิโลกรัม

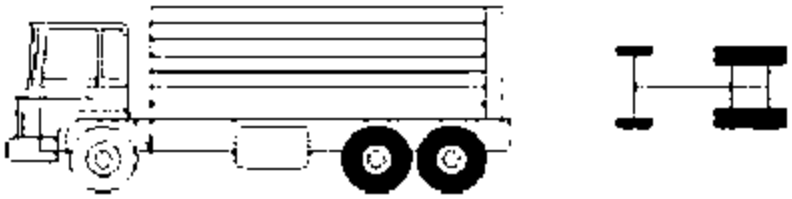
2) สำหรับยานพาหนะชนิดอื่นๆ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาท้าย (เพลาที่ 2) ไม่เกิน 11,000 กิโลกรัม หรือน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 15,000 กิโลกรัม (รูปที่ 9.53)



รูปที่ 9.53 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เพลาเดี่ยว-ยางคู่

- น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เพลาคู่-ยางคู่

ยานพาหนะชนิดที่มี 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ชนิดเพลาท้าย (เพลาที่ 2 และ เพลาที่ 3) เป็นเพลาคู่ ใช้ยางคู่ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาคู่ท้ายไม่เกิน 20,000 กิโลกรัม หรือน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 25,000 กิโลกรัม (รูปที่ 9.54)



รูปที่ 9.54 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เพลาคู่-ยางคู่

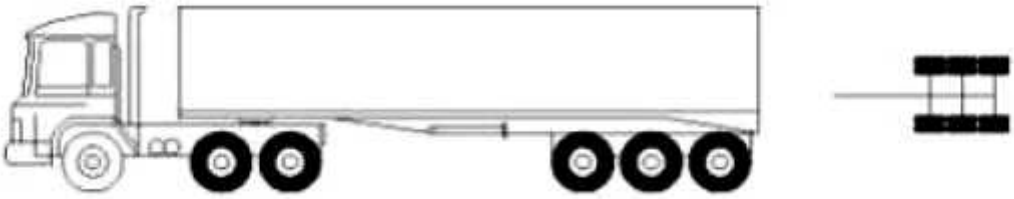
- น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน สามเพลา-ยางคู่

ตัวรถลากจูงมี 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ชนิดเพลาท้าย (เพลาที่ 2 และ เพลาที่ 3) เป็นเพลาคู่ ใช้ยางคู่ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาคู่ท้ายไม่เกิน 20,000 กิโลกรัม หรือน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 25,000 กิโลกรัม ตัวรถกึ่งพ่วงเป็นชนิดสามเพลา ใช้ยางคู่ ต้องมีน้ำหนักลงเพลารวมไม่เกิน 25,500 กิโลกรัม โดยระยะห่างระหว่างสลักพ่วง (King Pin) กับศูนย์กลางเพลาของเพลาที่ 1 ของตัวรถกึ่งพ่วงต้องไม่น้อยกว่า 8 เมตร ที่จดทะเบียนฯ ก่อนวันที่ 1 มกราคม 2553 มีระยะห่างสลักพ่วง ต่ำกว่า 8 เมตร ก็ได้ แต่ทั้งนี้ให้ใช้ได้ถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2557 และตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2558 เป็นต้นไป ตัวรถลากจูงและตัวรถพ่วงต้องมีน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุก (รูปที่ 9.55) ดังนี้

1) ตัวรถลากจูงและตัวรถพ่วงที่มีระยะห่างสลักพ่วงฯ ตั้งแต่ 7 เมตรขึ้นไป แต่ไม่ถึง 8 เมตร ต้องมีน้ำหนักฯ ไม่เกิน 49,000 กิโลกรัม

2) ตัวรถลากจูงและตัวรถพ่วงที่มีระยะห่างสลักพ่วงฯ ตั้งแต่ 6 เมตรขึ้นไป แต่ไม่ถึง 7 เมตร ต้องมีน้ำหนักฯ ไม่เกิน 47,000 กิโลกรัม

3) ตัวรถลากจูงและตัวรถพ่วงที่มีระยะห่างสลักพ่วงฯ ตั้งแต่ 4.5 เมตรขึ้นไป แต่ไม่ถึง 6 เมตร ต้องมีน้ำหนักฯ ไม่เกิน 45,000 กิโลกรัม



รูปที่ 9.55 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน สามเพลา-ยางคู่

อนึ่ง กรณียานพาหนะที่ยื่นขออนุญาตมีจำนวนเพลา กลุ่มเพลา หรือลักษณะของเพลาหรือกลุ่มเพลาแตกต่างจากตารางที่ 1 ผู้ขออนุญาตต้องแสดงรายการคำนวณค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างชั้นทาง โดยค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างชั้นทางสูงสุด ต้องไม่เกินความเครียด (Strain) ของเพลาคู่-ยางคู่ ที่มีน้ำหนักลงกลุ่มเพลา ไม่เกิน 20,000 กิโลกรัม (เพลาละ 10,000 กิโลกรัม) พร้อมแนบเอกสารรายการคำนวณโดยวิศวกรโยธาระดับไม่ต่ำกว่าสามัญวิศวกร

9.2.2 การคำนวณ Load Equivalency Factor (LEF)

คือ แฟกเตอร์ปรับค่าน้ำหนักเพลาต่างๆ ให้มีค่าเทียบเท่ากับน้ำหนักเพลาเดี่ยวมาตรฐาน โดย AASHTO ได้ให้คำนิยามค่า LEF ไว้ดังนี้ (David และ Paul, 1991; Yoder, 1959)

"LEF represents the ratio of the number of repetitions of any axle load configuration (single, tandem, tridem) necessary to cause the same reduction in PSI (Present Serviceability Index) as one application of an 18-kip single axle load"

จากคำนิยามดังกล่าวกลายเป็นที่รู้จักถึงอำนาจการทำลายของน้ำหนักเพลาใดๆ เทียบกับน้ำหนักเพลาเดี่ยวมาตรฐาน 18,000 ปอนด์ (8 ตัน) AASHTO นำผลการศึกษาถนนทดลอง AASHO Road Test ในปีค.ศ. 1960 มาวิเคราะห์และพัฒนาเป็น Empirical Regression Model เพื่อประมาณค่า LEF โดยมีสมการความสัมพันธ์แสดงได้ดังนี้

$$LEF = \left(\frac{W_{t18}}{W_{tx}}\right) \quad (32)$$

เมื่อ

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right) = 4.79 \log (18+1) - 4.79 \log (L_x + L_2) + 4.33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (33)$$

$$G_t = \log\left(\frac{4.2-p_t}{4.2-1.5}\right) \quad (34)$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081(Lx+L_2)^{3.23}}{(SN+1)^{5.19}(L_2)^{3.23}} \quad (35)$$

W_{tx} = จำนวนของเพลา

W_{t18} = จำนวนของน้ำหนักเพลามาตรฐาน

L_x = น้ำหนักลงเพลาหรือกลุ่มเพลา

L_2 = Axle code (1=เพลาเดี่ยว, 2=เพลาคู่, 3= เพลา)

SN = Structural Number (Asphalt Institute แนะนำ SN = 5)

p_t = Terminal Serviceability (Asphalt Institute แนะนำ p_t = 2.5)

$$\beta_{18} = 0.40 + \frac{0.081(18+1)^{3.23}}{(SN+1)^{5.19}(1)^{3.23}}$$

AASHTO (1986) ยังได้จัดทำตารางสรุปค่า LEF กรณีเพลาเดี่ยว (Single Axle) และเพลาคู่ (Tandem Axle) สำหรับถนนลาดยาง โดยใช้ค่า p_t และ SN เท่ากับ 2.5 และ 5 ตามลำดับ (Asphalt Institute, 1981) ดังแสดงในตารางที่ 9.6

ตารางที่ 9.6 Load Equivalency Factor (LEF) สำหรับถนนลาดยาง

Axle Load		Load Equivalency Factor		Axle Load		Load Equivalency Factor	
Lb	Ton	Single Axles	Tandem Axles	Lb	Ton	Single Axles	Tandem Axles
1,000	0.45	0.00002		41,000	18.60	23.27	2.29
2,000	0.91	0.00018		42,000	19.05	25.64	2.51
3,000	1.36	0.00072		43,000	19.50	28.22	2.75
4,000	1.81	0.00209		44,000	19.96	31.00	3.00
5,000	2.27	0.00500		45,000	20.41	34.00	3.27
6,000	2.72	0.01043		46,000	20.87	37.24	3.55
7,000	3.18	0.0196		47,000	21.32	40.74	3.85
8,000	3.63	0.0343		48,000	21.77	44.50	4.17
9,000	4.08	0.0562		49,000	22.23	48.54	4.51
10,000	4.54	0.0877	0.00688	50,000	22.68	52.88	4.86
11,000	4.99	0.1331	0.01008	51,000	23.13		5.23
12,000	5.44	0.189	0.0144	52,000	23.59		5.63
13,000	5.90	0.264	0.0199	53,000	24.04		6.04
14,000	6.35	0.360	0.0270	54,000	24.49		6.47
15,000	6.80	0.478	0.0360	55,000	24.95		6.93
16,000	7.26	0.623	0.0472	56,000	25.40		7.41
17,000	7.71	0.796	0.0608	57,000	25.85		7.92
18,000	8.16	1.000	0.0773	58,000	26.31		8.45
19,000	8.62	1.24	0.0971	59,000	26.76		9.01
20,000	9.07	1.51	0.1206	60,000	27.22		9.59
21,000	9.53	1.83	0.148	61,000	27.67		10.20
22,000	9.98	2.18	0.180	62,000	28.12		10.84
23,000	10.43	2.58	0.217	63,000	28.58		11.52
24,000	10.89	3.03	0.260	64,000	29.03		12.22
25,000	11.34	3.53	0.308	65,000	29.48		12.96
26,000	11.79	4.09	0.364	66,000	29.94		13.73
27,000	12.25	4.17	0.426	67,000	30.39		14.54
28,000	12.70	5.39	0.495	68,000	30.84		15.38
29,000	13.15	6.14	0.572	69,000	31.30		16.26
30,000	13.61	6.97	0.658	70,000	31.75		17.19
31,000	14.06	7.88	0.753	71,000	32.21		18.15
32,000	14.51	8.88	0.857	72,000	32.66		19.15
33,000	14.97	9.98	0.971	73,000	33.11		20.22
34,000	15.42	11.18	1.095	74,000	33.57		21.32
35,000	15.88	12.50	1.23	75,000	34.02		22.47
36,000	16.33	13.93	1.38	76,000	34.47		23.66
37,000	16.78	15.50	1.53	77,000	34.93		24.91
38,000	17.24	17.20	1.70	78,000	35.38		26.22
39,000	17.69	19.06	1.89	79,000	35.83		27.58
40,000	18.14	21.08	2.08	80,000	36.29		28.99

ที่มา : Asphalt Institute (1981)

นอกจากวิธีของ AASHTO ซึ่งเป็นวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) แล้ว ยังมีวิธีคำนวณค่า LEF โดยการวิเคราะห์ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และวิธีคำนวณค่า LEF โดยการตรวจวัด (Mechanistic Approach) ซึ่งทั้งสองวิธีใช้สมการความสัมพันธ์เดียวกัน ดังนี้

$$\text{LEF} = \left(\frac{\text{Strain for Candidate Axle}}{\text{Strain for Standard Axle}}\right)^{n} \quad (36)$$

เมื่อ n = จำนวนเท่าของอำนาจการทำลาย สำหรับถนนลาดยาง ซึ่งมีค่าระหว่าง 3 กับ 6 และมีค่าทั่วไปเท่ากับ 4 และค่าความเครียด (Strain) จากสมการข้างต้น หาได้จาก (1) ผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Linear Elastic Analysis, LEA ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทาง (Theoretical Approach) และ (2) ผลการตรวจวัดจริงในสนาม (Mechanistic Approach) แต่อย่างไรก็ตาม ค่า LEF สามารถประมาณได้จากกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) ได้เช่นกัน ดังสมการต่อไปนี้

$$\mathrm{LEF} = \left(\frac{\textbf{Axle Load,Wx}}{\textbf{Standard Axle Load,Ws}}\right)^{4} \qquad (37)$$

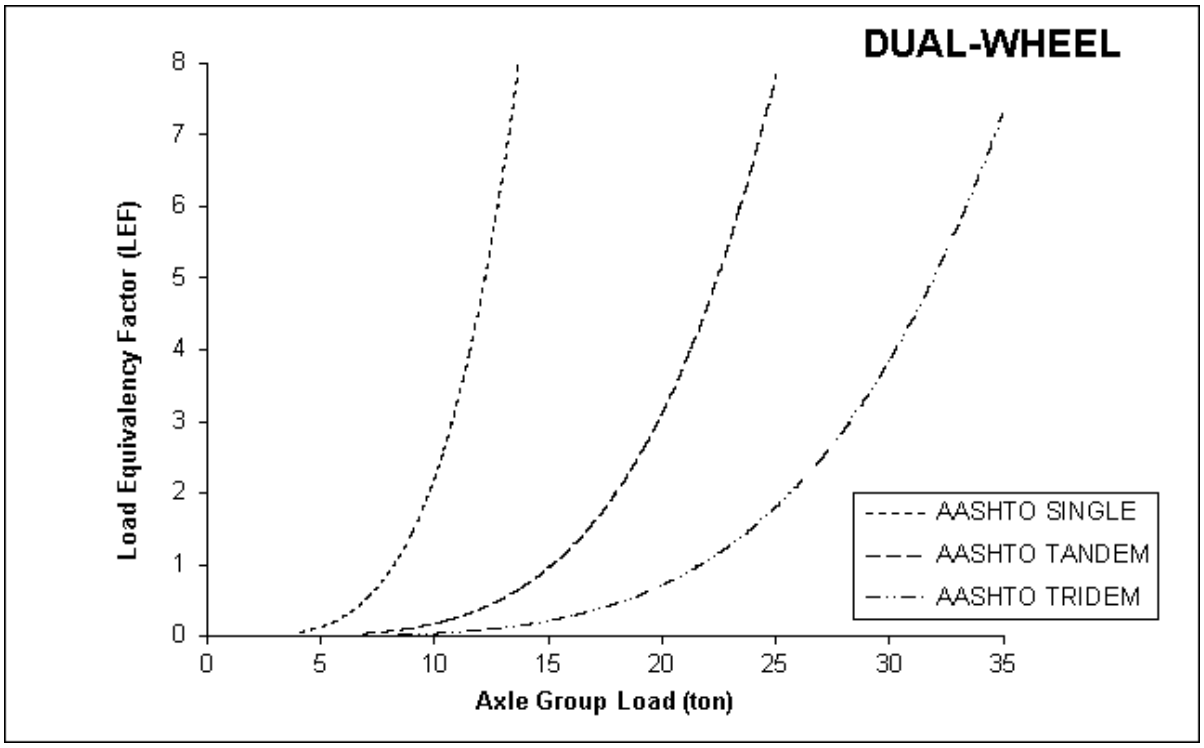
โดยน้ำหนักเพลามาตรฐาน (Standard Axle Group Load, W_s) แนะนำโดยหน่วยงานต่างๆ สรุปไว้ในตารางที่ 9.7

ตารางที่ 9.7 น้ำหนักเพลามาตรฐาน

Axle/Wheel Configuration	Standard Axle Group Load (tons)		
	U.S. Department of Transport, Huang (1993)	Queensland Transport (1990)	Department of Highways (2003)
Single/Dual	8.2	8.2	11
Tandem/Dual	16.3	13.8	20
Tridem/Dual	24.5	18.5	25.5

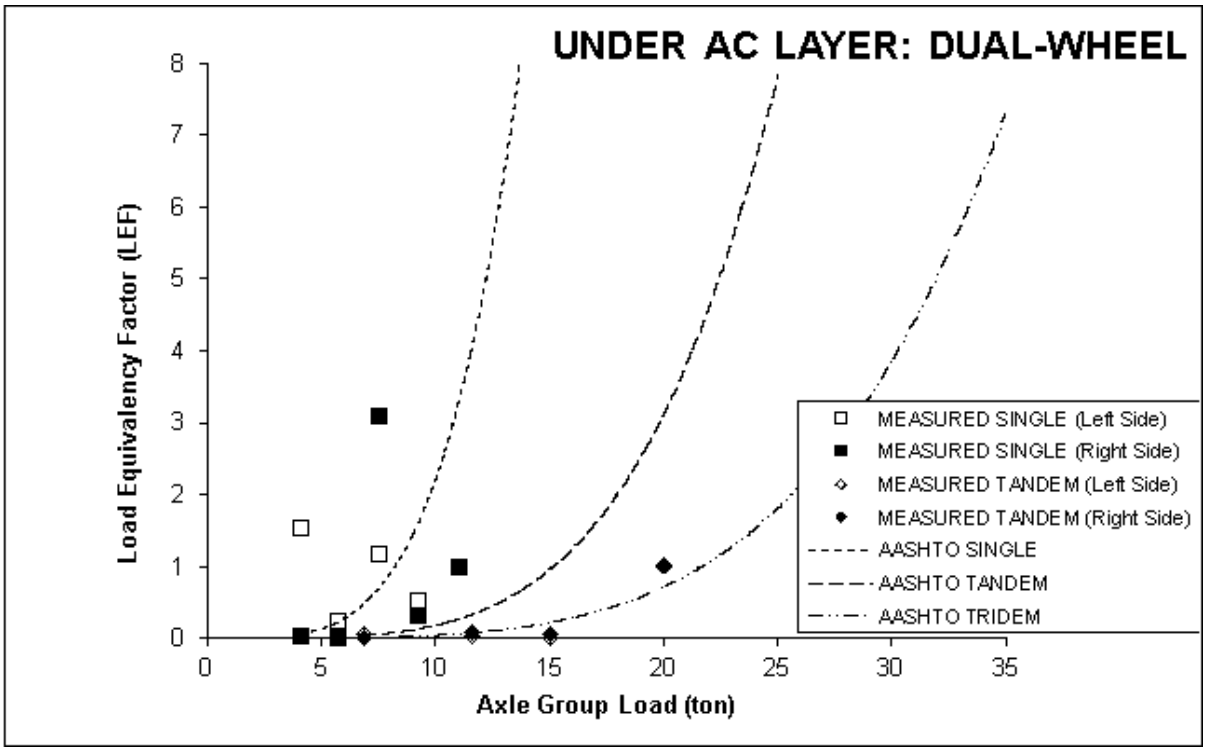
9.2.3 ผลการคำนวณ Load Equivalency Factor (LEF)

ผลการคำนวณค่า Load Equivalency Factor (LEF) โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986) ดังแสดงในรูปที่ 9.56 ค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) เพิ่มขึ้นตามน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลา (Tridem)

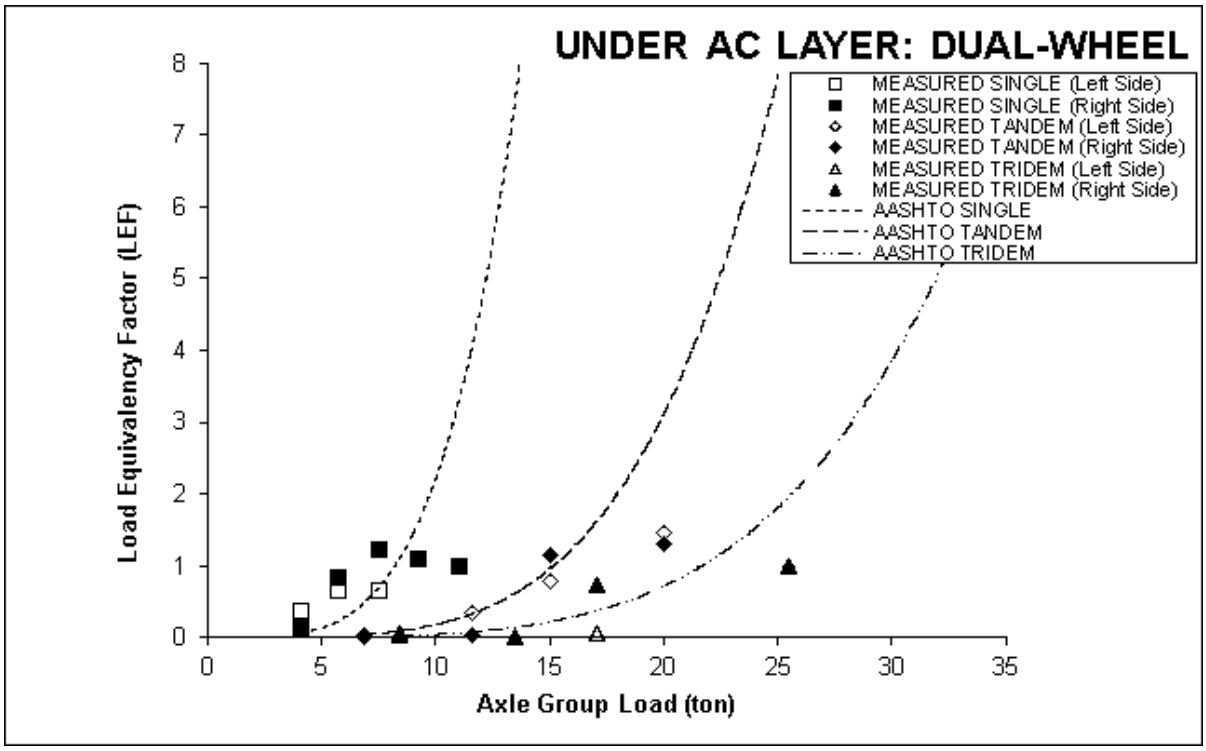


รูปที่ 9.56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986)

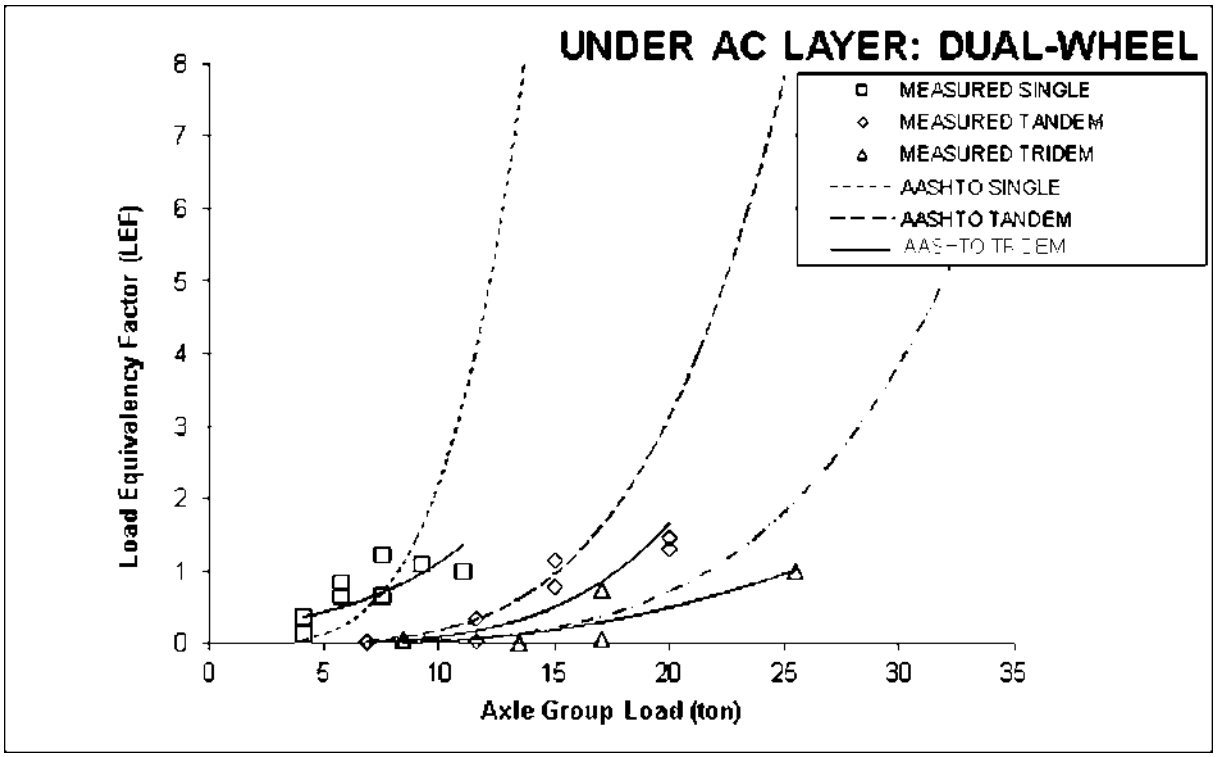
ผลการคำนวณค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัดจริงในสนาม (Mechanistic Approach) ดังแสดงในรูปที่ 9.57 ถึง รูปที่ 9.62 ค่าความเครียด (Strain) ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (AC) ตรวจวัดในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรและในแนวขนานทิศทางจราจร นำมาใช้คำนวณค่า LEF กรณียางคู่ ตามน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลา (Tridem) ดังแสดงในรูปที่ 9.57 และ รูปที่ 9.58 ตามลำดับ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา พบว่า ค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากการตรวจวัดค่า Strain ใต้ผิว AC ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร มีความแปรปรวนสูงกว่าค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากการตรวจวัดค่า Strain ใต้ผิว AC ในแนวขนานทิศทางจราจร ค่า LEF คำนวณจากข้อมูลค่าความเครียดใต้ผิวทาง AC ตรวจวัดในแนวขนานทิศทางจราจรในรูปที่ 9.58 นำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงสถิติ ดังแสดงในรูปที่ 9.59 นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) ของโครงการนี้ กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) ซึ่งเสนอโดย AASHTO (1986) ที่น้ำหนักลงกลุ่มเพลาเดียวกัน ยังแสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของข้อมูลค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัดจะต่ำกว่าค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์



รูปที่ 9.57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain ใต้ผิวทาง AC ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร (Mechanistic Approach)

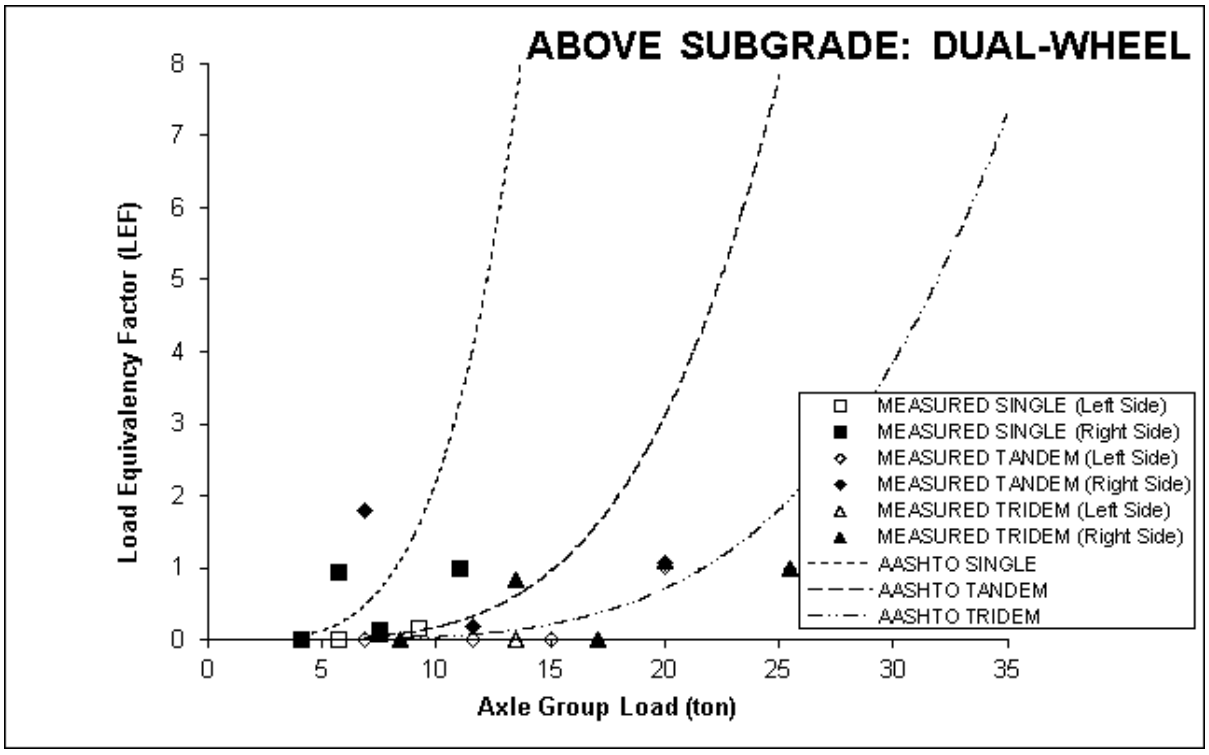


รูปที่ 9.58 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain ใต้ผิวทาง AC ในแนวขนานทิศทางจราจร (Mechanistic Approach)

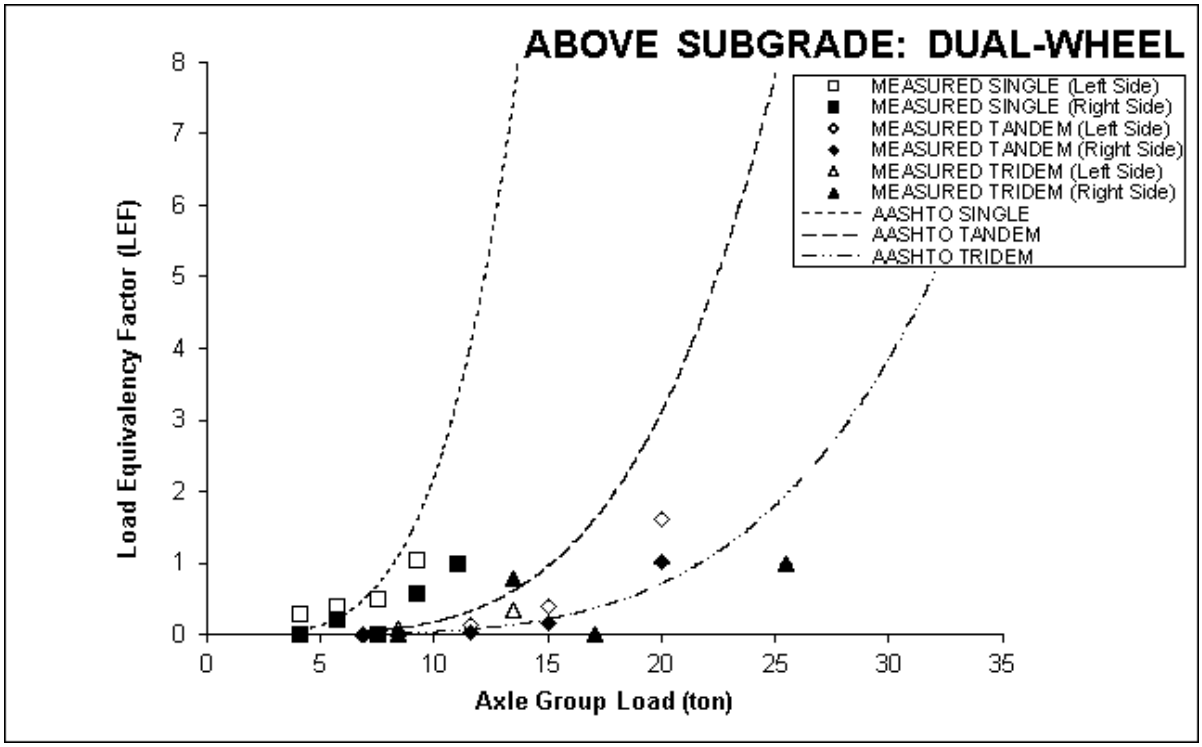


รูปที่ 9.59 การเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach)

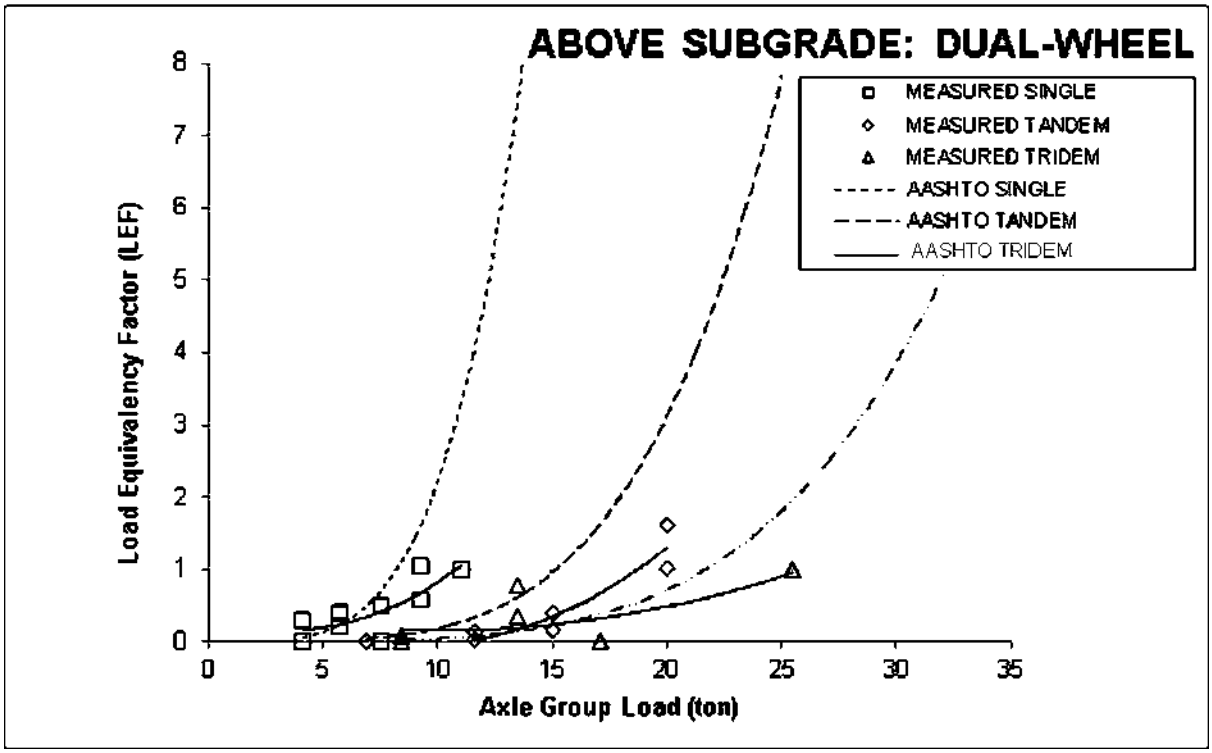
ในขณะที่ค่า Strain เหนือ Subgrade ตรวจวัดในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรและในแนวขนานทิศทางจราจร นำมาใช้คำนวณค่า LEF กรณียางคู่ ตามน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลา (Tridem) เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 9.60 และรูปที่ 9.61 ตามลำดับ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลาพบว่า ค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากการตรวจวัดค่า Strain เหนือ Subgrade ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร มีความแปรปรวนสูงกว่าค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากการตรวจวัดค่า Strain เหนือ Subgrade ในแนวขนานทิศทางจราจร ค่า LEF คำนวณจาก ข้อมูลค่าความเครียดเหนือ Subgrade ตรวจวัดในแนวขนานทิศทางจราจรในรูปที่ 9.61 นำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงสถิติ ดังแสดงในรูปที่ 9.62 นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) ของโครงการนี้ กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) ซึ่งเสนอโดย AASHTO (1986) ที่น้ำหนักลงกลุ่มเพลาเดียวกัน ยังแสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของข้อมูลค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัดจะต่ำกว่าค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์



รูปที่ 9.60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain เหนือ Subgrade ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร (Mechanistic Approach)

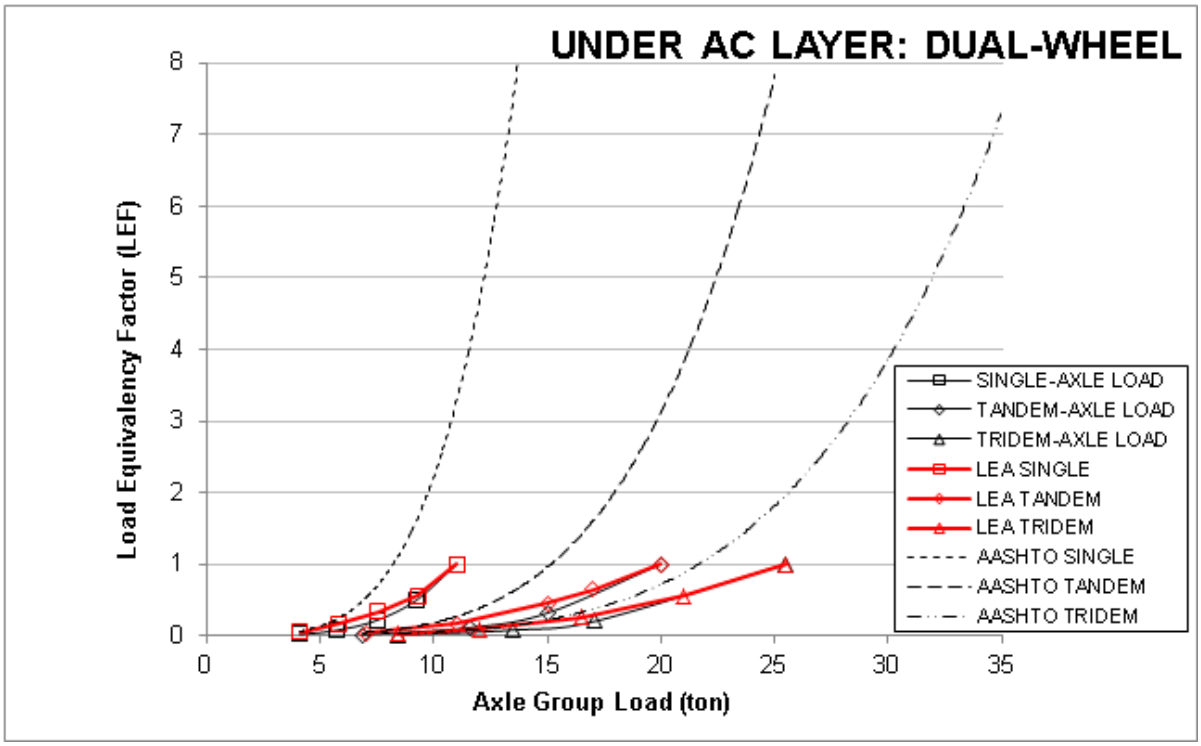


รูปที่ 9.61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain เหนือ Subgrade ในแนวขนานทิศทางจราจร (Mechanistic Approach)

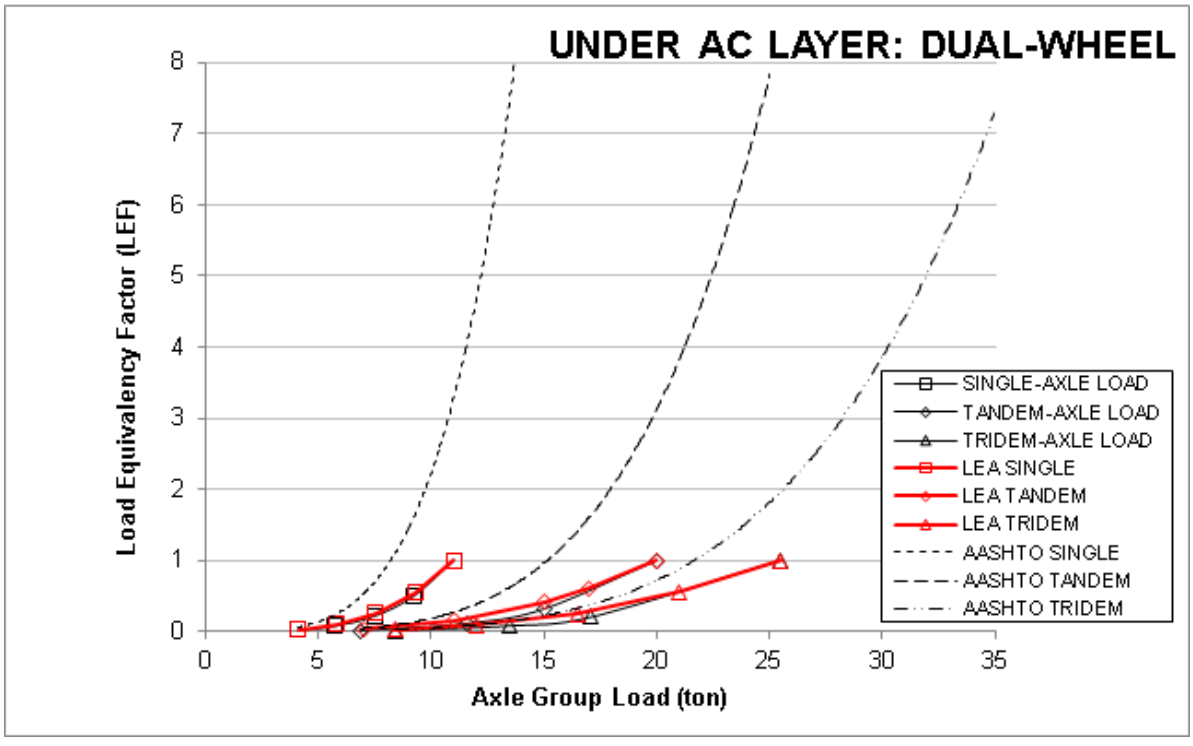


รูปที่ 9.62 การเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach)

ผลการคำนวณค่า LEF โดยการวิเคราะห์ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) ดังแสดงในรูปที่ 9.63 ถึงรูปที่ 9.65 ค่าความเครียด (Strain) ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (AC) คำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Linear Elastic Analysis (LEA) ทั้งในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรและในแนวขนานทิศทางจราจร นำมาใช้คำนวณค่า LEF กรณียางคู่ ตามน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลา (Tridem) ดังแสดงในรูปที่ 9.63 และรูปที่ 9.64 ตามลำดับ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลาพบว่า กรณีค่า Strain ในแนวขนานทิศทางจราจร ค่า LEF ซึ่งคำนวณได้ด้วยโปรแกรม LEA ใกล้เคียงกับค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากกฎยกกำลังสี่ ในขณะที่กรณีค่า Strain ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร ค่า LEF ซึ่งคำนวณได้ด้วยโปรแกรม LEA แตกต่างกับค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากกฎยกกำลังสี่เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า ที่น้ำหนักลงกลุ่มเพลาเดียวกัน แนวโน้มของข้อมูลค่า LEF โดยวิธีการวิเคราะห์ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) จะต่ำกว่าค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986)



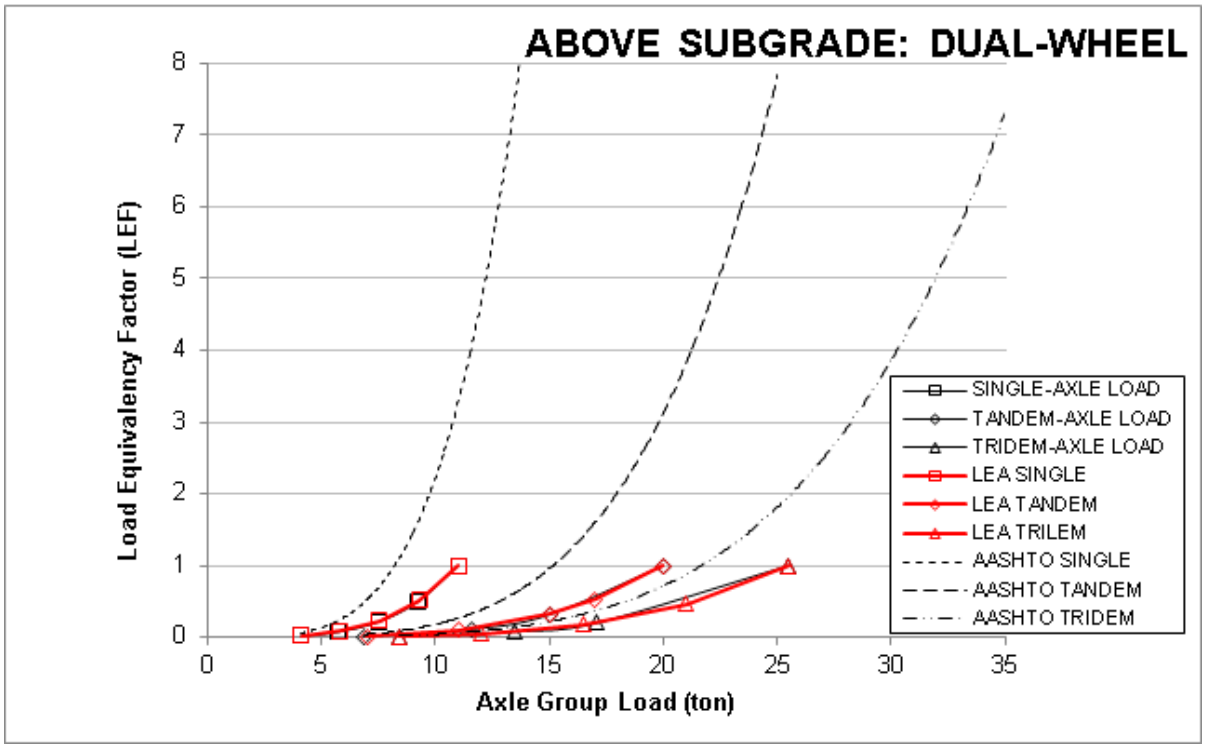
รูปที่ 9.63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain ใต้ผิวทาง AC ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law)



