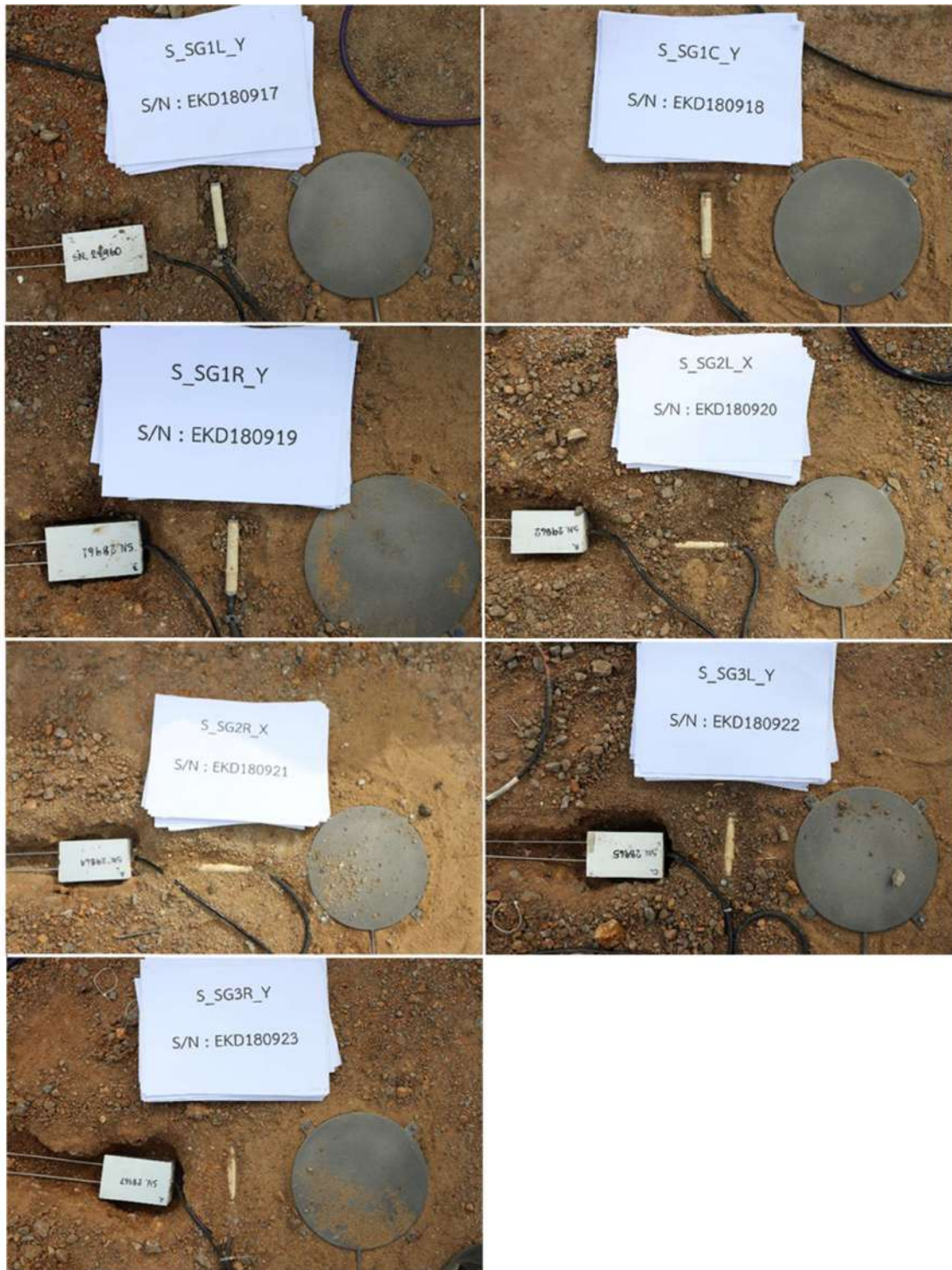




รูปที่ 5.129 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับชั้น Subgrade



รูปที่ 5.130 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับชั้น Subgrade



รูปที่ 5.131 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในระดับชั้น Subgrade



รูปที่ 5.132 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 22 ตัว ในระดับชั้น Subgrade ลงท่อ PE

5.8.6 การฝังกลบและบดอัดชั้น Subbase จนถึงระดับใต้ชั้น Base

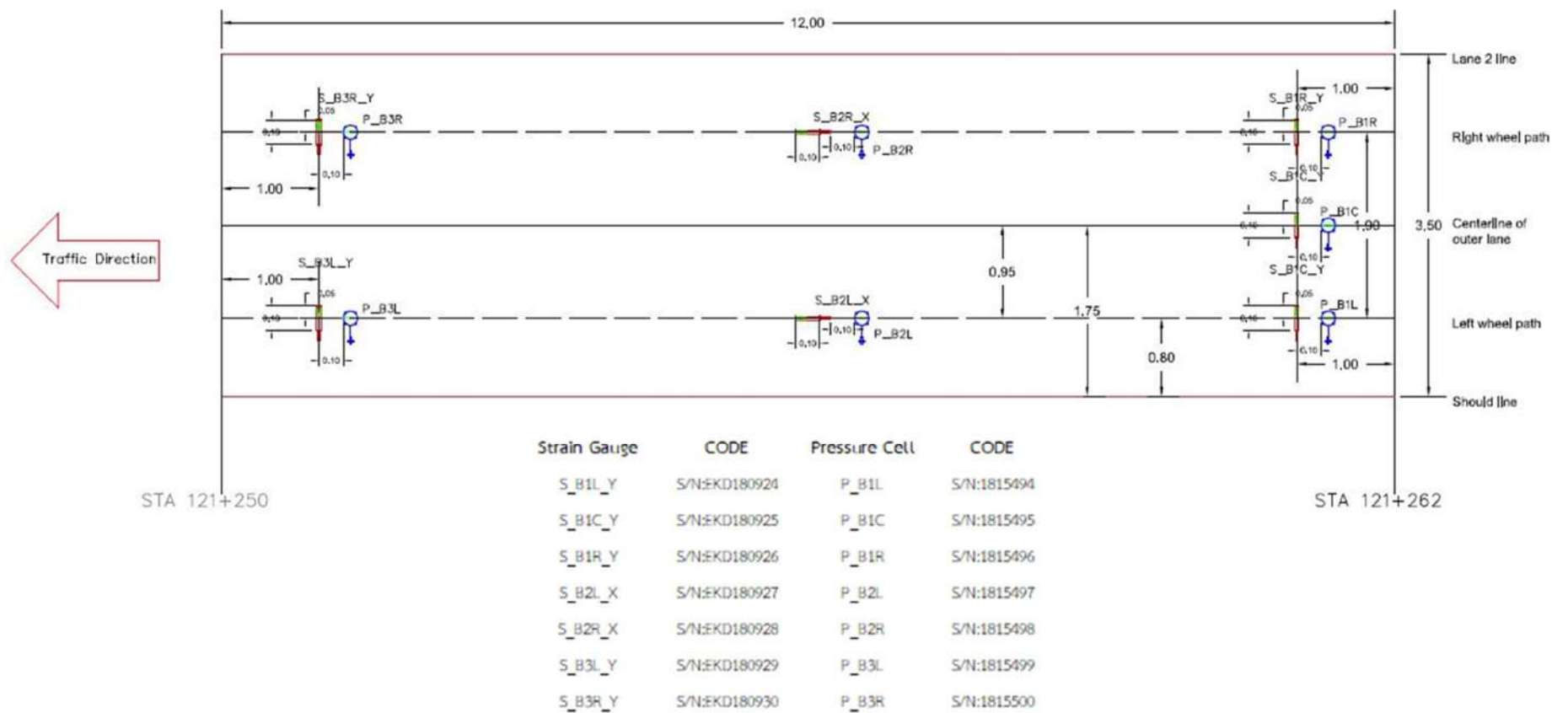
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการฝังกลบชั้น Subbase ความหนา 20 ซม. จนถึงระดับใต้ชั้น Base พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบสันสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 5.133