รูปที่ 9.64 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain ใต้ผิวทาง AC ในแนวขนานทิศทางจราจร ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law)

ในขณะที่ค่า Strain เหนือ Subgrade วิเคราะห์ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) ได้นำมาใช้คำนวณค่า LEF กรณียางคู่ ตามน้ำหนักลง

กลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลา (Tridem) เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 9.65 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา พบว่า ค่า LEF คำนวณได้จากโปรแกรม LEA ใกล้เคียงกับค่า LEF คำนวณได้จากกฎยกกำลังสี่ ทั้งนี้ค่า LEF วิเคราะห์จากค่า Strain เหนือ Subgrade ใกล้เคียงกว่าค่า LEF วิเคราะห์จากค่า Strain ใต้ผิว AC นอกจากนี้ยังพบว่า ที่น้ำหนักลงกลุ่มเพลาเดียวกัน แนวโน้มของข้อมูลค่า LEF โดยวิธีการวิเคราะห์ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) จะต่ำกว่าค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986)



รูปที่ 9.65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain เหนือ Subgrade ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law)

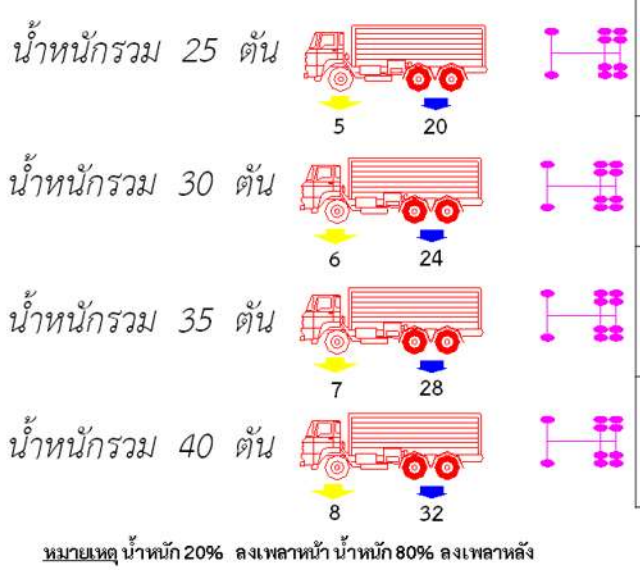
ผลการคำนวณค่า LEF กรณียางเดี่ยวและยางคู่ ตามน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) กฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) และวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986) สรุปไว้ในตารางที่ 9.8 และ ตารางที่ 9.9 ตามลำดับ โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลา (Tridem) ตัวอย่างการคำนวณค่า LEF สำหรับรถบรรทุกสิบล้อพิกัดน้ำหนักรวมต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 9.66

ตารางที่ 9.8 ผลการคำนวณค่า LEF กรณียางเดี่ยว ตามน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load)

AXLE	LEF (MEASURED)			LEF (FOURTH POWER LAW)			LEF (AASHTO)		
GROUP	SINGLE	TANDEM	TRIDEM	SINGLE	TANDEM	TRIDEM	SINGLE	TANDEM	TRIDEM
LOAD (t)	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE
1									
3	0.0924	-	-	0.0337	-	-	-	-	-
5	0.0964	-	-	0.2603	-	-	-	-	-
7	0.9932	-	-	1.0000	-	-	-	-	-
9	2.7828	-	-	2.7326	-	-	-	-	-
11	5.4652	-	-	6.0979	-	-	-	-	-
13	9.0404	-	-	11.8955	-	-	-	-	-

ตารางที่ 9.9 ผลการคำนวณค่า LEF กรณียางคู่ ตามน้ำหนักลงกลุ่มเพลา (Axle Group Load)

AXLE	LEF (MEASURED)			LEF (FOURTH POWER LAW)			LEF (AASHTO)		
GROUP	SINGLE	TANDEM	TRIDEM	SINGLE	TANDEM	TRIDEM	SINGLE	TANDEM	TRIDEM
LOAD (t)	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE	AXLE
1									
3	0.1593			0.0055			0.0156		
5	0.1877			0.0427			0.1324		
7	0.3433			0.1640			0.5380		
9	0.6261			0.4481			1.4675		
11	1.0361			1.0000			3.1544		
13	1.5733	0.1108		1.9508	0.1785		5.8814	0.5457	
15	2.2377	0.3290	0.2347	3.4578	0.3164	0.1197	10.0663	0.9796	0.2194
17	3.0293	0.6400	0.3163	5.7046	0.5220	0.1975	16.3053	1.6140	0.3714
19	3.9481	1.0438	0.4251	8.9011	0.8145	0.3082	25.3835	2.4880	0.5906
21		1.5404	0.5611		1.2155	0.4600		3.6423	0.8918
23		2.1298	0.7243		1.7490	0.6618		5.1241	1.2898
25		2.8120	0.9147		2.4414	0.9238		6.9908	1.7987
27		3.5870	1.1323		3.3215	1.2569		9.3136	2.4324
29		4.4548	1.3771		4.4205	1.6728		12.1790	3.2051
31			1.6491			2.1842			4.1316
33			1.9483			2.8048			5.2287
35			2.2747			3.5490			6.5154
37			2.6283			4.4325			8.0137
39			3.0091			5.4714			9.7490



	LEF (Measured)	LEF (Fourth Power Law)
น้ำหนักรวม 25 ตัน	0.0964+1.2805 = 1.38	0.2603+1.0000 = 1.26
น้ำหนักรวม 30 ตัน	0.4332+2.4593 = 2.89	0.5398+2.0736 = 2.61
น้ำหนักรวม 35 ตัน	0.9932+4.0093 = 5.00	1.0000+3.8416 = 4.84
น้ำหนักรวม 40 ตัน	1.7764+5.9305 = 7.71	1.7060+6.5536 = 8.26

หมายเหตุ น้ำหนัก 20% ลงเพลาหน้า น้ำหนัก 80% ลงเพลาหลัง

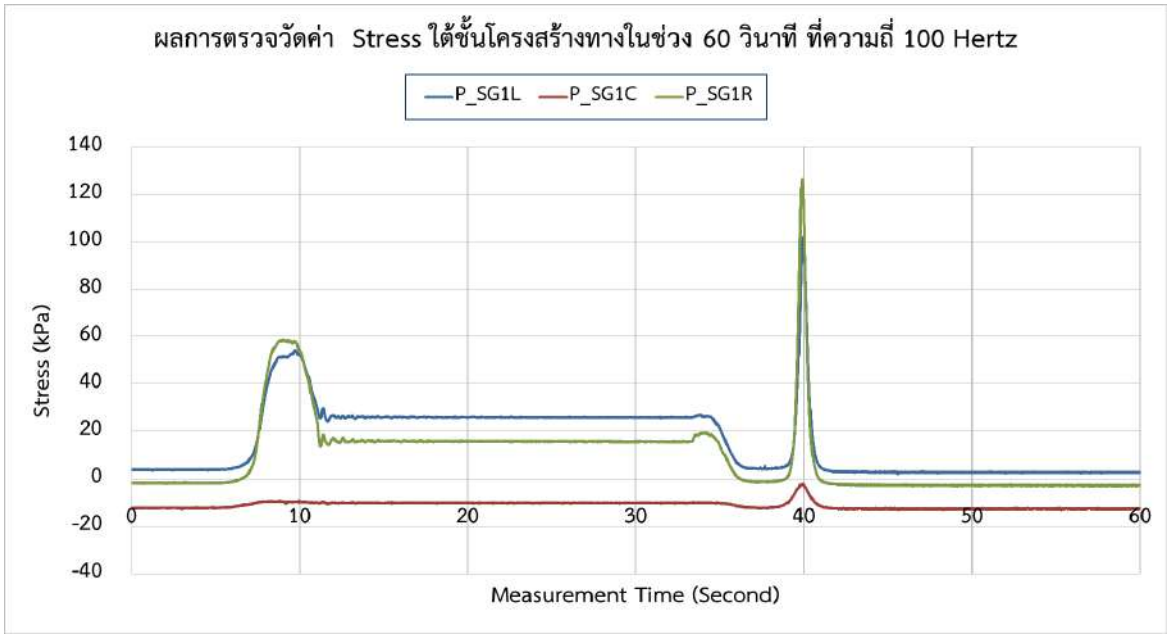
รูปที่ 9.66 ตัวอย่างการคำนวณค่า LEF สำหรับรถบรรทุกสิบล้อพิกัดน้ำหนักรวมต่างๆ

9.3 การปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง

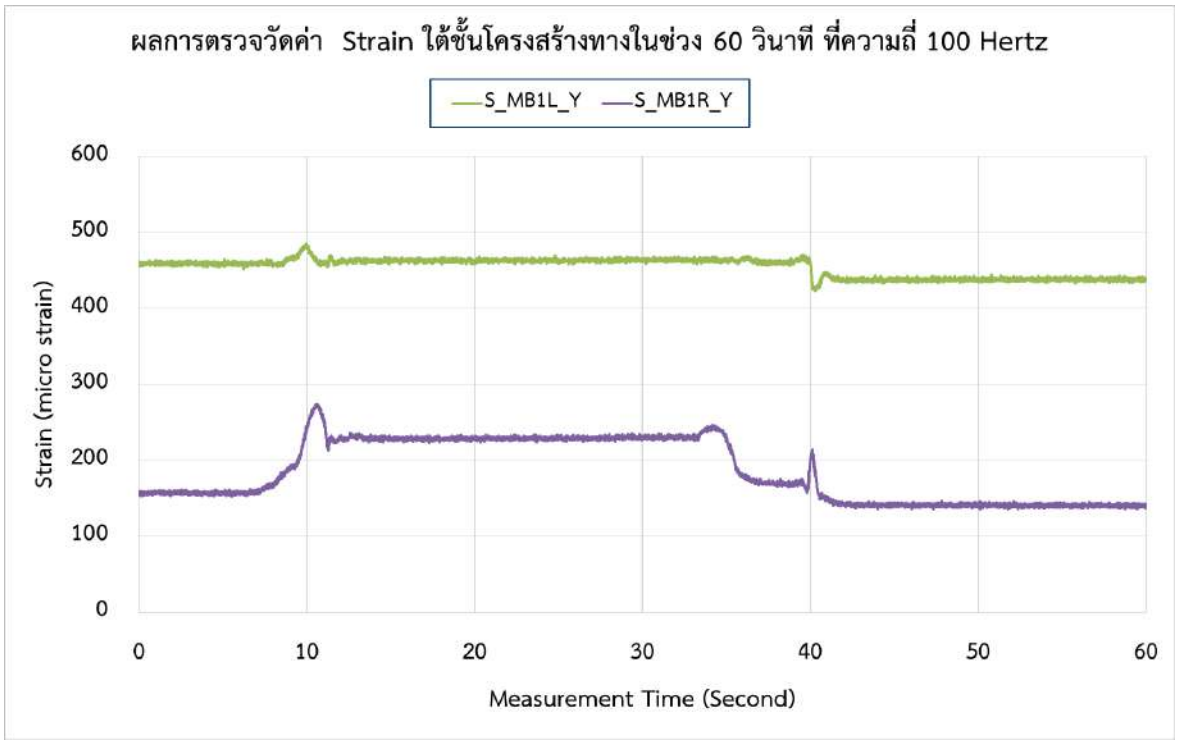
ที่ปรึกษาได้ดำเนินการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง ตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนน ซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จ จำนวน 2 แปลงในระยะที่หนึ่ง และที่ติดตั้งเพิ่มเติม จำนวน 1 แปลงซึ่งจะประกอบด้วย 1) Simplified Model สำหรับงานปฏิบัติการ และ 2) Mechanistic (Analytical) Model สำหรับงานวิจัยวิชาการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

9.3.1 ลักษณะกราฟความเค้นและความเครียดจากการทดสอบวิ่งรถบรรทุกผ่านแปลงตรวจวัดถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

ผลการทดสอบทดสอบรถ 6 ล้อ และรถกึ่งพ่วง แปลงถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท สามารถนำมาพล็อตเป็นค่าความเค้นและความเครียด เปรียบเทียบกับเวลา พบว่ามีลักษณะสอดคล้องกับผลการทดสอบในแปลงถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี จึงจะได้แสดงผลบางส่วนเท่านั้น รูปที่ 9.67 แสดงค่าความเค้น กรณีรถหยุดนิ่งรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เพลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Pressure Cell ชั้น Top Subgrade (60 cm) แถวที่ 1 ซึ่งมีลักษณะความเค้นเพิ่มขึ้นในช่วงที่รถใกล้หยุดนิ่ง หรือการเบรกรถทำให้เกิดแรงกระทำกับวัสดุชั้นทางมากขึ้นนั่นเองรูปที่ 9.68 แสดงค่าความเครียดในกรณีเดียวกัน ซึ่งพบลักษณะการเพิ่มขึ้นในช่วงรถใกล้หยุดนิ่ง เช่นเดียวกัน

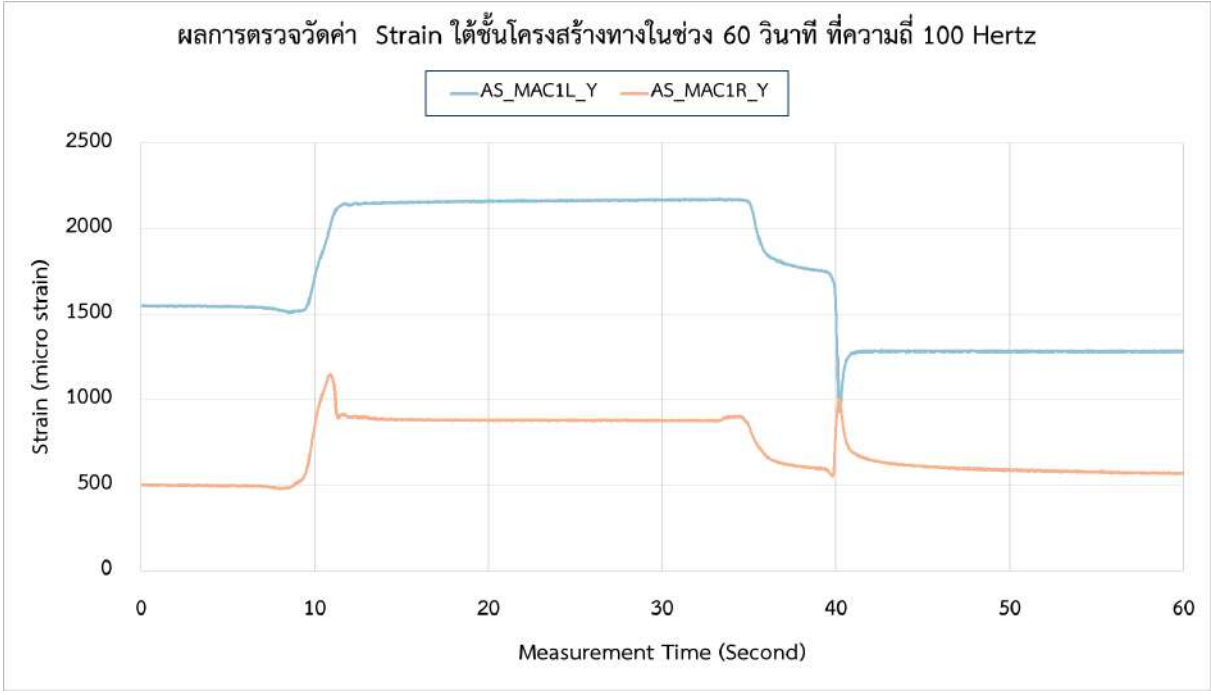


รูปที่ 9.67 ความเค้น กรณีรถหยุดนิ่งรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เพลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Pressure Cell ชั้น Top Subgrade (60 cm) แถวที่ 1



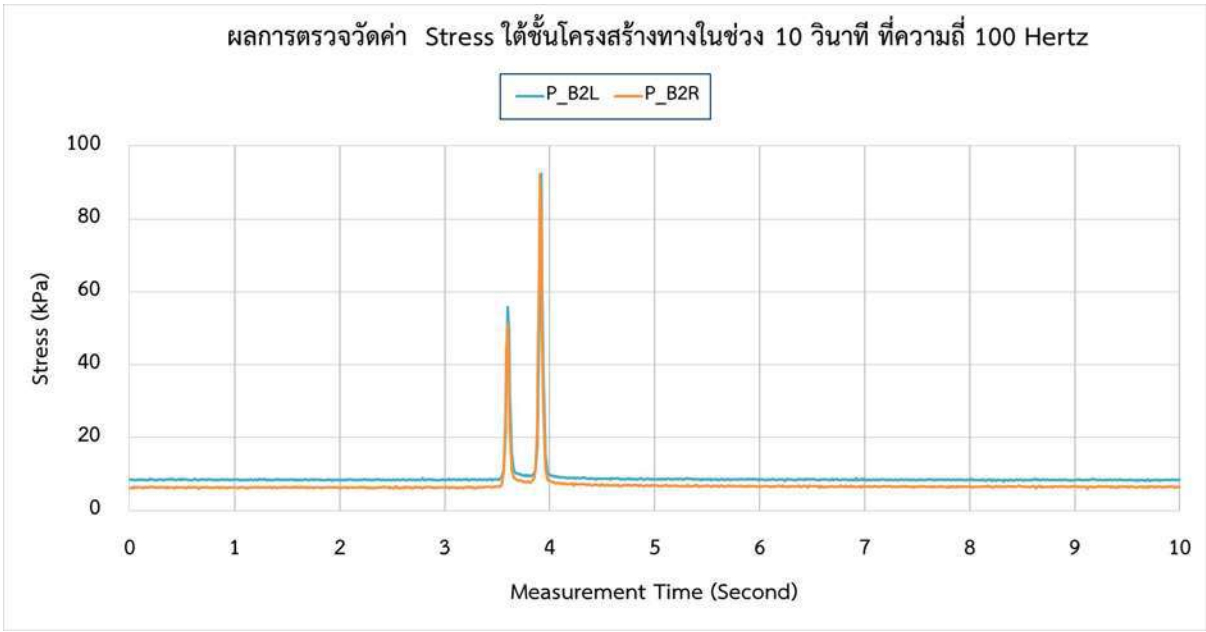
รูปที่ 9.68 ความเครียด กรณี รถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เพลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Middle Base (30 cm) แถวที่ 1

รูปที่ 9.69 แสดงความเครียดในชั้น Middle AC (10 cm) แถวที่ 1 กรณีเดียวกัน พบว่าความเครียดในชั้นวัสดุ AC มีลักษณะความหนืด (Viscous) โดยความเครียดจะไม่กลับมาเท่าเดิมทันทีภายหลังน้ำหนักบรรทุกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดในแปลงโพธารามเช่นเดียวกัน



รูปที่ 9.69 ความเครียด กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เพลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Middle AC (10 cm) แถวที่ 1

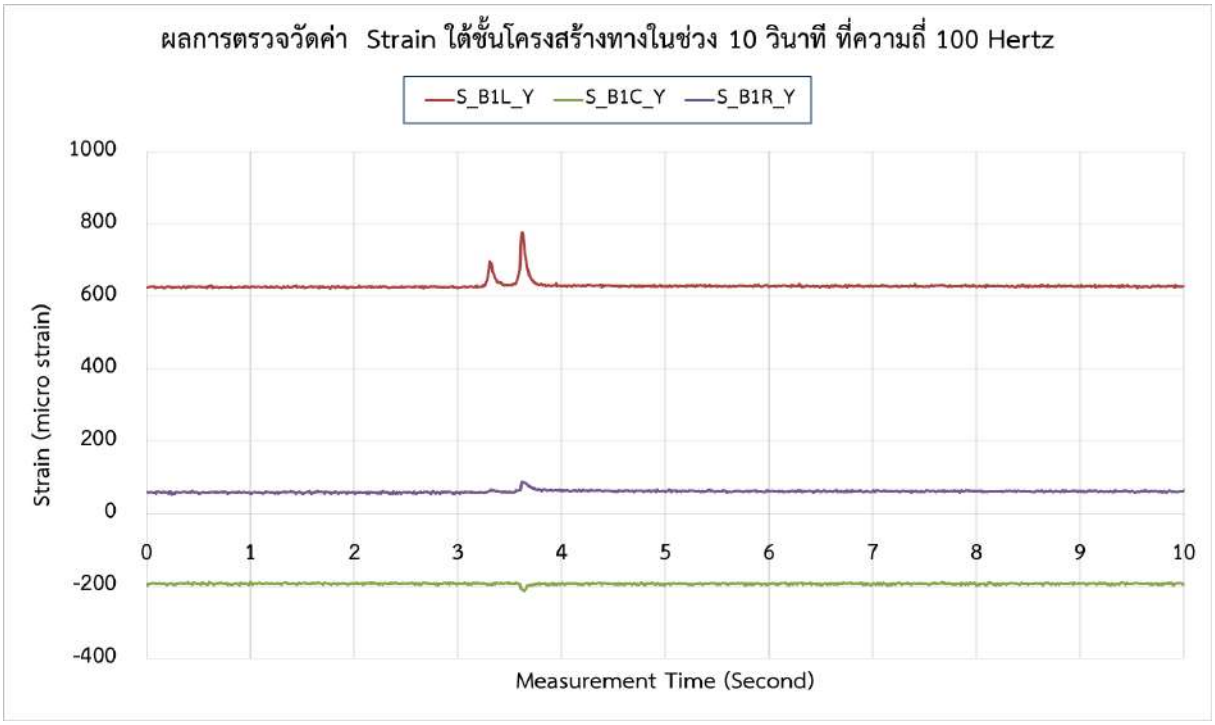
ตัวอย่างผลการตรวจวัดในกรณีรถวิ่งที่ความเร็วต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 9.70 ถึง รูปที่ 9.72 จากรูปที่ 9.70 พบว่า ความเค้นที่ชั้น Bottom Base (40 cm) มีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นแบบ Pulse ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วรถบรรทุก และมีลักษณะสอดคล้องกับผลการศึกษาในแปลงโพธารามเช่นเดียวกัน



รูปที่ 9.70 ความเค้น กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Pressure Cell ชั้น Bottom Base (40 cm) แถวที่ 2

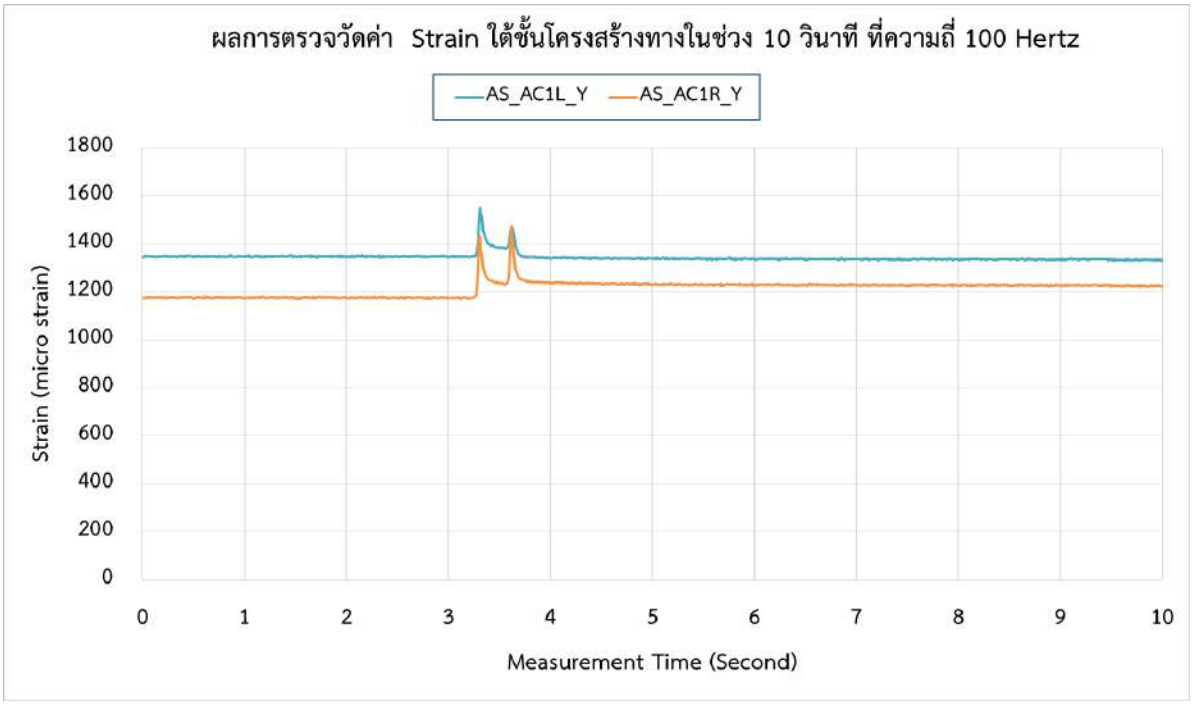
จากรูปที่ 9.71 แสดงความเครียดในชั้น Bottom base ที่ตำแหน่งใต้ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลางช่องจราจร ซึ่งพบว่าบริเวณใต้ล้อซ้ายมีแนวโน้มค่าความเครียดเพิ่มขึ้น (Tensile strain) หรือความสูงของ Pulse มากกว่าที่ใต้ล้อขวาซึ่งส่วนหนึ่งคาดว่าเนื่องจากล้อรถบรรทุกอาจไม่เหยียบเหนือตำแหน่งของอุปกรณ์ Strain

Gage อย่างตรงทีเกียว ส่วนค่าความเครียด ที่กึ่งกลางช่องจราจร พบว่ามีค่าลบหรือเป็นลักษณะของ Compressive strain ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในแปลงโพธารามเช่นกัน



รูปที่ 9.71 ความเครียด กรณี รถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Bottom Base (40 cm) แถวที่ 1

จากรูปที่ 9.72 แสดงความเครียดในชั้น Bottom AC ที่ตำแหน่งใต้ล้อซ้าย และล้อขวา พบการเพิ่มขึ้นของความเครียดในลักษณะ Pulse (Tensile strain) เช่นกันโดยพบว่าเมื่อน้ำหนักกระทำผ่านไปแล้ว ค่าความเครียดไม่ลดกลับมาสู่จุดเดิม ซึ่งเป็นลักษณะ Viscous ดังได้กล่าวมาข้างต้น ลักษณะความเครียดนี้สอดคล้องกับผลการตรวจวัดในแปลงโพธารามเช่นกัน



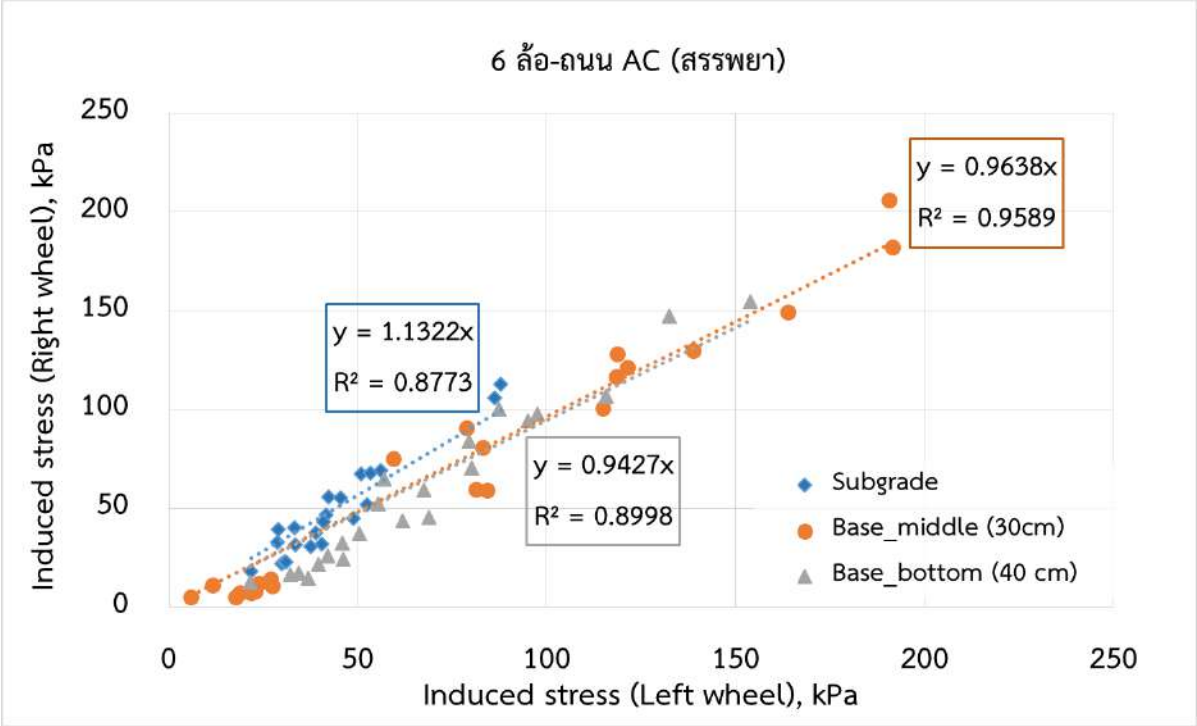
รูปที่ 9.72 ความเครียด กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Asphalt Strain Gage ชั้น Bottom AC (20 cm) แถวที่ 1

9.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดและตัวแปรต่างๆจากการทดสอบวิ่งรถบรรทุกผ่านแปลงตรวจวัดถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

จากผลการทดสอบรถ 6 ล้อ ณ แปลงถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท สามารถนำผลการตรวจวัดความเค้น และความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก หรือ Induced stress และ Induced strain ที่บริเวณตำแหน่งต่างๆ มาสร้างความสัมพันธ์เปรียบเทียบได้ดังต่อไปนี้

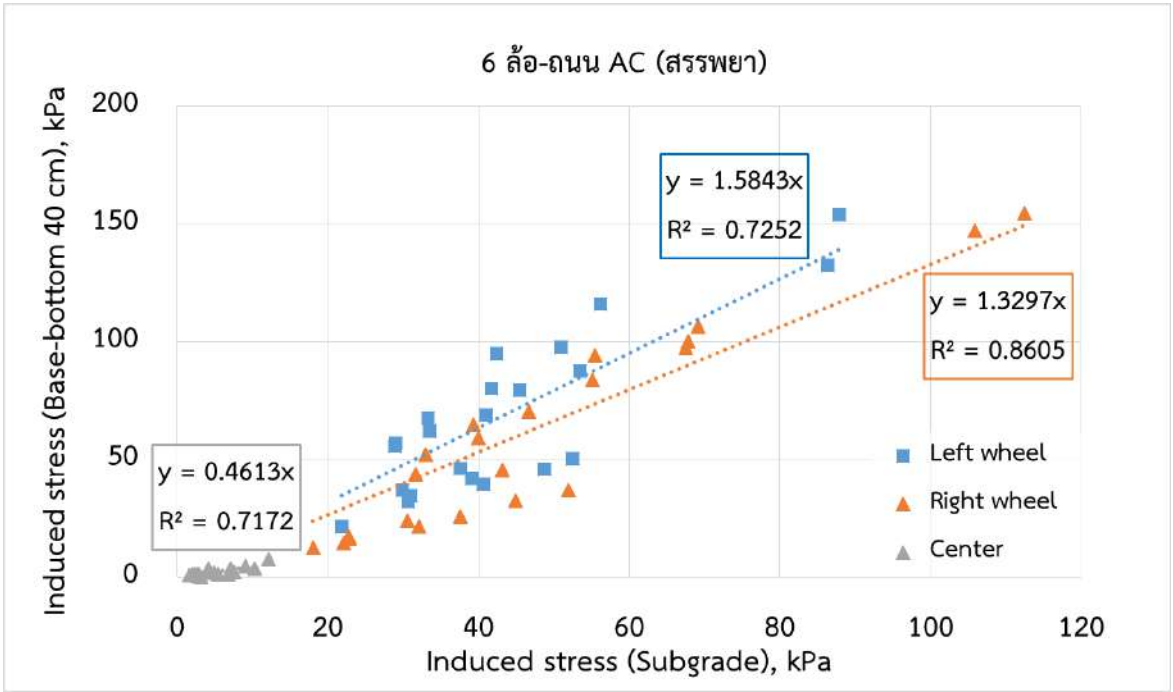
รูปที่ 9.73 แสดง ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา เหนือชั้น Subgrade และ Base จากความสัมพันธ์พบว่าค่า Stress ใต้ล้อซ้ายและใต้ล้อขวามีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ทั้งในชั้น Subgrade และในชั้น Base ที่ความลึก 30 ซม.และความลึก 40 ซม. ทั้งนี้มีแนวโน้มแตกต่างจากข้อมูลที่พบจากแปลงทดสอบโพธาราม (เนื่องจากข้อมูลจากแปลงโพธาราม ที่ค่า Stress ในชั้น Subgrade ใต้ล้อขวามีค่าน้อยกว่าใต้ล้อขวา) สาเหตุที่เป็นไปได้ของความแตกต่างระหว่างแปลงสรรพยาและแปลงโพธารามนี้อาจเกิดเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เช่น

- ความแตกต่างของวัสดุชั้นทาง โดยแปลงทดสอบนครชัยศรีมีชั้นวัสดุ Selected material เพิ่มเติมเข้ามา
- ความชันของผิวทางมีความแตกต่างกัน
- ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งอุปกรณ์วัดและตำแหน่งล้อรถบรรทุก



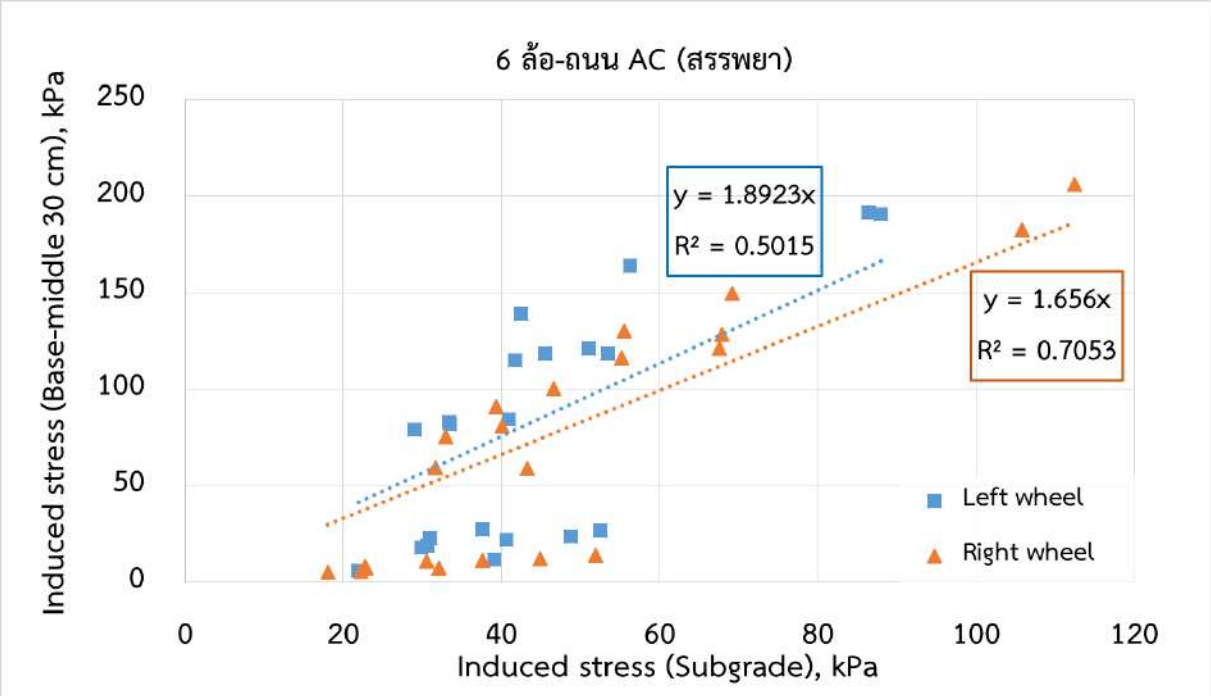
รูปที่ 9.73 ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา เหนือชั้น Subgrade และ Base แปลงสรรพยา

รูปที่ 9.74 แสดง ค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 40 ซม. (Bottom) ใต้ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง จากความสัมพันธ์พบว่าบริเวณใต้ล้อซ้ายและใต้ล้อขวา ค่าความเค้นในชั้น Base (ลึก 40 ซ.ม.) มีค่าความเค้นมากกว่าความเค้นในชั้น Subgrade ประมาณ 30-60% ในขณะที่บริเวณกึ่งกลางช่องจราจร ความเค้นในชั้น Base มีค่าน้อยกว่าในชั้น Subgrade ประมาณ 50% ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับผลการตรวจวัดในแปลงโพธาราม



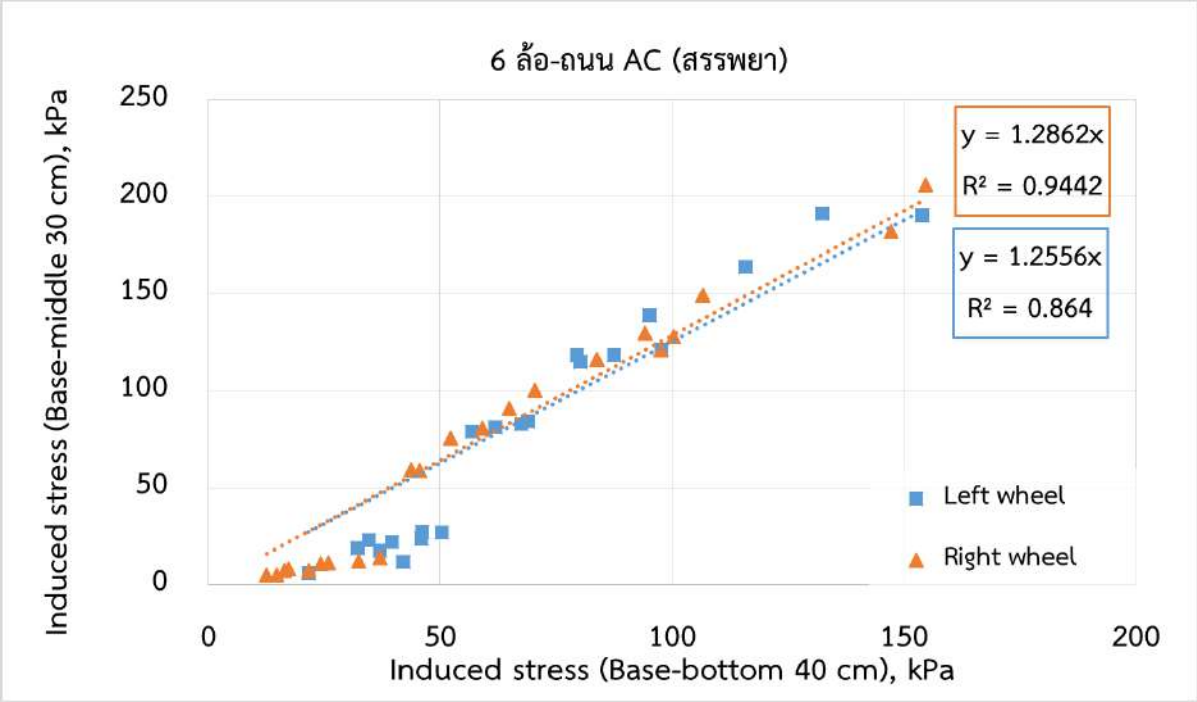
รูปที่ 9.74 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 40 cm (Bottom) ใต้ ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง แปลงสรรพยา

รูปที่ 9.75 แสดงค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 30 ซม. (Middle) ใต้ ล้อซ้าย และ ล้อขวา จากความสัมพันธ์พบว่าบริเวณใต้ล้อซ้ายและใต้ล้อขวา ค่าความเค้นในชั้น Base (ลึก 30 ซ.ม.) มีค่าความเค้นมากกว่าความเค้นในชั้น Subgrade ประมาณ 65-90%



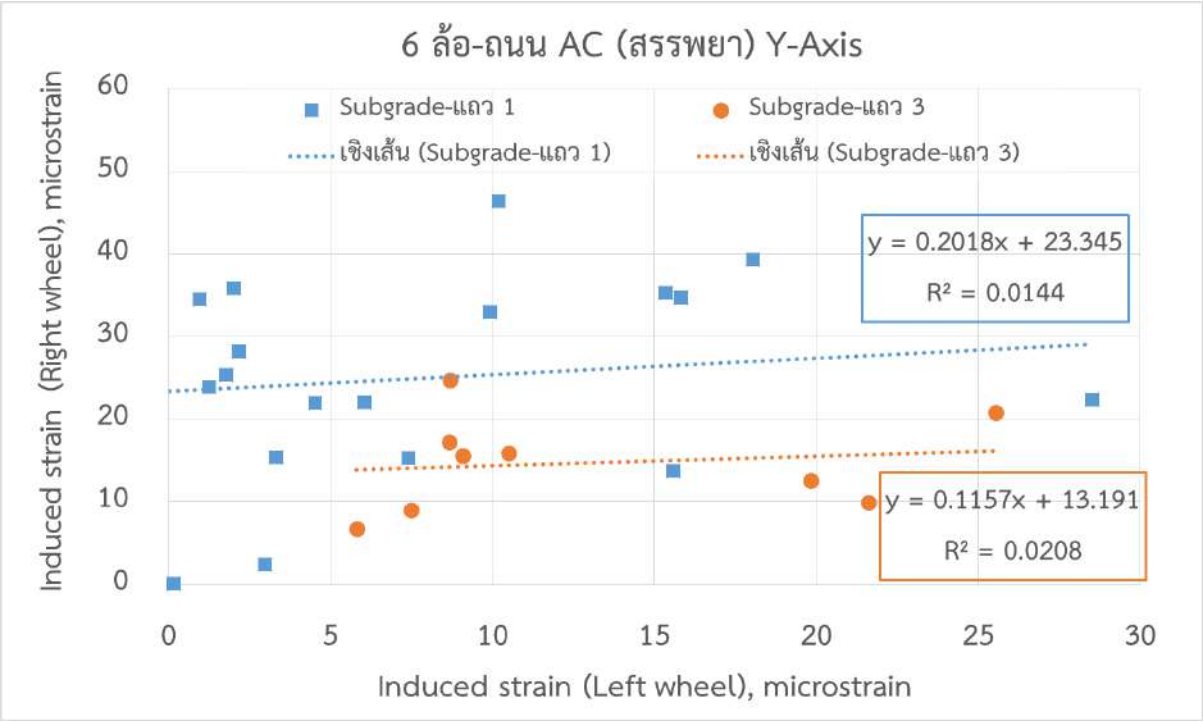
รูปที่ 9.75 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 30 cm (Middle) และใต้ ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง แปลงสรรพยา

รูปที่ 9.76 แสดง ค่าความเค้น บริเวณชั้น Base ที่ความลึก 30 ซม. (Middle) และที่ความลึก 40 ซม. (Bottom) ใต้ ล้อซ้าย และ ล้อขวา จากความสัมพันธ์พบว่าบริเวณใต้ล้อซ้ายและใต้ล้อขวา ค่าความเค้นในชั้น Base (ลึก 30 ซ.ม.) มีค่าความเค้นมากกว่าที่ความลึก 40 ซม. (Bottom) ประมาณ 25-30% ซึ่งแสดงถึงการลดทอนค่าความเค้นตามความลึกในชั้น Base



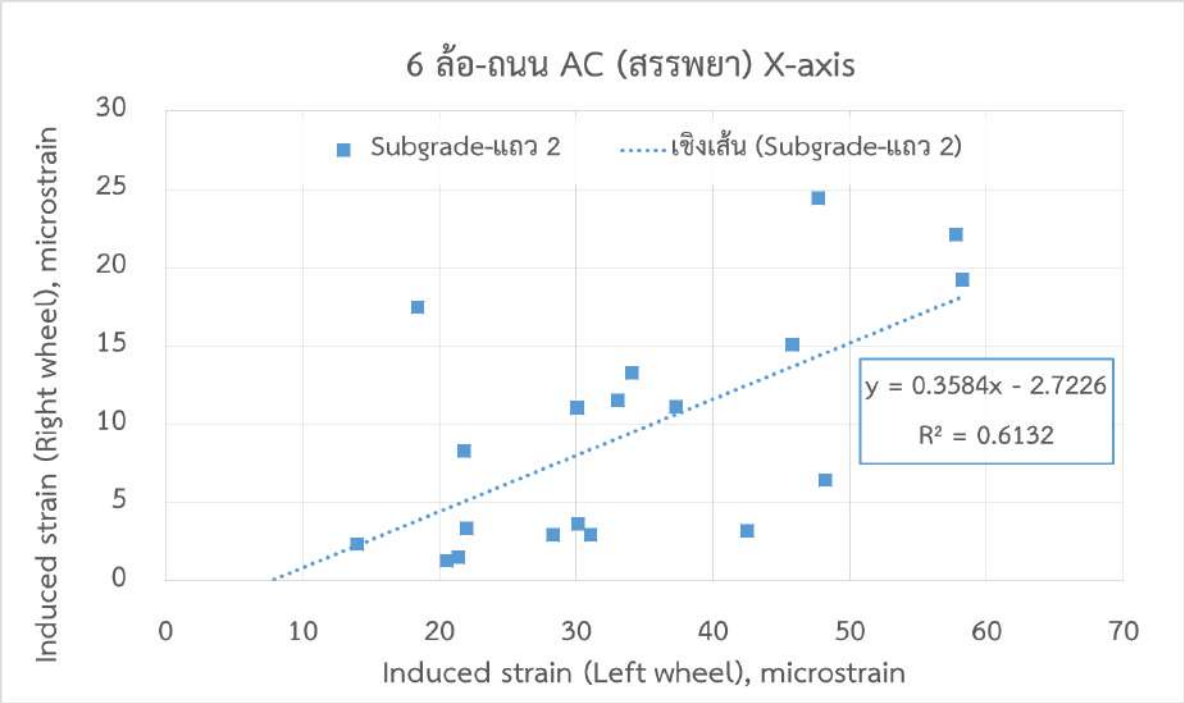
รูปที่ 9.76 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Base ที่ความลึก 30 cm (Middle) และ ชั้น Base ที่ความลึก 40 cm (Base) ใต้ ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง แปลงสรรพยา

รูปที่ 9.77 แสดง ค่าความเครียดบริเวณชั้น Subgrade ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 1 และแถวที่ 3 ทิศทางตั้งฉากกับถนน Strain Y (Normal-to-lane axis) พบว่าความเครียดมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่น่าเชื่อถือได้ แต่ก็พบว่าความเครียดใต้ล้อซ้ายมีแนวโน้มแปรปรวนมากกว่าใต้ล้อขวา และพบว่าบริเวณแถวที่ 1 มีแนวโน้มมีความมากกว่าแถวที่ 3 ซึ่งอาจเกิดจากตำแหน่งของเซนเซอร์ที่มีความแตกต่างกันในแต่ละแถวกัน



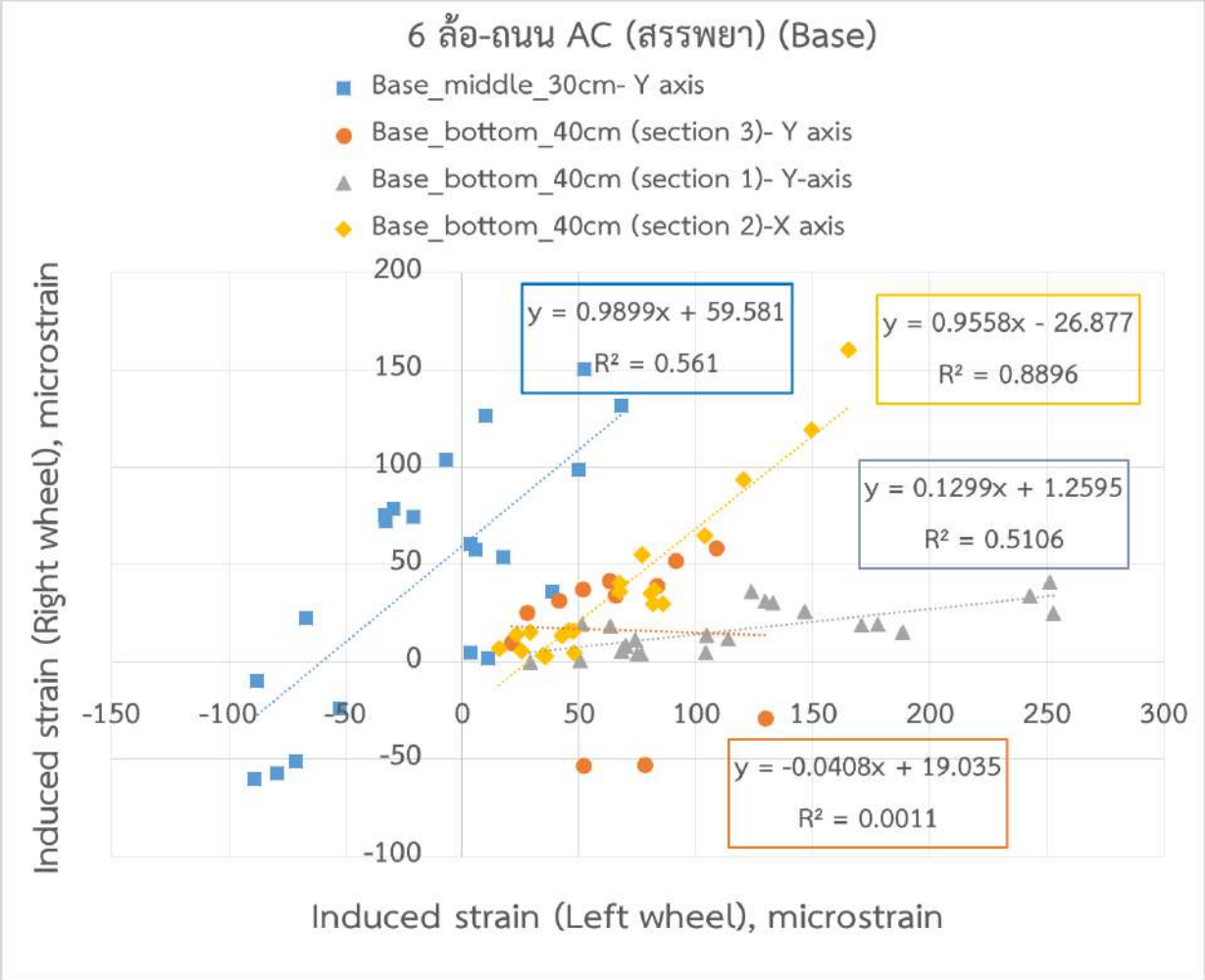
รูปที่ 9.77 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 1 และแถวที่ 3 ทิศทางตั้งฉากกับถนน Strain Y (Normal-to-lane axis)

รูปที่ 9.78 แสดง ค่าความเครียดบริเวณชั้น Subgrade ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 2 ทิศทางขนานกับถนน Strain X (Parallel-to-lane axis) พบว่าความเครียดมีความแปรปรวนน้อยกว่าบริเวณแถวที่ 1 และ 3 ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับถนน และสามารถหาความสัมพันธ์ที่น่าเชื่อถือได้ (R2 = 0.6132) โดยพบว่าความเครียดใต้ล้อซ้ายมีแนวโน้มมากกว่าใต้ล้อขวา



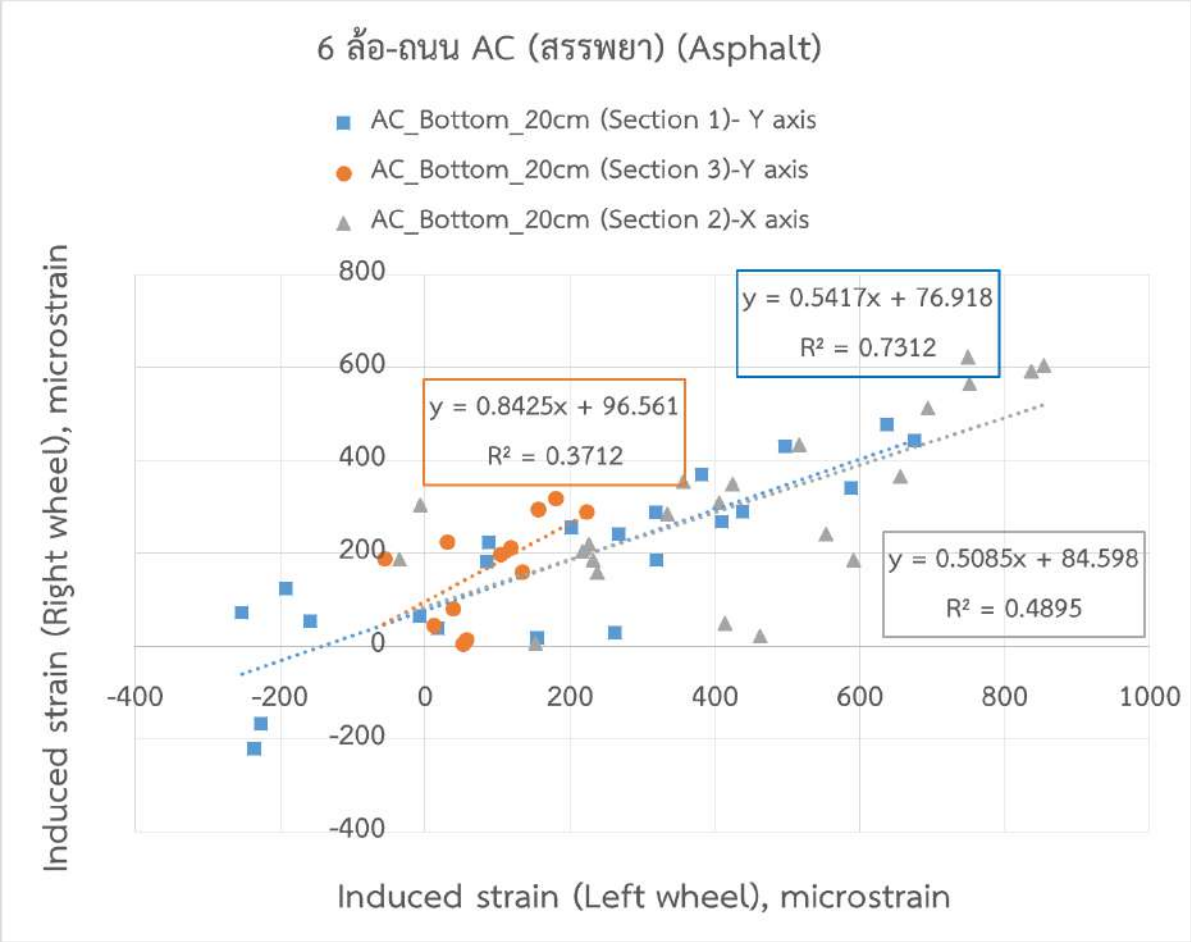
รูปที่ 9.78 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 2 ทิศทางขนานกับถนน Strain X (Parallel-to-lane axis)

รูปที่ 9.79 แสดงค่าความเครียดบริเวณชั้น Base ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดใต้ล้อซ้ายและล้อขวามีความน่าเชื่อถือมากที่สุด (R2 = 0.8896) ในกรณีความเครียดขนานกับถนน Strain X (Parallel-to-lane axis) และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่ชั้น Base ที่ความลึก 30 ซม. ใต้ล้อขวาและล้อซ้าย มีความแปรปรวนน้อยกว่าและมีความน่าเชื่อถือมากกว่าความเครียดที่ชั้น Base ที่ความลึก 40 ซม. และพบว่าที่ความลึก 40 ซม. ความเครียดใต้ล้อซ้ายมีแนวโน้มมีความสูงกว่าความเครียดใต้ล้อขวา



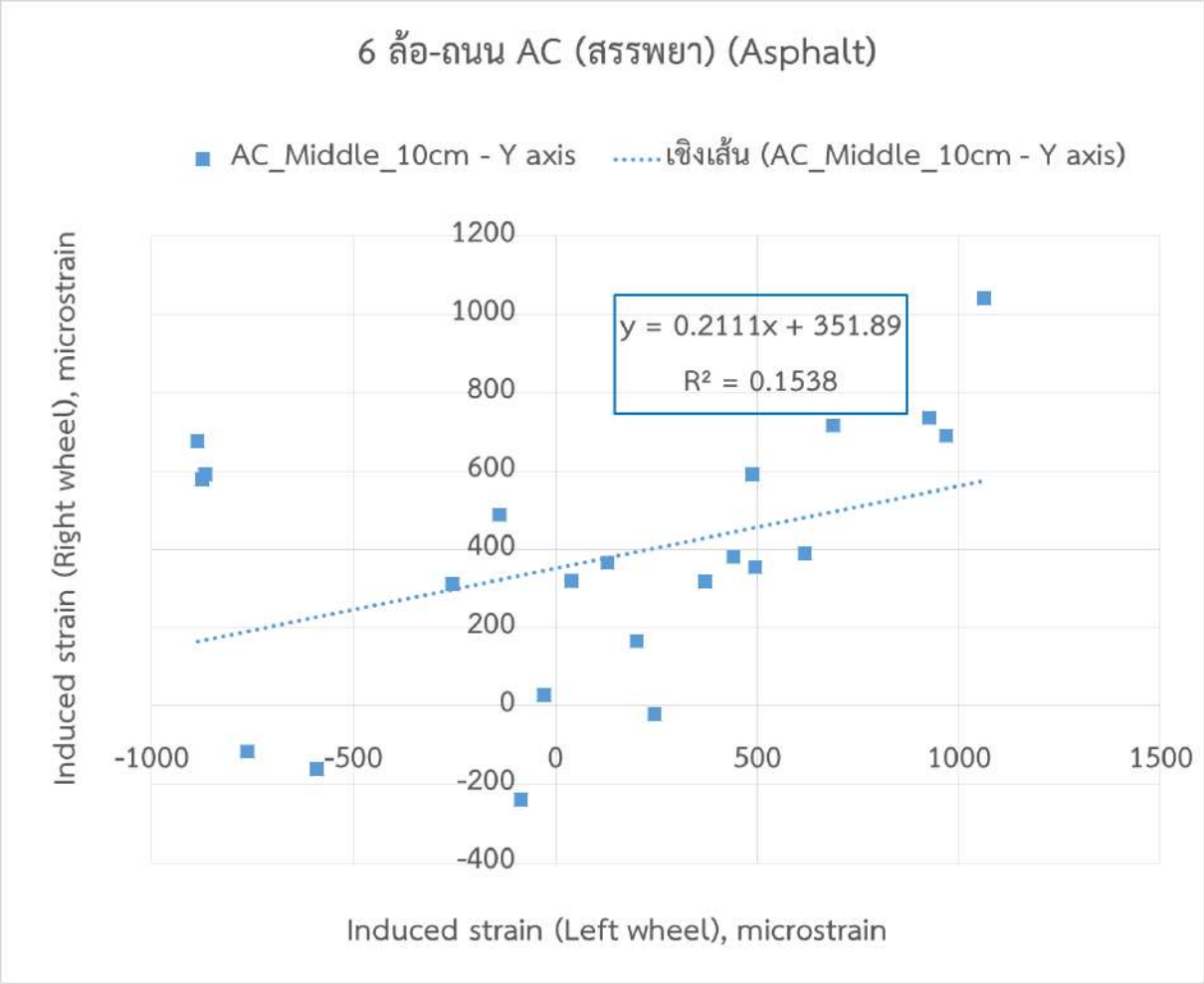
รูปที่ 9.79 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Base ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา

รูปที่ 9.80 แสดงค่าความเครียดบริเวณชั้น AC ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดใต้ล้อซ้ายและล้อขวามีความน่าเชื่อถือมากที่สุด (R2 = 0.7312) ในกรณีความเครียดขนานกับถนน Strain X (Parallel-to-lane axis) และพบว่า ความเครียดใต้ล้อซ้ายมีแนวโน้มมีความสูงกว่าความเครียดใต้ล้อขวา



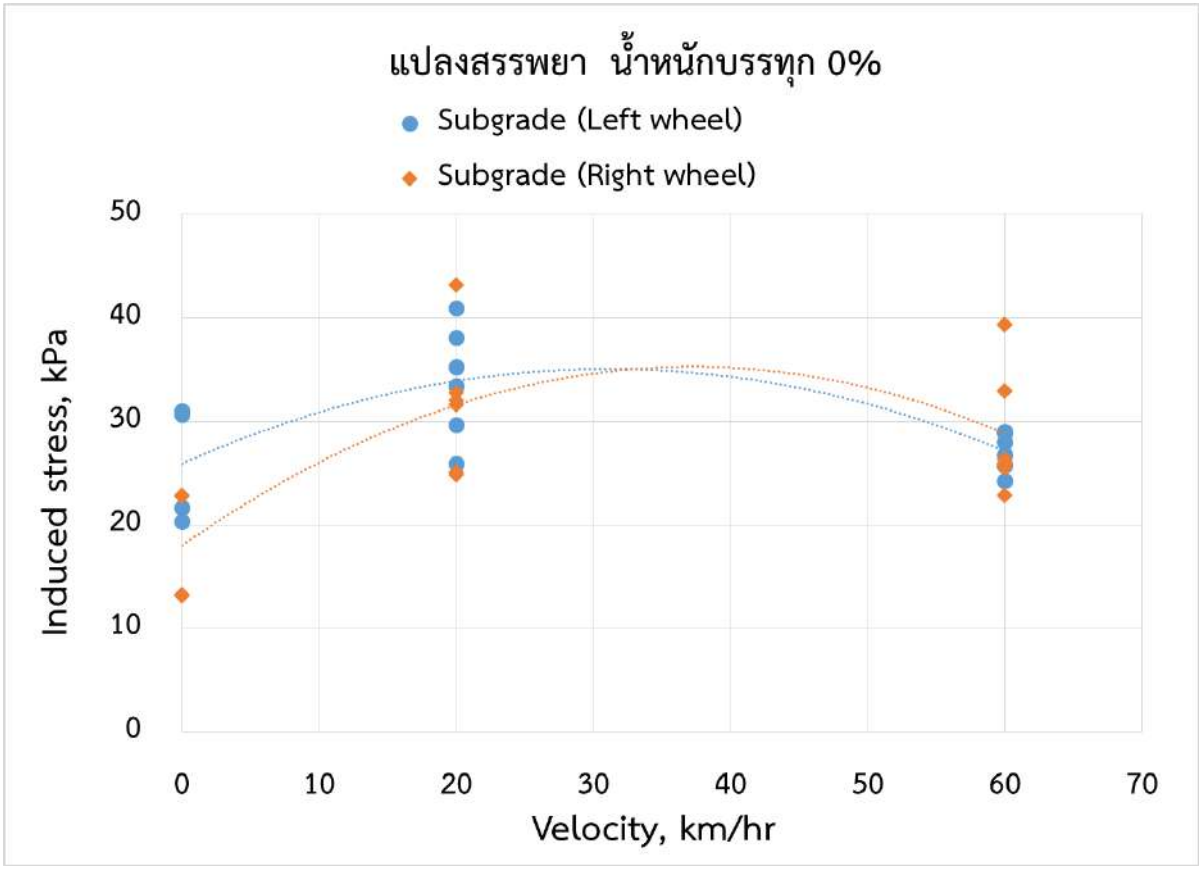
รูปที่ 9.80 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณด้านล่างชั้น AC (Bottom) ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา

รูปที่ 9.81 แสดงค่าความเครียดบริเวณกึ่งกลางชั้น AC ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดใต้ล้อซ้ายและล้อขวามีความแปรปรวนและมีความน่าเชื่อถือน้อยกว่ากรณีความเครียดใต้ชั้น AC ทั้งนี้อาจเกิดตำแหน่งที่ล้อรถกระทำไม่ตรงกับตำแหน่งของ Strain Gage โดยจะส่งผลต่อความแปรปรวนของการตรวจวัดได้มากเมื่อติดตั้ง Strain Gage ใกล้ผิวทาง

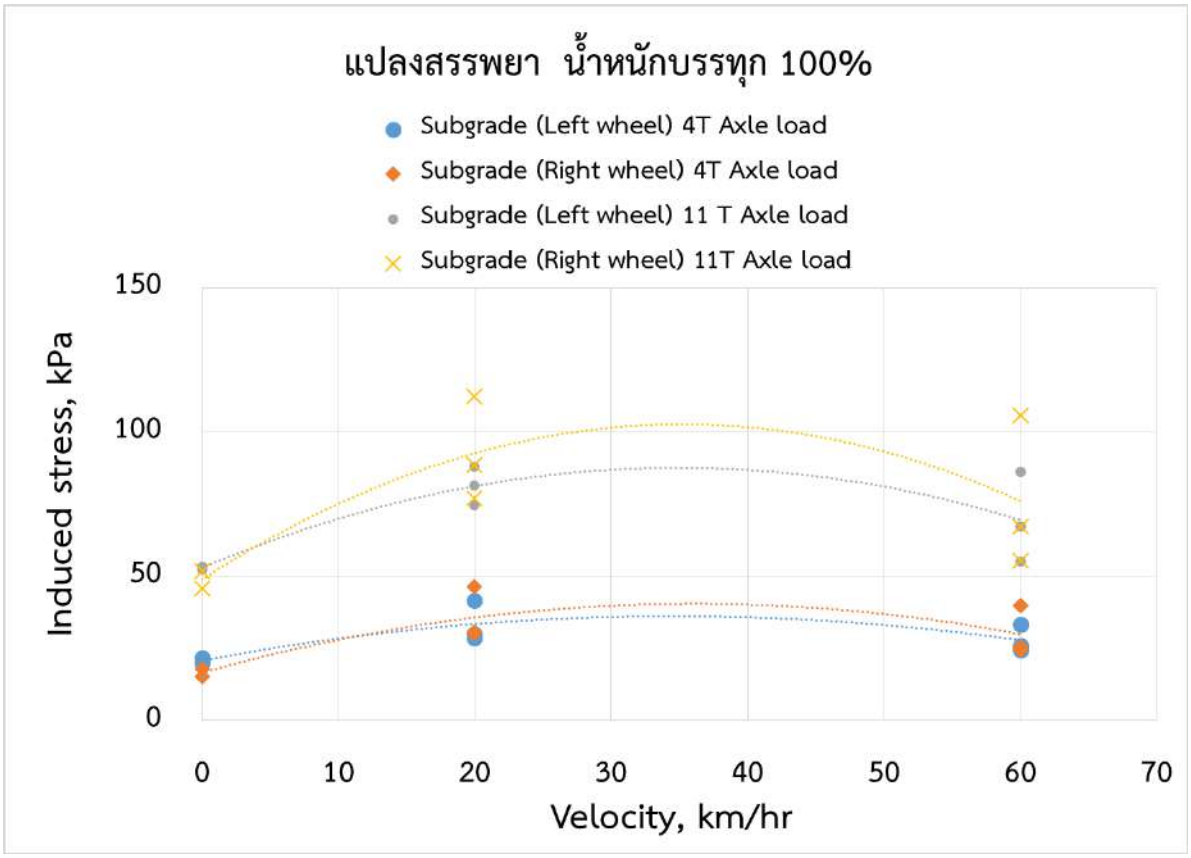


รูปที่ 9.81 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณกึ่งกลาง AC (Bottom) ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา

รูปที่ 9.82 และ รูปที่ 9.83 แสดงค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 0% และ 100 % ทั้งสองกรณีพบแนวโน้มคล้ายคลึงกันคือ ค่าความเค้นมีมีเพิ่มขึ้นตามความเร็วจนถึงความเร็วประมาณ 20-30 กม.ต่อชั่วโมง แล้วจึงมีค่าลดลงเล็กน้อย พฤติกรรมดังกล่าวมีความแตกต่างจากที่พบในแปลงโพธาราม และในการศึกษาในอดีต ในขณะนี้ยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่ชัด แต่คาดว่าอาจเกิดจากลักษณะการชะลอตัวของรถบรรทุกขณะวิ่งเข้าสู่แปลงทดสอบ ซึ่งทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้น

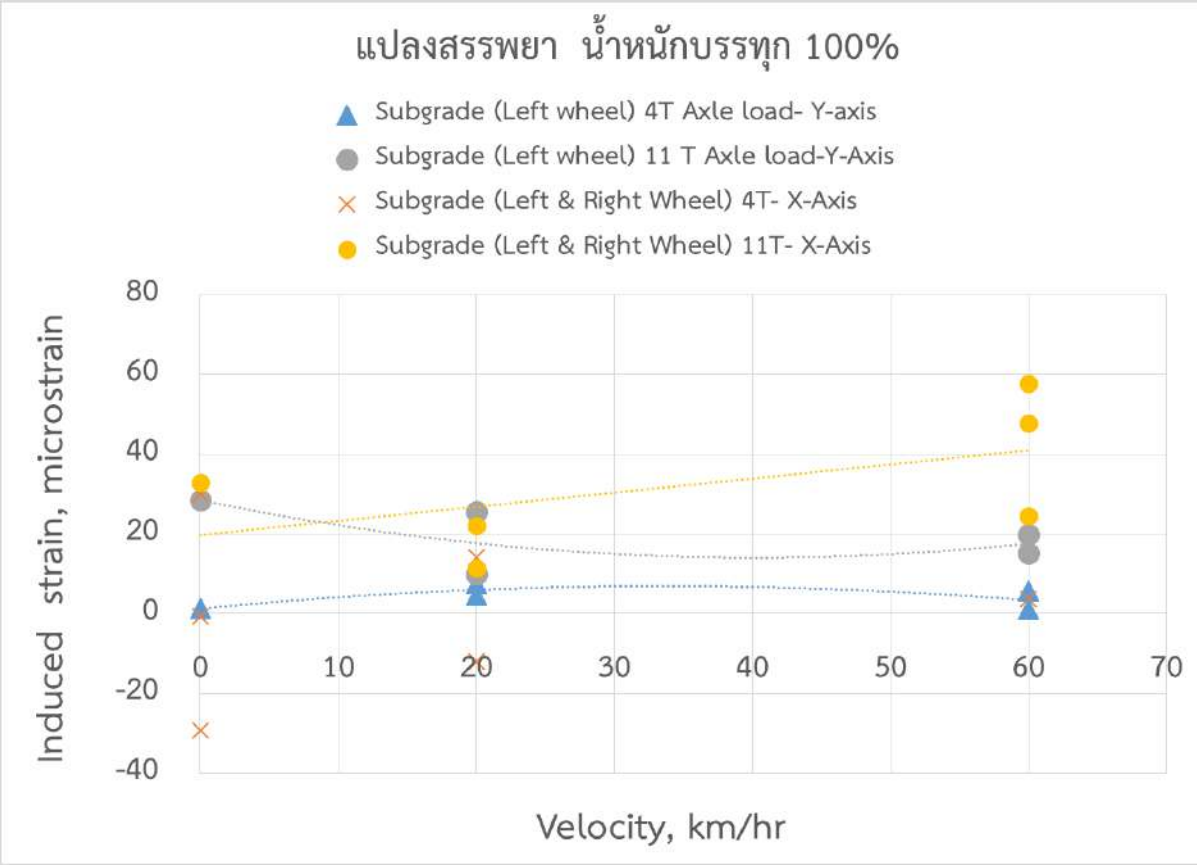


รูปที่ 9.82 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 0 % น้ำหนักเพลา 4.1 ตัน



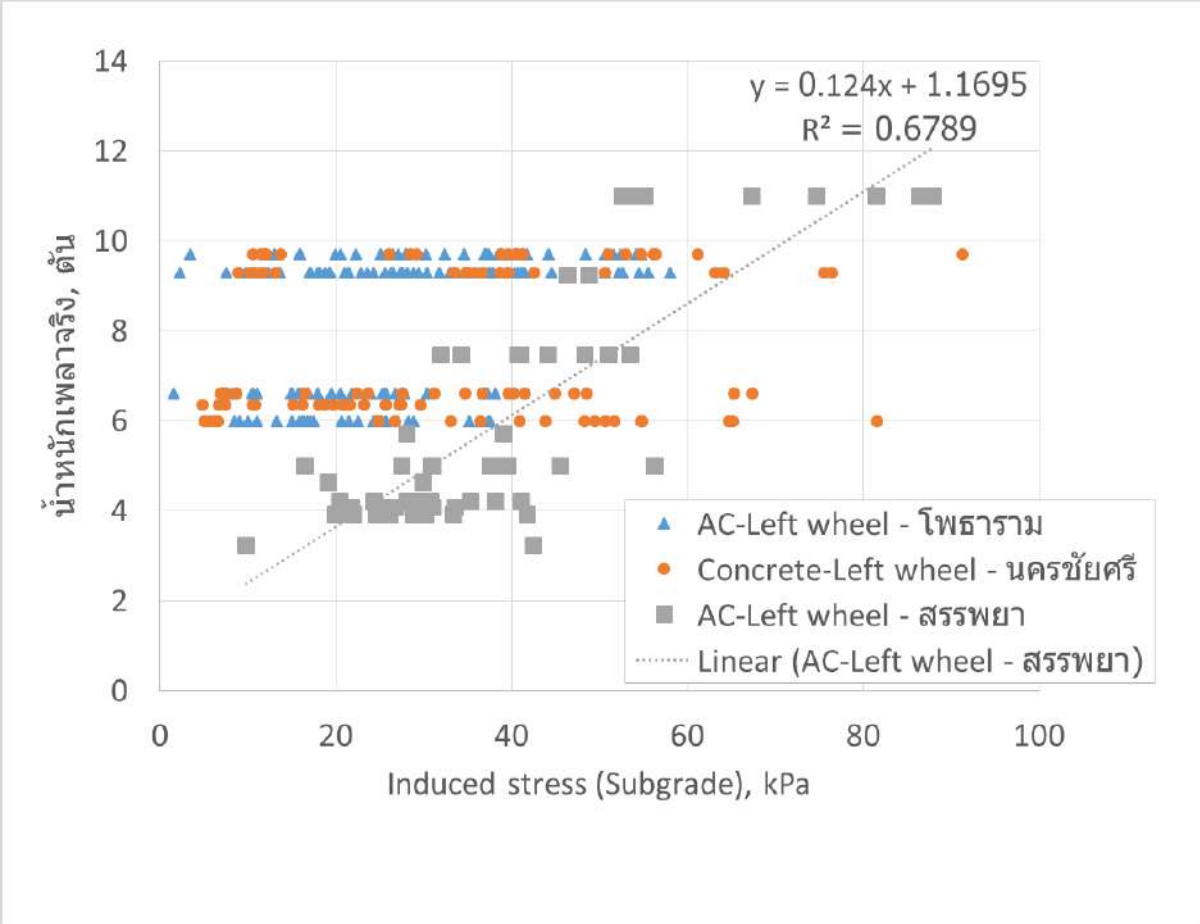
รูปที่ 9.83 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 100% น้ำหนักเพลา 4 ตัน และ 11 ตัน

รูปที่ 9.84 แสดงค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ เทียบกรณีความเครียดวัดในแนวตั้งฉากทิศจราจร (Y-Axis) และทิศขนานจราจร (X-Axis) พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจน มีการกระจายตัวค่อนข้างมาก ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากความไม่แม่นยำที่ล้อรถบรรทุกจะเหยียบตรงตำแหน่งอุปกรณ์ Strain Gage เมื่อรถวิ่งด้วยความเร็วสูง



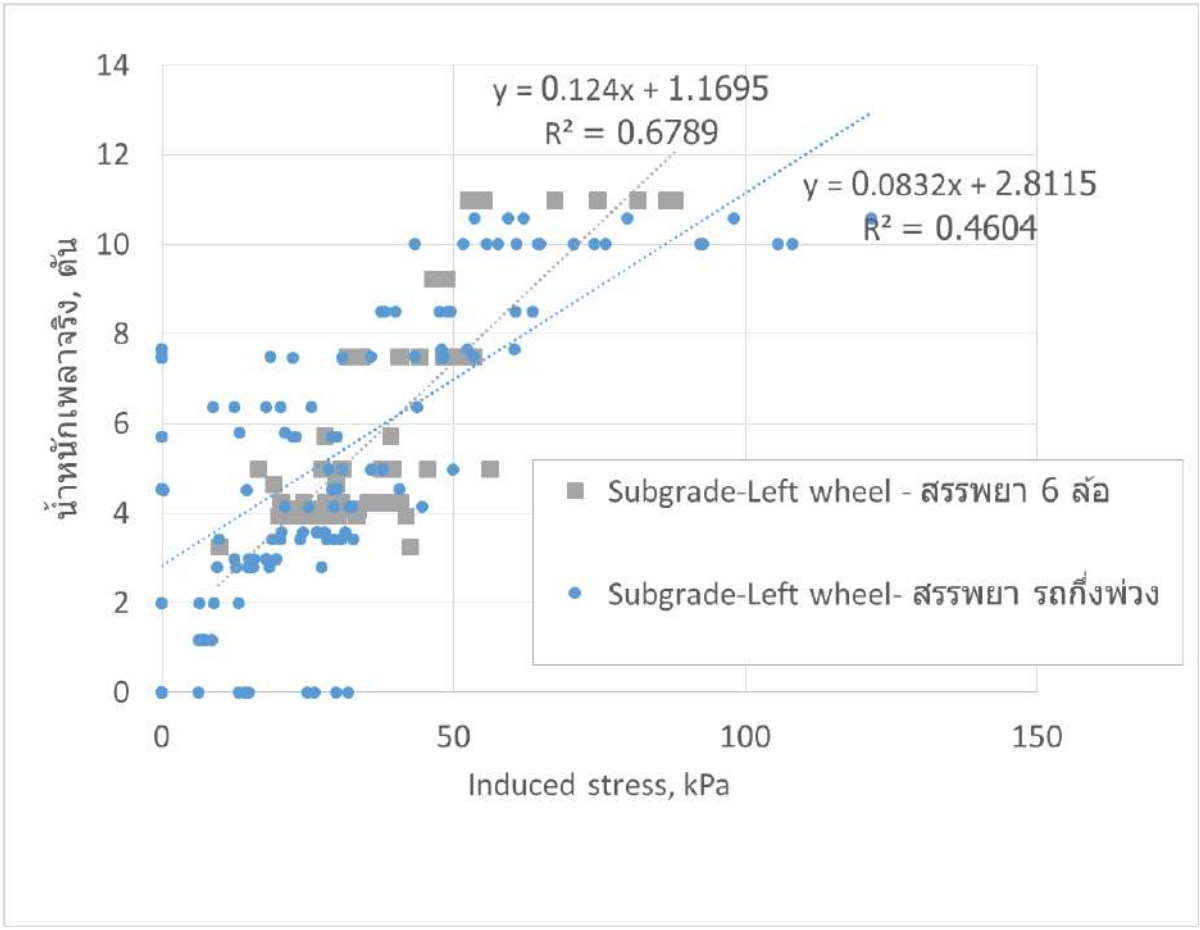
รูปที่ 9.84 ค่าความเครียด (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 100% น้ำหนักเพลา 4 ตัน และ 11 ตัน

รูปที่ 9.85 เปรียบเทียบ ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ จาก 3 แปลงทดสอบซึ่งมีลักษณะชั้นทางแตกต่างกัน ได้แก่ แปลง AC มีวัสดุคัดเลือก-โพธาราม, แปลง Concrete- นครชัยศรี และ แปลง AC ไม่มีวัสดุคัดเลือก-สรรพยา จากความสัมพันธ์เห็นได้ว่า ข้อมูลจากแปลงสรรพยา ให้แนวโน้มค่าความเค้นเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักเพลาจริง ที่ชัดเจนและสมเหตุสมผลกว่าแปลงทดสอบนครชัยศรีและแปลงโพธาราม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือมากกว่า



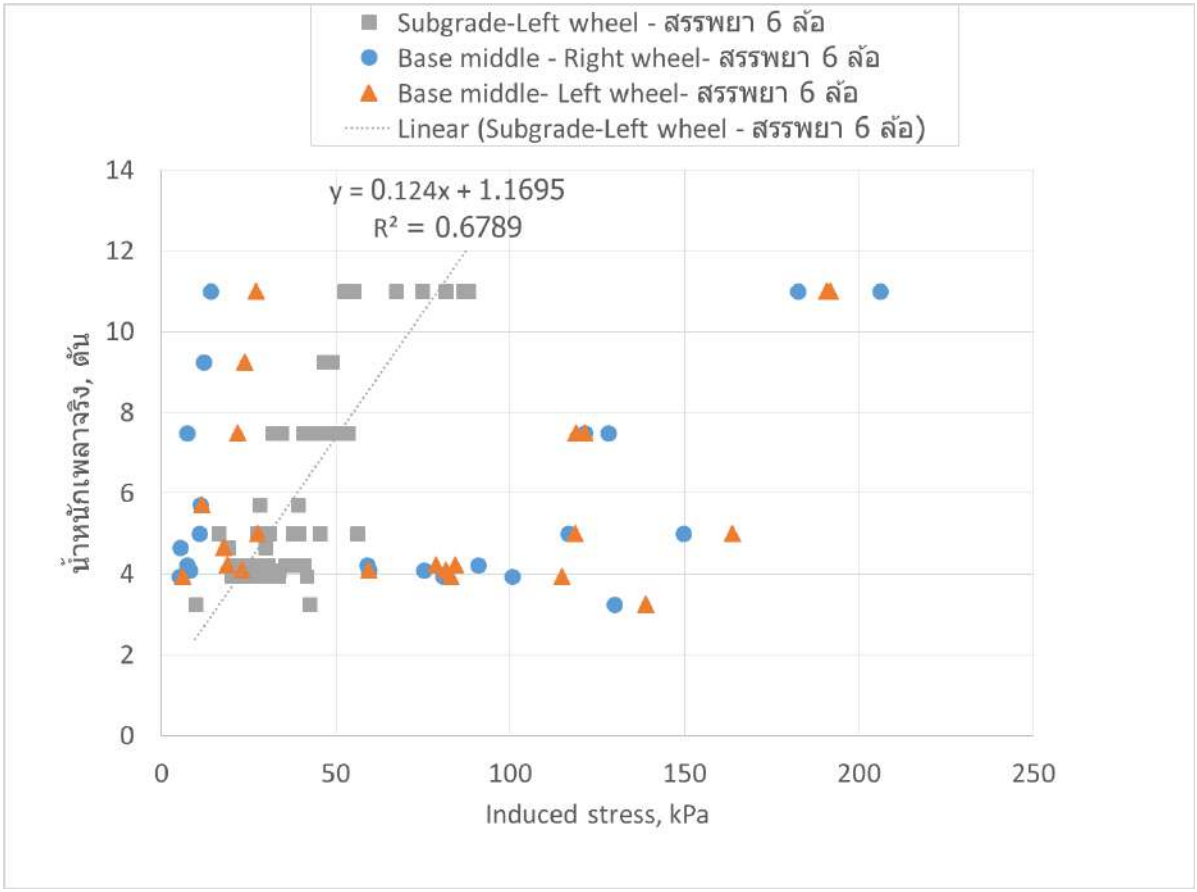
รูปที่ 9.85 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ เปรียบเทียบแปลงทดสอบ 3 แปลง AC (with selected mat)-โพธาราม, Concrete- นครชัยศรี และ AC (without selected mat)-สรรพยา

รูปที่ 9.86 เปรียบเทียบ ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ และรถกึ่งพ่วงแปลงทดสอบที่น้ำหนักเพลาต่างๆ จาก แปลง AC (ไม่มีชั้นวัสดุคัดเลือก)-สรรพยา จากความสัมพันธ์เห็นได้ว่า ลักษณะของรถบรรทุกไม่มีผลกระทบต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและน้ำหนักลงเพลามากนัก และข้อมูลของรถบรรทุกทั้งสองชนิดมีน่าเชื่อถือในระดับที่น่าพอใจ



รูปที่ 9.86 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ เปรียบเทียบกรณีรถบรรทุก 6 ล้อ และรถกึ่งพ่วงแปลงทดสอบ AC (without selected mat)-สรรพยา

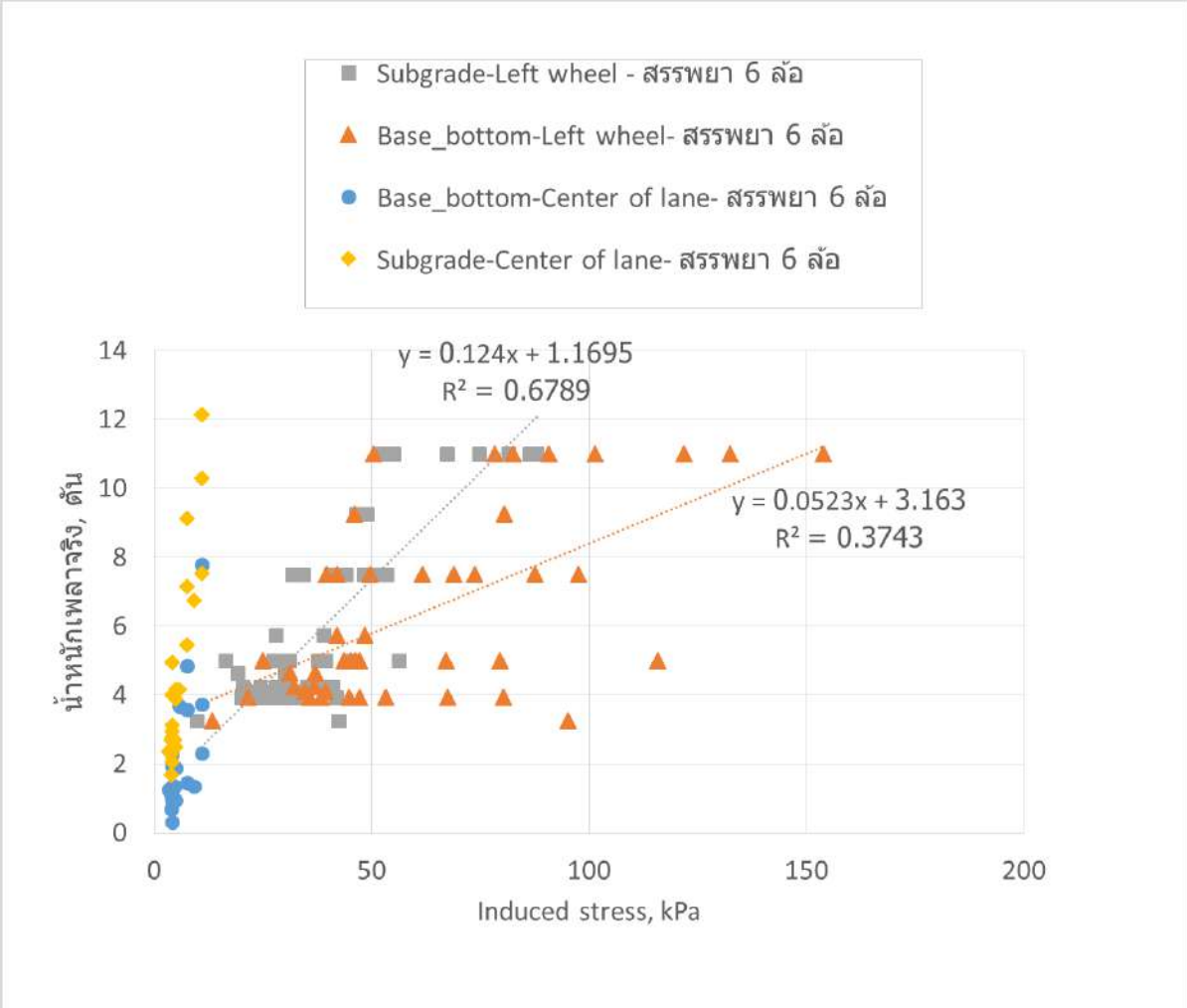
รูปที่ 9.87 เปรียบเทียบ ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-middle ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ จาก แปลงสรรพยา เห็นได้ว่า ความเค้นที่ชั้น Base-middle ไม่มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักบรรทุกลงเพลาดีเท่ากับความเค้นที่ชั้น Subgrade ทั้งกรณีใต้ล้อซ้ายและใต้ล้อขวา ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากในชั้น Base-middle อยู่ใกล้กับผิวทางมากกว่า โอกาศที่ล้อรถบรรทุกจะเหยียบไม่ตรงกับตำแหน่งอุปกรณ์วัดแล้วส่งผลให้แรงกระทำมีความแปรปรวนมากกว่ากรณีหน่วยแรงที่อยู่ลึกลงไปในชั้น Subgrade



รูปที่ 9.87 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-middle ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ

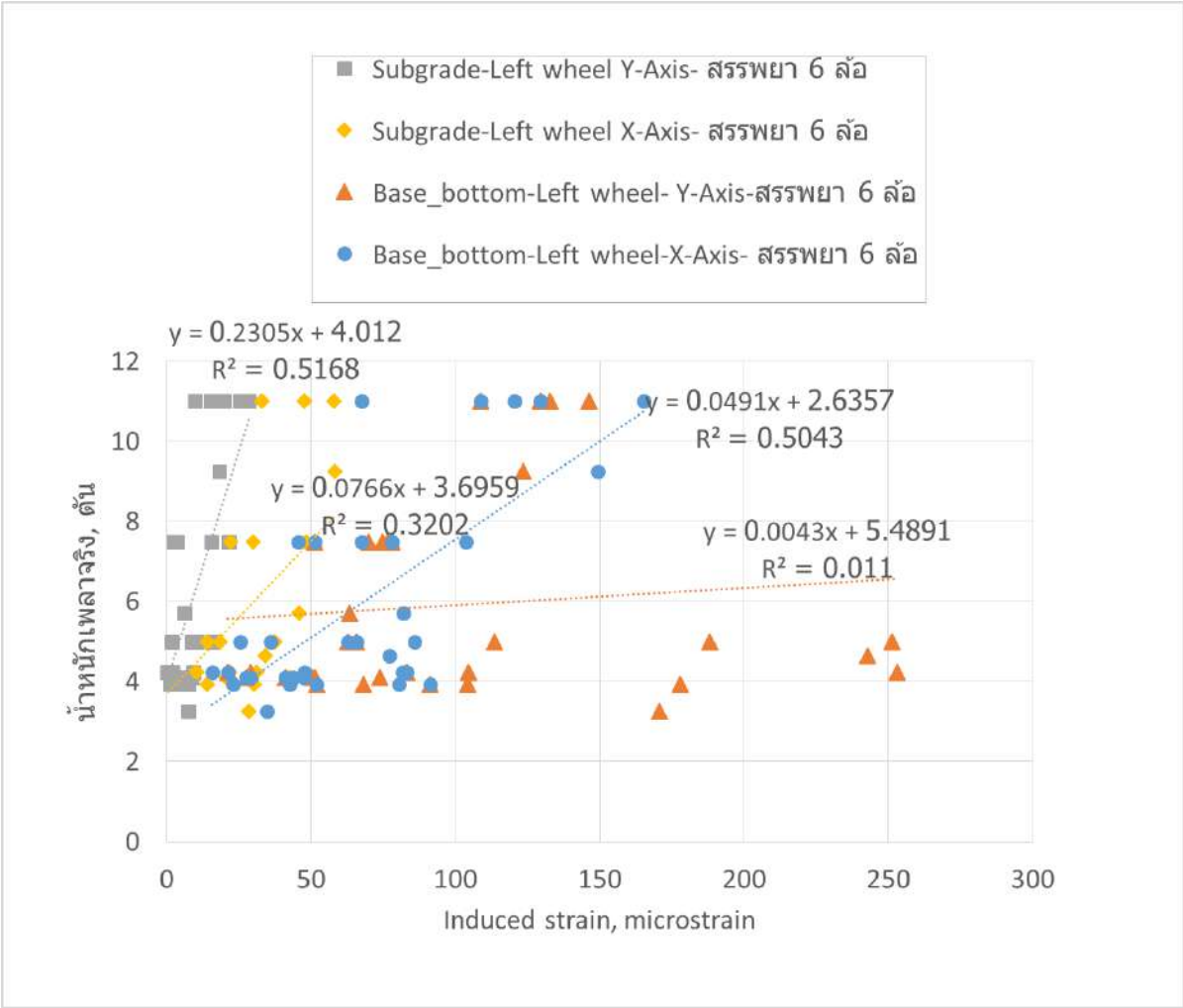
รูปที่ 9.88 เปรียบเทียบ ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ใต้ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ จาก แปลงสรรพยา เห็นได้ว่า ความเค้นที่ชั้น Base-bottom มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักบรรทุกลงเพลาดีกว่ากรณีชั้น Base-middle เล็กน้อย (รูปที่ 21) และมีการกระจายตัวของข้อมูลมากกว่าความเค้นที่ชั้น Subgrade ทั้งนี้เนื่องจากในชั้น Base-bottom อยู่ห่างจากผิวทางมากกว่าชั้น Base-middle แต่อยู่ใกล้ผิวทางมากกว่าชั้น Subgrade จึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลความเค้นแปรผกผันกับความลึกจากผิวทาง