รูปที่ 5.133 การฝังกลบและบดอัดชั้น Subbase จนถึงระดับใต้ชั้น Base

5.8.7 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณในระดับใต้ชั้น Base

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับใต้ชั้น Base จำนวน 14 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.134 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 7 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.135 และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 7 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.136 นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 5.137 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 5.134 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับใต้ชั้น Base



รูปที่ 5.135 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับใต้ชั้น Base



รูปที่ 5.136 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับใต้ชั้น Base



รูปที่ 5.137 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับใต้ชั้น Base ลงท่อ PE

5.8.8 การฝังกลบและบดอัดชั้น Base จนถึงระดับกึ่งกลางชั้น Base

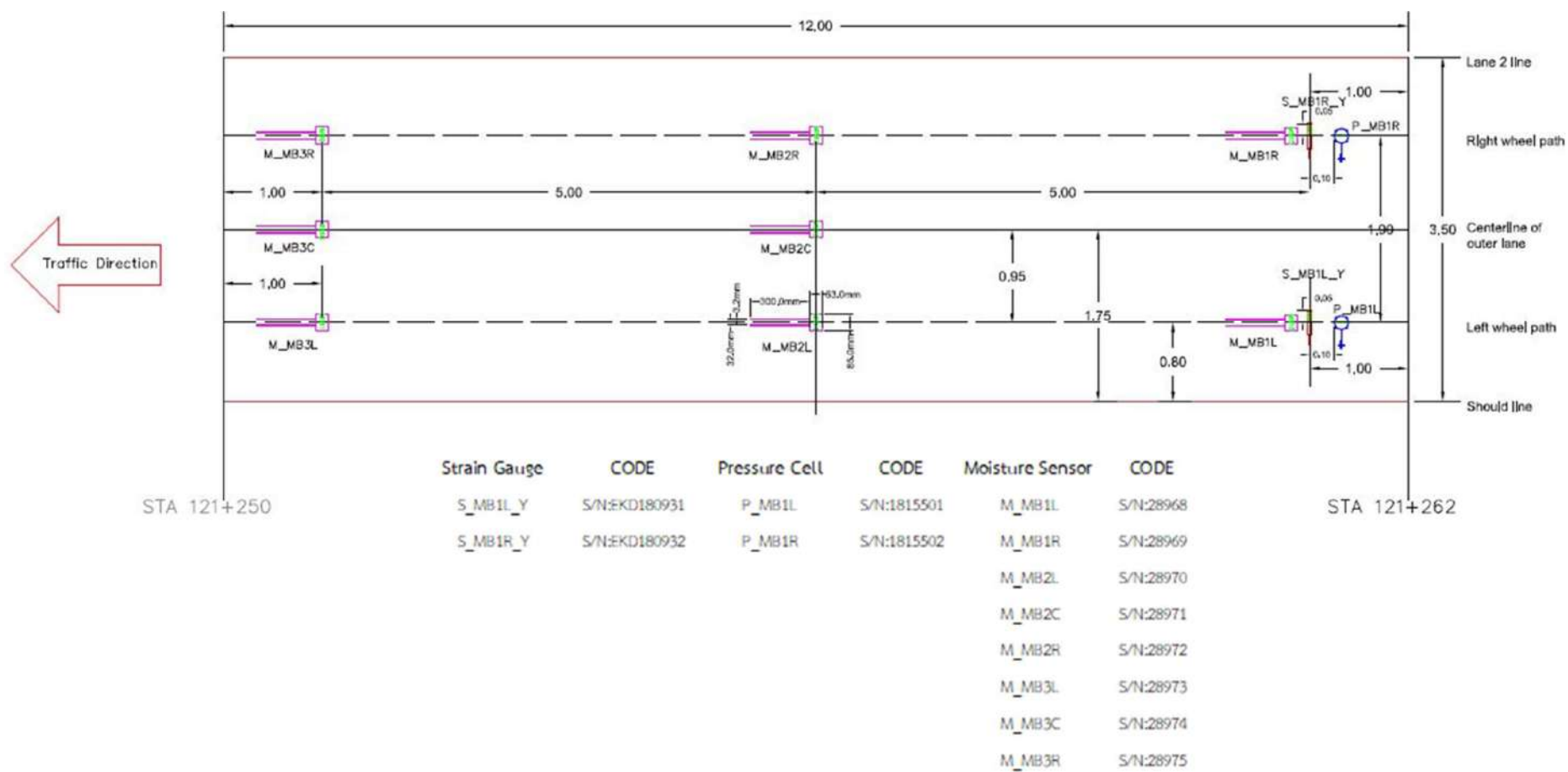
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการฝังกลบชั้น Base ความหนา 10 ซม. จนถึงระดับกึ่งกลางชั้น Base พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบสันสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 5.138



รูปที่ 5.138 การฝังกลบและบดอัดชั้น Base จนถึงระดับกึ่งกลางชั้น Base

5.8.9 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้น Base

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับกึ่งกลางชั้น Base จำนวน 12 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.139 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.140 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.141 และ อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) จำนวน 8 ตัวดังแสดงในรูปที่ 5.142 นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 5.143 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 5.139 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้น Base



รูปที่ 5.140 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base



รูปที่ 5.141 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base



รูปที่ 5.142 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base



รูปที่ 5.143 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในระดับกึ่งกลางชั้น Base ลงท่อ PE

5.8.10 การฝังกลบและบดอัดจากระดับกึ่งกลางชั้น Base จนถึงระดับใต้ชั้นผิวทาง AC

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการฝังกลบจากระดับกึ่งกลางชั้น Base จนถึงระดับใต้ชั้นผิวทาง AC ชั้น ความหนา 10 ซม. พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบสันสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 5.144 หลังจากนั้นลงชั้น Prime Coat ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.145