สำหรับกรณีความเค้นที่กึ่งกลางช่องทางจราจรนั้นพบว่า ทั้งชั้น Subgrade และ Base-bottom มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักลงเพลาใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่า 12 kPa ทั้งนี้เนื่องจากเป็นจุดที่ได้รับอิทธิพลจากหน่วยแรงที่ส่งจากล้อรถบรรทุกแผ่กระจายออกด้านข้างเท่านั้น จึงไม่ได้รับอิทธิพลจากความลึกมากนัก



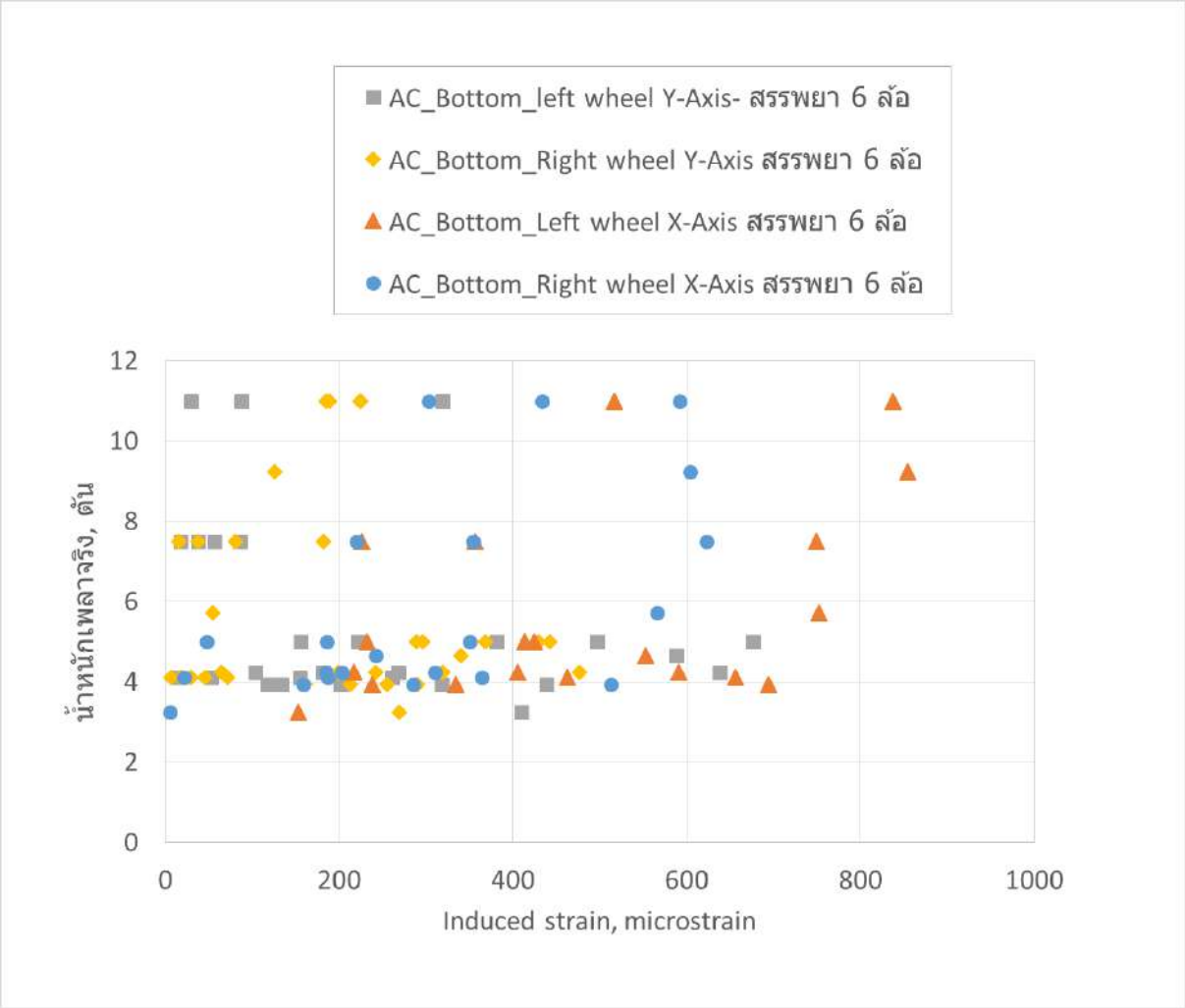
รูปที่ 9.88 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ใต้ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ

รูปที่ 9.89 เปรียบเทียบ ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ใต้ล้อซ้ายในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ เห็นได้ว่ามีแนวโน้มคล้ายคลึงกับกรณีความเครียด (รูปที่ 22) โดยความเครียดที่ระดับใกล้ผิวทางกว่า (ชั้น Base-bottom) มีการกระจายตัวของข้อมูลมากกว่าที่ระดับ Subgrade ซึ่งอยู่ลึกกว่า นอกจากนั้นยังพบว่าความเครียดตามแนว X-Axis ขนานช่องจราจร มีแนวโน้มมีค่ามากกว่ากรณี Y-Axis ตั้งฉากกับช่องจราจร ในกรณี Subgrade แต่ในกรณีของชั้น Base-bottom พบว่าความเครียดตามแนว X-Axis ขนานช่องจราจร มีการกระจายตัวของข้อมูลน้อยกว่า



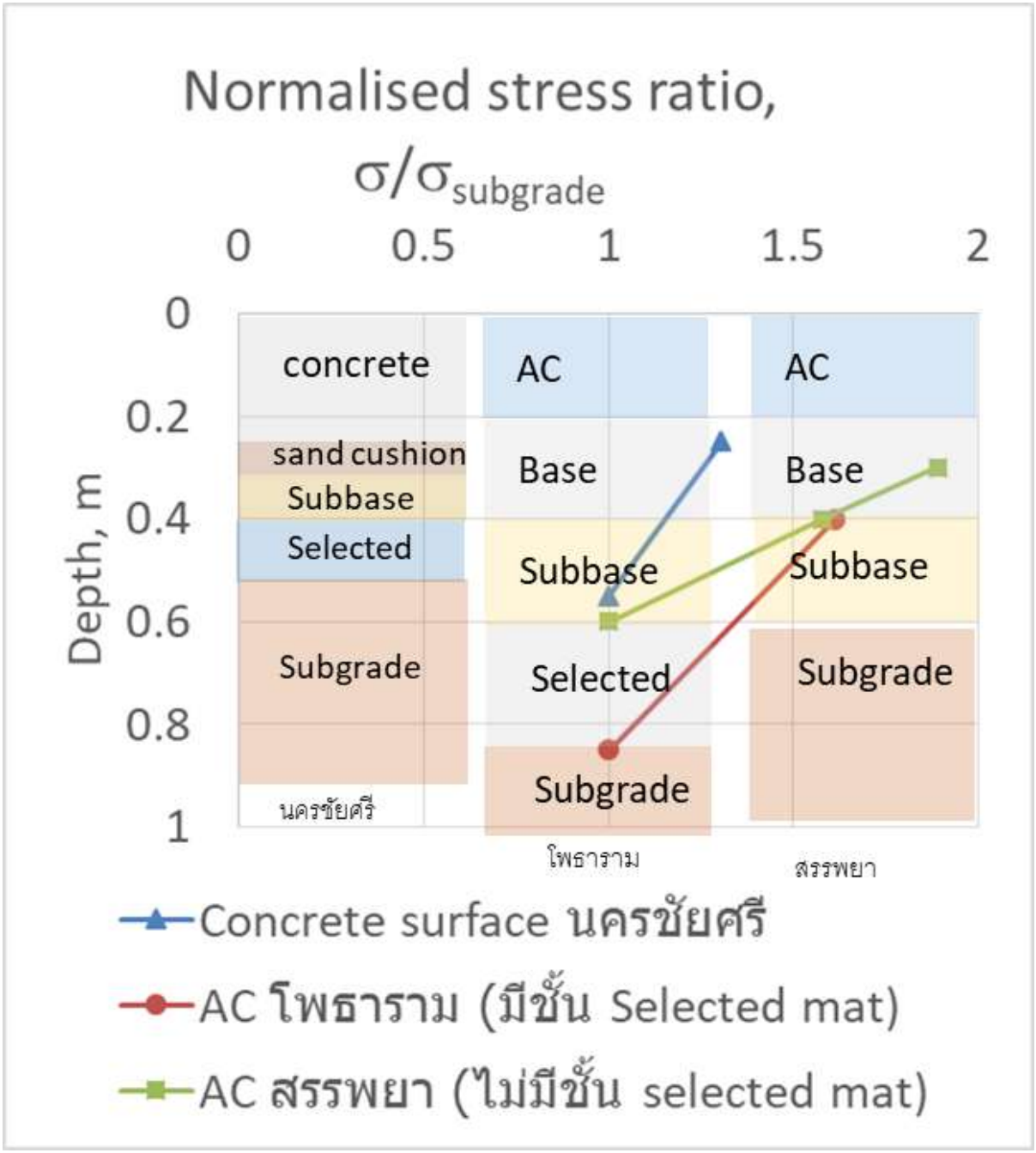
รูปที่ 9.89 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ใต้ล้อซ้าย ในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ

รูปที่ 9.90 เปรียบเทียบ ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น AC ใต้ล้อซ้ายและล้อขวา ในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเพลาและความเครียดในชั้น AC มีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาตำแหน่งของล้อรถบรรทุกไม่ตรงกับตำแหน่งอุปกรณ์วัดดังได้กล่าวมา และยังอาจเกิดจากพฤติกรรมหนืด (Viscousity) ของวัสดุ AC อีกด้วย



รูปที่ 9.90 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น AC ใต้ล้อซ้ายและล้อขวา ในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ

รูปที่ 9.91 แสดงค่าความอัตราส่วนความเค้นเปรียบเทียบกับความเค้นที่เหนือชั้น Subgrade ตามความลึก ทั้งสามแปลงทดสอบ ซึ่งมีลักษณะชั้นทางแตกต่างกัน ได้แก่ แปลงสรรพยา (ผิวทาง AC ไม่มีชั้นวัสดุคัดเลือก) แปลงโพธาราม (ผิวทาง AC มีวัสดุคัดเลือก) และแปลงนครชัยศรี (ผิวทางคอนกรีต) พบว่าความชันหรืออัตราการลดทอนความเค้นในชั้นทางแต่ละแบบมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้พบว่าอัตราการลดลงของหน่วยแรงมีค่ามากที่สุดในกรณีแปลงสรรพยา ซึ่งบ่งชี้ว่าวัสดุชั้นทางในแปลงสรรพยามีความแข็งมากกว่า โดยการทดสอบ Control test ได้ผลการทดสอบ CBR ดังนี้ แปลงโพธาราม ชั้น Subbase (CBR=18.5%) ชั้น Base (CBR=62.7%) และ แปลงสรรพยา ชั้น Subbase (CBR=32.5%) ชั้น Base (CBR=88.6%) ผลการตรวจวัดจึงสอดคล้องตามหลักทางวิศวกรรม



รูปที่ 9.91 ค่าความอัตราส่วนความเค้นเปรียบเทียบกับความเค้นที่เหนือชั้น Subgrade เทียบตามความลึก แปลงสรรพยา (ผิวทาง AC ไม่มีชั้นวัสดุคัดเลือก) แปลงโพธาราม (ผิวทาง AC มีวัสดุคัดเลือก) และแปลงนครชัยศรี (ผิวทางคอนกรีต)

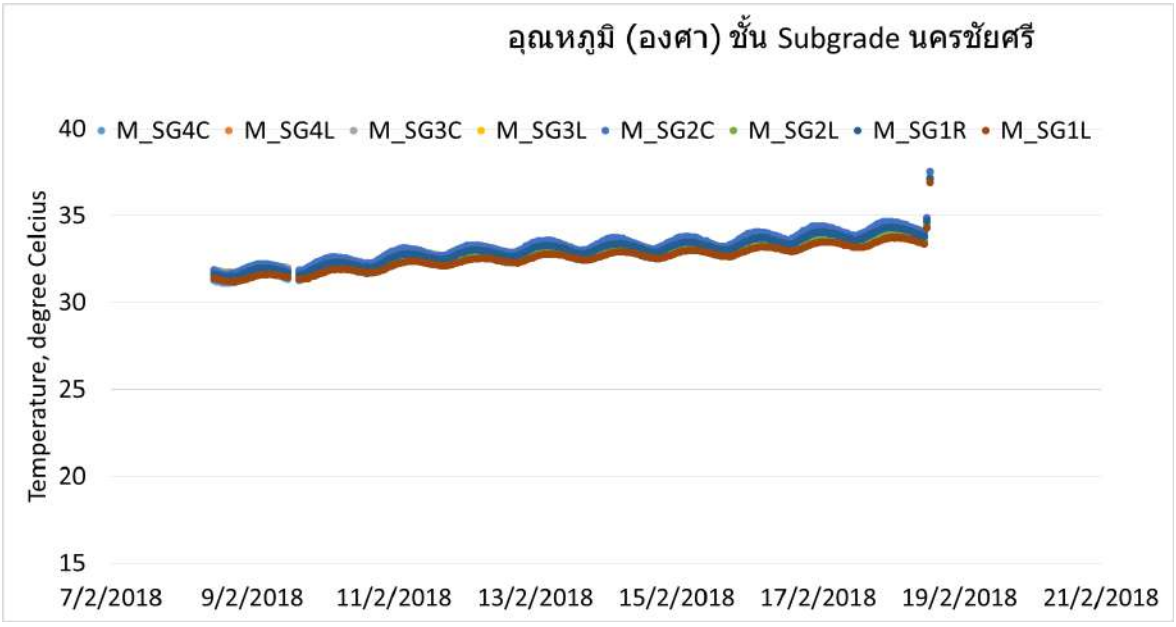
9.3.3 ความชื้นและอุณหภูมิ

รูปที่ 9.92 ถึง รูปที่ 9.97 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิในวัสดุชั้นทางต่างๆ จากทั้งสามแปลงทดสอบ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีความคล้ายคลึงกัน นั่นคืออุณหภูมิในชั้นทรายใต้แผ่นพื้นคอนกรีต (รูปที่ 9.92ข) มีความแปรปรวนในช่วง 30-39 องศาเซลเซียสมากกว่า อุณหภูมิบริเวณ Subgrade ซึ่งอยู่ในช่วง 31-34 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไปตามหลักการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

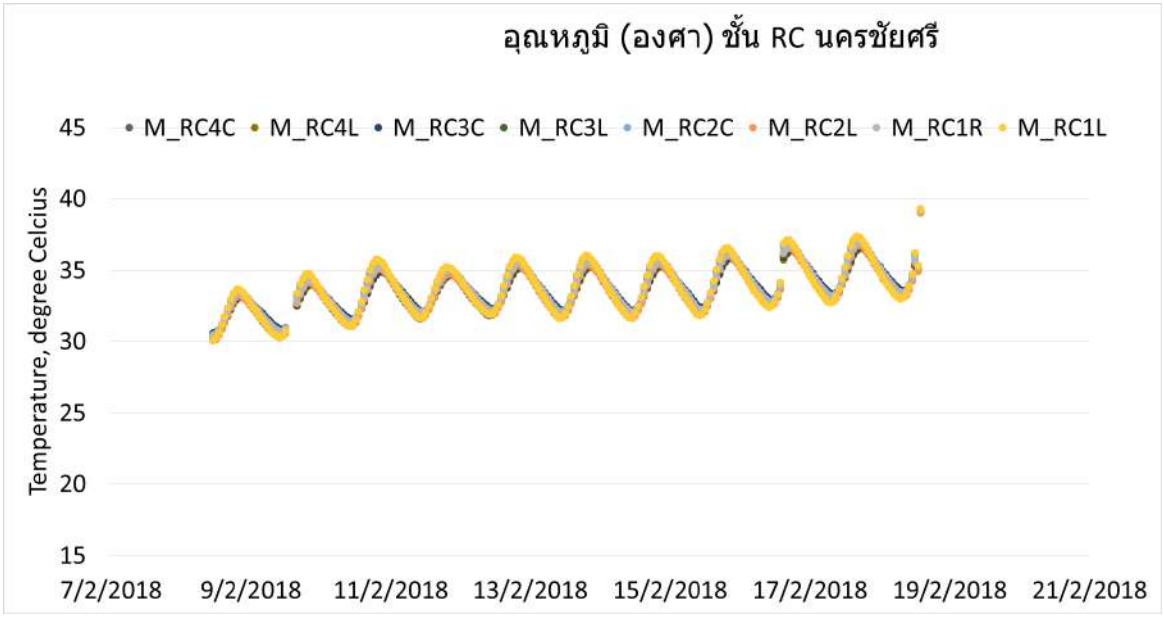
รูปที่ 9.94 แสดงอุณหภูมิในชั้น Subgrade ในถนนลาดยาง (โพธาราม) มีค่าในช่วง 30-38 องศา โดยมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนเมษายน สำหรับอุณหภูมิกึ่งกลางชั้น Base มีค่าในช่วง 25-42 องศา ซึ่งแสดงถึงความแปรปรวนที่มากกว่าตามหลักการถ่ายเทความร้อนเช่นกัน รูปที่ 9.96 แสดงอุณหภูมิในชั้น Subgrade และ

กึ่งกลางชั้น Base ในถนนลาดยาง (สรรพยา) ซึ่งชั้น Subgrade อยู่ใกล้ผิวทางมากกว่า (เนื่องจากแปลงสรรพยาไม่มีชั้นวัสดุคัดเลือก) ซึ่งส่งผลให้ค่าอุณหภูมิในชั้น Subgrade มีค่าสูงกว่าในช่วง 36 ถึง 44 องศา ส่วนอุณหภูมิในชั้น Base มีค่าในช่วง 35 ถึง 46 องศาซึ่งสูงกว่าแปลงโพธารามเช่นกัน

ลักษณะความชื้นในแปลงทดสอบทั้ง 3 แปลงมีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่าง ถนนลาดยางและถนนคอนกรีต สำหรับถนนคอนกรีตใน รูปที่ 9.93 ความชื้นในชั้นทรายใต้แผ่นพื้นคอนกรีตมีความแปรปรวนมากกว่า ความชื้นบริเวณ Subgrade ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต Sargand et al. (2006) แต่สำหรับกรณีถนนลาดยาง ในรูปที่ 9.95 และ รูปที่ 9.97 พบว่าความชื้นบริเวณ Subgrade มีความแปรปรวนและตอบสนองต่อภูมิอากาศมากกว่าความชื้นในชั้น Base เนื่องจากผิวทางแบบ AC มีความทึบน้ำสูง ความชื้นจึงเปลี่ยนแปลงในลักษณะล่างขึ้นบน

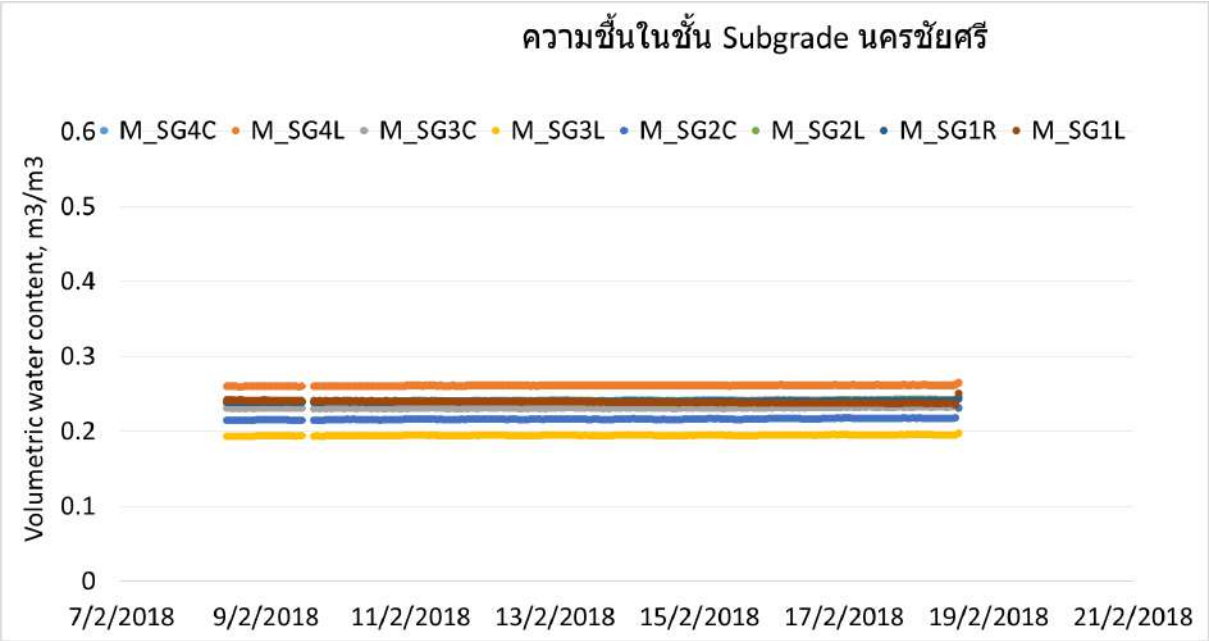


ก

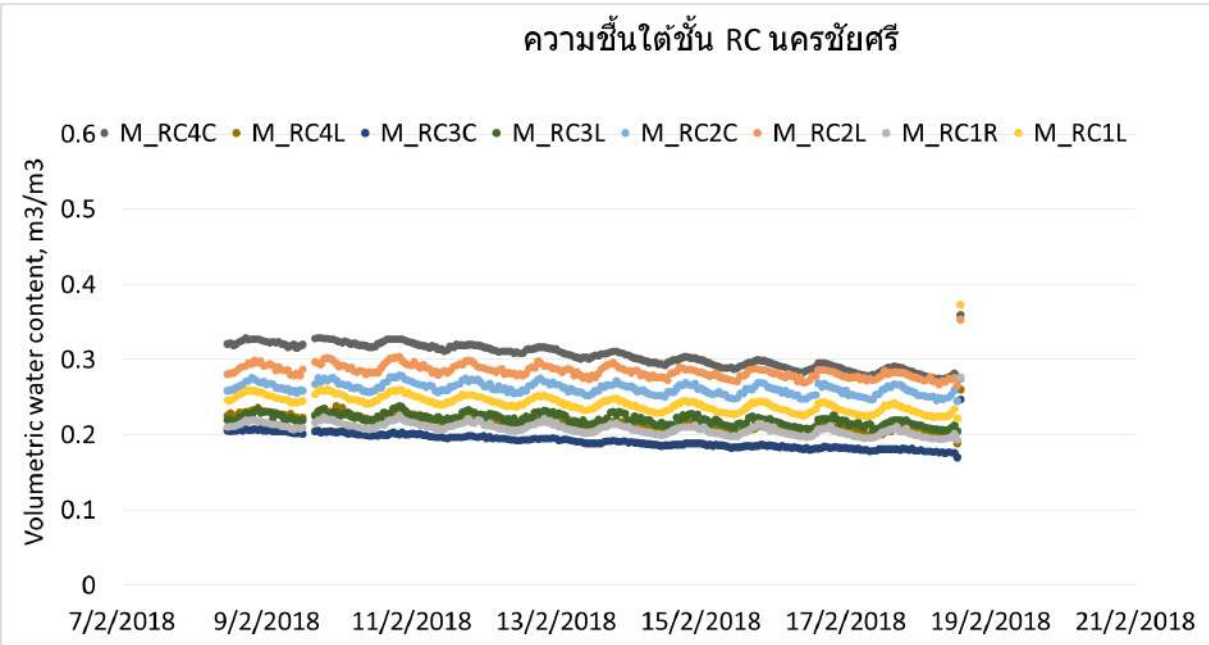


ข

รูปที่ 9.92 อุณหภูมิในชั้น Subgrade และใต้ชั้น RC แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)

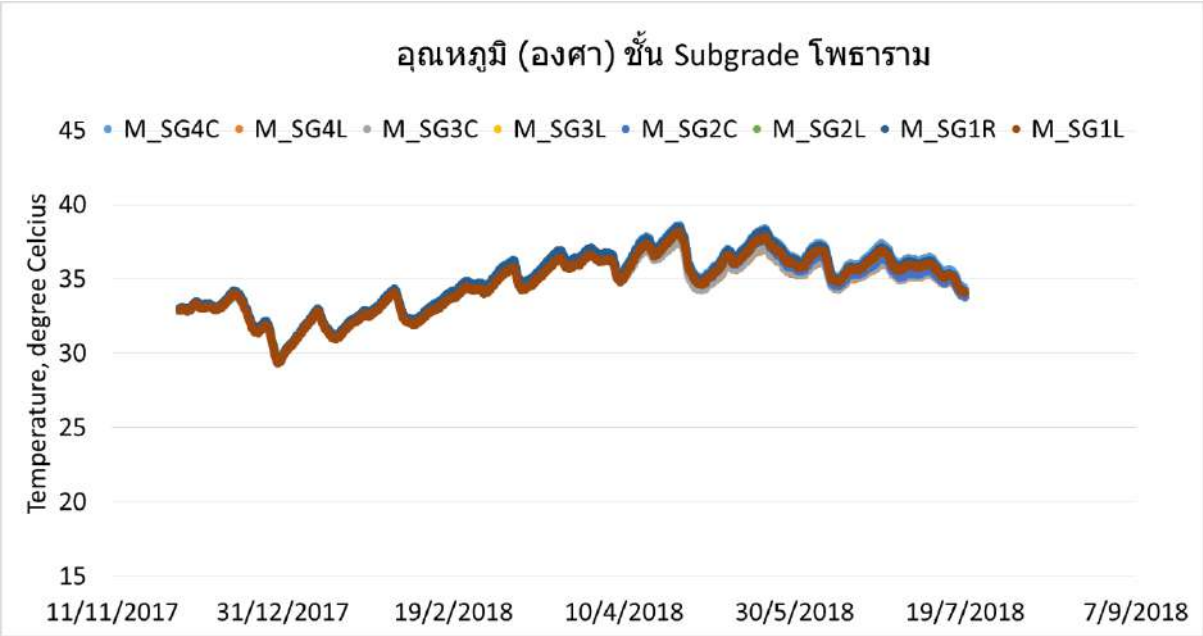


ก

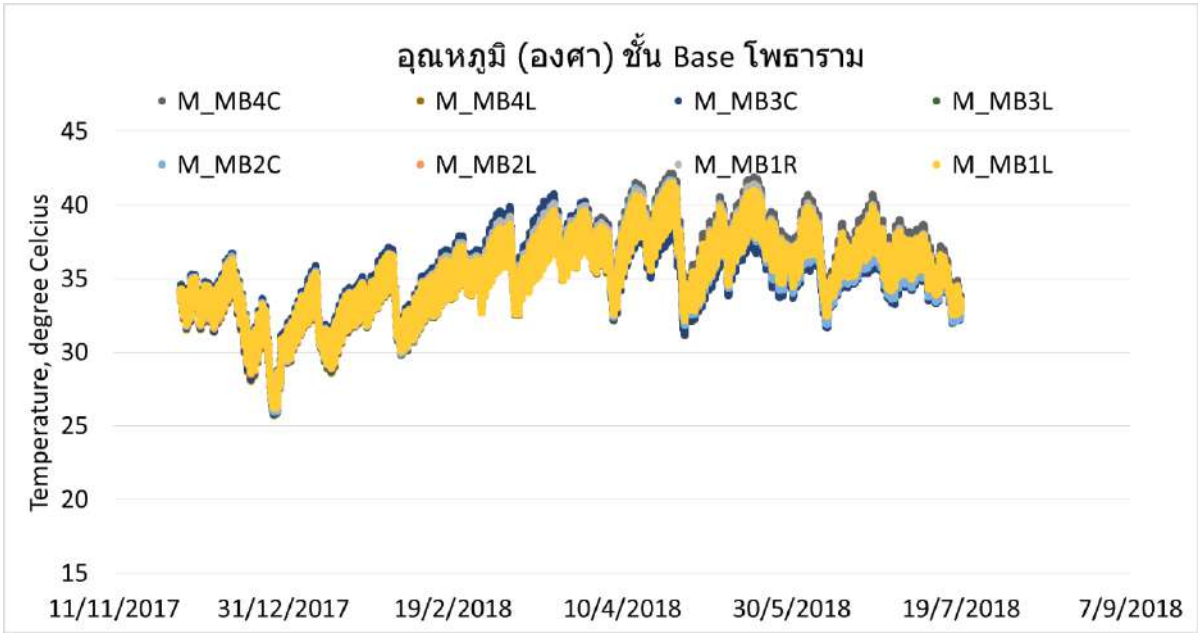


ข

รูปที่ 9.93 ความชื้นในชั้น Subgrade และใต้ชั้น RC แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)

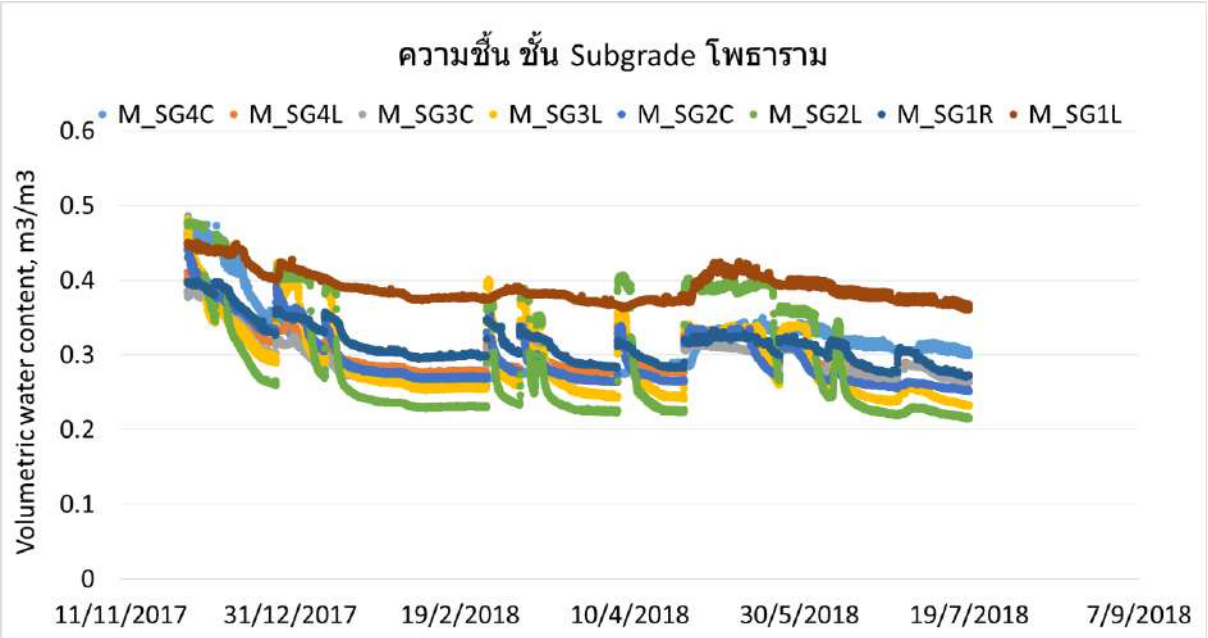


ก

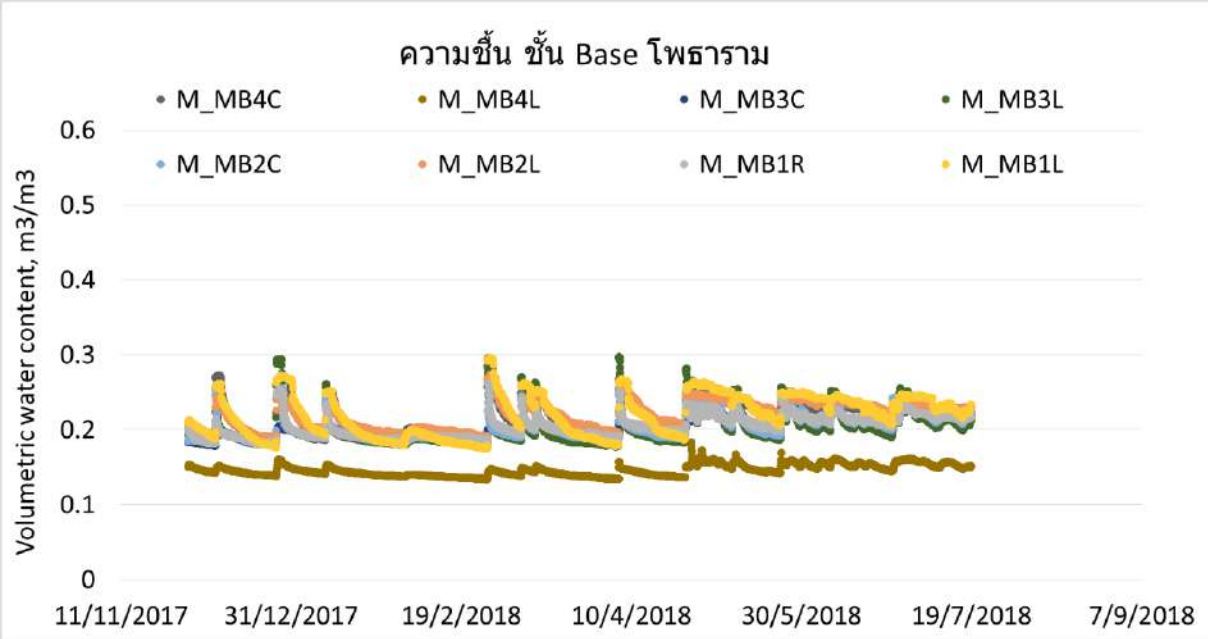


ข

รูปที่ 9.94 อุณหภูมิในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (โพธาราม)

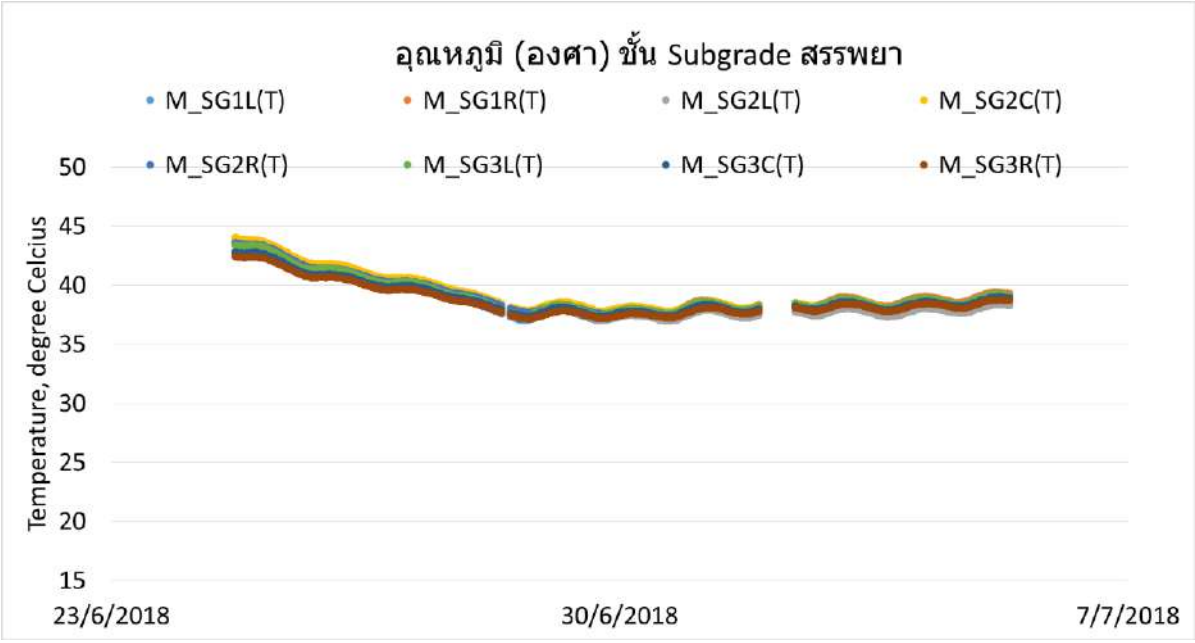


ก

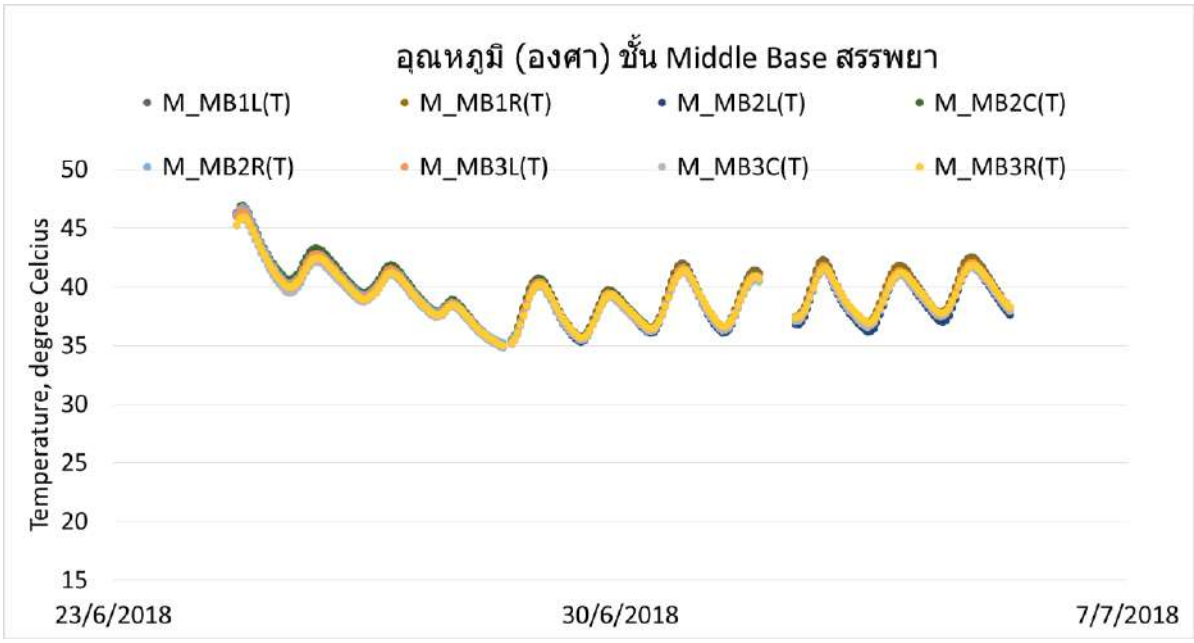


ข

รูปที่ 9.95 ความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (โพธาราม)

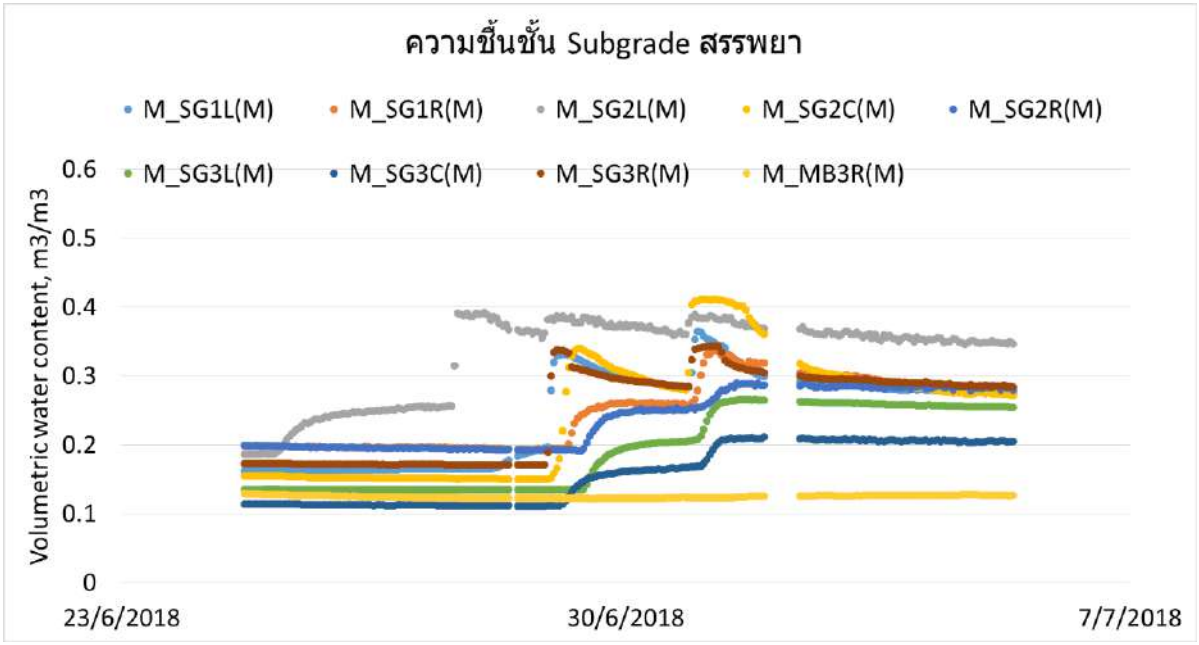


ก

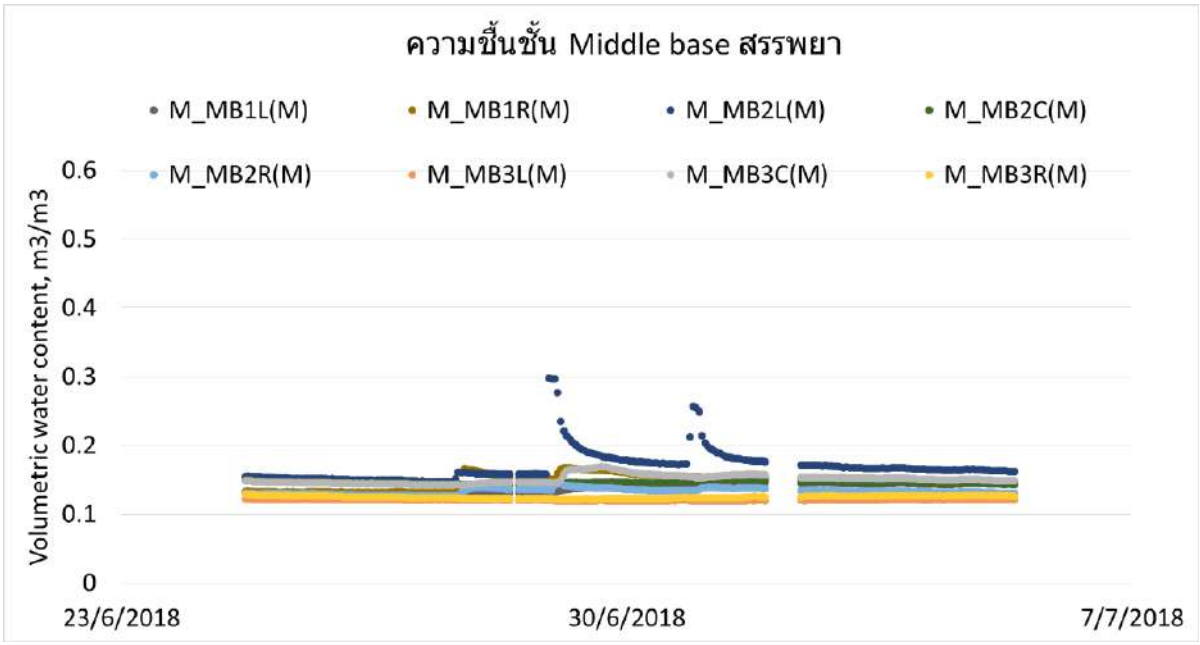


ข

รูปที่ 9.96 อุณหภูมิในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (สรรพยา)