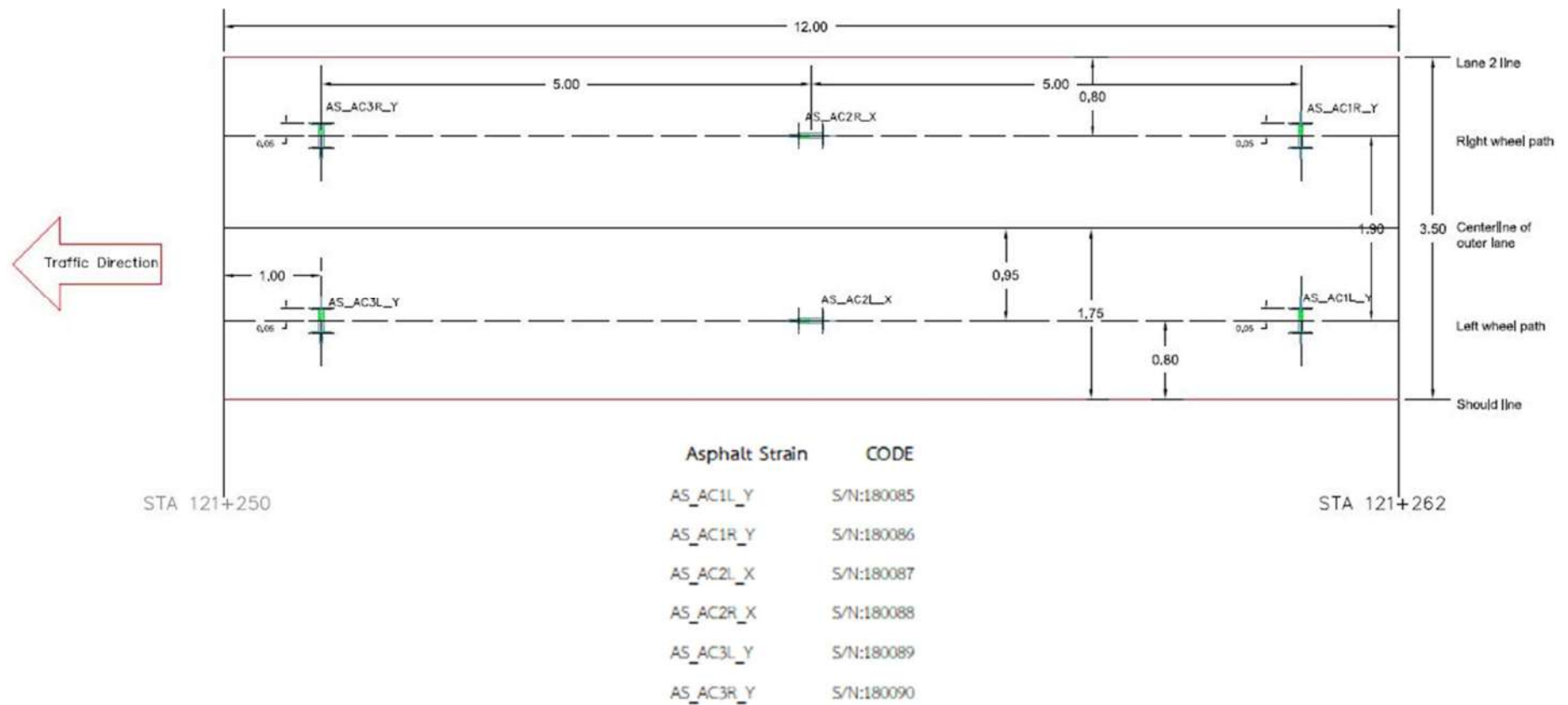
รูปที่ 5.144 การฝังกลบและบดอัดจากระดับกึ่งกลางชั้น Base จนถึงระดับใต้ชั้นผิวทาง AC



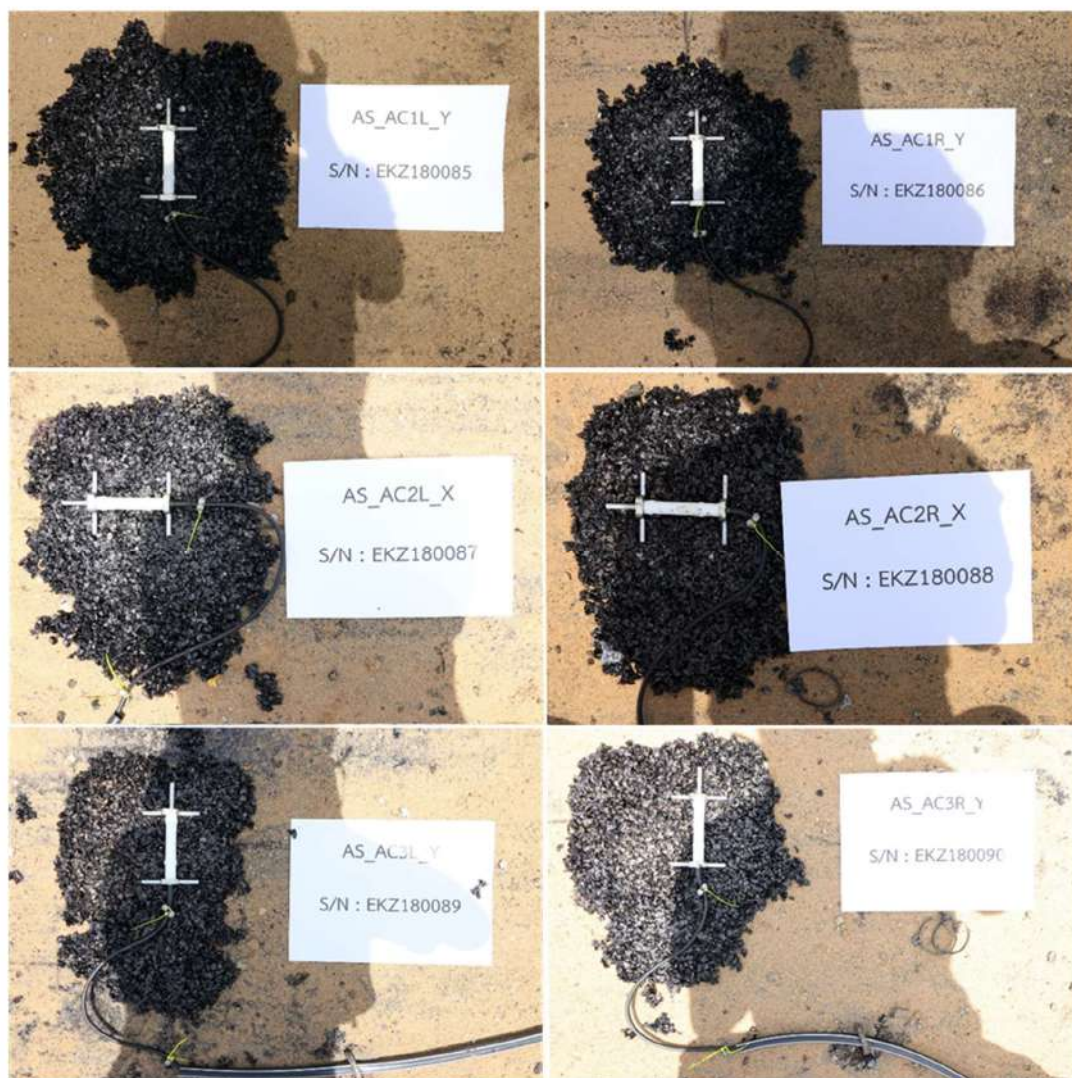
รูปที่ 5.145 ชั้น Prime Coat

5.8.11 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC จำนวน 6 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.146 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) จำนวน 6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.147 นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 5.148 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 5.146 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 5.147 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 5.148 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง
(Asphalt Strain Gage) ในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC ลงท่อ PE

5.8.12 การกลบและบดอัดชั้น Asphalt Concrete Bound Base

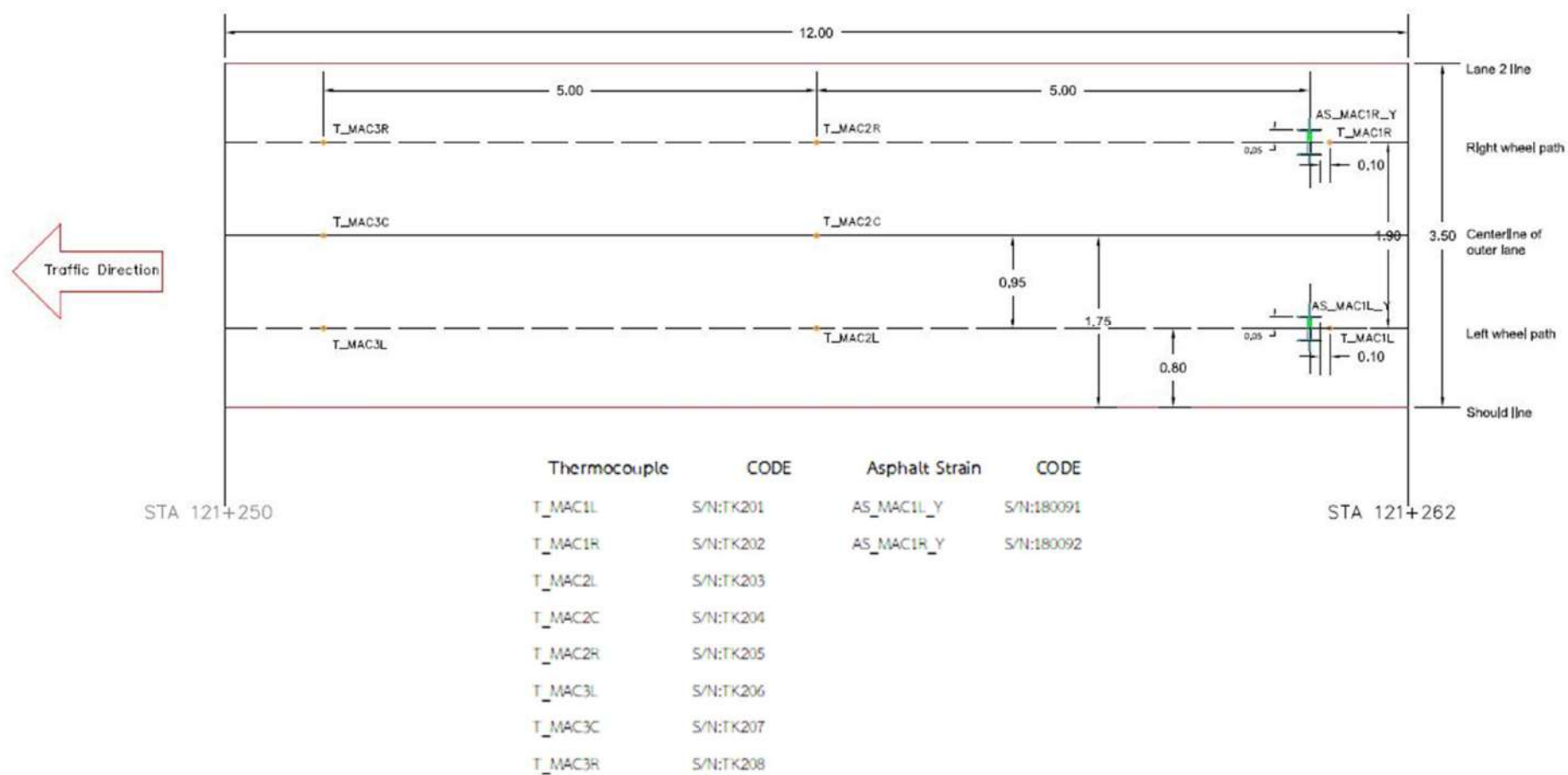
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการฝังกลบและบดอัดจากระดับชั้น AC Bound Base จากใต้ระดับชั้นผิวทาง AC จนถึงระดับกึ่งกลางชั้น AC ซึ่งประกอบขึ้น Asphalt Concrete Bound Base ความหนา 10 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 5.149



รูปที่ 5.149 ชั้น Asphalt Concrete Bound Base

5.8.13 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC จำนวน 10 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.150 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) จำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.151 และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.152 นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 5.153 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 5.150 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 5.151 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง
(Asphalt Strain Gage) ในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 5.152 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 5.153 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC ลงท่อ PE

5.8.14 การฝังกลบและบดอัดชั้นผิวทาง AC จนแล้วเสร็จ

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการฝังกลบและบดอัดจากระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC จนแล้วเสร็จ ประกอบด้วย ชั้น Asphalt Concrete Binder Course ความหนา 5 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 5.154 และ ชั้น Asphalt Concrete Wearing Course ความหนาอีก 5 ซม. ดังแสดงใน รูปที่ 5.155 จากนั้นคณะผู้วิจัยได้ตีเส้นเพื่อระบุ ตำแหน่งแนวล้อซ้าย แนวล้อขวา แนวกึ่งกลางแปลง และตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ลงบนผิวทาง AC ดังแสดงใน รูปที่ 5.156



รูปที่ 5.154 ชั้น Asphalt Concrete Binder Course



รูปที่ 5.155 ชั้น Asphalt Concrete Wearing Course



รูปที่ 5.156 แนวเส้นบนผิวทาง AC เพื่อระบุตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดฯ

5.8.15 การติดตั้ง observation well

คณะผู้วิจัยได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) จำนวน 2 จุด สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง ดังแสดงในรูปที่ 5.157 ถึง รูปที่ 5.158



รูปที่ 5.157 ชุดหลุมเจาะ ลึกขนาด 15 เมตร จำนวน 1 จุด



รูปที่ 5.158 เทพื้นคอนกรีตบริเวณรอบหลุมเจาะและติดตั้งเสาเหล็กกันบริเวณ จำนวน 1 จุด