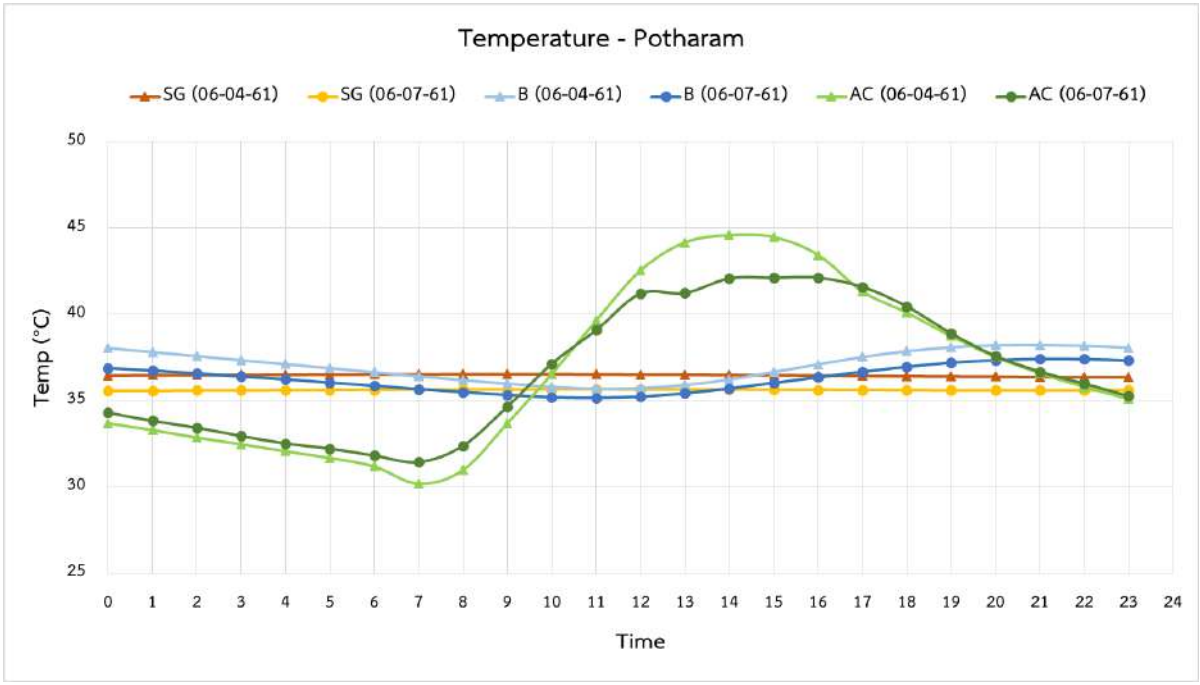


ก

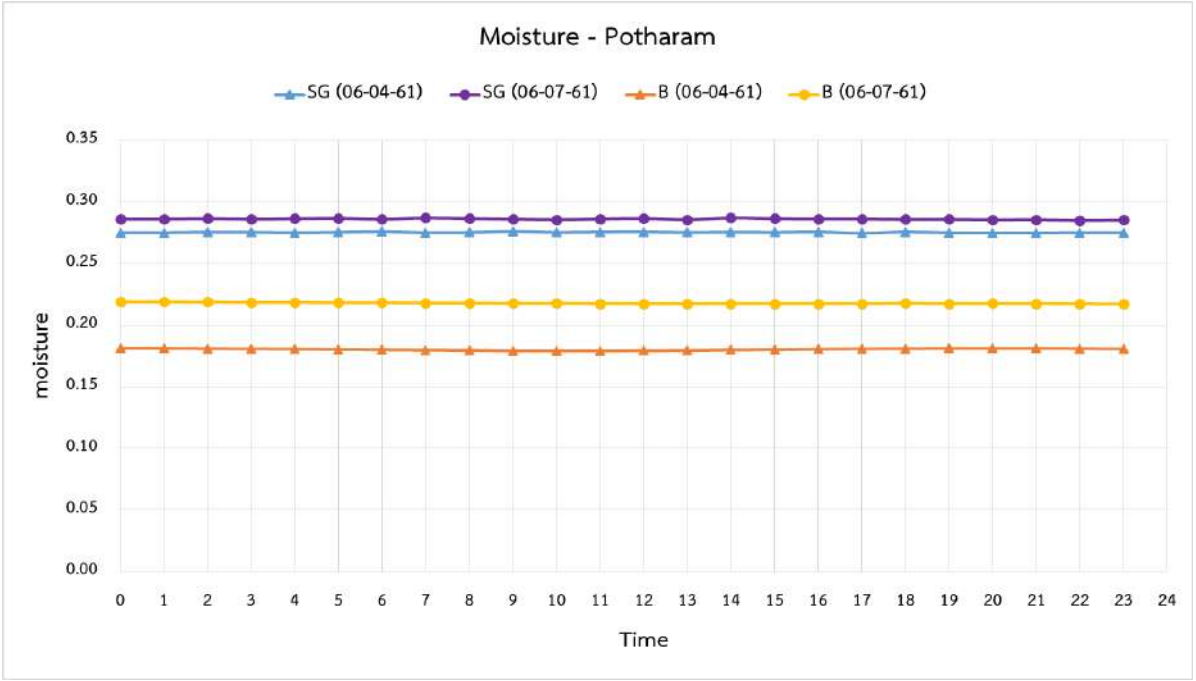


ข

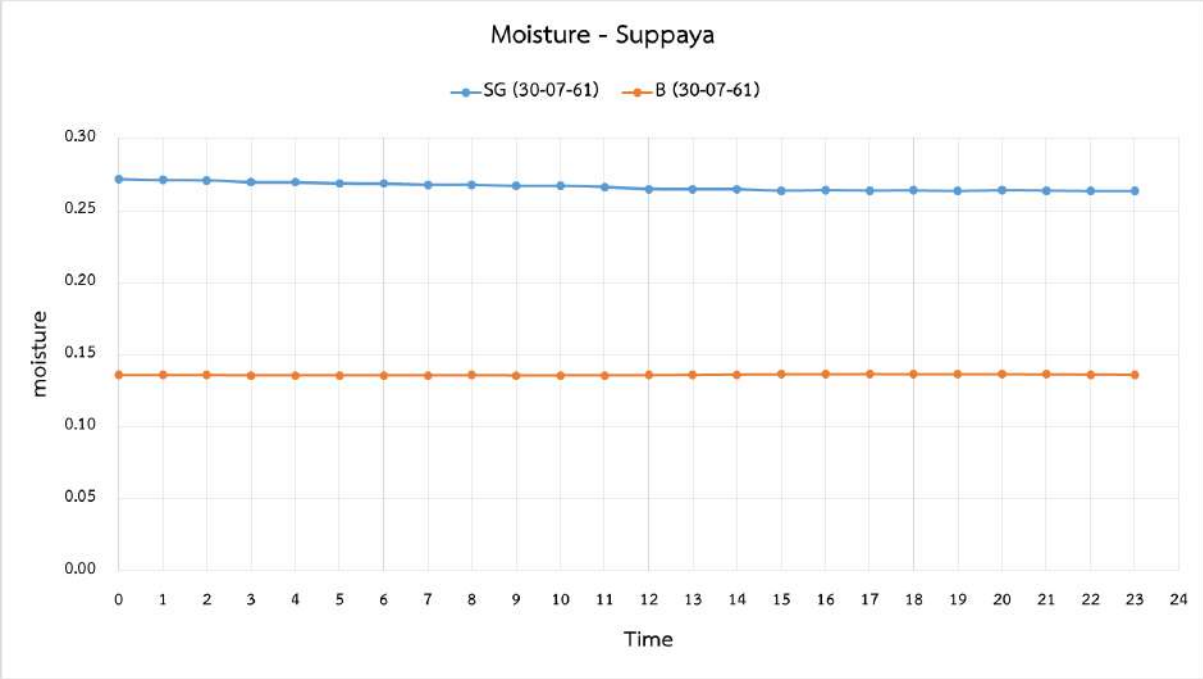
รูปที่ 9.97 ความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (สรรพยา)



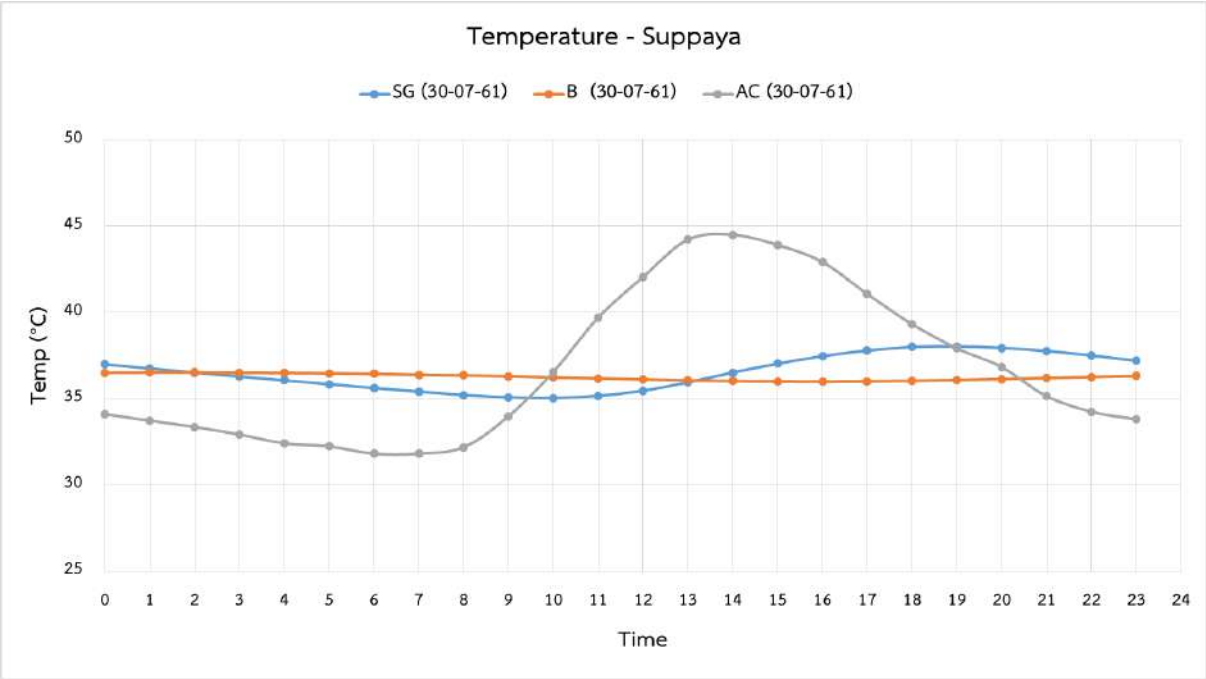
รูปที่ 9.98 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (โพธาราม)



รูปที่ 9.99 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (โพธาราม)



รูปที่ 9.100 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (สรรพยา)



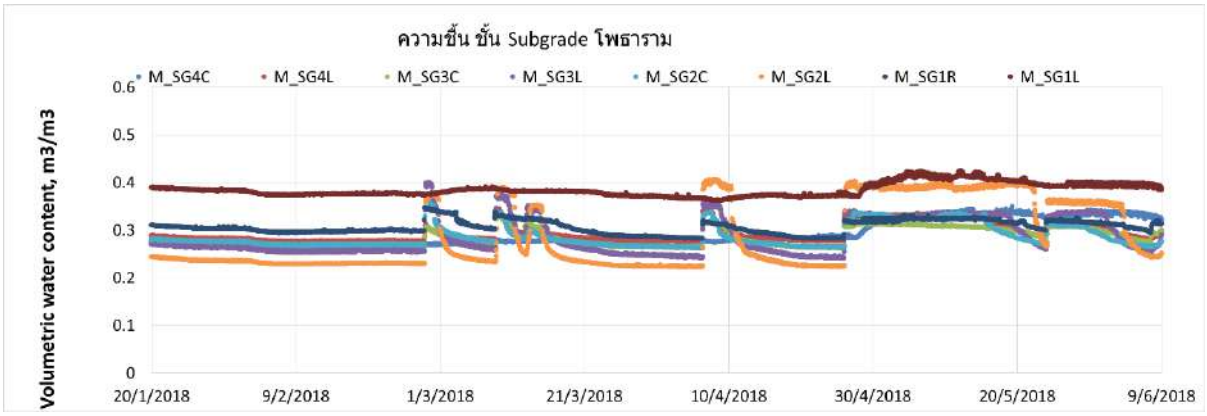
รูปที่ 9.101 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (สรรพยา)

9.3.4 ความชื้นและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของถนน

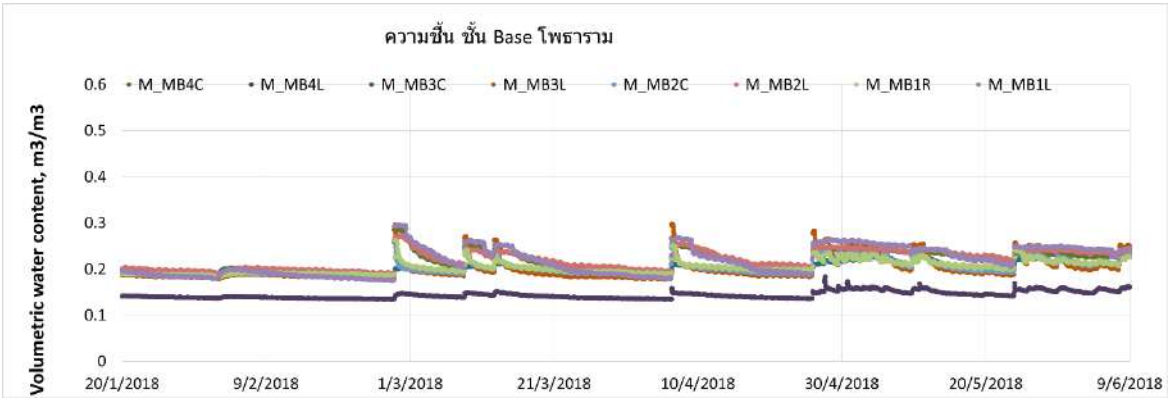
จากข้อมูลความชื้นที่วัดได้ในวัสดุชั้นทาง แปลงโพธาราม ดังแสดงในรูปที่ 9.99 สามารถนำมาเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการรับน้ำหนักของรถบรรทุก หรือค่า ความชันระหว่าง ESAL/Strain ดังแสดงในรูปที่ 9.102ก โดยเมื่อ ค่า ESAL/Strain มีค่าต่ำ จะบ่งชี้ว่าวัสดุชั้นทางเริ่มมีการเสื่อมสภาพ เพราะ ESAL เปรียบเสมือนน้ำหนักกระทำ ดังนั้น ESAL/Strain ก็เปรียบได้กับค่า Modulus ของวัสดุนั่นเอง จากรูปที่ 9.102ก จะเห็นได้ว่าวัสดุชั้น AC และ Base มีแนวโน้มค่า ESAL/Strain ขึ้นลงแต่ก็มีค่าค่อนข้างคงที่ แต่วัสดุชั้น Subbase และ Selected material พบว่ามีแนวโน้มค่า ESAL/Strain ลดลงตามเวลา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นก็จะพบว่าความชื้นในวัสดุ Subgrade และ ชั้น Base ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยอัตรา

การลดลงของค่า ESAL/Strain จะมีค่าลดลงมากในหลังเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มมีฝนตกชุกนั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุ Subbase และ Selected material จะมีวัสดุขนาดเม็ดละเอียดมากกว่าจะมีความอ่อนไหวต่อความชื้นมากกว่าวัสดุเม็ดหยาบ ในชั้น Base และวัสดุผิวทาง AC

ก



ข



ค

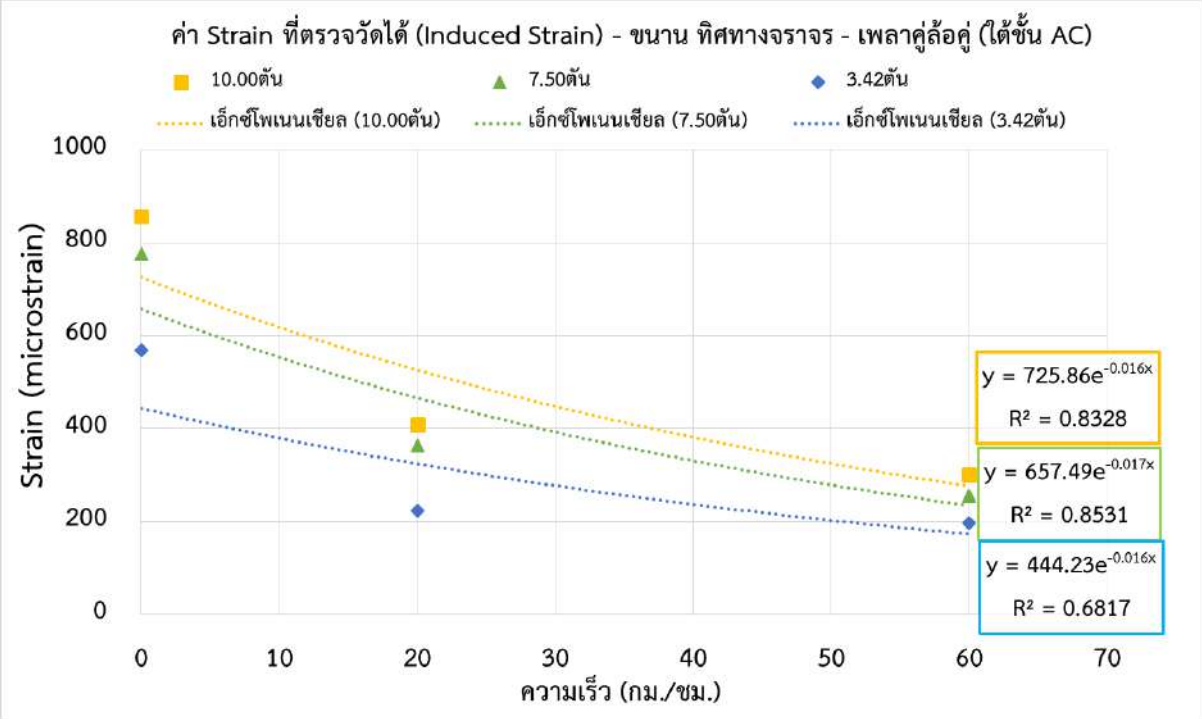
รูปที่ 9.102 อัตราส่วน ESAL/Strain และความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base ที่ช่วงเวลาต่างๆ แปลงถนน AC (โพธาราม)

จากผลการวิเคราะห์ผลการทดสอบในเบื้องต้นพบว่า แนวโน้มการตอบสนองของวัสดุทางในด้านความเค้นและความเครียด มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ผ่านมาในแปลงโพธาราม แต่อย่างไรก็ดี ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในตำแหน่งต่างๆ และความสัมพันธ์กับความเร็วรถบรรทุกมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง เนื่องจากลักษณะชั้นทางที่มีความแตกต่างกัน และยังพบว่ามีปัญหาเรื่องความแม่นยำในตำแหน่งของล้อรถบรรทุกและอุปกรณ์ Strain Gage ซึ่งมีขนาดเล็ก โดยเฉพาะในกรณีที่รถวิ่งด้วยความเร็วสูงอาจทำให้การวัดคลาดเคลื่อน และลักษณะการเกิด Strain เมื่อตำแหน่งอุปกรณ์อยู่ระหว่างสองเพลา ซึ่งมีลักษณะซับซ้อนทำให้ค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น (Induced strain) ที่วัดได้มีการกระจายตัวมากกว่าค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้น (Induced stress) อย่างไรก็ดี จากผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ทุกตัวที่ได้ติดตั้งสามารถวัดได้อย่างถูกต้อง ในระดับที่น่าพอใจ และสามารถนำไปติดตามผลเพื่อสร้าง Performance model ของถนนในระยะยาวได้

จากผลการประเมินสมรรถนะของถนนในระยะยาวพบว่าปริมาณความชื้นมีผลต่อคุณภาพวัสดุ ชั้น Subbase และ Selected material พบว่ามีแนวโน้มค่า ESAL/Strain ลดลงตามเวลา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นก็จะพบว่าความชื้นในวัสดุ Subgrade และ ชั้น Base ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยอัตราการลดลงของค่า ESAL/Strain จะมีค่าลดลงมากในหลังเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มมีฝนตกชุก

9.3.5 ความเร็วและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของถนน

จากผลการทดสอบรถบรรทุกกึ่งพ่วงโดยเปลี่ยนแปลงความเร็ว หยุดนิ่ง, 20, 60 กม./ชม. ที่น้ำหนักบรรทุก 10, 7.5 และ 3.42 ตัน พบว่าเมื่อ ความเร็วลดลง จาก 60 กม. /ชม. จนหยุดนิ่ง ค่าความเครียด (Strain) จะเพิ่มขึ้น 2.5-3 เท่า ดังแสดงใน รูปที่ 9.103 ทำให้อำนาจการทำลายสูงขึ้น ดังนั้นในพื้นที่ที่รถบรรทุกหนักต้องชลอตัวหรือวิ่งช้า เช่น บริเวณทางแยกจะทำให้ถนนเสียหายเร็วขึ้น จึงไม่ควรออกแบบเป็นผิวทาง AC



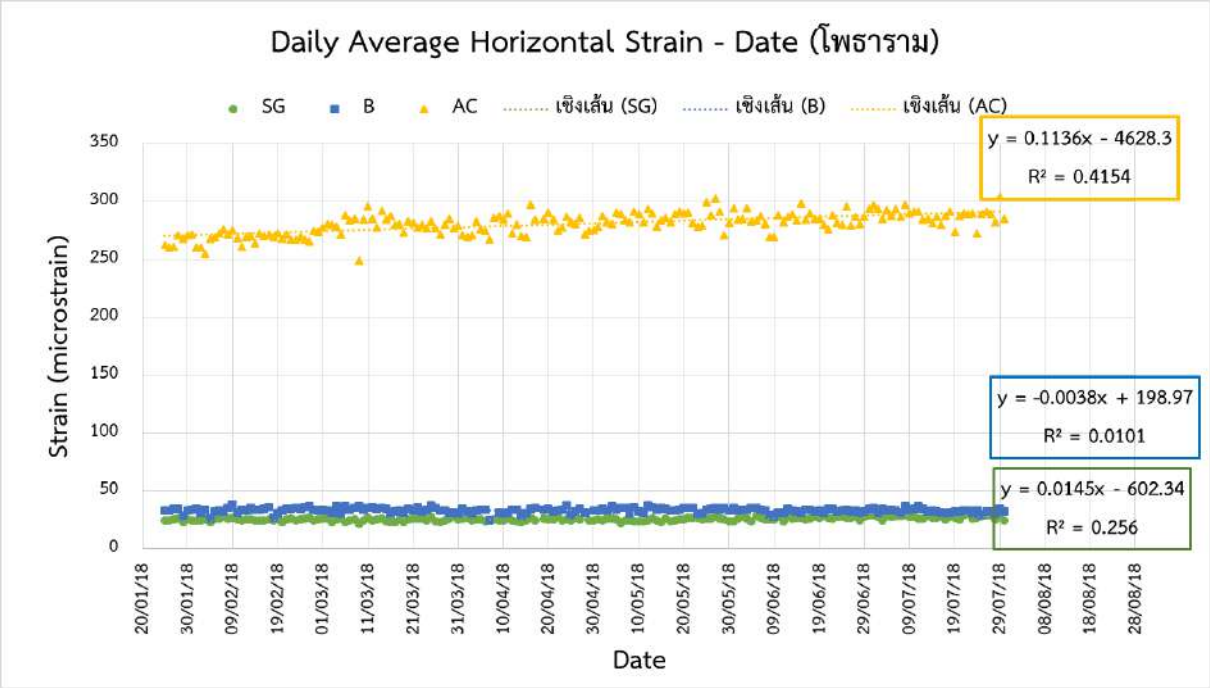
รูปที่ 9.103 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถบรรทุกกับ Strain แนวราบ ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

9.3.6 แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

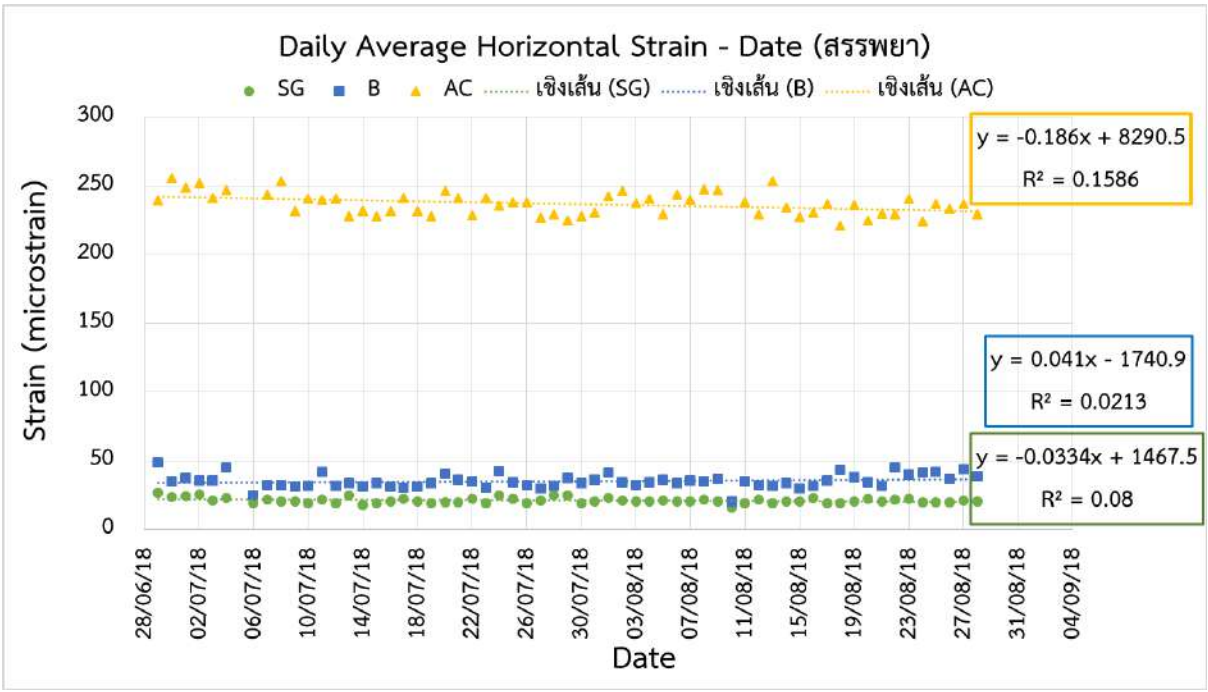
ที่ปรึกษาได้ดำเนินการปรับปรุงแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี ซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จในระยะที่หนึ่ง และ อ.สรรพยา จ.ชัยนาท ที่ได้ติดตั้งเพิ่มเติมอีก 1 แปลงในระยะที่สอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

- **ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Strain) กับระยะเวลาและปริมาณจราจรสะสม**

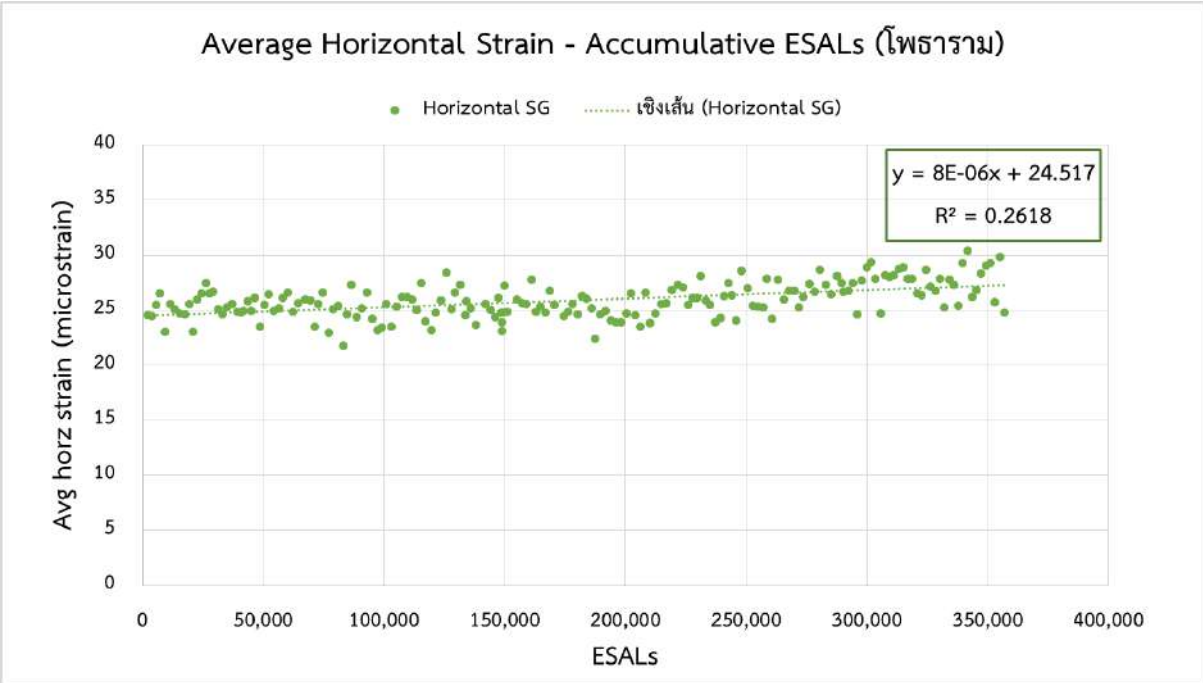
ที่ปรึกษาได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Strain) กับระยะเวลาและปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ในชั้นโครงสร้างต่างๆของถนนลาดยางดังแสดงใน รูปที่ 9.104 ถึง รูปที่ 9.113



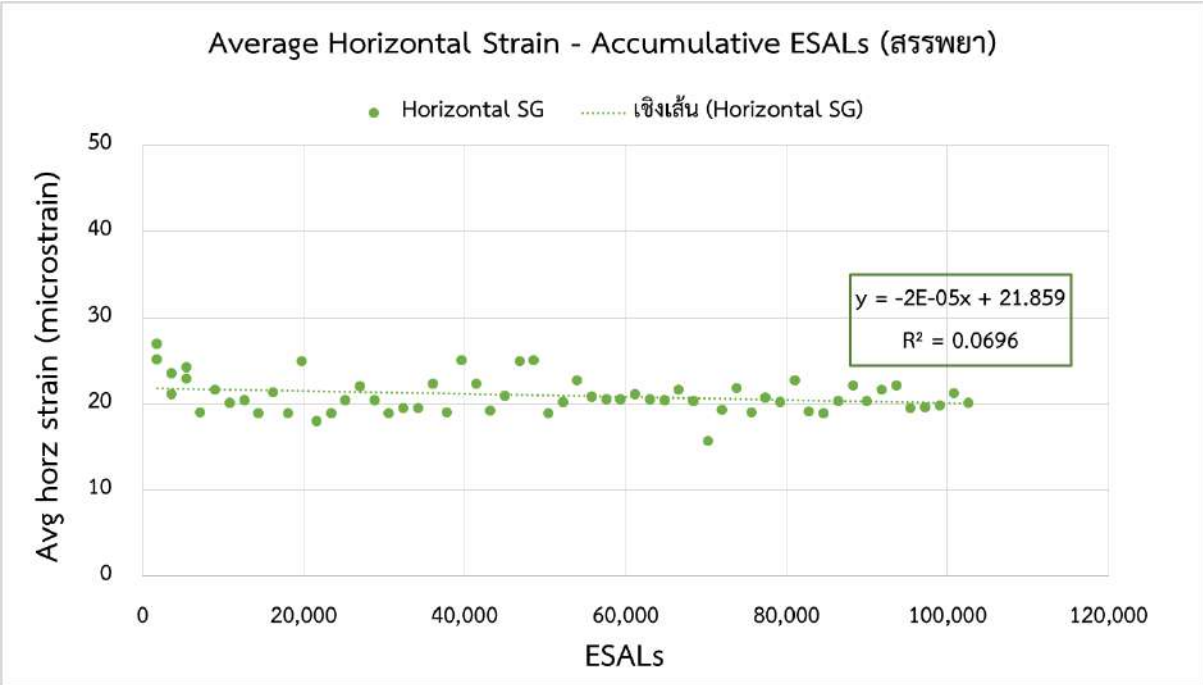
รูปที่ 9.104 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับระยะเวลาของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



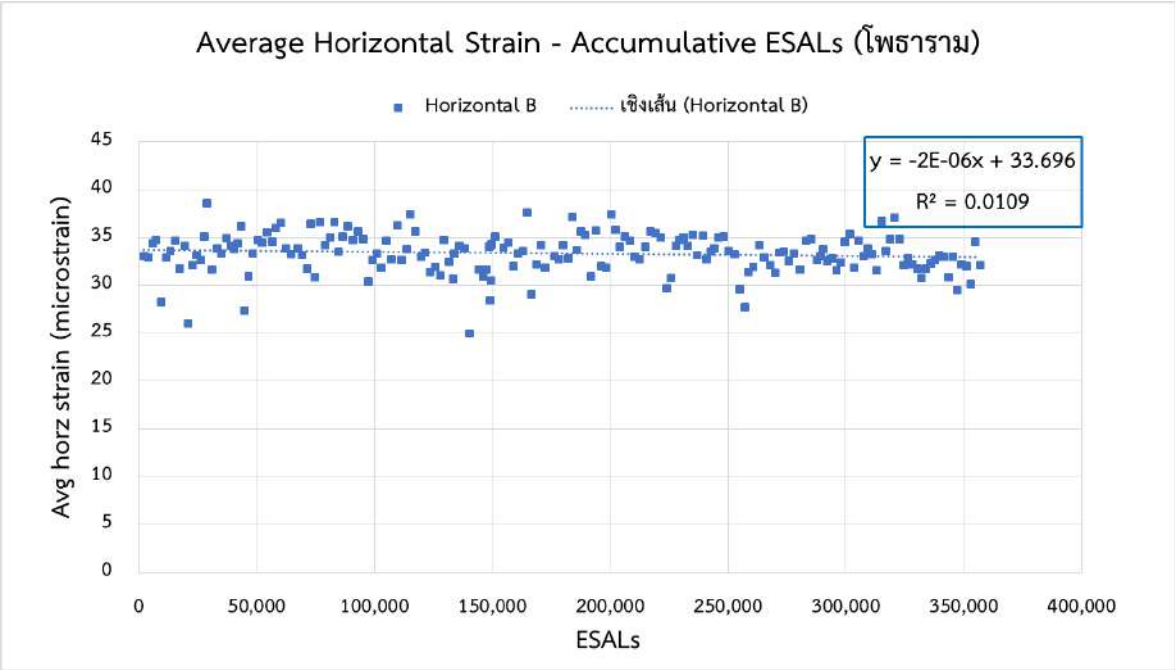
รูปที่ 9.105 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ใต้ผิวทาง AC, Base และเหนือชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



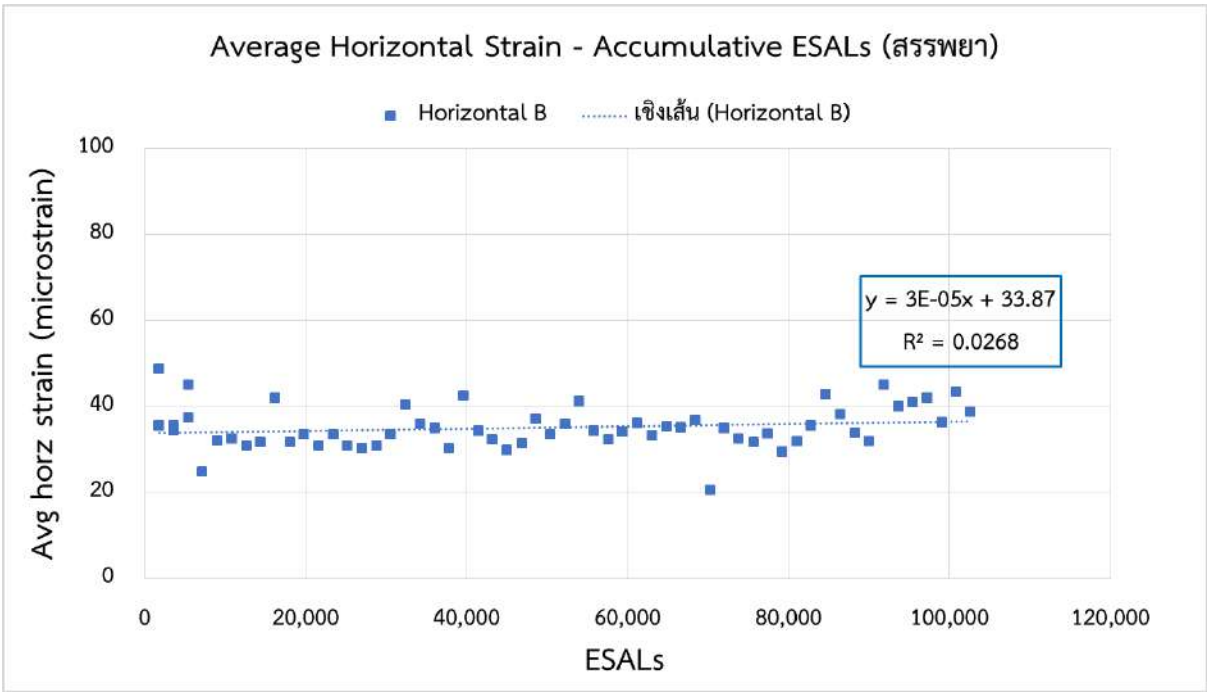
รูปที่ 9.106 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



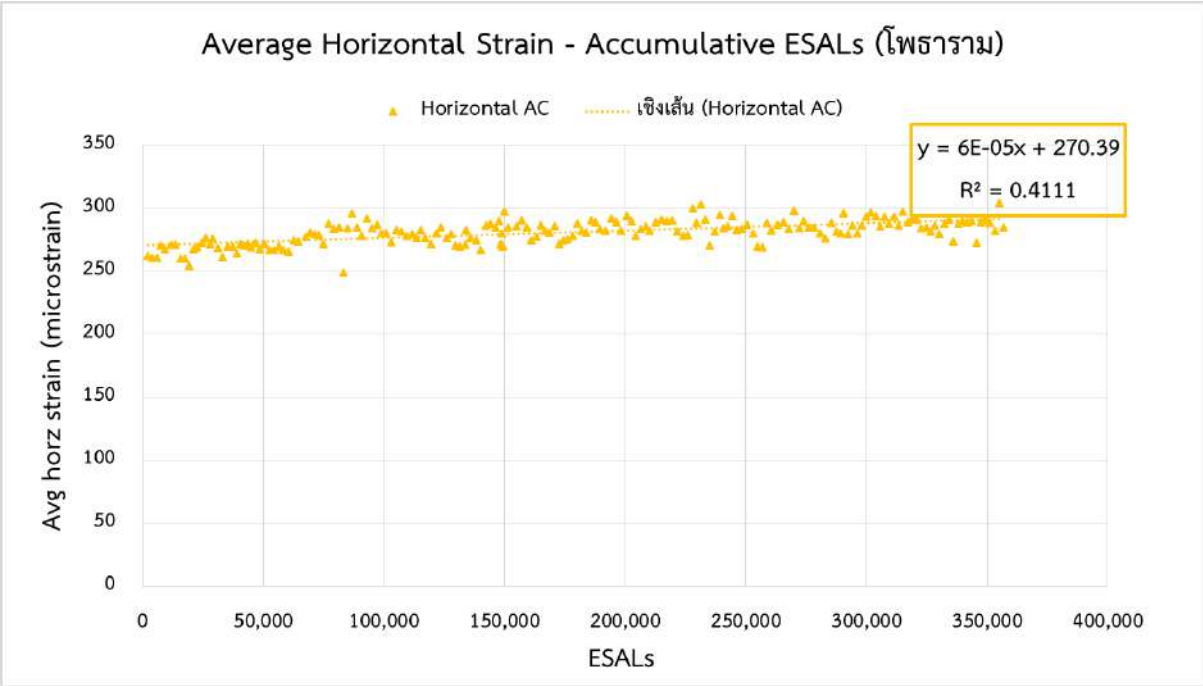
รูปที่ 9.107 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท



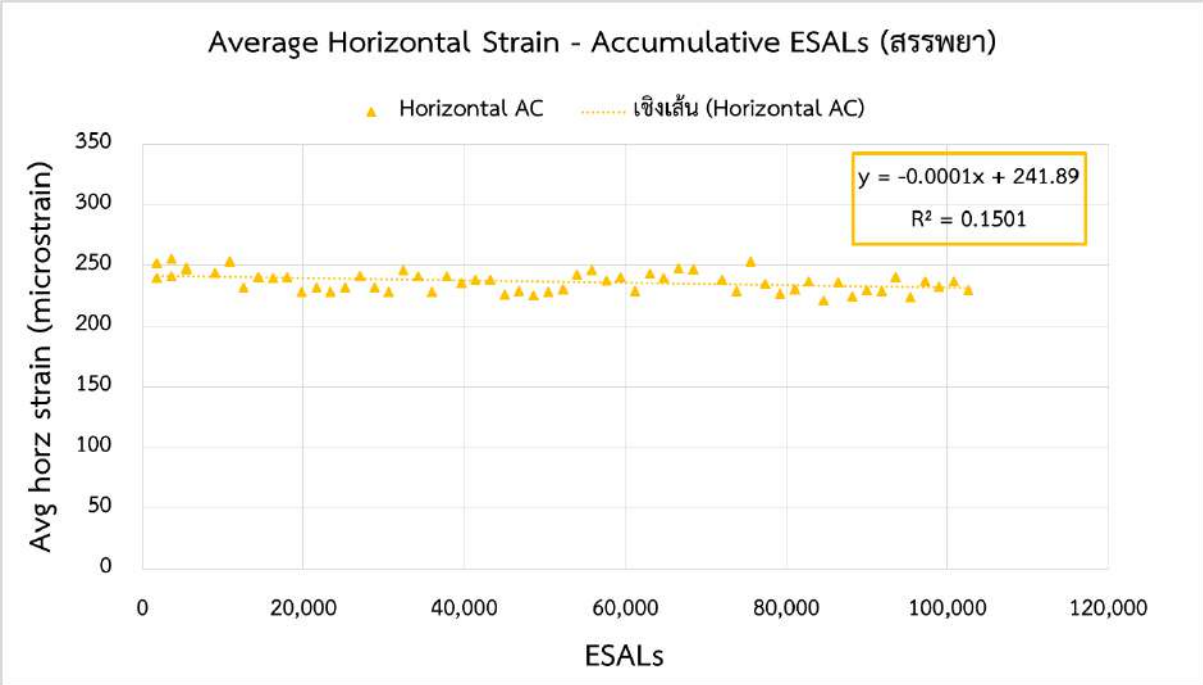
รูปที่ 9.108 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Base ของถนนลาดยาง อ. โพธาราม จ.ราชบุรี



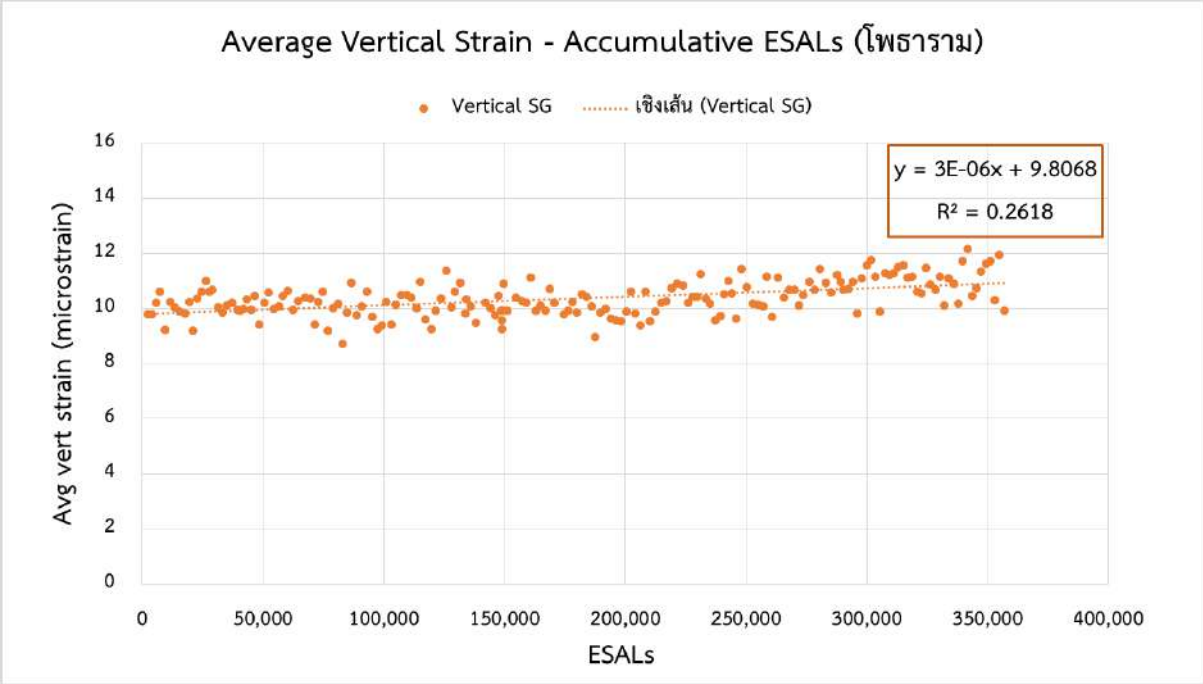
รูปที่ 9.109 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Base ของถนนลาดยาง อ. สรรพยา จ.ชัยนาท



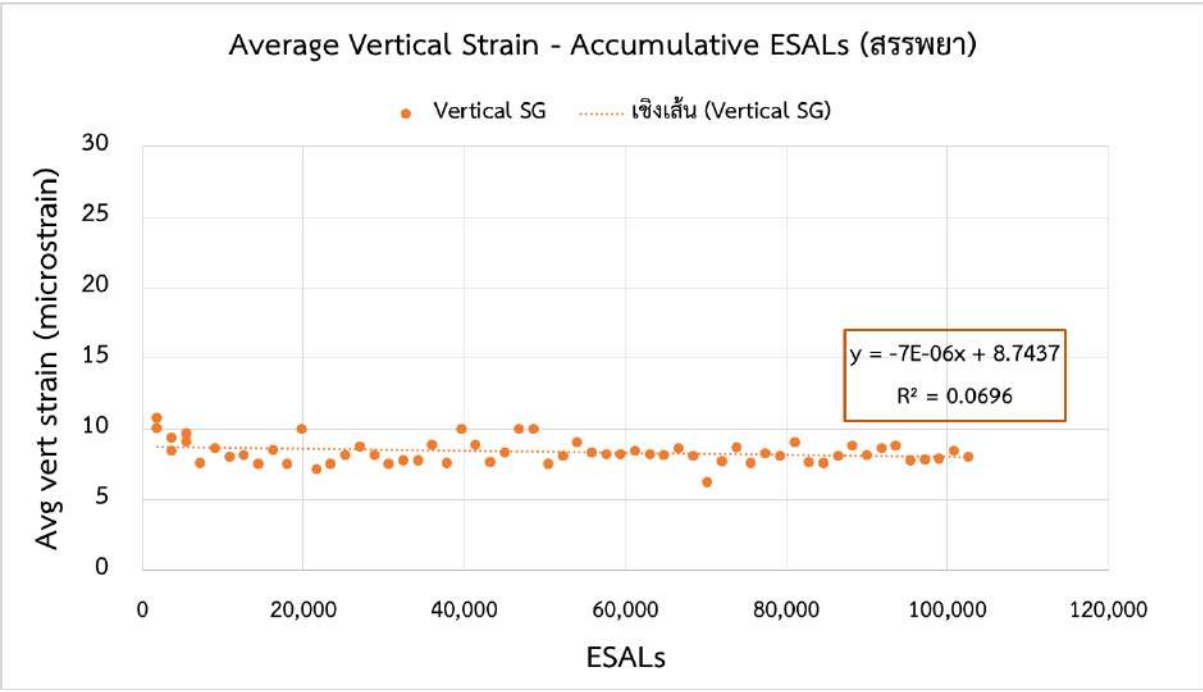
รูปที่ 9.110 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



รูปที่ 9.111 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท



รูปที่ 9.112 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวดิ่ง กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



รูปที่ 9.113 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวดิ่ง กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

- **แบบจำลองความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้า (Fatigue Failure Model)**

สถาบัน Asphalt Institute (AI) และ Shell ได้จัดทำแบบจำลอง (Model) เพื่อใช้ในการทำนายจำนวนรอบของน้ำหนักที่กระทำสูงสุดที่ยอมให้จนเกิดรอยแตกโดยพิจารณาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$N_f = f_1 \varepsilon_t^{-f_2} E_1^{-f_3} \quad (38)$$

เมื่อ N_f คือ จำนวนรอบของแรงกระทำต่อโครงสร้างที่ยอมให้ก่อนจะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue Cracking)

ε_t คือ Horizontal Tensile Strain ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

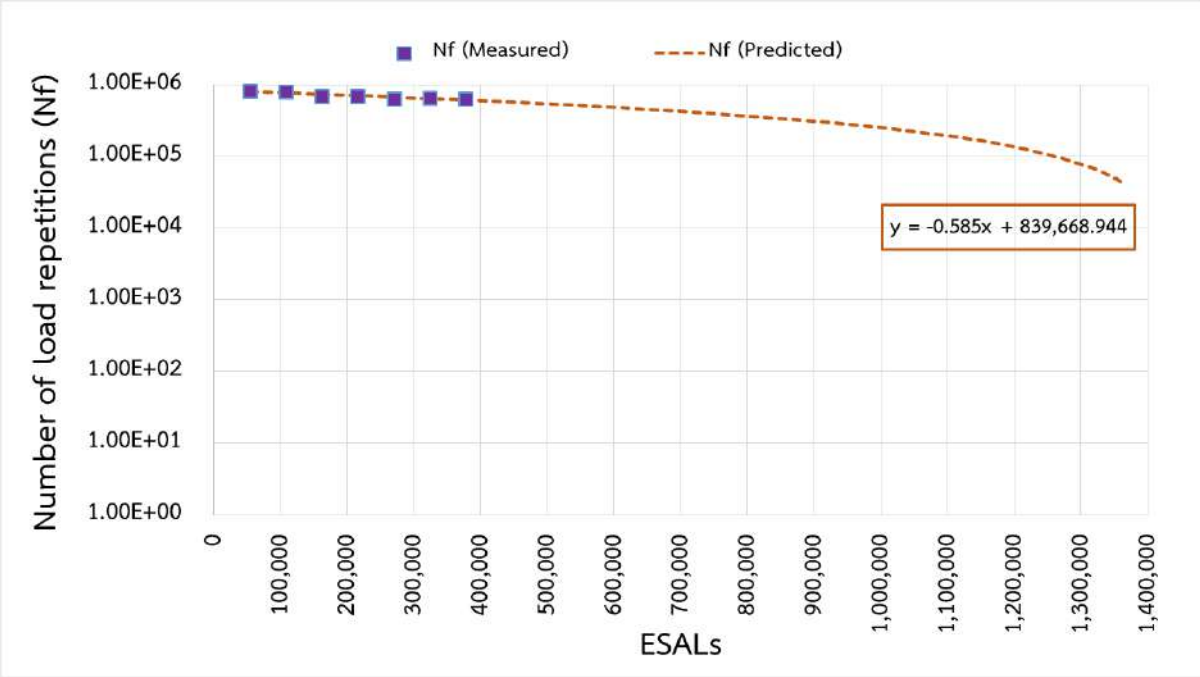
E_1 คือ ค่าโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

f_1, f_2, f_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการความสัมพันธ์

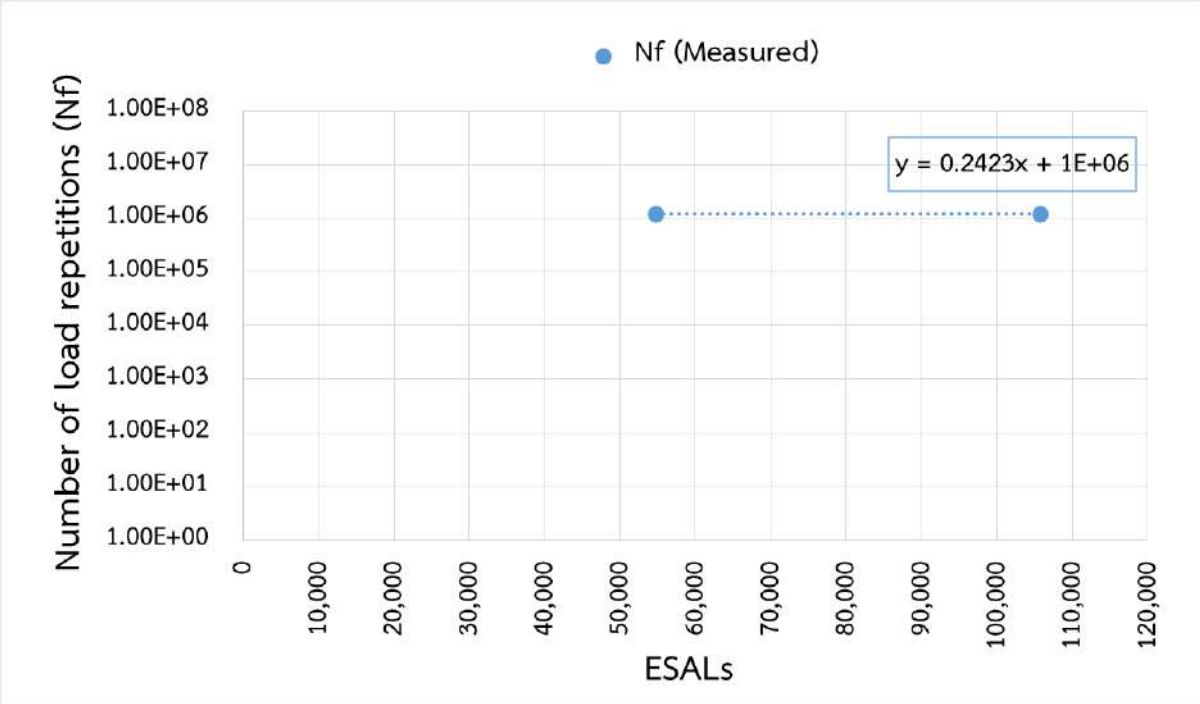
โดยสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป AI ได้กำหนดให้ใช้สมการดังต่อไปนี้

$$N_f = 0.0796\varepsilon_t^{-3.291}E_1^{-0.854} \quad (39)$$

โดยค่า N_f จะลดลงเมื่อค่า Tensile Strain ที่เกิดขึ้นซ้ำๆ ใต้ผิวทางลาดยางสูงขึ้น ซึ่งสามารถใช้ค่าเฉลี่ยรายเดือนของ Tensile Strain ที่ได้จากการตรวจวัดใต้ผิวทางลาดยางมาใช้ในการทำนายอายุบริการคงเหลือของถนนลาดยาง โดยค่า N_f ยิ่งน้อย หมายถึงอายุบริการ (หรือจำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำที่รับได้) ของถนนลาดยางยิ่งเหลือน้อยลง โดยถนนลาดยางจะชำรุดเสียหายเนื่องจากความล้าเมื่อค่า N_f ใกล้ศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 9.114 และ รูปที่ 9.115



รูปที่ 9.114 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_f กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

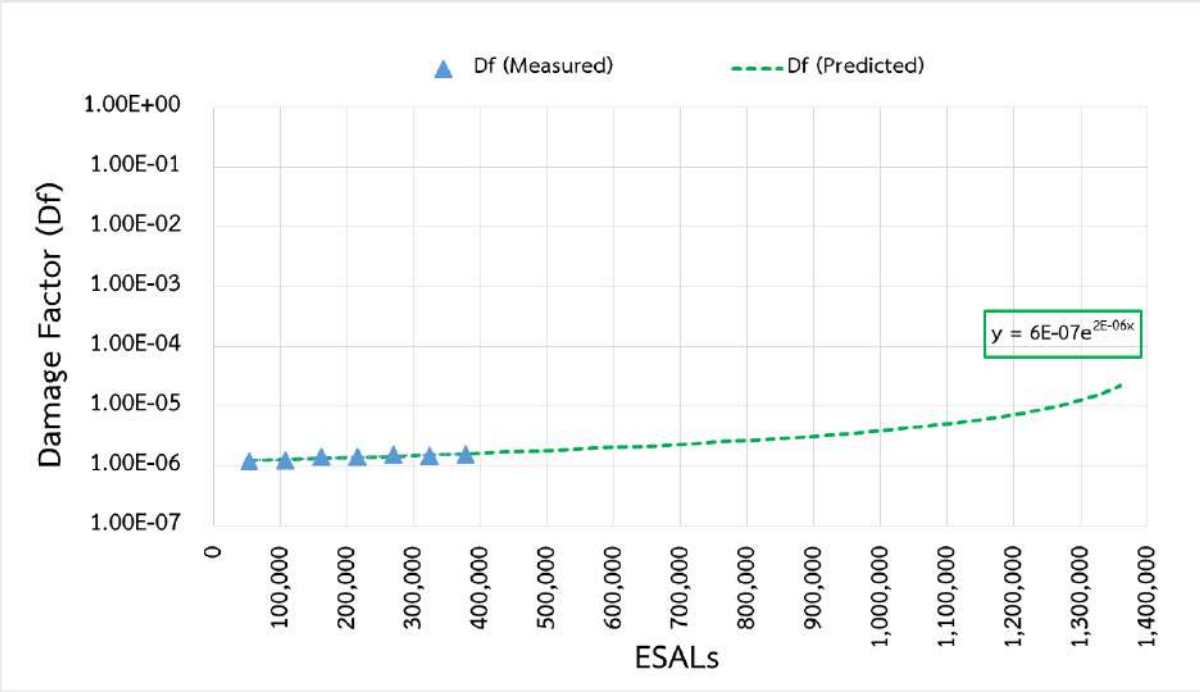


รูปที่ 9.115 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nf กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

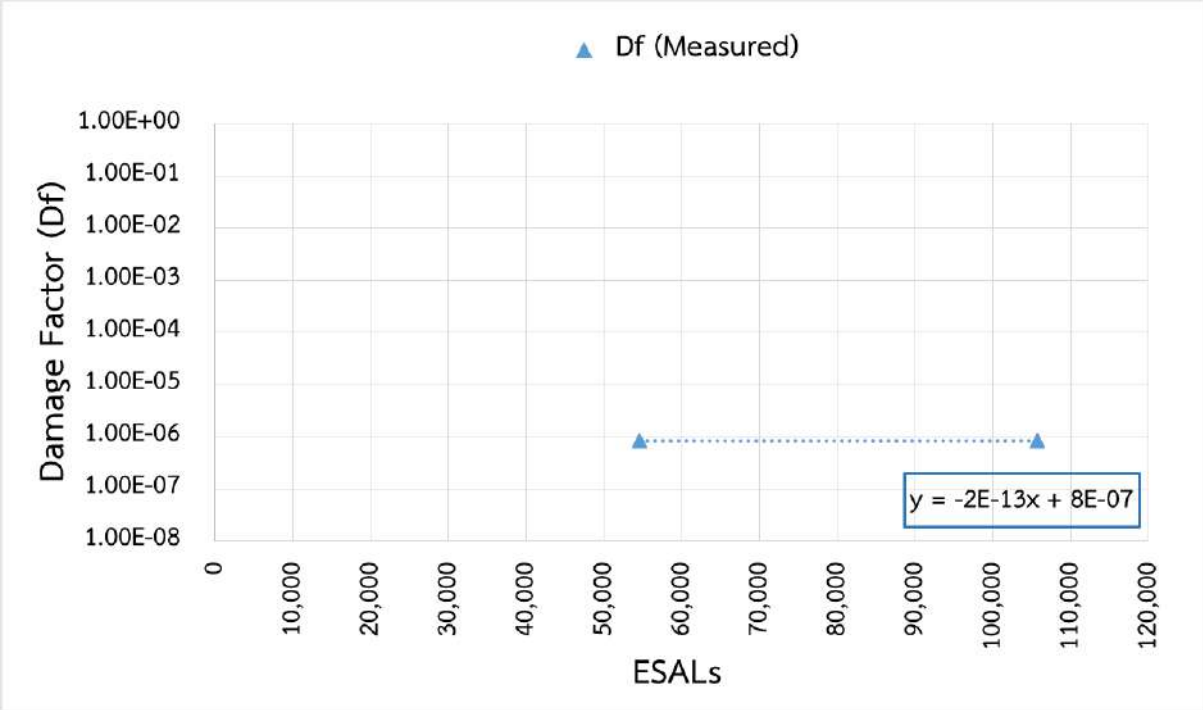
ค่า N_f สามารถนำไปหาค่าความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้า (D_f) ได้ดังสมการ

$$D_f = 1/N_f \quad (40)$$

ความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้า (D_f) ในแต่ละเดือน จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ในแต่ละเดือนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถนนลาดยางจะหมดอายุบริการเนื่องจากความล้า (Fatigue Failure) เมื่อค่า $D_f = 1$ ดังแสดงในรูปที่ 9.116 และรูปที่ 9.117



รูปที่ 9.116 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง D_f กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



รูปที่ 9.117 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง D_f กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

- **แบบจำลองความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดร่องล้อ (Rutting Failure Model)**

สถาบัน Asphalt Institute (AI) และ Shell ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายจำนวนรอบของน้ำหนักที่กระทำสูงสุดที่ยอมให้จนเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดร่องล้อโดยพิจารณาได้จากสมการดังต่อไปนี้

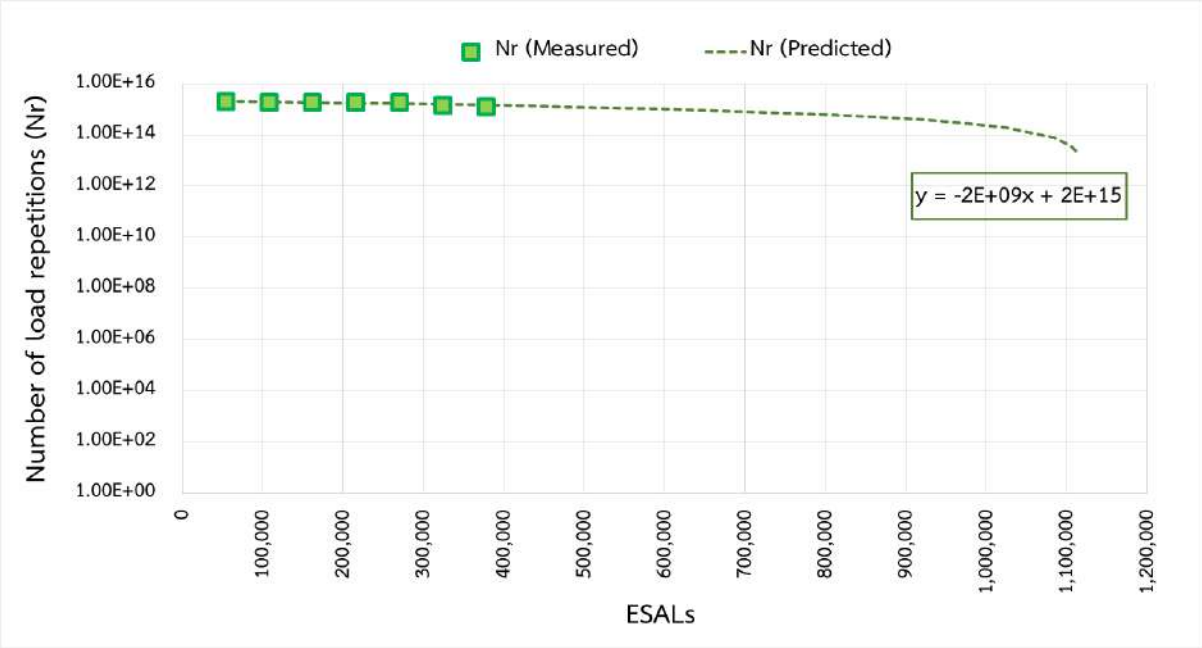
$$N_r = 1.365\times10^{-9}(\varepsilon_v^{-4.477}) \quad (41)$$

เมื่อ

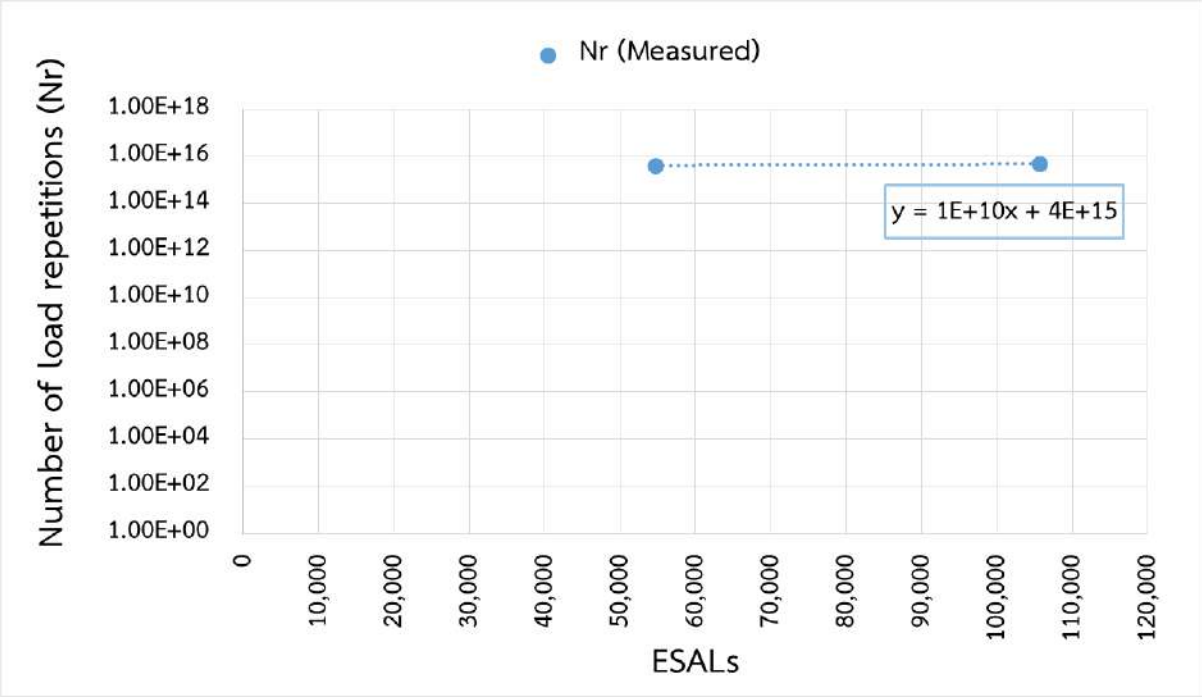
Nr = จำนวนรอบของน้ำหนักบรรทุกที่จะกระทำให้ถนนลาดยางพังเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดร่องล้อ

ε_v = ค่า Vertical Strain ที่เกิดขึ้นซ้ำๆ บนชั้นดินเดิม (Subgrade)

ในการทำนายอายุบริการของถนนลาดยางจากค่า N_r จะใช้ค่าความเครียดแนวดิ่ง (Vertical Strain) ที่เกิดขึ้นซ้ำๆ บนชั้นดินเดิม (Subgrade) แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดแนวดิ่ง (Vertical Strain) ที่ปรึกษาจึงจำเป็นต้องแปลงค่าผลการตรวจวัดความเครียดแนวราบ (Horizontal Strain) บนชั้นดินเดิม (Subgrade) เป็นค่าความเครียดแนวดิ่ง (Vertical Strain) โดยใช้ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) เพื่อทำนายอายุบริการของถนนลาดยางจากการเกิดร่องล้อ โดยผิวทางลาดยางจะหมดอายุบริการอันเนื่องมาจากการเกิดร่องล้อเมื่อค่า N_r ใกล้ศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 9.118 และรูปที่ 9.119



รูปที่ 9.118 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_r กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

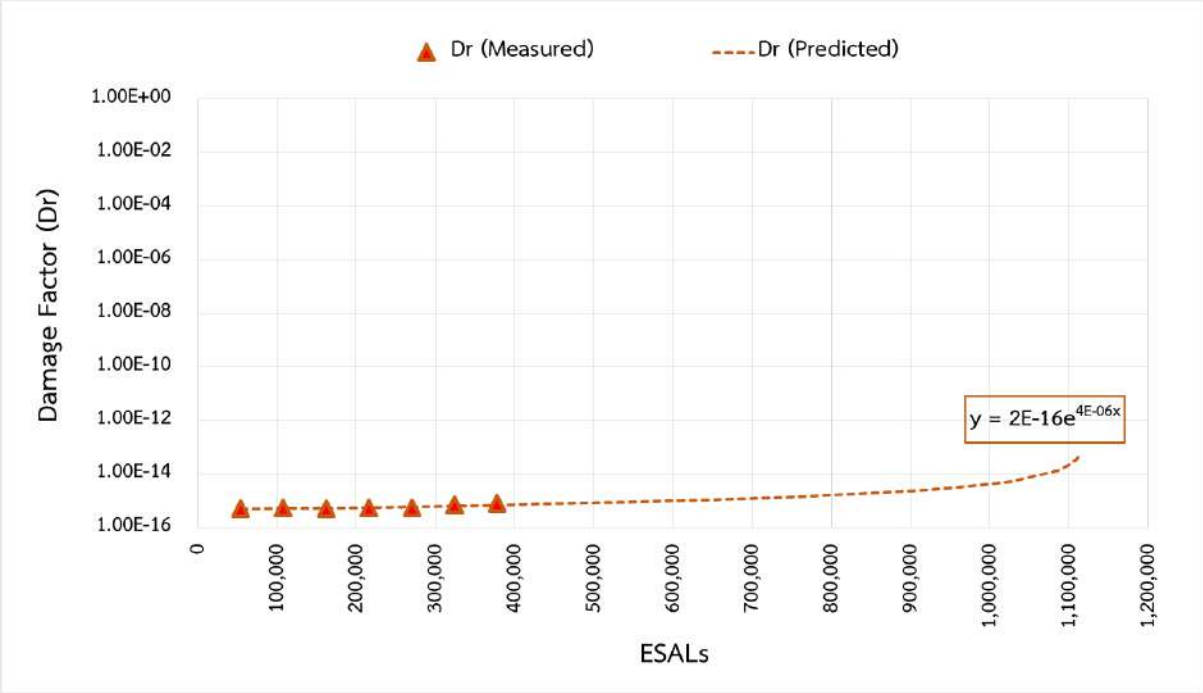


รูปที่ 9.119 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_r กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

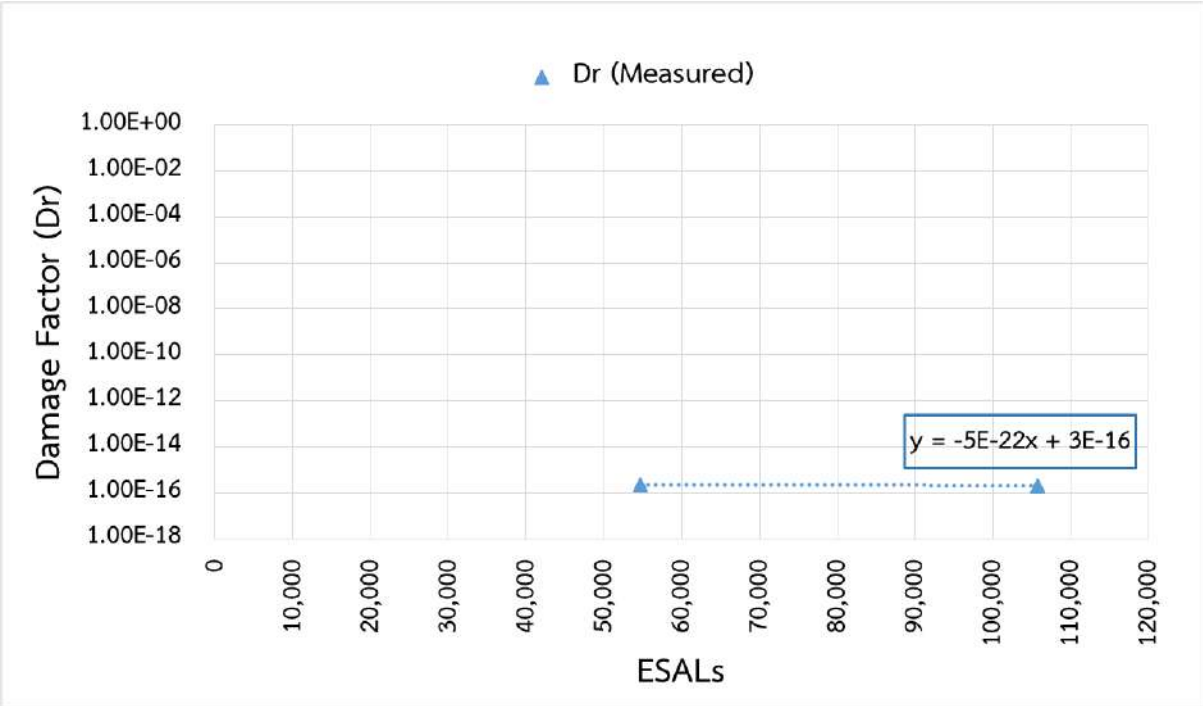
ค่า N_r สามารถนำไปหาค่าความเสียหายสะสมเนื่องจากร่องล้อ (D_r) ได้ดังสมการ

$$D_r = 1/N_r \quad (42)$$

ความเสียหายสะสมเนื่องจากร่องล้อ (D_r) ในแต่ละเดือน จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ในแต่ละเดือนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถนนลาดยางจะหมดอายุบริการเนื่องจากร่องล้อ (Rutting Failure) เมื่อค่า $D_r = 1$ ดังแสดงในรูปที่ 9.120 และรูปที่ 9.121



รูปที่ 9.120 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง D_r กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

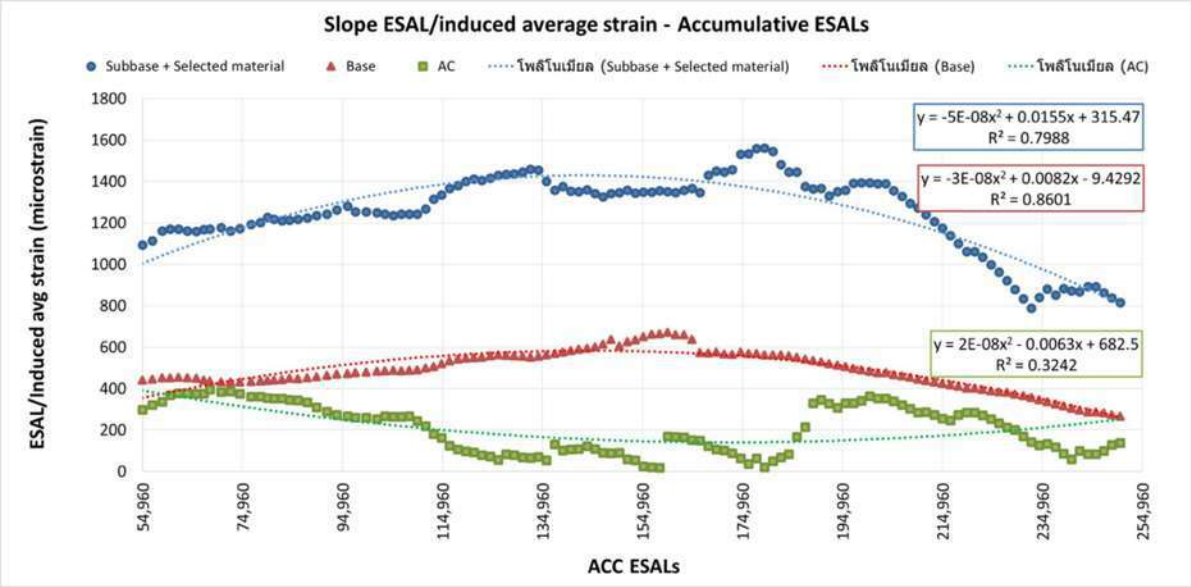


รูปที่ 9.121 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง D_r กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

- **แบบจำลองทำนายความลึกของการเกิดร่องล้อ (Rutting Depth Model)**

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายความลึกของการเกิดร่องล้อสำหรับแปลงตรวงจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยมีขั้นตอนในพัฒนาแบบจำลองดังนี้

1) คำนวณความชันระหว่างปริมาณจราจร (ESAL) กับค่า Induced strain เฉลี่ยย้อนหลัง 1 เดือน ของแต่ละชั้นทาง โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ดังแสดงในรูปที่ 9.122



รูปที่ 9.122 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ESALs /Induced Average Strain กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

2) คำนวณค่า strain แนวราบเฉลี่ยของแต่ละชั้นทางจาก ปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) หารด้วยความชันระหว่างปริมาณจราจร (ESAL) กับค่า Induced strain เฉลี่ยย้อนหลัง 1 เดือน ของแต่ละชั้นทาง ที่ได้จากข้อ 1 ดังสมการ

Strain แนวราบเฉลี่ย = ESALs / (Slope ของ ESAL/Induced strainเฉลี่ยย้อนหลัง 1 เดือน) (43)

3) คำนวณค่า strain แนวดิ่งเฉลี่ยของแต่ละชั้นทางจากค่า strain แนวราบเฉลี่ยของแต่ละชั้นทางที่ได้จากข้อ 2 คูณด้วยอัตราส่วนปัวซอง (Poisson Ratio) ของชั้นทาง ดังสมการ

$$\text{Strain}_{\text{แนวดิ่งเฉลี่ย}} = \nu \times \text{Strain}_{\text{แนวราบเฉลี่ย}} \quad (44)$$

เมื่อ ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson Ratio) ของชั้นทาง (0.35 สำหรับชั้น AC, Base, Subbase Selected Material และ 0.40 สำหรับชั้น Subgrade)

4) คำนวณค่าความลึกร่องล้อที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นทางโดยนำค่า strain แนวดิ่งเฉลี่ยของแต่ละชั้นทางที่ได้จากข้อ 3 คูณด้วยความหนาของชั้นทาง ดังสมการ

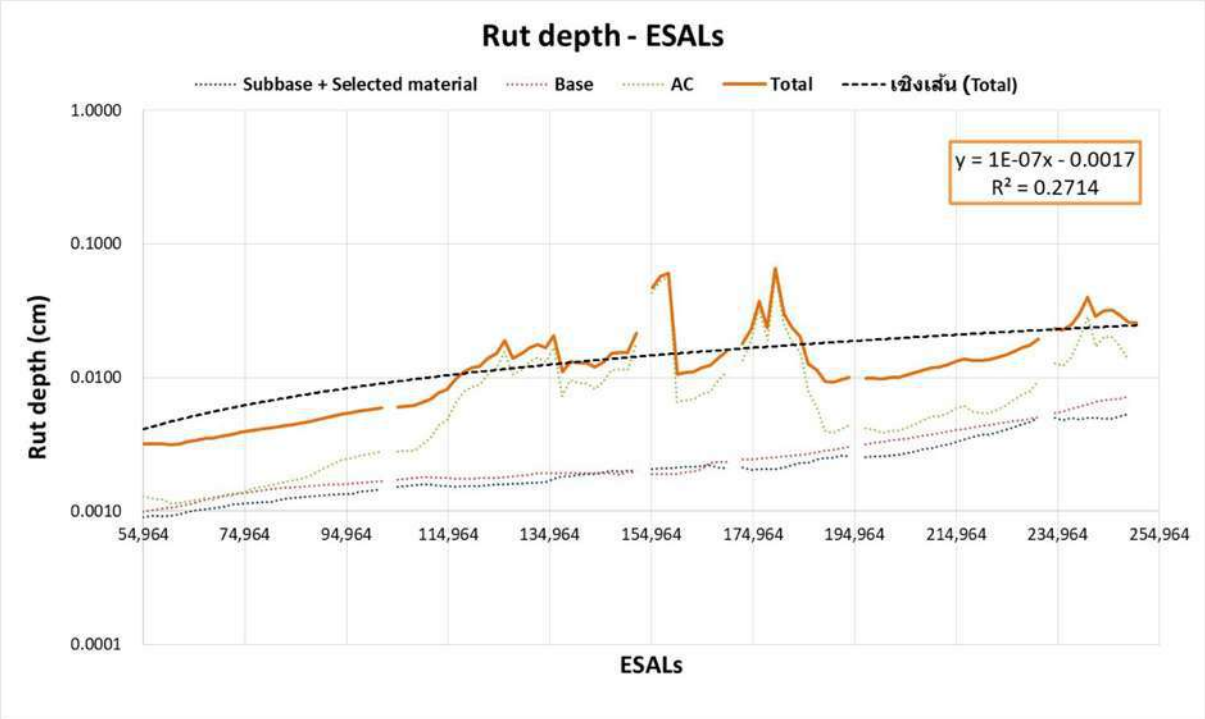
$$\text{Rutting Depth}_{\text{ในชั้นทาง}} = \text{Strain}_{\text{แนวดิ่งเฉลี่ย}} \times \text{ความหนาของชั้นทาง} \quad (45)$$

เมื่อ ความหนาชั้น AC = 20 ซม., ความหนาชั้น Base = 20 ซม. และความหนาชั้น Subbase + Selected Material = 45 ซม.

5) คำนวณค่าความลึกร่องล้อที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากผลรวมของความลึกร่องลึกในแต่ละชั้นทางที่ได้จากข้อ 4 ดังสมการ

$$\text{Rutting Depth}_{\text{ทั้งหมด}} = \text{Rutting Depth}_{AC} + \text{Rutting Depth}_{Base} + \text{Rutting Depth}_{Subbase+\ Selected\ Material} \quad (46)$$

ค่าความลึกร่องล้อจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ในแต่ละเดือนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 9.123 ซึ่งสามารถทำนายการเกิดร่องล้อของถนนลาดยางได้ เพื่อวางแผนการบำรุงรักษาตามระดับความรุนแรงของร่องล้อที่เกิดขึ้นตามเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 9.10



รูปที่ 9.123 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rut Depth กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ. ราชบุรี

ตารางที่ 9.10 เกณฑ์การบำรุงรักษาถนนลาดยางตามระดับความรุนแรงของร่องล้อ (ที่มา: คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง กรมทางหลวง)

ร่องล้อลึกเฉลี่ย	0.6-1.2 ซม.	1.2-2.5 ซม.	2.5 ซม. ขึ้นไป
ระดับความรุนแรง	เล็กน้อย	ปานกลาง	รุนแรง
การซ่อมบำรุง	ไม่ต้องซ่อมบำรุง	ปะซ่อม ขุดซ่อม ขูดไสและเสริมผิว	ปะซ่อม ขุดซ่อม ขูดไสและเสริมผิว

9.3.7 แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต อ. นครชัยศรี จ. นครปฐม

ในปี ค.ศ. 1998 Jeffery R. Roesler ได้จัดทำแบบจำลอง (Model) เพื่อใช้ในการทำนายจำนวนรอบของน้ำหนักที่กระทำสูงสุดที่ยอมให้จนเกิดรอยแตกในแผ่นคอนกรีต โดยพิจารณาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Log}\,(N_f) = 17.61 - 17.61(\sigma/\text{MOR}) \quad (47)$$

$$\text{MOR} = 0.75(f_c')^{1/2} \quad (48)$$

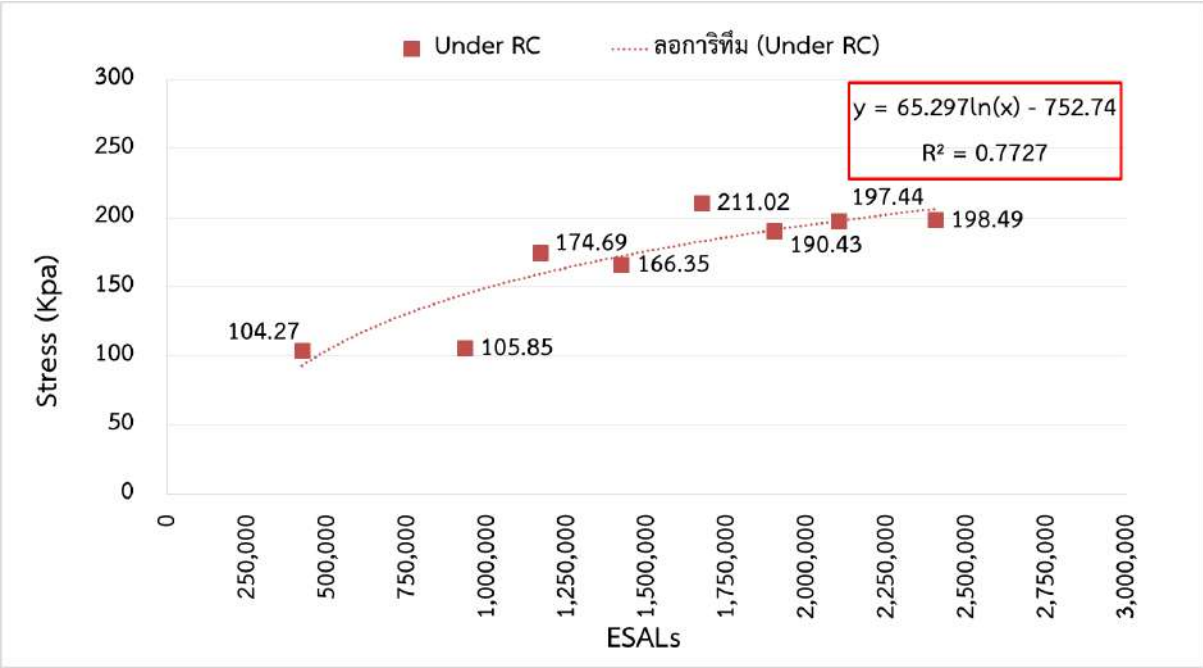
เมื่อ N_f คือ จำนวนรอบของแรงกระทำต่อโครงสร้างที่ยอมให้ก่อนจะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue Cracking) ในแผ่นคอนกรีต

σ คือ ค่า Stress สูงสุดที่กระทำต่อแผ่นคอนกรีต (psi)

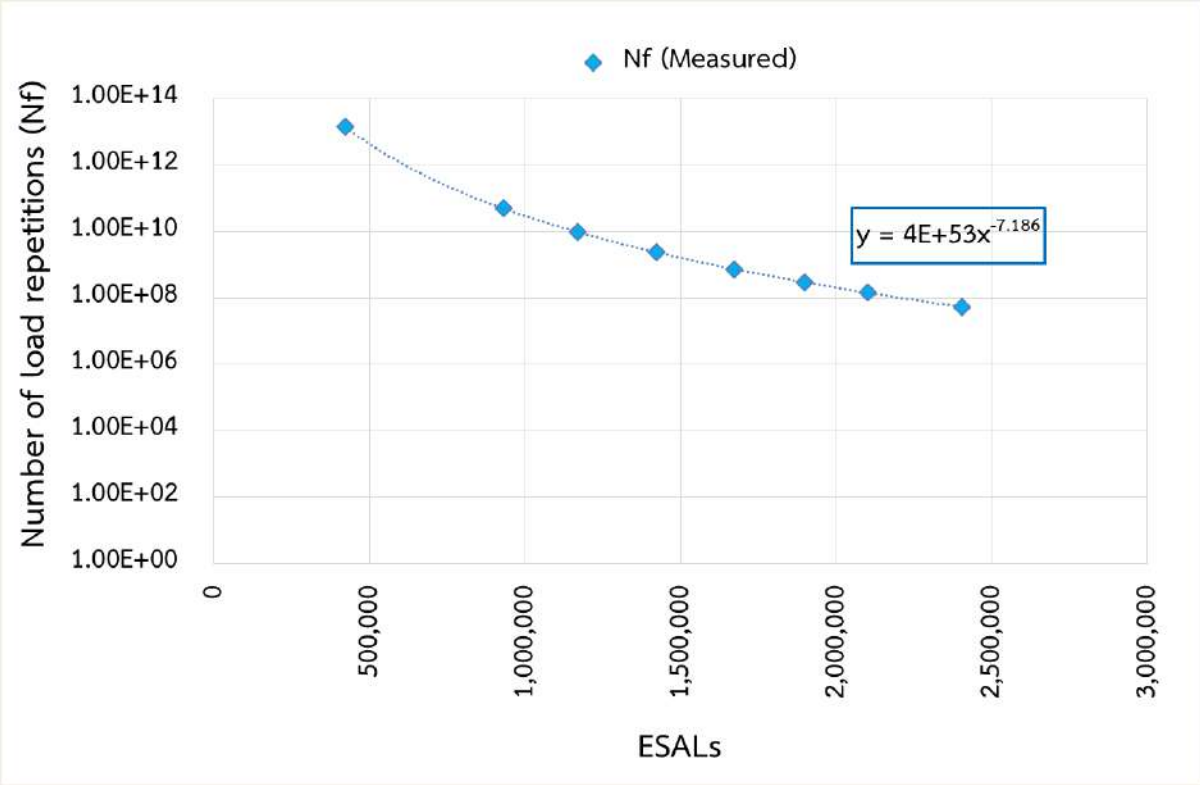
MOR คือ ค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) ของคอนกรีต (psi)

f_c' คือ Compressive Strength ของคอนกรีตที่ 28 วัน (32.5 MPa หรือ 4,713.73 psi)

การทำนายอายุบริการของถนนคอนกรีตสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าความเค้น (Stress) สูงสุดที่กระทำต่อแผ่นพื้นคอนกรีต โดยที่ปรึกษาทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นสูงสุดในแต่ละวัน (Daily Maximum Stress) ที่ใต้ชั้นผิวทางคอนกรีตเพื่อหาค่าเฉลี่ยของความเค้นสูงสุดรายเดือน (Monthly Average Maximum Stress) สำหรับวิเคราะห์อายุบริการของถนนคอนกรีตโดยใช้แบบจำลองความเสียหายอันเนื่องจากความล้า (Fatigue Failure Model) ดังแสดงใน รูปที่ 9.124 จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แบบจำลอง Roesler (1998) พบว่าจำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตชำรุดเสียหายเนื่องจากความล้า (N_f) ดังแสดงใน รูปที่ 9.125



รูปที่ 9.124 ค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) ใต้ผิวทางคอนกรีต อ. นครชัยศรี จ. นครปฐม