5.8.16 การติดตั้ง data logger

การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) ติดตั้งภายใน Cabinet เพื่อป้องกันความชื้น ความร้อน และสภาพแวดล้อมที่จะให้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลเกิดความเสียหายขณะการใช้งานในภาคสนามได้ มีอัตราความถี่ในการเก็บข้อมูลสูงสุด 100 Hz ดังแสดงในรูปที่ 5.159



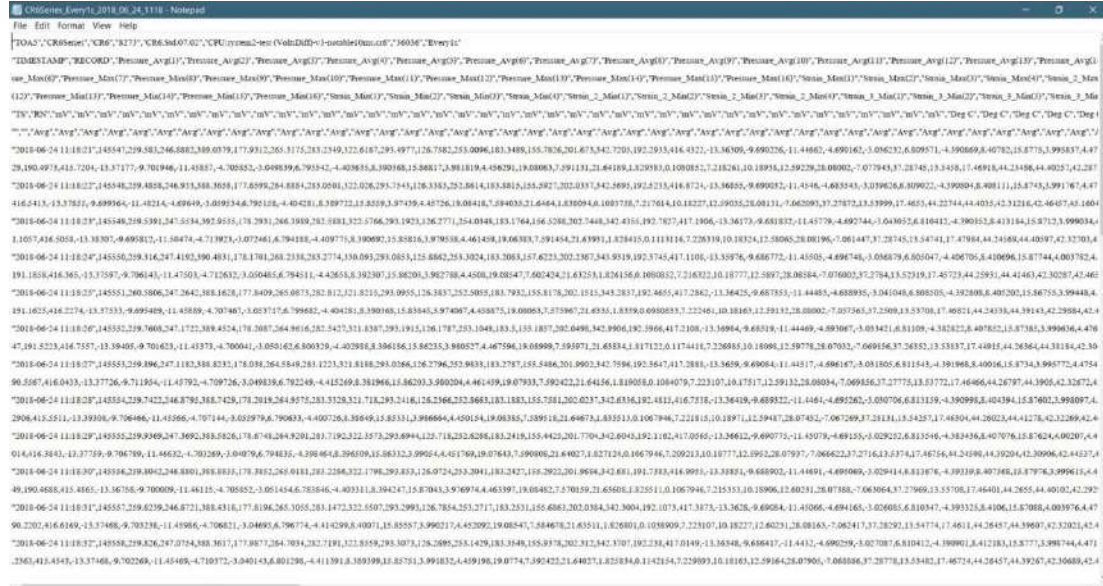
รูปที่ 5.159 การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)

การติดตั้ง data logger จะมีการเชื่อมต่อเข้ากับ UPS สำหรับในกรณีที่ไฟฟ้าขัดข้อง ไฟฟ้าตก หรือเกิดการกระชาก ระยะเวลาการ backup ก็ขึ้นอยู่กับขนาดของ UPS เมื่อไฟฟ้าติระบบก็จะทำการชาร์ตไปเก็บไว้แบตเตอรี่ ในส่วนของข้อมูล data logger จะมี CF card สำหรับเก็บข้อมูล ในกรณีที่ไฟฟ้าดับข้อมูลที่ค้างอยู่ระหว่างการบันทึกจะถูกเก็บไว้ใน CF Card เมื่อไฟฟ้าติระบบของ data logger จะกลับมาทำงานเป็นปกติ

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

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

วิธีการในการเชื่อมโยงข้อมูลจาก Data Logger ไปยัง Computer อีกเครื่องหนึ่งจะเชื่อมต่อผ่าน RS232 หรือระบบ internet (เพิ่ม modem) แล้วแสดงผลผ่าน software (LoggerNet) ของ Campbell โดยโปรแกรม LoggerNet จะสามารถดูข้อมูล บันทึกข้อมูล หรือตั้งค่าให้ CR6 ส่งข้อมูลแบบอัตโนมัติกลับมาที่คอมพิวเตอร์เครื่องนั้นๆได้ ไฟล์ที่บันทึกมาจะเป็นตามไปตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 5.160



รูปที่ 5.160 ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลจาก Data Logger

5.8.17 การทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดฯ ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

ภายหลังการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดฯ ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล รวมทั้งผู้ผิวทางและชั้นโครงสร้างทางของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางให้กลับคืนสู่สภาพเดิมแล้วเสร็จ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบสัญญาณตรวจวัดของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ซึ่งได้สัญญาณตรวจวัดของแต่ละเครื่องมือจะแสดงค่าบนหน้าจอโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 5.161 และสรุปผลการทดสอบในรูปที่ 5.160

The image displays two side-by-side screenshots of the CR6Series software interface. Both windows show a 'Table Monitor: Real Time Monitoring' view with a list of sensor readings. The left window shows strain and temperature data, while the right window shows pressure and strain data. Both windows have a 'List Alphabetically' checkbox at the bottom left.

Field	Value
Strain_2_Avg(3)	-4.495423 mV
Strain_2_Avg(4)	7.978938 mV
Strain_3_Avg(1)	19.44558 mV
Strain_3_Avg(2)	4.651487 mV
Strain_3_Avg(3)	4.648828 mV
Strain_3_Avg(4)	19.83593 mV
Strain_4_Avg(1)	7.742771 mV
Strain_4_Avg(2)	22.00376 mV
Strain_4_Avg(3)	0.8659256 mV
Strain_4_Avg(4)	0.1828452 mV
Strain_HAS_Avg(1)	4.268917 mV
Strain_HAS_Avg(2)	7.575776 mV
Strain_HAS_2_Avg(1)	12.14345 mV
Strain_HAS_2_Avg(2)	27.29897 mV
Strain_HAS_3_Avg(1)	-5.229471 mV
Strain_HAS_3_Avg(2)	35.81383 mV
Strain_HAS_4_Avg(1)	8.360349 mV
Strain_HAS_4_Avg(2)	17.19085 mV
Temp_TypeK_Avg(1)	82.0164 Deg C
Temp_TypeK_Avg(2)	86.08117 Deg C
Temp_TypeK_Avg(3)	85.58797 Deg C
Temp_TypeK_Avg(4)	84.78857 Deg C
Temp_TypeK_Avg(5)	89.92822 Deg C
Temp_TypeK_Avg(6)	92.36057 Deg C
Temp_TypeK_Avg(7)	78.11176 Deg C
Temp_TypeK_Avg(8)	87.71114 Deg C
Pressure_Max(1)	270.3841 mV
Pressure_Max(2)	281.7623 mV
Pressure_Max(3)	408.0546 mV
Pressure_Max(4)	208.7988 mV

Field	Value
RectNum	21.779
TimeStamp	19/6/2019 19:30:29
Pressure_Avg(1)	42.20808 mV
Pressure_Avg(2)	-39.57217 mV
Pressure_Avg(3)	-17.04287 mV
Pressure_Avg(4)	61.88549 mV
Pressure_Avg(5)	-8.0474 mV
Pressure_Avg(6)	-15.28434 mV
Pressure_Avg(7)	63.83986 mV
Pressure_Avg(8)	63.48894 mV
Pressure_Avg(9)	79.17257 mV
Pressure_Avg(10)	74.96145 mV
Pressure_Avg(11)	79.35802 mV
Pressure_Avg(12)	78.95008 mV
Pressure_Avg(13)	81.97405 mV
Pressure_Avg(14)	86.48096 mV
Pressure_Avg(15)	84.24245 mV
Pressure_Avg(16)	82.18878 mV
Strain_Avg(1)	-4.115051 mV
Strain_Avg(2)	-13.1226 mV
Strain_Avg(3)	-0.5261328 mV
Strain_Avg(4)	-3.116357 mV
Strain_2_Avg(1)	-0.1258827 mV
Strain_2_Avg(2)	8.360184 mV
Strain_2_Avg(3)	1.747773 mV
Strain_2_Avg(4)	1.067021 mV
Strain_3_Avg(1)	-4.590385 mV
Strain_3_Avg(2)	0.2958987 mV
Strain_3_Avg(3)	6.287088 mV
Strain_3_Avg(4)	-5.774764 mV

รูปที่ 5.161 การทดสอบเครื่องมือตรวจวัดฯ ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการใช้สายวัดระดับน้ำในหลุมเจาะวัดความลึกของน้ำใต้ดิน โดยผลความลึกของระดับน้ำใต้ดินที่ 10 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.162

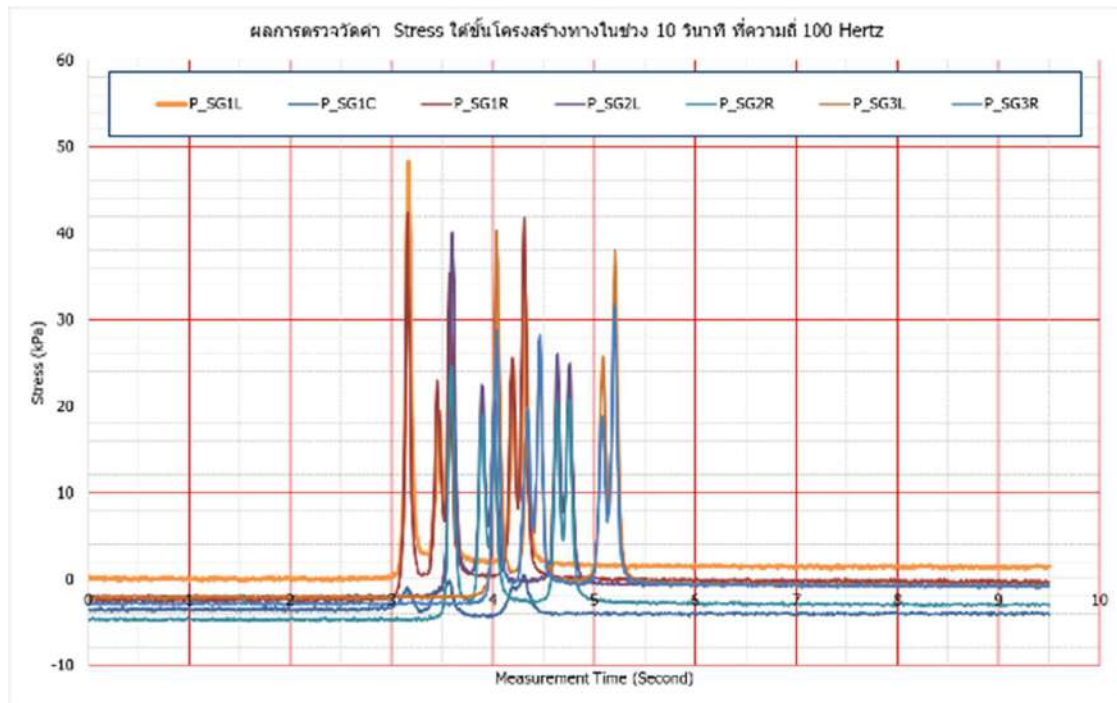


รูปที่ 5.162 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well)

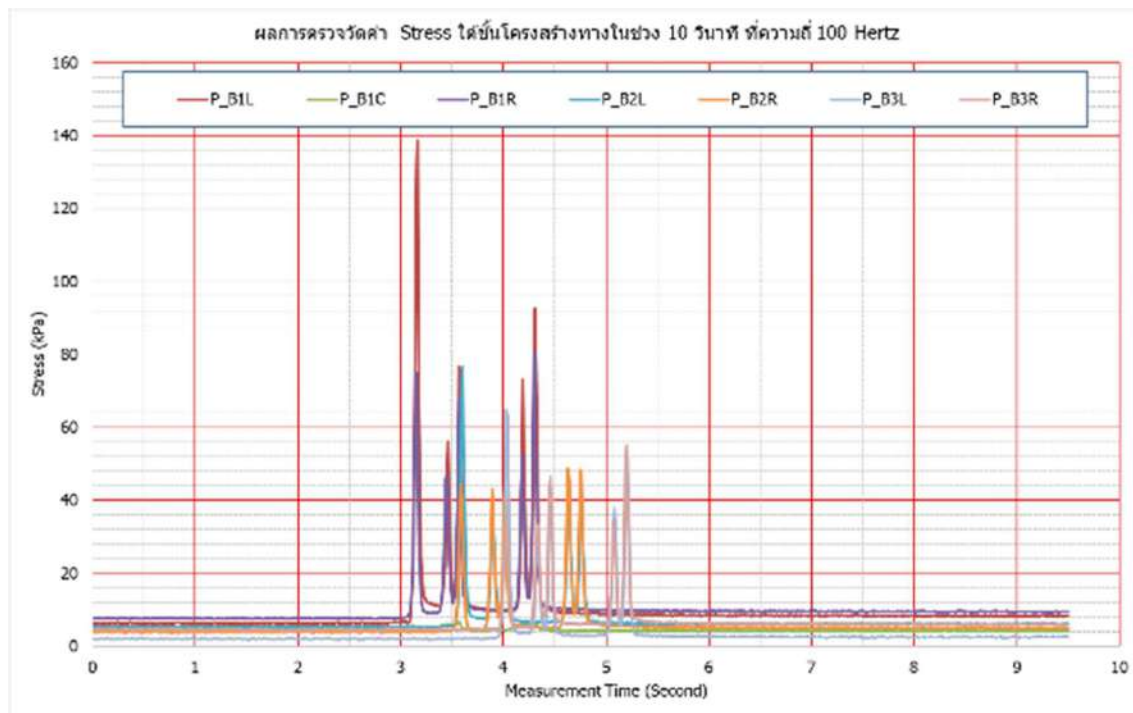
นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้ทดสอบความเร็วในการอ่านค่าสัญญาณและบันทึก 100 Hz (100 ค่าในเวลา 1 วินาที) ของอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) โดยการตรวจวัดค่าสัญญาณเมื่อมีรถบรรทุกวิ่งผ่านแปลงทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.163 ซึ่งค่าสัญญาณที่ได้จากแต่ละอุปกรณ์ตรวจวัดฯ ถูกอ่านและบันทึกลงในอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) โดยภายหลังการทดสอบพบว่าอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) สามารถอ่านและบันทึกข้อมูลได้ 100 Hz ดังแสดงกราฟข้อมูลตรวจวัดในรูปที่ 5.164 ถึง รูปที่ 5.171 และตารางสรุปข้อมูลตรวจวัดในภาคผนวก ฉ