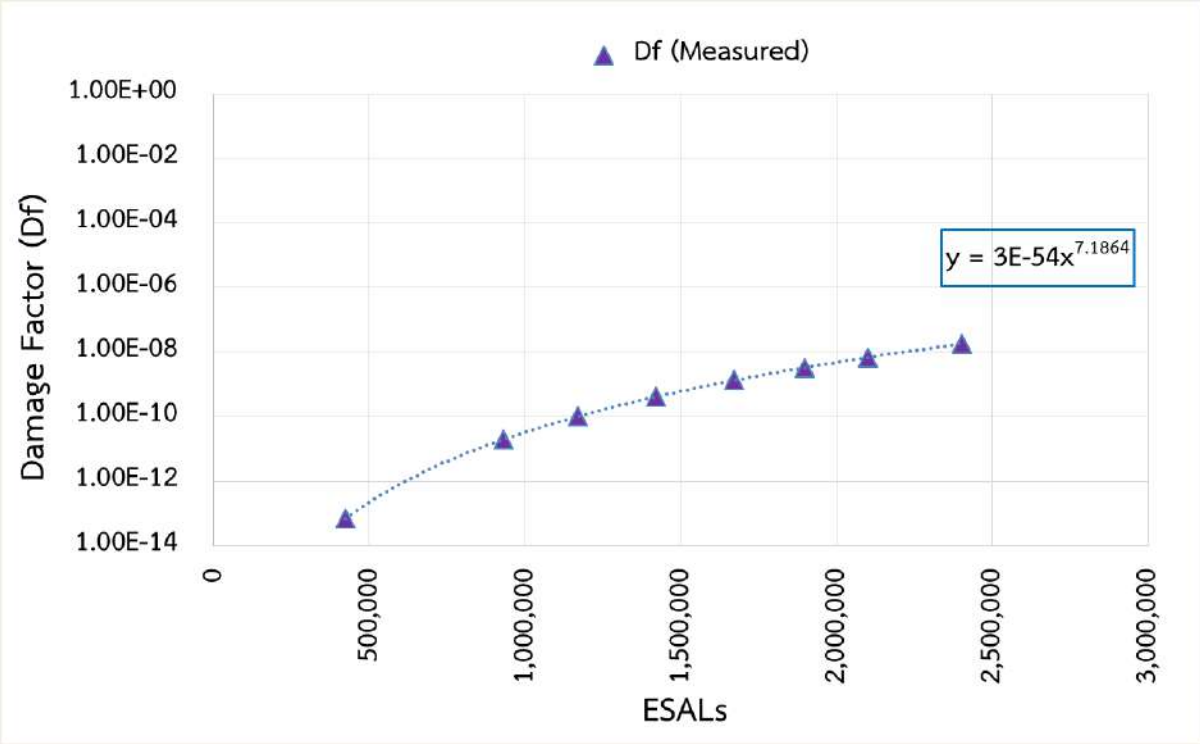


รูปที่ 9.125 จำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตชำรุดเสียหายเนื่องจากความล้า (Nf) อ. นครชัยศรี จ. นครปฐม

ค่า N_f สามารถนำไปหาค่าความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้า (D_f) ได้ดังสมการ

$$D_f = 1/N_f \quad (49)$$

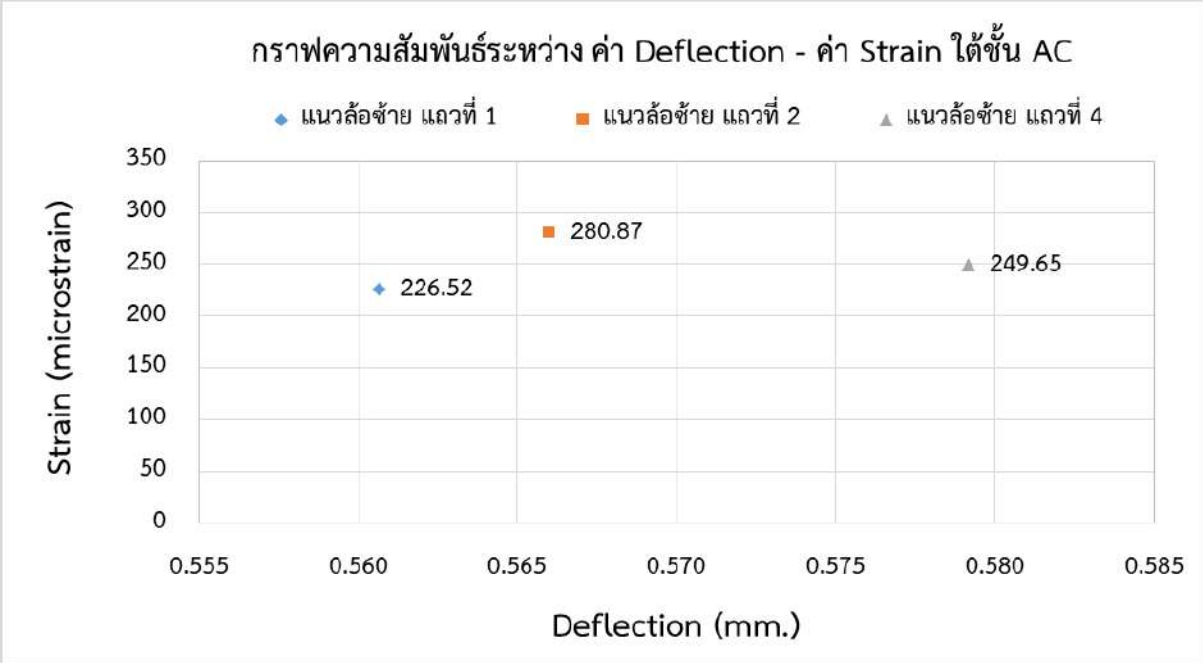
ความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้า (D_f) ในแต่ละเดือน จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ในแต่ละเดือนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถนนคอนกรีตจะหมดอายุบริการเนื่องจากความล้า (Fatigue Failure) เมื่อค่า $D_f = 1$ ดังแสดงในรูปที่ 9.126



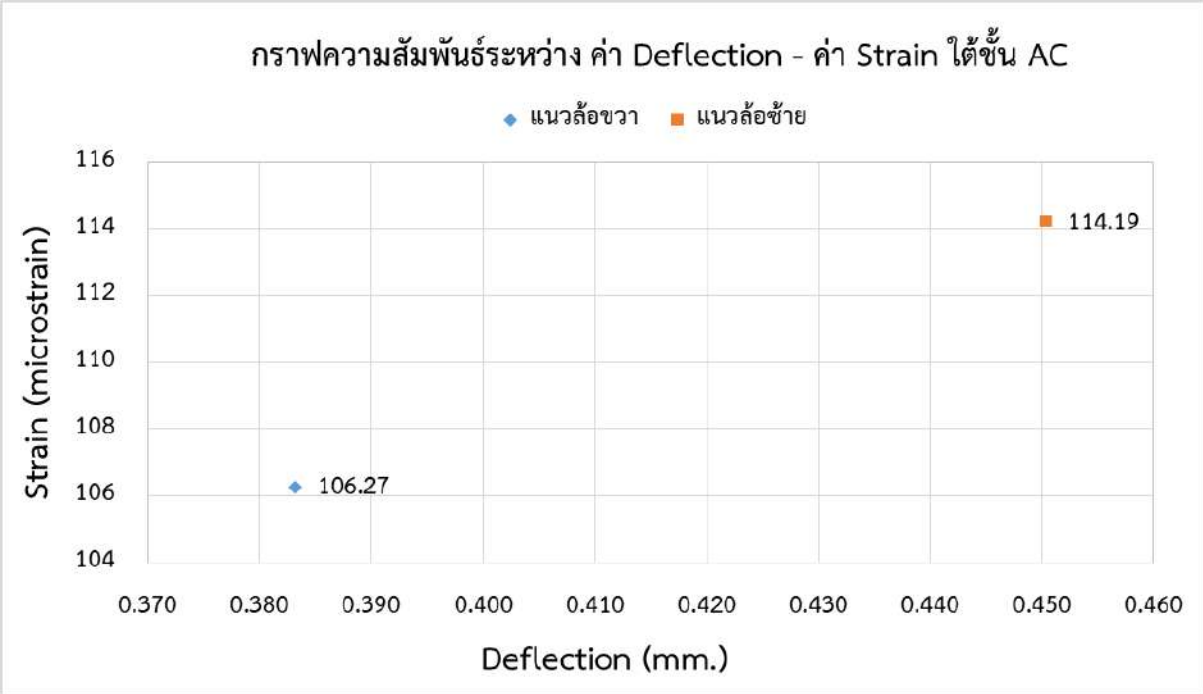
รูปที่ 9.126 ค่าความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้าของถนนคอนกรีตอ. นครชัยศรี จ. นครปฐม

9.3.8 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Simplified Model และ Mechanistic (Analytical) Model

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Simplified Model สำหรับงานปฏิบัติการ ที่ได้จากการตรวจวัดค่า Deflection จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ที่แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง และ Mechanistic (Analytical) Model สำหรับงานวิจัยวิชาการ ที่ได้จากการตรวจวัดค่าความเครียด (Strain) ในตำแหน่งและช่วงเวลาเดียวกับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ซึ่งสามารถสร้างกราฟความกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี ดังแสดงในรูปที่ 9.127 และที่ อ.สรรพยา จ.ชัยนาท ดังแสดงในรูปที่ 9.128

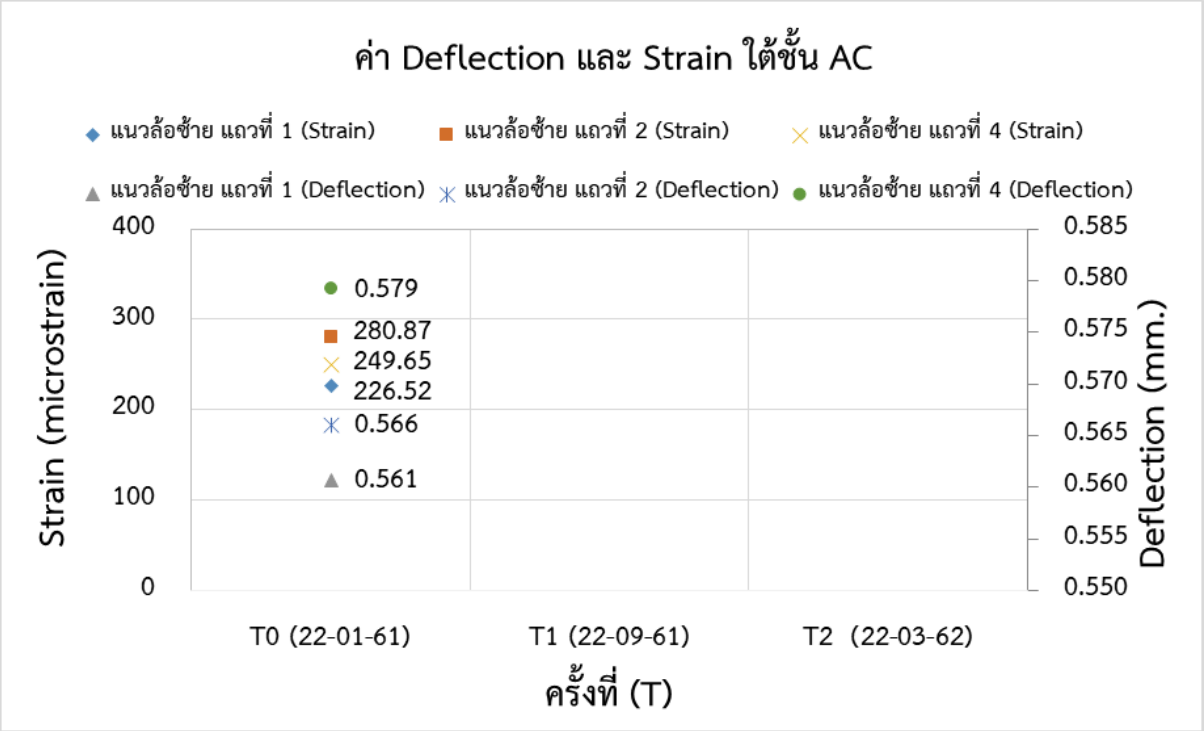


รูปที่ 9.127 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

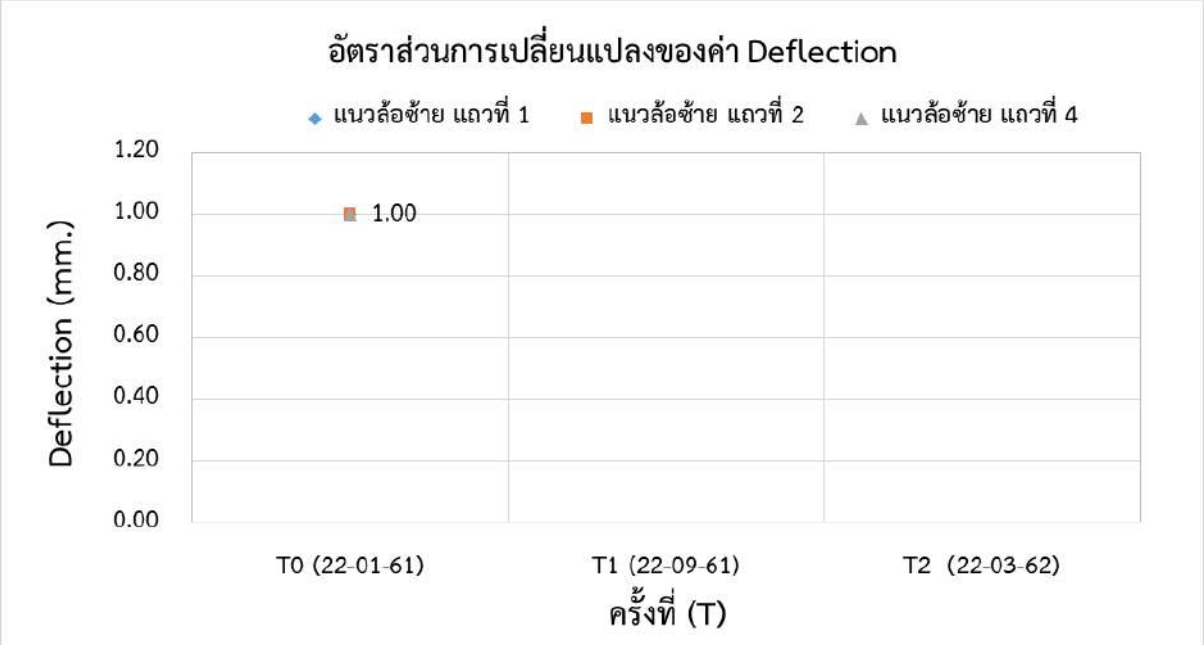


รูปที่ 9.128 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท

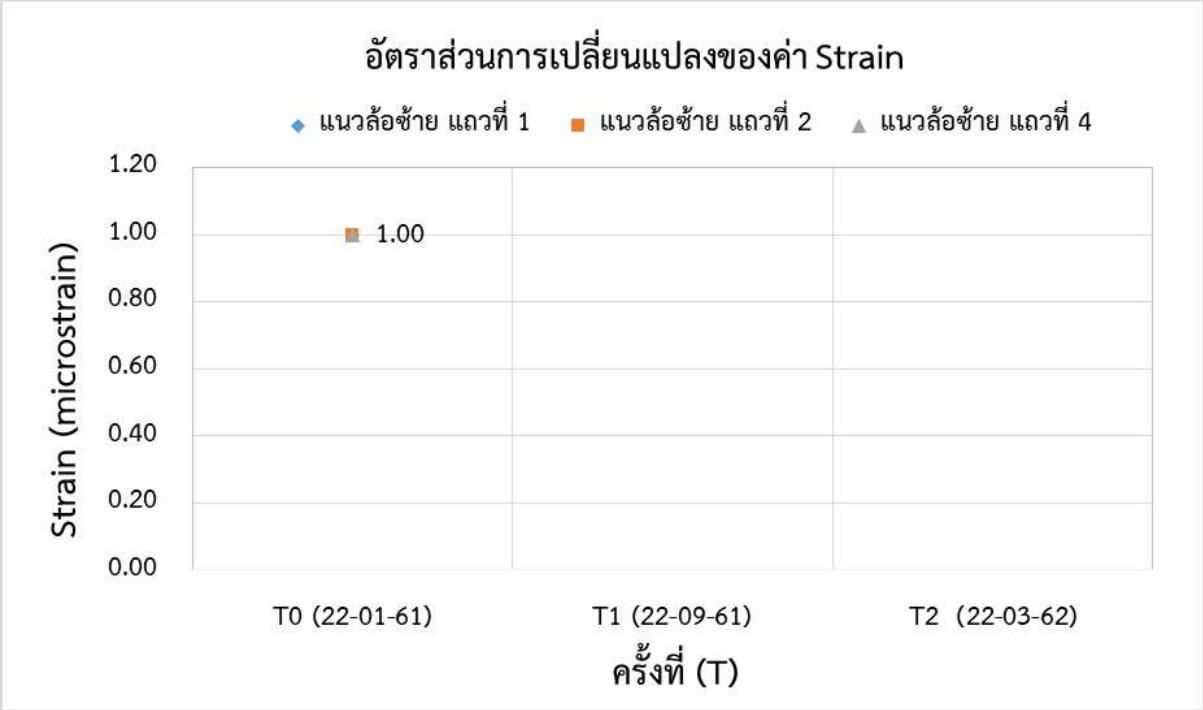
ทั้งนี้ที่ปรึกษาจะดำเนินการเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง ทั้งของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี และ อ.สรรพยา จ.ชัยนาท ทุกๆ 6 เดือน เพื่อให้เห็นแนวโน้มของสัดส่วนของ Deflection (FWD) และ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูป รูปที่ 9.129 ถึง รูปที่ 9.134



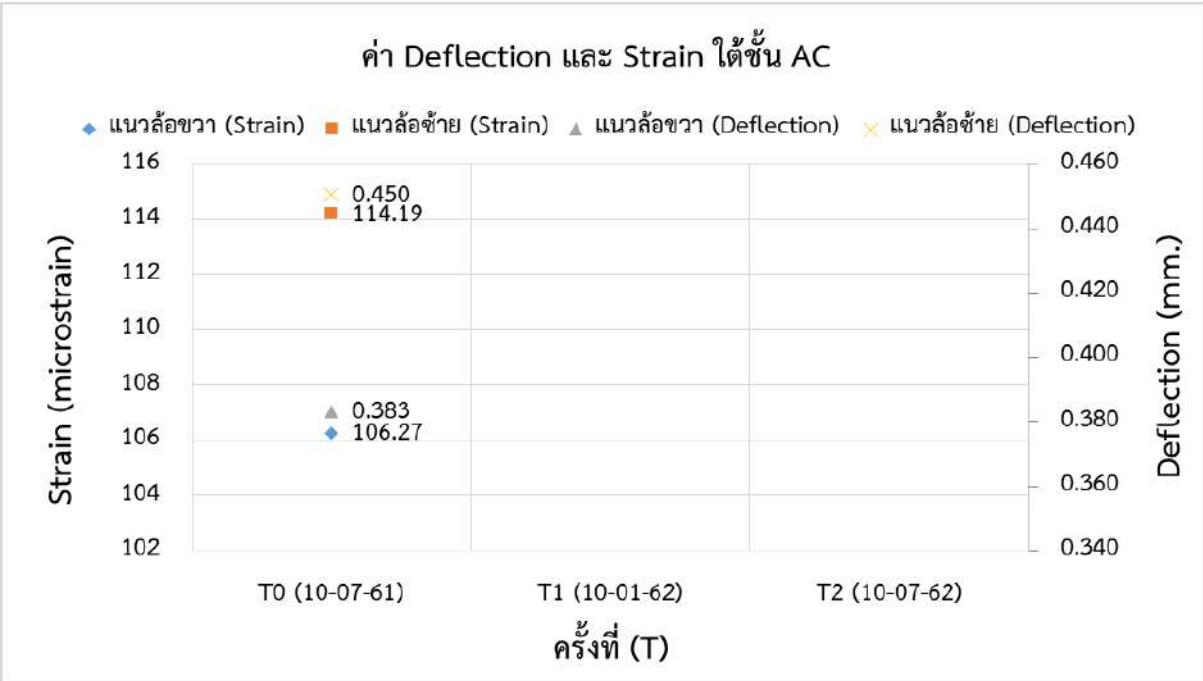
รูปที่ 9.129 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



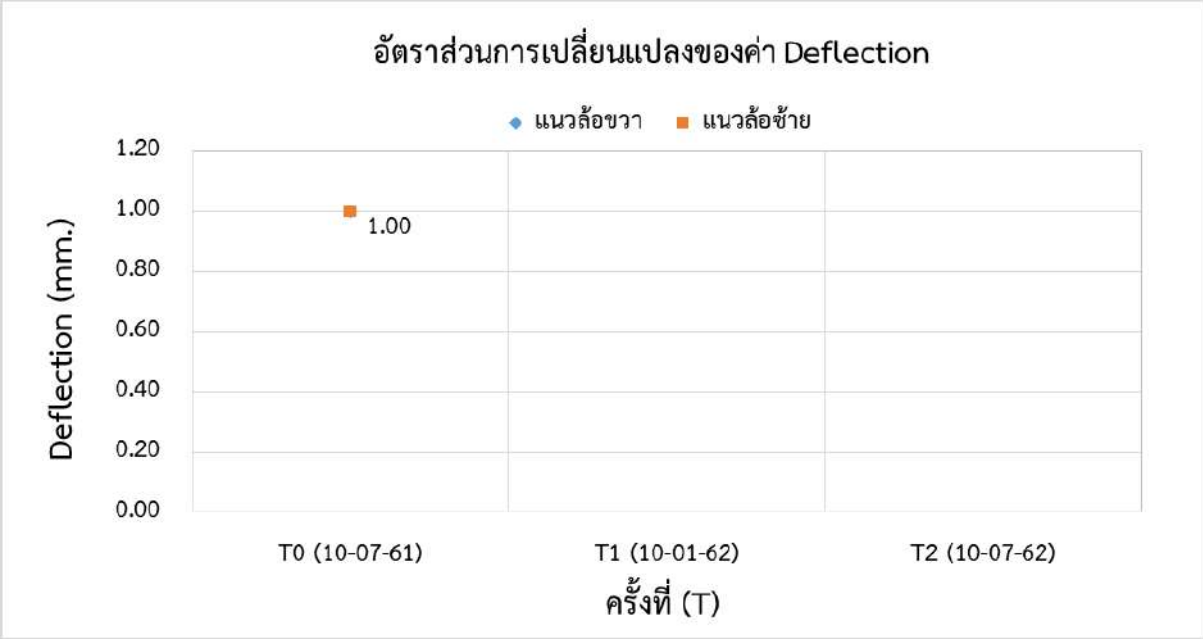
รูปที่ 9.130 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Deflection (FWD) ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



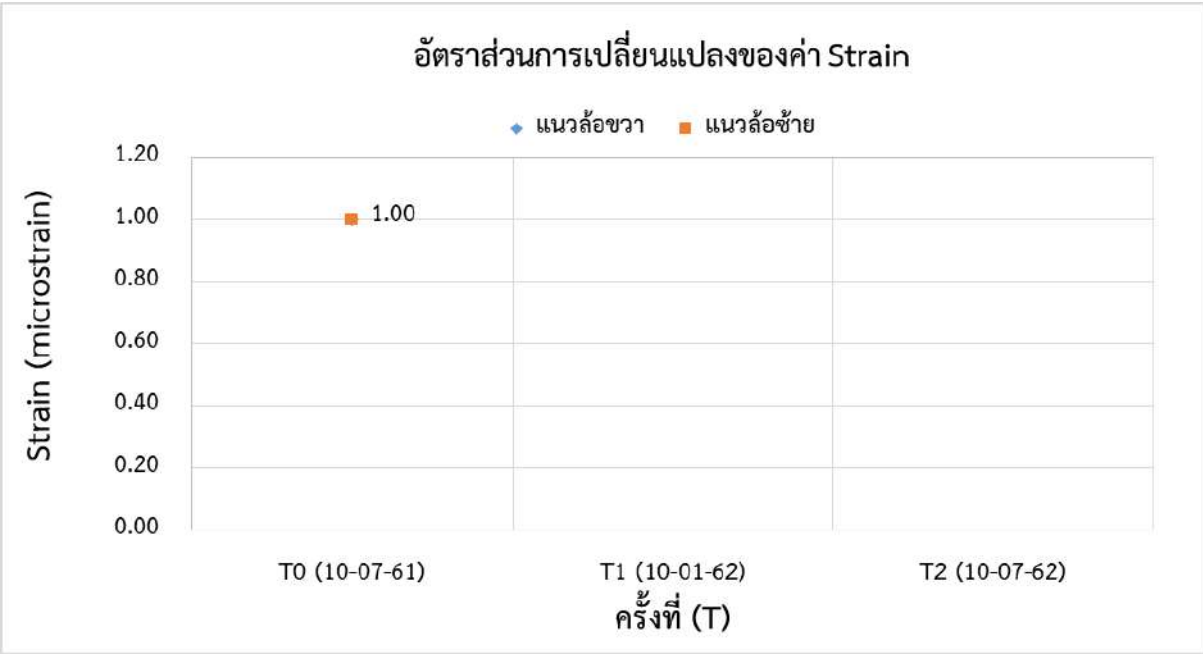
รูปที่ 9.131 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Strain ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



รูปที่ 9.132 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท



รูปที่ 9.133 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Deflection (FWD) ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท



รูปที่ 9.134 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Strain ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท

10. การจัดทำรายงานและถ่ายทอดความรู้

ที่ปรึกษาจะดำเนินการจัดทำคู่มือและรายงานการศึกษาโครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวง ดังต่อไปนี้

10.1 คู่มือการใช้งานและดูแลรักษาระบบ

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการจัดทำคู่มือการใช้งานและดูแลรักษาระบบ ดังแสดงในรูปที่ 10.1 ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

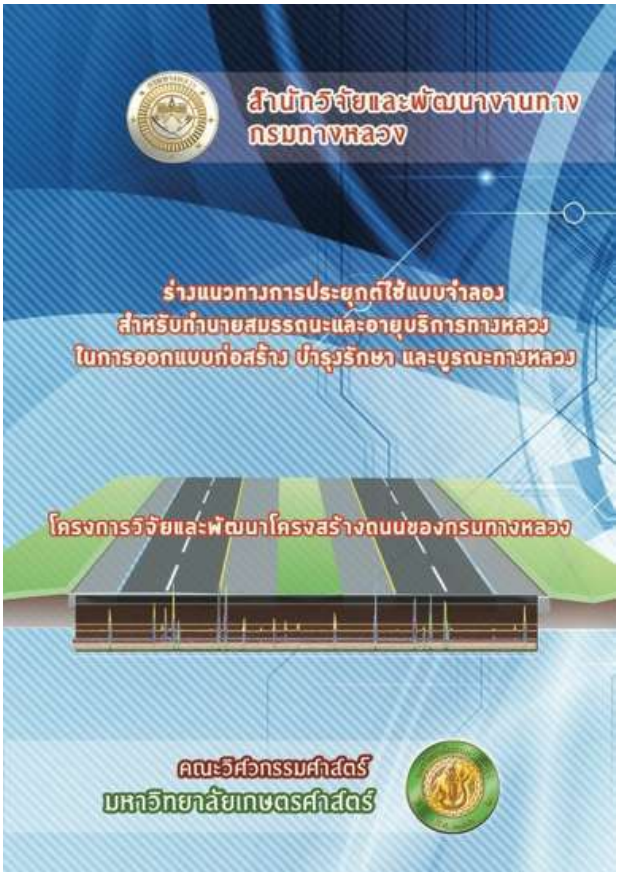
- ระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน
- ระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม



รูปที่ 10.1 คู่มือการใช้งานและดูแลรักษาระบบ

10.2 รายงานการศึกษาพัฒนาแบบจำลอง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการจัดทำรายงานการศึกษาพัฒนาแบบจำลองและแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 10.2 สำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงในการออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะทางหลวง



รูปที่ 10.2 รายงานการศึกษาพัฒนาแบบจำลองและแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

10.3 การฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้

ที่ปรึกษาจะดำเนินการฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้โดยมีแนวทางในการดำเนินงานดังต่อไปนี้

10.3.1 การจัดฝึกอบรม

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้ให้กับเจ้าหน้าที่ฝ่ายปฏิบัติการของกรมทางหลวง ในวันศุกร์ที่ 10 สิงหาคม 2561 ในหัวข้อดังต่อไปนี้

- การติดตั้ง การใช้งานและดูแลรักษาระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน
- การใช้งานและดูแลรักษาระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม
- แนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงในการออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะทางหลวง

โดยช่วงเช้า เวลา 9.30 น. - 12.00 น. ณ โรงแรมเจ้าพระยาธาราริเวอร์ไซต์ จังหวัดชัยนาท และ ช่วงบ่าย เวลา 13.00 น. - 16.00 น. ที่ปรึกษาได้ดำเนินการสาธิตการใช้งานและบำรุงรักษาระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนและระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม ณ แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง จังหวัดชัยนาท กิโลเมตรที่ 121+250 (ขาเข้า) ทางหลวงหมายเลข 32 ต.หาดอาษา อ.สรรพยา จ.ชัยนาท มีผู้เข้าร่วมอบรมจำนวนทั้งหมด 32 ท่าน แบ่งตามหน่วยงานที่สังกัด ดังแสดงในตารางที่ 10.1 และบรรยากาศการอบรมและสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์ฯแสดงในรูปที่ 10.3 ถึง รูปที่ 10.4

ตารางที่ 10.1 สรุปจำนวนผู้เข้าฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้

ลำดับที่	หน่วยงาน	จำนวน
1.	สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง	5
2.	สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ	2
3.	สำนักบริหารบำรุงทาง	1
4.	สำนักบริหารโครงการทางหลวงระหว่างประเทศ	1
5.	สำนักควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ	3
6.	แขวงทางหลวงสิงห์บุรี	1
7.	หมวดทางหลวงพรหมบุรี	1
8.	หมวดทางหลวงสิงห์บุรี	3
9.	หมวดทางหลวงอินทร์บุรี	1
10.	สำนักงานทางหลวงที่ 12 (สุพรรณบุรี)	3
11.	แขวงทางหลวงสุพรรณบุรีที่ 1	2
12.	หมวดทางหลวงเดินบางนางบวช	1
13.	แขวงทางหลวงสุพรรณบุรีที่ 2	1
14.	แขวงทางหลวงชัยนาท	4
15.	หมวดทางหลวงสรรพยา	1
16.	หมวดทางหลวงสรรคบุรี	1
17.	หมวดทางหลวงเนินขาม	1
	รวม	32



รูปที่ 10.3 การฝึกอบรมและถ่ายทอดความรู้



รูปที่ 10.4 การสาธิตการใช้งานและบำรุงรักษาระบบเครื่องมือตรวจวัดฯ

10.3.2 การจัดสัมมนา

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการจะดำเนินการจัดสัมมนาผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ของกรมทางหลวง วันจันทร์ที่ 27 สิงหาคม 2561 ณ โรงแรมรามาการ์เด้น กรุงเทพมหานคร ในหัวข้อดังต่อไปนี้

- การบรรยายเรื่อง งานติดตั้งระบบเครื่องมือและตรวจวัดพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนน โดย ผศ.ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี
- การบรรยายเรื่อง การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างทฤษฎีกับข้อเท็จจริงจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนน
- การบรรยายเรื่อง แบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะทางหลวง โดย ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว
- การบรรยายเรื่อง อัตราการทำลาย (Load Equivalency Factor, LEF) ของรถบรรทุกและการทำนายอายุบริการทางหลวง โดย รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ
- การเสวนา โดย ผศ.ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ ดร.อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์ และ รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล ในประเด็นดังนี้
  - สรุปภาพรวมผลผลิต (Output) ผลลัพธ์ (Outcome) และผลกระทบ (Impact) จากโครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวง
  - ถอดบทเรียนงานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและงานวางระบบแปลงตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างถนน เพื่อยกระดับการตรวจสอบและควบคุมน้ำหนักยานพาหนะบนทางหลวง
  - บทพิสูจน์ระหว่างทฤษฎีกับข้อเท็จจริงเกี่ยวกับการกระจายน้ำหนักในชั้นโครงสร้างถนน
  - แบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการถนนของกรมทางหลวง : เก็บบนหิ้งหรือขึ้นห้าง ?
  - “กฎยกกำลังสี่” ยังคงใช้หาอัตราการทำลายและเป็นเกณฑ์ในการควบคุมน้ำหนักรถบรรทุกของกรมทางหลวงในอนาคตได้หรือไม่ ?
  - ประเด็นข้อสังเกตและข้อควรพิจารณาจากการศึกษาแปลงตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างถนนในงานวิเคราะห์ออกแบบ ก่อสร้าง และวางแผนบำรุงรักษาทางหลวง

- แนวทางการประเมินสมรรถนะทางหลวงสายหลักทั่วประเทศ การติดตามตรวจสอบพฤติกรรมการเสื่อมสภาพถนนเนื่องจากปริมาณรถบรรทุกหนักและสภาพแวดล้อมในอนาคต

และในช่วงสุดท้ายของการสัมมนามีการเปิดรับฟังข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะ และตอบข้อซักถาม ดังแสดงในรูปที่ 10.5 โดยมีผู้สนใจเข้าร่วมการสัมมนาในครั้งนี้จำนวนทั้งหมด 71 ท่าน



รูปที่ 10.5 การจัดสัมมนาผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ของกรมทางหลวง

11. บทสรุป

โครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวงเป็นโครงการศึกษาวิจัยพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนนภายใต้สภาวะการแบกรับน้ำหนักและสภาวะแวดล้อมในประเทศไทย โดยการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดเหนือคันทางดินเดิม ใต้พื้นทาง และใต้ผิวทาง และระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามเพื่อติดตามตรวจวัดความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) อุณหภูมิ (Temperature) และปริมาณความชื้น (Moisture) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางอย่างต่อเนื่อง และพัฒนาแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง รวมถึงเป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ ประกอบการวิเคราะห์อำนาจการทำลายของรถบรรทุกประเทศไทย โครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวงในปี 2561 เป็นการดำเนินงานต่อเนื่องในระยะที่ 2 ดังแสดงตามรูปที่ 11.1



รูปที่ 11.1 ภาพรวมการดำเนินงานโครงการ

การดำเนินการในระยะที่ 2 ได้ดำเนินการติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางเพิ่มเติม 1 แห่ง บนทางหลวงหมายเลข 32 ก.ม. 121+250 ต.หาดอาษา อ.สรรพยา จ.ชัยนาท โดยอยู่หลังจากผ่านเครื่องชั่ง WIM ประมาณ 40 เมตร ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำข้อมูลน้ำหนักรถบรรทุกจากเครื่องชั่ง WIM มาใช้ประกอบการวิเคราะห์แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการทดสอบในสภาวะควบคุมโดยใช้รถบรรทุก 6 ล้อ (พิกัด 15 ตัน) และรถกึ่งพ่วง (พิกัด 50.5 ตัน) เพื่อตรวจวัดค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ในกรณีรถเปล่าและกรณีที่มีน้ำหนักบรรทุก 25%, 50% และ 100% ของพิกัดน้ำหนัก โดยมีการทดสอบ 3 ระดับความเร็วคือกรณีรถจอดหยุดนิ่งและกรณีรถวิ่งด้วยความเร็ว 20 กม./ชม. และ 60 กม./ชม. โดยแบ่งการทดสอบเป็นกรณีเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยว เพลาเดี่ยวล้อคู่ เพลาคู่ล้อคู่ และสามเพลาล้อคู่ วัตถุประสงค์ในการทดสอบในสภาวะควบคุมเพื่อ 1) ตรวจสอบความน่าเชื่อถือในการตรวจวัดโดยการเปรียบเทียบกับหลักทฤษฎี 2) ศึกษาผลกระทบของความเร็วรถต่อความเค้นและความเครียดในโครงสร้างชั้นทางและ 3) ศึกษาวิเคราะห์อำนาจการทำลายของรถบรรทุกประเทศไทย โดยที่ปรึกษาได้ดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบผลการทดสอบในสภาวะควบคุมกับผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎีดังต่อไปนี้

1) Boussinesq's Theory
2) Odemark's Method of Equivalent Thickness
3) Burmister's Multilayer (Three-Layer) System
4) Linear Elastic Analysis (LEA) Model
5) Finite Element Analysis (FEA)

เนื่องจากการดำเนินงานในระยะที่ 1 พบข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง FEA 2 มิติ ดังนั้นการดำเนินงานในระยะที่ 2 จึงได้ปรับเปลี่ยนมาใช้แบบจำลอง FEA 3 มิติเพื่อให้มีความละเอียดถูกต้องในการวิเคราะห์มากขึ้น นอกจากนั้นการดำเนินงานในระยะที่ 1 พบข้อจำกัดในการทดสอบกรณีล้อคู่ซึ่งค่าความเครียดบริเวณพื้นที่ใต้ล้อและพื้นที่ช่องว่างระหว่างล้ออาจแตกต่างกัน ดังนั้นการดำเนินงานในระยะที่ 2 จึงเพิ่มเติมกระบวนการทดสอบสอบให้มีความละเอียดมากขึ้นโดยที่ปรึกษาได้ทำการทดสอบทั้งในกรณีที่ล้อนอกและล้อในของล้อคู่ทับ Strain Gage พอดีและทดสอบในกรณีที่ Strain Gage อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อนอกและล้อในเพื่อศึกษาความแตกต่างของค่าความเครียดที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัดจากการทดสอบในสภาวะควบคุมกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีสามารถสรุปโดยย่อได้ดังต่อไปนี้

1) ค่าความเค้นที่คำนวณจากทุกทฤษฎีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนาม โดยค่าความเค้นมีค่าลดลงเมื่อระดับความลึกมากขึ้น
2) ค่าความเครียดที่คำนวณจากทุกทฤษฎีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ยกเว้นเพียงแต่ทฤษฎีของ Burmister ที่แสดงค่าความเครียดในชั้นพื้นทางสูงกว่าค่าความเครียดในชั้นผิวทาง โดยพบว่าค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้จาก Strain Gage ที่ติดตั้งใต้ชั้นผิวทางในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางจราจรมีความแปรปรวนค่อนข้างสูงเนื่องจากอิทธิพลของตำแหน่งล้อที่กดทับลงบน Strain Gage ดังอธิบายไว้ในข้อถัดไป อย่างไรก็ตามค่าความแปรปรวนมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความลึกมากขึ้น
3) ตำแหน่งล้อที่กดทับบน Strain Gage ที่ติดตั้งใต้ชั้นผิวทางในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางจราจรส่งผลอย่างมากต่อผลการตรวจวัดความเครียดใต้ชั้นผิวทาง โดยถ้าหาก Strain Gage อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อด้านในและล้อด้านนอก (กรณีล้อคู่) จะส่งผลให้เกิดความเครียดอัด (Compressive Strain) แต่ถ้าหาก Strain Gage อยู่ตำแหน่งใต้ล้อใดล้อหนึ่งจะส่งผลให้เกิดความเครียดดึง (Tensile Strain) ทั้งนี้ขนาดของ Strain Gage นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กทำให้โอกาสที่ล้อรถจะกดทับลงบนตำแหน่งเดิมทุกครั้งนั้นเป็นไปได้ยากมาก ส่งผลให้การตรวจวัดความเครียดใต้ผิวทางในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางจราจรมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง
4) ผลการตรวจวัดจาก Strain Gage ที่ติดตั้งใต้ผิวทางในทิศทางขนานกับทิศทางจราจรมีความแม่นยำในการตรวจวัดค่อนข้างสูง เนื่องจากค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้ทั้งในกรณีที่ Strain Gage อยู่ตำแหน่งใต้ล้อและกรณีที่ Strain Gage อยู่ในตำหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อด้านในและล้อ

ด้านนอก (กรณีล้อคู่) เป็นความเครียดดึง (Tensile Strain) ทั้งหมดทำให้ไม่เกิดความแปรปรวนอันเนื่องมากจากตำแหน่งการกดทับของล้อลงบน Strain Gage

5) ค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้จาก Strain Gage ที่ติดตั้งใต้ผิวทางในทิศทางขนานกับทิศทางจราจรมีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎี 2.5-3 เท่า สาเหตุส่วนหนึ่งอาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ที่ตรวจวัดได้จริงมีค่าต่ำกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการออกแบบถึงแม้ว่าในการก่อสร้างแปลงทดสอบจะผ่านมาตรฐานการทดสอบวัสดุและมาตรฐานการก่อสร้างของกรมทางหลวงทุกประการ นอกจากนั้นการวิเคราะห์ทางทฤษฎีนั้นมักใช้ทฤษฎีความเป็นอีลาสติกของวัสดุเป็นสมมติฐานหลัก อย่างไรก็ตามวัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างชั้นทางนั้นไม่ได้มีความเป็นอีลาสติกอย่างสมบูรณ์ ความเครียดในชั้นวัสดุ AC มีลักษณะหนืด (Viscous) และขึ้นกับเวลา (Time dependent) จึงอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของผลการตรวจวัดกับผลที่วิเคราะห์ได้จากทางทฤษฎีเช่นกัน

6) จากการตรวจวัดค่าความเค้นและความเครียดของรถบรรทุกคันเดียวกันที่มีน้ำหนักบรรทุกเท่ากันแต่มีความเร็วต่างกันพบว่าค่าความเค้นและความเครียดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเร็วของรถบรรทุกลดลง โดยรถที่มีความเร็ว 20 กม./ชม. ทำให้เกิดความเครียดสูงกว่ารถที่มีความเร็ว 60 กม./ชม. ประมาณ 1.5-2 เท่า ในขณะที่รถจอดหยุดนิ่งมีความเครียดสูงกว่ารถที่มีความเร็ว 60 กม./ชม. ประมาณ 2.5-3 เท่า

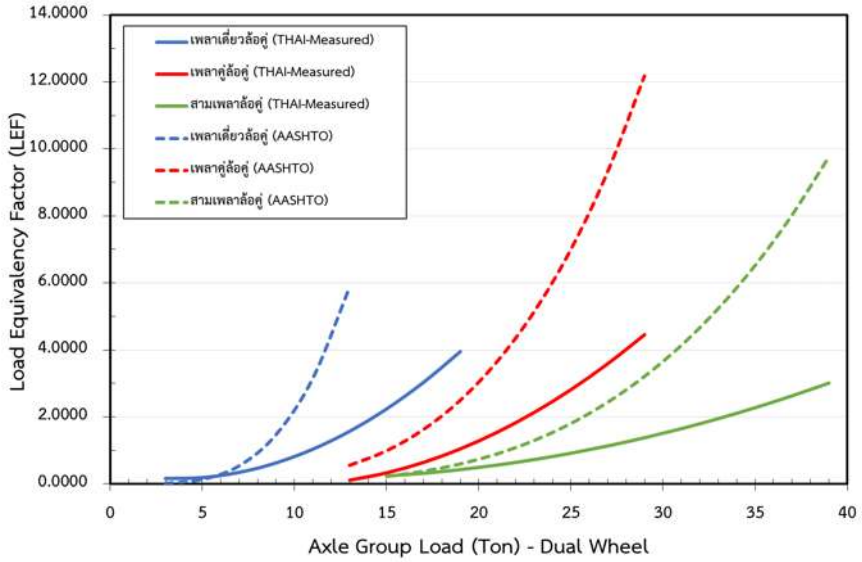
7) เมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นบนแปลงทดสอบอำเภอสรรพยา จังหวัดชัยนาท กับแปลงทดสอบอำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างทางใกล้เคียงกัน พบว่าทั้งสองแปลงทดสอบนั้นมีพฤติกรรมเหมือนกันไม่ว่าจะเป็นค่าความเค้น ความเครียด รวมไปถึงความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นโครงสร้างทางนั้นนับว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างมาก

ที่ปรึกษาใช้ผลการทดสอบในสภาวะควบคุมจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (สรรพยา) โดยการหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของค่าความเครียดใต้ชั้นผิวทางและบนชั้นคันทาง (Subgrade) เพื่อวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลาย (LEF) ของรถบรรทุกประเทศไทย ทั้งในกรณีเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยว เพลาเดี่ยวล้อคู่ เพลาคู่ล้อคู่ และสามเพลาล้อคู่ พร้อมดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) ของโครงการนี้กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) ซึ่งเสนอโดย AASHTO (1986) ที่น้ำหนักลงกลุ่มเพลาเดียวกัน

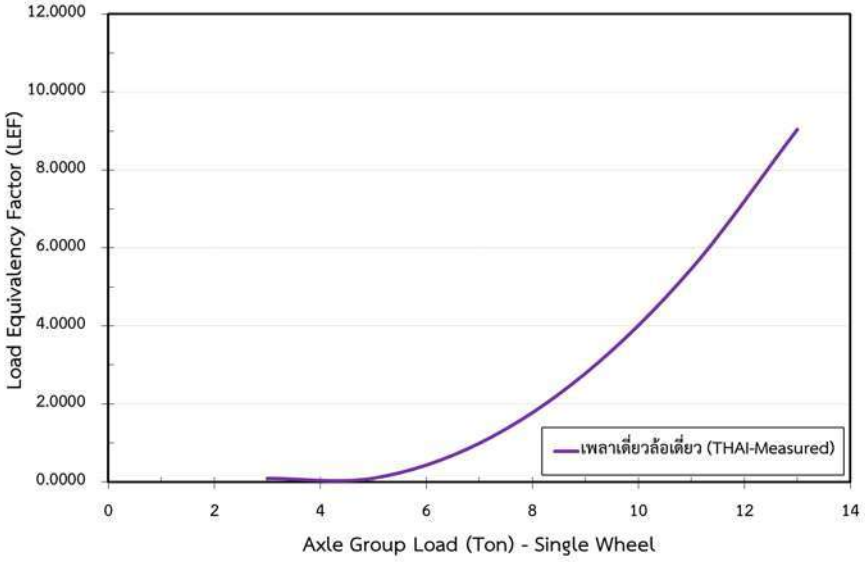
จากผลการศึกษาโครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวงข้อเสนอแนะเชิงนโยบายสำหรับกรมทางหลวงดังต่อไปนี้

ข้อเสนอแนะในการออกแบบโครงสร้างทางโดยใช้ค่า LEF ของรถบรรทุกประเทศไทยจากการตรวจวัด

กรมทางหลวงควรนำค่าอำนาจการทำลาย (LEF) เทียบกับน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานประเทศไทยตามที่สรุปในตารางที่ 9.8 และ ตารางที่ 9.9 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากข้อมูลผลการตรวจวัดของโครงการ มาใช้ในการออกแบบโครงสร้างถนนเพื่อให้สอดคล้องกับพิกัดน้ำหนักบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวง ค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัดของโครงการนี้ (Mechanistic Approach) กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) ซึ่งเสนอโดย AASHTO (1986) ที่น้ำหนักลงกลุ่มเพลาเดียวกันแสดงดังรูปที่ 11.2 และ รูปที่ 11.3



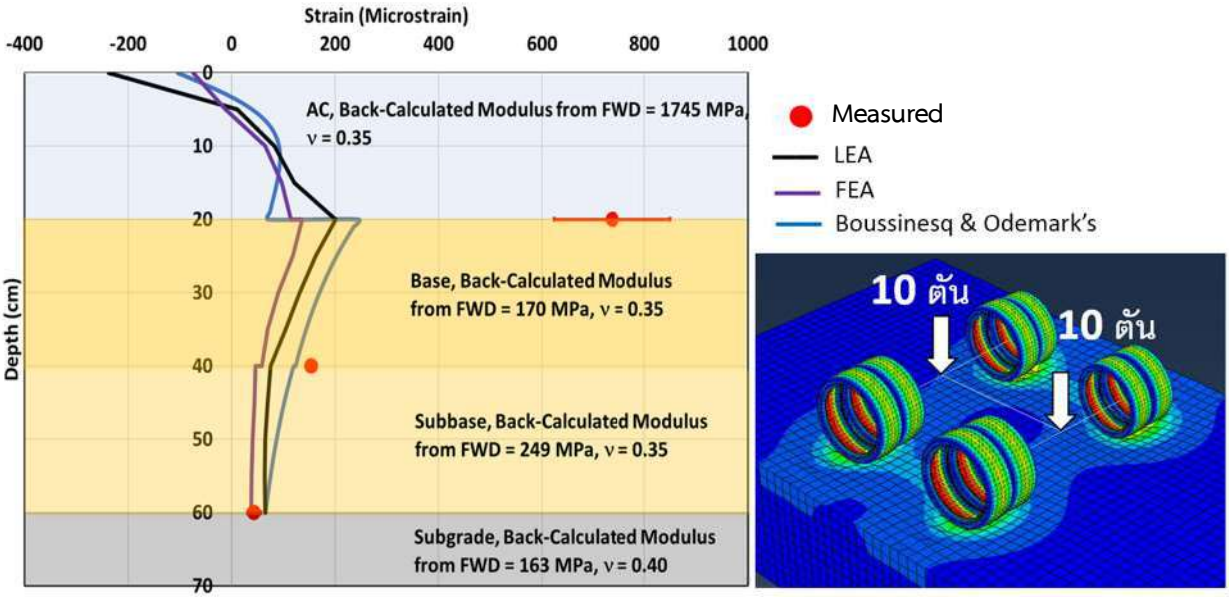
รูปที่ 11.2 อำนาจการทำลายของน้ำหนักลงกลุ่มเพลารถบรรทุกประเทศไทยกรณีล้อคู่



รูปที่ 11.3 อำนาจการทำลายของน้ำหนักลงกลุ่มเพลารถบรรทุกประเทศไทยกรณีล้อเดี่ยว

ข้อเสนอแนะในการควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้างโดยการตรวจสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

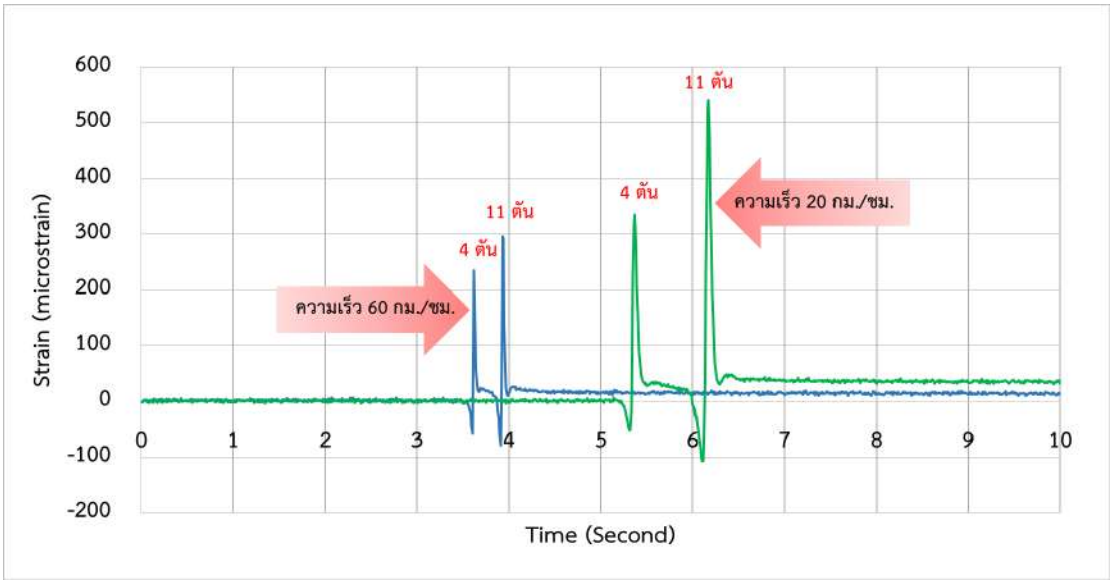
ค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้จาก Strain Gage ใต้ผิวทางทิศทางขนานกับทิศทางจราจรมีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎีประมาณ 2.5-3 เท่า (ดังรูปที่ 11.4) สาเหตุส่วนหนึ่งอาจเกิดจากในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะสมมติว่าวัสดุเป็นอีลาสติกแต่วัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างผิวทางนั้นมีพฤติกรรม Viscoelastic สาเหตุอีกส่วนหนึ่งอาจเป็นผลสืบเนื่องจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการออกแบบถึงแม้ว่าการก่อสร้างแปลงตรวจวัดเป็นไปตามมาตรฐานและข้อกำหนดของกรมทางหลวง ดังนั้นจึงเสนอให้มีการทดสอบค่าโมดูลัสในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพวัสดุระหว่างก่อสร้างและตรวจสอบความแข็งของโครงสร้างถนนโดยเครื่องมือ FWD ภายหลังการก่อสร้างเสร็จเพื่อให้โครงสร้างถนนมีสมรรถนะและอายุใช้งานตามข้อกำหนดการออกแบบ



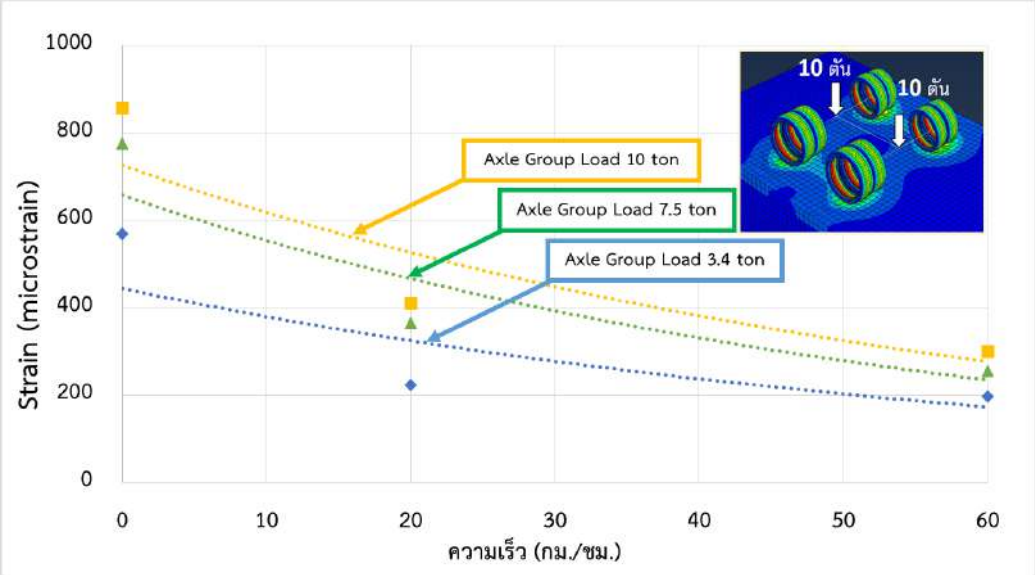
รูปที่ 11.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการคำนวณทางทฤษฎี

ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงโครงสร้างถนนช่วงที่มีการชะลอความเร็วให้มีความทนทานเป็นพิเศษ

จากการตรวจวัดค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเท่ากันแต่มีความเร็วต่างกัน พบว่าค่าความเค้นและความเครียดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเร็วของรถบรรทุกลดลง ดังรูปที่ 11.5 ถึง รูปที่ 11.7 รถบรรทุกขับที่ความเร็ว 20 กม./ชม. เกิดความเครียดสูงกว่ารถบรรทุกขับที่ความเร็ว 60 กม./ชม. ประมาณ 1.5-2 เท่า ในขณะที่รถบรรทุกที่จอดหยุดนิ่งมีความเครียดสูงสุด ดังนั้นช่วงที่มีรถบรรทุกหนักชะลอความเร็วหรือใช้ความเร็วต่ำ เช่น ช่วงทางแยก ทางลาดชัน บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนัก บริเวณด่านเก็บค่าธรรมเนียมผ่านทาง ทางหลวงมีแนวโน้มเสียหายเร็วขึ้นและมีอายุบริการสั้นลงกว่าช่วงทางปกติ



รูปที่ 11.5 ความเครียดใต้ผิวทางของรถบรรทุกหกล้อที่มีความเร็ว 20 กม./ชม. และ 60 กม./ชม.



รูปที่ 11.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถบรรทุกกับความเครียดใต้ผิวทาง



รูปที่ 11.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถบรรทุกกับอำนาจการทำลาย

ข้อเสนอแนะในการควบคุมน้ำหนักและการกำหนดค่าธรรมเนียมรถบรรทุกเกินพิกัด

กรมทางหลวงควรนำค่า LEF ของรถบรรทุกประเทศไทยที่ได้จากการข้อมูลผลการตรวจวัดของโครงการมาใช้ในการวิเคราะห์อำนาจการทำลายของรถบรรทุกเกินพิกัดดังตัวอย่างรูปที่ 11.8 ซึ่งวิเคราะห์จากค่า LEF เทียบกับน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานของประเทศไทย โดยกรมทางหลวงสามารถพิจารณาค่าธรรมเนียมการใช้ทางของรถบรรทุกต่างประเทศและการคิดค่าธรรมเนียมของรถบรรทุกเกินพิกัดน้ำหนักจากการเสื่อมอายุของถนนตัวอย่างดังรูปที่ 11.9 และรูปที่ 11.10

รูปที่ 11.9 เป็นการประมาณการค่าเสื่อมของทางหลวงเนื่องจากรถบรรทุกแต่ละประเภทภายใต้สมมติฐานงบประมาณที่ใช้ในการก่อสร้างทางหลวงเท่ากับ 20 ล้านบาทต่อกิโลเมตร และทางหลวงได้รับการออกแบบให้รองรับน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานประเทศไทยเท่ากับ 10 ล้าน ESALs ดังสมการที่ (50)

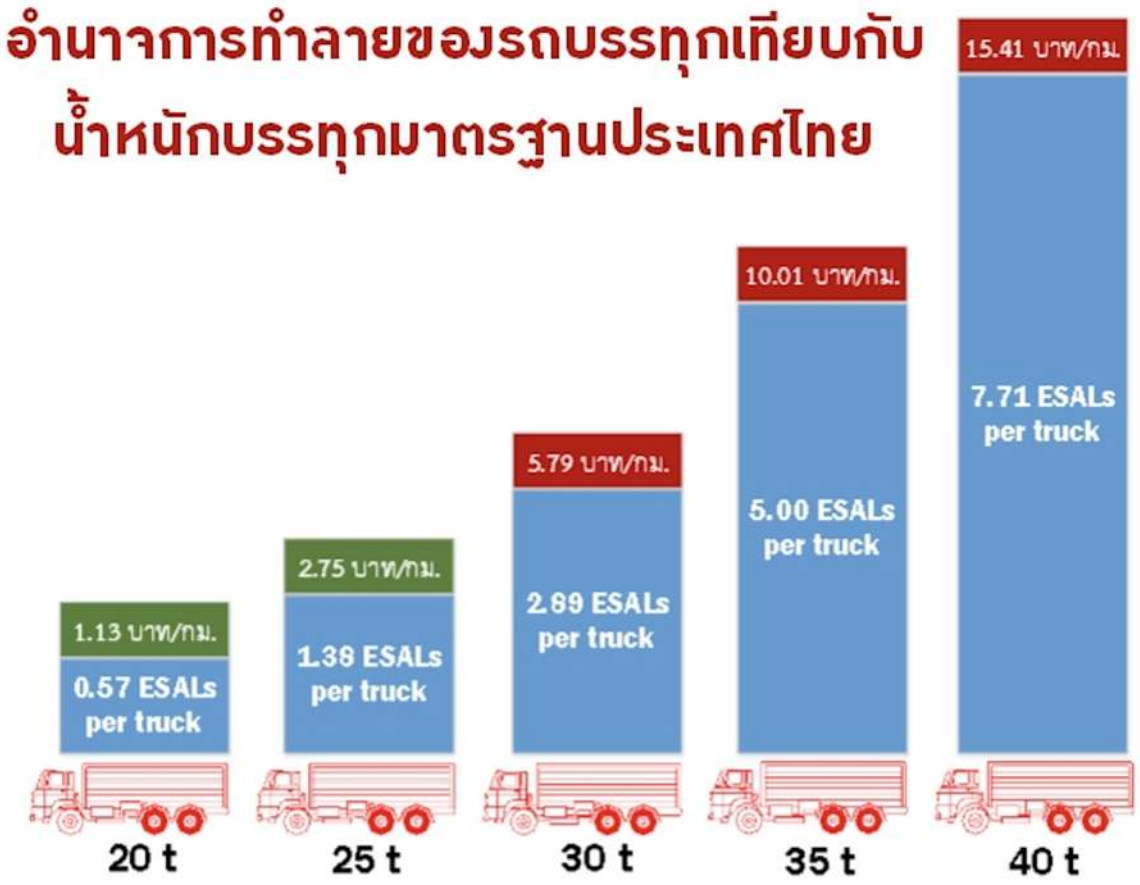
$$\text{ค่าเสื่อมของทางหลวงเนื่องจากรถบรรทุก} = \frac{\text{งบประมาณก่อสร้างทางหลวงต่อกิโลเมตร} \times \text{อำนาจการทำลาย}}{\text{ค่า ESALs ที่ใช้ในการออกแบบทางหลวง}} \quad ...(50)$$

ยกตัวอย่างเช่น รถบรรทุกสิบล้อพิกัดน้ำหนัก 25 ตัน มีอำนาจการทำลาย (LEF) เทียบกับน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานประเทศไทย ประมาณ 1.38 ESALs ดังนั้นในการวิ่งผ่าน 1 เที่ยว ทำให้ทางหลวงเสื่อมสภาพคิดเป็นค่าเสื่อม ประมาณ 2.76 บาทต่อกิโลเมตร (20 ล้านบาทต่อกิโลเมตร x 1.38 ESALs/10 ล้าน ESALs)

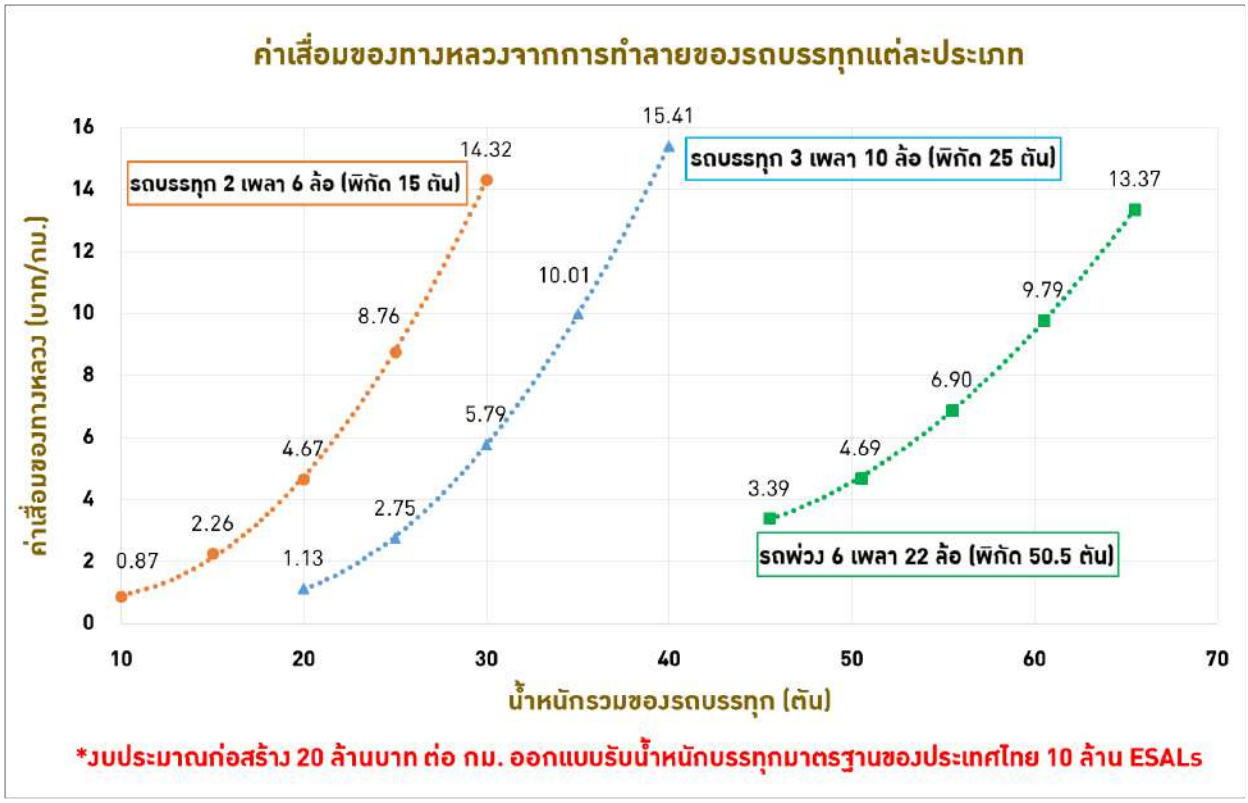
รูปที่ 11.10 เป็นการประมาณการค่าเสื่อมของทางหลวงต่อการขนส่งสินค้าน้ำหนัก 1 ตันโดยรถบรรทุกแต่ละประเภทดังสมการที่ (51) ภายใต้สมมติฐานรถบรรทุก 2 เพลาหกล้อมีน้ำหนักรถเปล่าเท่ากับ 5.4 ตัน รถบรรทุก 3 เพลาสิบล้อมีน้ำหนักรถเปล่าเท่ากับ 8.5 ตัน รถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อมีน้ำหนักรถเปล่าเท่ากับ 10 ตัน

$$\text{ค่าเสื่อมของทางหลวงต่อการขนส่งสินค้าน้ำหนัก 1 ตัน} = \frac{\text{ค่าเสื่อมของทางหลวงต่อกิโลเมตร}}{\text{น้ำหนักรถบรรทุกรวม} - \text{น้ำหนักรถเปล่า}} \quad ...(51)$$

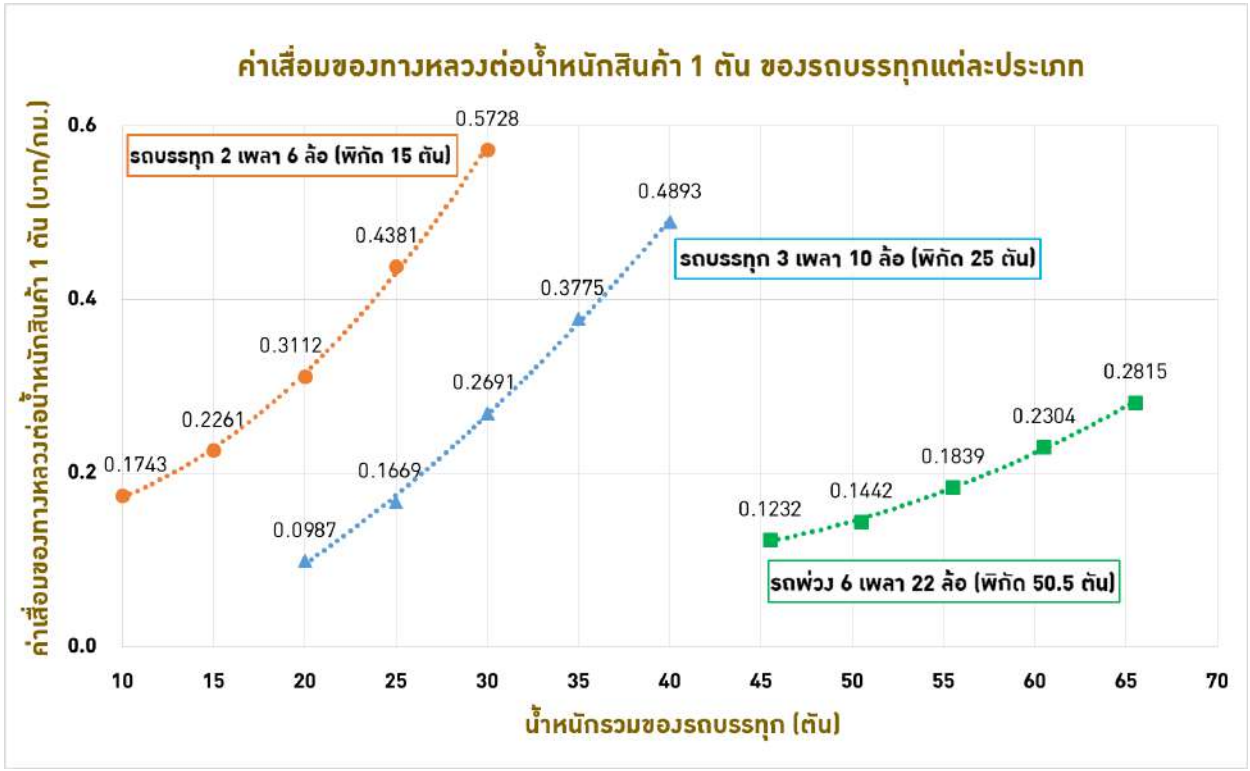
ยกตัวอย่างเช่น รถบรรทุกสิบล้อพิกัดน้ำหนัก 25 ตัน มีน้ำหนักรถเปล่า 8.5 ตัน ในการวิ่ง 1 เที่ยว ทำให้เกิดค่าเสื่อมของทางหลวงประมาณ 2.76 บาทต่อกิโลเมตร ดังนั้นในการวิ่งผ่าน 1 เที่ยว ทำให้ทางหลวงเสื่อมสภาพคิดเป็นค่าเสื่อมต่อการขนส่งสินค้าน้ำหนัก 1 ตัน ประมาณ 0.167 บาทต่อกิโลเมตร (2.76 บาทต่อกิโลเมตร/(25 ตัน – 8.5 ตัน)



รูปที่ 11.8 อำนาจการทำลายของรถบรรทุกสิบล้อเกินพิกัดน้ำหนัก



รูปที่ 11.9 ค่าเสื่อมของทางหลวงเนื่องจากรถบรรทุกแต่ละประเภทเกินพิกัดน้ำหนัก



รูปที่ 11.10 ค่าเสื่อมของทางหลวงต่อการขนส่งสินค้าน้ำหนัก 1 ตันโดยรถบรรทุกแต่ละประเภท

ข้อเสนอแนะด้านสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง

จากการติดตามตรวจวัดความเค้นและความเครียดของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะการใช้งานและสภาวะแวดล้อมของประเทศไทย

พบว่าแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางมีแนวโน้มจะเกิดรอยแตกร้าวจากความล้า (Fatique Crack) เมื่อจำนวนเพลามาตรฐานสะสม (ESAL) ประมาณ 1.5 ล้านเที่ยว (ค่า Damage Factor = 1.0) แสดงดังรูปที่ 11.11 ส่วนแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตมีแนวโน้มเริ่มเกิดรอยแตกร้าวจากความล้า (Fatique Crack) เมื่อจำนวนเพลามาตรฐานสะสมประมาณ 6 ล้านเที่ยว (ค่า Damage Factor = 1.0) แสดงดังรูปที่ 11.12 จากการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณพบความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวราบใต้ชั้นผิวทางลาดยางกับจำนวนเพลามาตรฐานสะสม อุณหภูมิของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต และปริมาณความชื้นของพื้นทางดังสมการที่ (52) แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการติดตามตรวจวัดข้อมูลในระยะยาวอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

$$\varepsilon_{ac} = 3.7358^{-05}ESAL + 220.6855M_{base} + 0.9925T_{ac} + 188.2023 \quad ...(52)$$

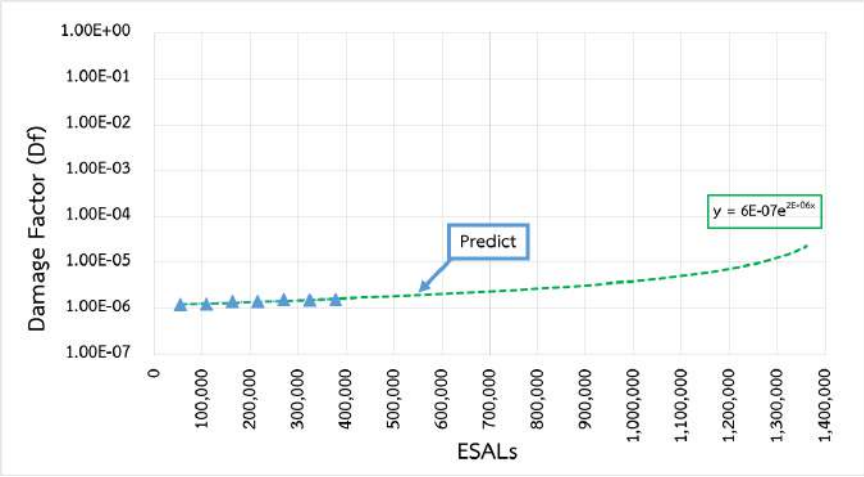
เมื่อ

ε_{ac} = ความเครียดแนวราบใต้ชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Microstrain)

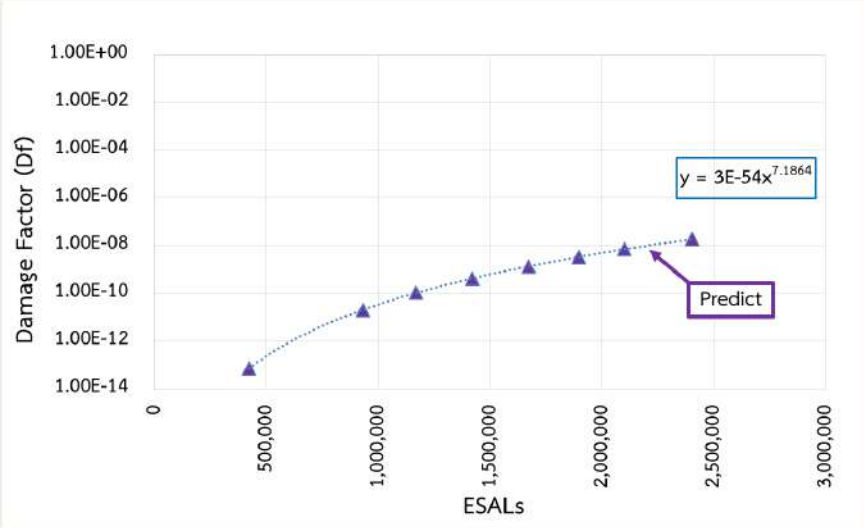
ESAL = จำนวนเพลามาตรฐานสะสม

M_{base} = ปริมาณความชื้นของพื้นทาง

T_{ac} = อุณหภูมิของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (°C)



รูปที่ 11.11 แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 11.12 แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

ข้อเสนอแนะในการเก็บข้อมูลในระยะยาว

การตรวจวัดติดตามพฤติกรรมของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางจำนวน 2 แปลงและถนนคอนกรีตจำนวน 1 แปลงของโครงการควรดำเนินควบคู่ไปกับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) โดยทดสอบ FWD บนแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีตทุก 3-6 เดือนเป็นอย่างน้อยเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 3 ปี เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัว (Deflection) จากการทดสอบด้วย FWD กับค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) จากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต เพื่อให้กรมทางหลวงสามารถใช้เครื่องมือ FWD ในการประเมินสมรรถนะความแข็งแรงของโครงข่ายทางหลวงทั่วประเทศแทนการก่อสร้างแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนทั่วประเทศ นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องมีการตรวจวัดการเสียรูป (Rutting) และความเสียหายของผิวทาง (Distress) ทุก 3-6 เดือนเป็นอย่างน้อย เพื่อใช้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างผลการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างถนนกับความเสียหายที่เกิดขึ้นในระยะยาว

12. ผลผลิต ผลลัพธ์ และผลกระทบของโครงการ

โครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวงมีผลผลิต (Output) ผลลัพธ์ (Outcome) และผลกระทบ (Impact) ที่เป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง (Stake Holders) ทั้งในส่วนของหน่วยงานในสังกัดของกรมทางหลวง และหน่วยงานภายนอกประกอบด้วยกรมทางหลวงชนบท กรมโยธาธิการและผังเมือง กรมการขนส่งทางบก สถาบันการศึกษา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย รวมถึงหน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้องด้านวิศวกรรมงานทางและการกำหนดนโยบายด้านคมนาคมขนส่ง โดยผลการศึกษาของโครงการสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาปรับปรุงการออกแบบโครงสร้างทาง การวิเคราะห์อำนาจการทำลายของรถบรรทุกประเทศไทย การวิเคราะห์ค่าเสื่อมของทางหลวงและโทษปรับของรถบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัด การวิเคราะห์ค่าธรรมเนียมการใช้ทางพิเศษและค่าธรรมเนียมการใช้ทางของรถบรรทุกจากต่างประเทศ การยกระดับการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างทาง และการทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงเพื่อใช้สนับสนุนการตัดสินใจในการวางแผนซ่อมบำรุงทางให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีรายละเอียดดังแสดงตามรูปที่ 12.1

ผลผลิตของโครงการ (Output)

โครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวงมีผลผลิต (Output) จากการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1) แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนของกรมทางหลวงจำนวน 3 แห่ง

ซึ่งประกอบด้วยแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตจำนวน 1 แห่งบนทางหลวงหมายเลข 4 (ขาเข้า) ก.ม. 41+940 ต.ท่าตำหนัก อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม และแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางจำนวน 2 แห่ง อยู่บนทางหลวงหมายเลข 4 ก.ม. (ขาเข้า) กม. 88+770 ต.ดอนทราย อ.โพธาราม จ.ราชบุรี และอยู่บนทางหลวงหมายเลข 32 (ขาเข้า) ก.ม. 121+250 ต.หาดอาษา อ.สรรพยา จ.ชัยนาท โดยแปลงตรวจวัดฯ แต่ละแห่งจะประกอบด้วย ระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม และระบบติดตามสมรรถนะทางหลวง เพื่อใช้ในการติดตามตรวจวัดค่าความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) อุณหภูมิ (Temperature) และปริมาณความชื้น (Moisture) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางโดยอัตโนมัติ

2) การทดสอบด้วยรถบรรทุกในสภาวะควบคุม

โดยการทดสอบด้วยรถบรรทุกจริงที่ทราบค่าน้ำหนักบรรทุกที่แน่นอนของเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยว เพลาเดี่ยวล้อคู่ เพลาคู่ล้อคู่ และสามเพลาล้อคู่ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์อำนาจการทำลายของรถบรรทุกประเทศไทยและศึกษาผลกระทบของความเร็วรถบรรทุกต่อความเค้นและความเครียดในโครงสร้างชั้นทาง

3) การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎี

โดยการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดจริงกับผลการวิเคราะห์โดยตามหลักทฤษฎีที่กรมทางหลวงใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างทางประกอบด้วย Boussinesq's Theory, Odemark's Method of Equivalent Thickness, Burmister's Multilayer (Three-Layer) System, Linear Elastic Analysis (LEA) Model และ 3D Finite Element Analysis (FEA)

4) การติดตามสมรรถนะของทางหลวงในระยะยาว

โดยการตรวจวัดค่าความเค้นและความเครียดในชั้นโครงสร้างทางด้วยความถี่ 100 Hz อย่างต่อเนื่องโดยอัตโนมัติ โดยจัดเก็บข้อมูลค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของผลการตรวจวัดในแต่ละวินาทีลงในฐานข้อมูล นอกจากนั้นยังทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิและปริมาณความชื้นในชั้นโครงสร้างทางทุก 30 นาที

ผลลัพธ์ของโครงการ (Outcome)

โครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวงมีผลลัพธ์ (Outcome) ที่เกิดจากการสังเคราะห์ข้อมูลผลผลิตดังต่อไปนี้

1) อำนาจการทำลาย (LEF) ของรถบรรทุกประเทศไทยจากผลการตรวจวัด

ปรึกษาได้ดำเนินการวิเคราะห์ค่าอำนาจการทำลาย (LEF) เทียบกับน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานประเทศไทย (เพลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยวเท่ากับ 7 ตัน เพลาเดี่ยว-ล้อคู่เท่ากับ 11 ตัน เพลาคู่-ล้อคู่เท่ากับ 20 ตัน และสามเพลา-ล้อคู่เท่ากับ มาตรฐาน 25.5 ตัน) จากผลการตรวจวัดค่าความเครียดในชั้นโครงสร้างทางในการทดสอบด้วยรถบรรทุกในสภาวะควบคุม

2) ผลกระทบของความเร็วรถบรรทุกต่ออำนาจการทำลายโครงสร้างถนน

จากผลการทดสอบด้วยรถบรรทุกในสภาวะควบคุมของเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยว เพลาเดี่ยวล้อคู่ เพลาคู่ล้อคู่ และสามเพลาล้อคู่ พบว่าค่าความเค้นและความเครียดในชั้นโครงสร้างทางมีแน้วโน้มสูงขึ้นเมื่อความเร็วของรถบรรทุกลดลง โดยมีค่าความเค้นและความเครียดสูงสุดเมื่อรถจอดหยุดนิ่ง ดังนั้นรถบรรทุกจะมีอำนาจการทำลายสูงในช่วงที่รถต้องชลอความเร็วหรือจอดหยุดนิ่ง

3) ผลการตรวจวัดความเครียดใต้ผิวทางสูงกว่าผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎี

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยรถบรรทุกในสภาวะควบคุมกับผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎีพบว่าค่าความเค้นและความเครียดจากผลการตรวจวัดจริงสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎี ยกเว้นเฉพาะค่าความเครียดใต้ผิวทางที่ตรวจวัดได้จริงจะมีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎีประมาณ 2.5 เท่า สาเหตุส่วนหนึ่งเนื่องจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีมักสมมติว่าวัสดุเป็นอีลาสติกแต่วัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างผิวทางนั้นมีลักษณะหนืด นอกจากนั้นผลการทดสอบค่าโมดูลัสจริงยังต่ำกว่าค่าโมดูลัสที่ใช้ในการออกแบบ

4) แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง

ที่ปรึกษาใช้ค่าความเครียดใต้ชั้นผิวทางจากการตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์ค่า Number of Load Repetition to Fatigue Failure (Nf) และความเครียดบนชั้นคันทางดินเดิมเพื่อวิเคราะห์ Number of Load Repetition to Rutting Failure (Nr) รวมถึงการวิเคราะห์ Damage Factor ของถนนลาดยางในระยะยาวอย่างต่อเนื่องเพื่อพัฒนาแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการของถนนลาดยาง ในส่วนของของถนนคอนกรีตที่ปรึกษาใช้ค่าความเค้นใต้ชั้นผิวทางในการวิเคราะห์ค่า Number of Load Repetition to Fatigue Failure (Nf) และ Damage Factor ในการทำนายสมรรถนะและอายุบริการของถนนคอนกรีต

ผลกระทบของโครงการ (Impact)

โครงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของกรมทางหลวงมีผลกระทบ (Impact) ที่หน่วยงานสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างถนน การวิเคราะห์ค่าเสื่อมและค่าธรรมเนียมการใช้ทาง และการกำหนดนโยบายด้านคมนาคมขนส่งทางถนนดังต่อไปนี้

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ

- นำค่าอำนาจการทำลาย (LEF) ของรถบรรทุกประเทศไทยไปใช้ปรับปรุงค่า Truck Factor ในการออกแบบโครงสร้างทางและนำผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นไปใช้ปรับปรุงแนวทางการออกแบบโครงสร้างทาง
- ปรับปรุงค่าโมดูลัสที่ใช้ในการออกแบบให้สอดคล้องตามคุณภาพวัสดุในปัจจุบัน

สำนักงานควบคุมน้ำหนักและยานพาหนะ

- นำค่าอำนาจการทำลาย (LEF) ของรถบรรทุกประเทศไทยไปใช้ในการวิเคราะห์โทษปรับของรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกินพิกัด
- ปรับปรุงโครงสร้างถนนช่วงทางเข้าสถานีตรวจสอบน้ำหนักให้มีความแข็งแรงทนทานเป็นพิเศษ

สำนักแผนงาน

- วิเคราะห์ค่าเสื่อมของทางหลวงเพื่อประเมินค่าธรรมเนียมการใช้ทางหลวงพิเศษและค่าใช้ทางของรถบรรทุกจากต่างประเทศ

กองทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง

- วิเคราะห์ค่าเสื่อมของทางหลวงเพื่อประเมินค่าธรรมเนียมการใช้ทางหลวงพิเศษ
- ปรับปรุงโครงสร้างถนนช่วงหน้าด่านเก็บค่าธรรมเนียมให้มีความแข็งแรงทนทานเป็นพิเศษ

สำนักสำรวจและออกแบบ

- ออกแบบโครงสร้างถนนช่วงที่รถบรรทุกชะลอความเร็วให้มีความแข็งแรงทนทานเป็นพิเศษ

สำนักบริหารบำรุงทาง

- ปรับปรุงโครงสร้างถนนช่วงที่รถบรรทุกชะลอความเร็ว เช่น ช่วงทางแยก ทางลาดชัน ให้มีความแข็งแรงทนทานเป็นพิเศษ
- นำแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงไปใช้ในการพัฒนาปรับปรุงงานบำรุงทาง

สำนักมาตรฐานและประเมินผล

- เพิ่มรายการทดสอบค่าโมดูลัสเพื่อควบคุมคุณภาพระหว่างการก่อสร้างทางหลวงและเมื่องานก่อสร้างแล้วเสร็จ

สำนักก่อสร้างทางที่ 1 และ 2

- ดำเนินการทดสอบค่าโมดูลัสเพื่อควบคุมคุณภาพระหว่างการก่อสร้างทางหลวง

สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง

- ศึกษาวิจัยเพื่อทบทวนค่าโมดูลัสที่ใช้ในการออกแบบให้สอดคล้องตามคุณภาพวัสดุในปัจจุบัน
- ดำเนินการทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) บนแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนอย่างต่อเนื่องเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัว (Deflection) จาก FWD กับสมรรถนะของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนน ทั้งนี้เพื่อให้กรมทางหลวงสามารถใช้การทดสอบ FWD เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบสมรรถนะทางหลวงทั่วประเทศ

<u>กรมทางหลวงชนบท</u>

- นำค่าอำนาจการทำลาย (LEF) ไปใช้ปรับปรุงค่า Truck Factor รวมทั้งผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นไปใช้ปรับแนวทางในการออกแบบโครงสร้างทางหลวงชนบท
- ศึกษาทบทวนค่าโมดูลัสที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางหลวงชนบท
- นำค่าอำนาจการทำลาย (LEF) ของรถบรรทุกประเทศไทยไปใช้ในการวิเคราะห์โทษปรับของรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกินพิกัดบนทางหลวงชนบท

<u>กรมโยธาธิการและผังเมือง</u>

- นำผลการศึกษาไปใช้ปรับปรุงการออกแบบโครงสร้างถนนท้องถิ่น

<u>กรมการขนส่งทางบก</u>

- นำผลการศึกษาไปใช้ในการกำหนดนโยบายความร่วมมือและอัตราค่าธรรมเนียมในการขนส่งทางถนนระหว่างประเทศ

<u>สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร</u>

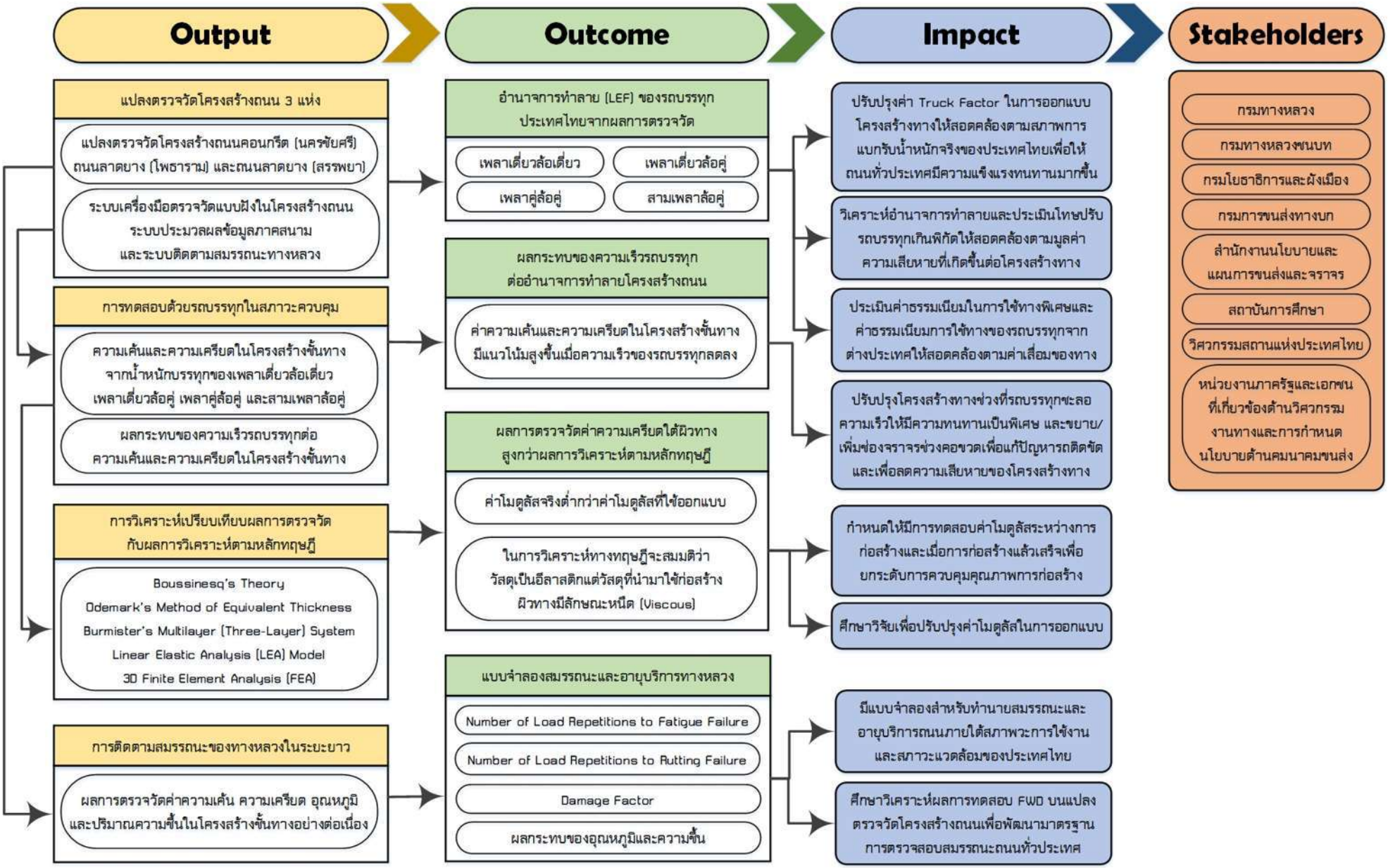
- นำผลการศึกษาไปใช้ในการกำหนดนโยบายการลงทุนด้านการคมนาคมขนส่งทางถนนและการกำหนดกรอบค่าธรรมเนียมการใช้ทางของประเทศไทย

<u>สถาบันการศึกษา</u>

- นำผลการศึกษาไปใช้ในการศึกษาวิจัยต่อยอดเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมงานทางของประเทศไทย

<u>วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย</u>

- นำผลการศึกษาไปใช้ในการกำหนดมาตรฐานและการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างถนน



รูปที่ 12.1 สรุปผลผลิต (Output) ผลลัพธ์ (Outcome) และผลกระทบ (Impact) ของโครงการ