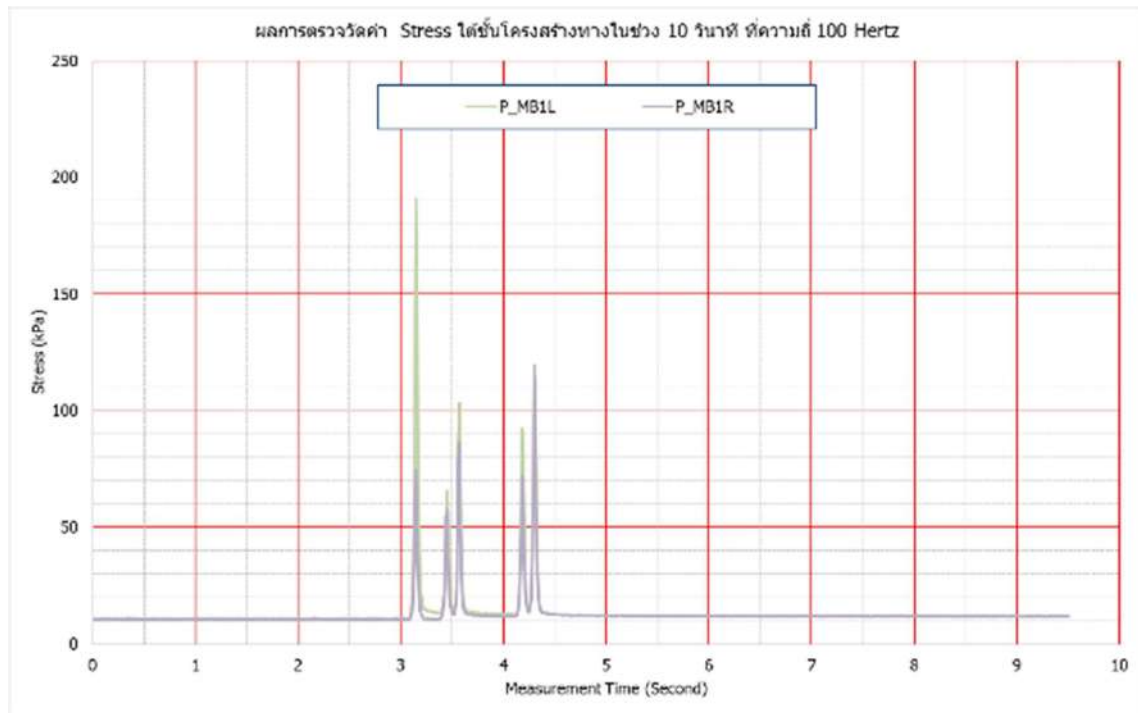
รูปที่ 5.163 การทดสอบความเร็วในการอ่านและบันทึก 100 Hz ของอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)



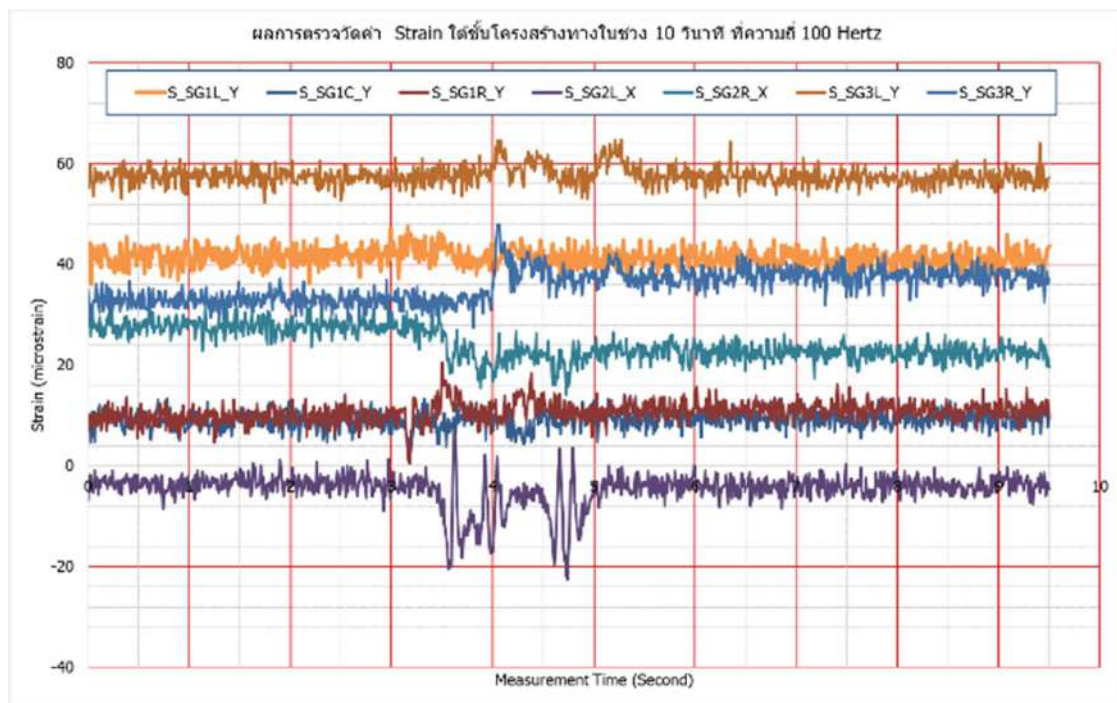
รูปที่ 5.164 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ชั้น Subgrade



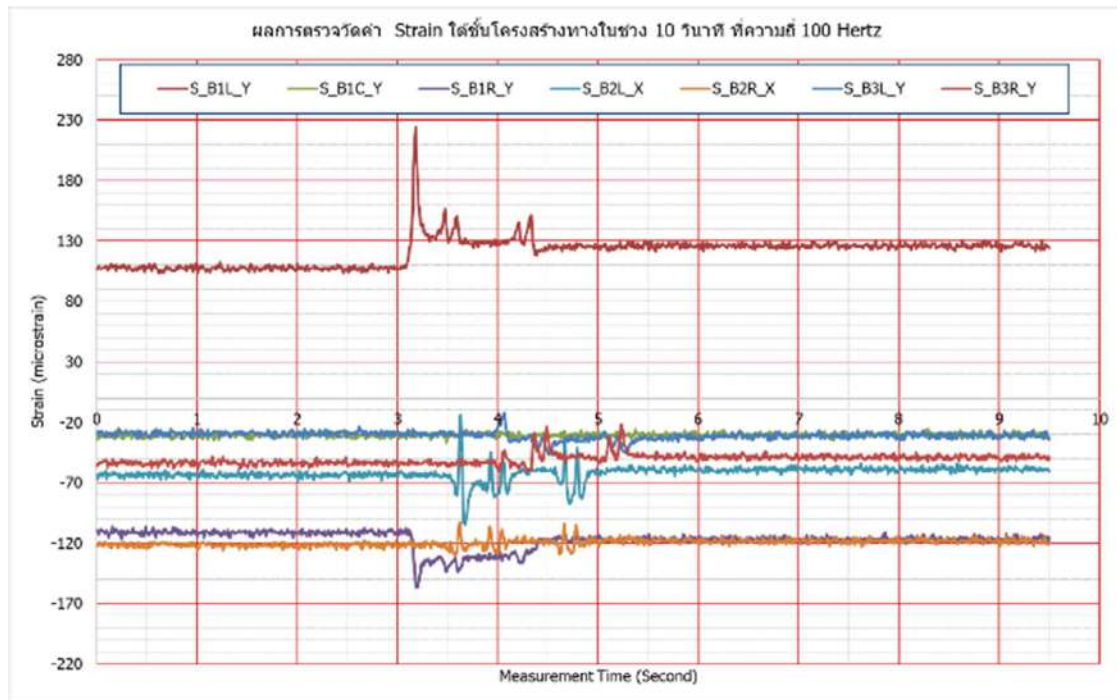
รูปที่ 5.165 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ระดับใต้ชั้น Base



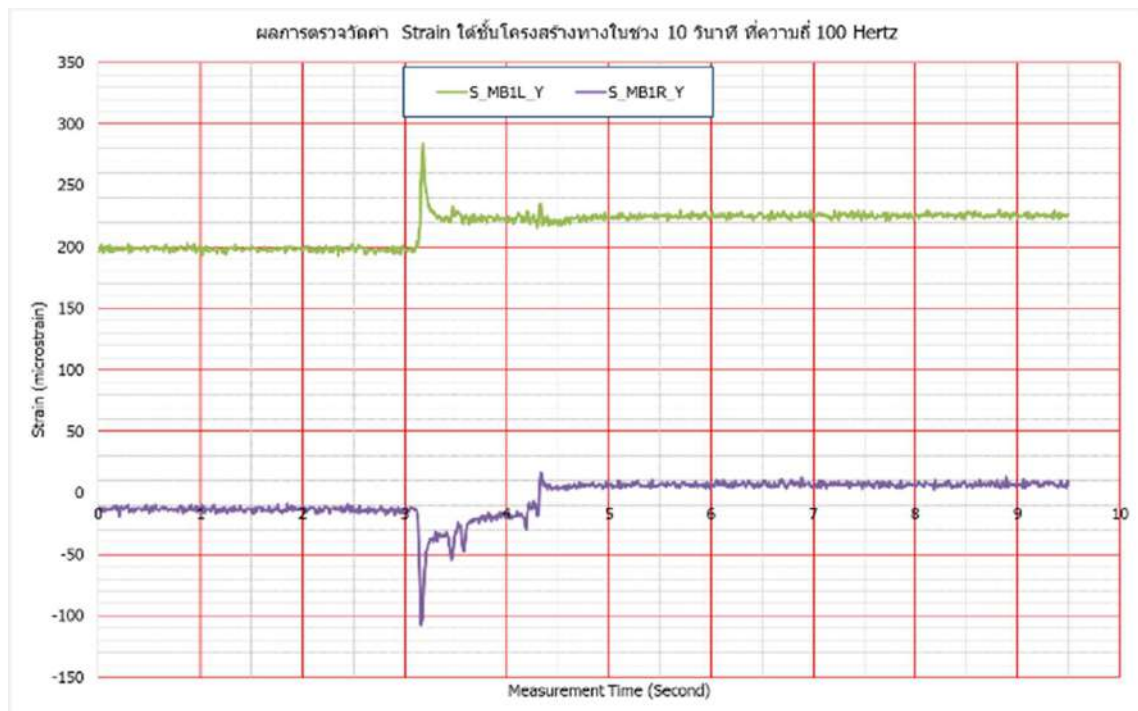
รูปที่ 5.166 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ระดับกึ่งกลางชั้น Base



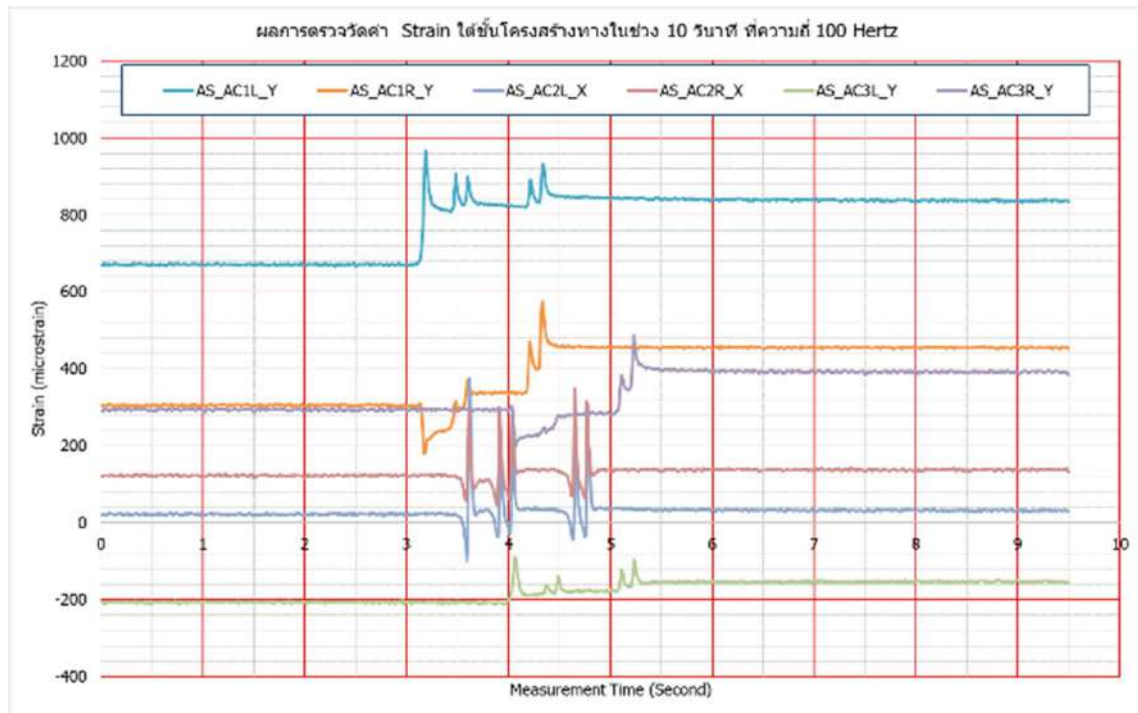
รูปที่ 5.167 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ชั้น Subgrade



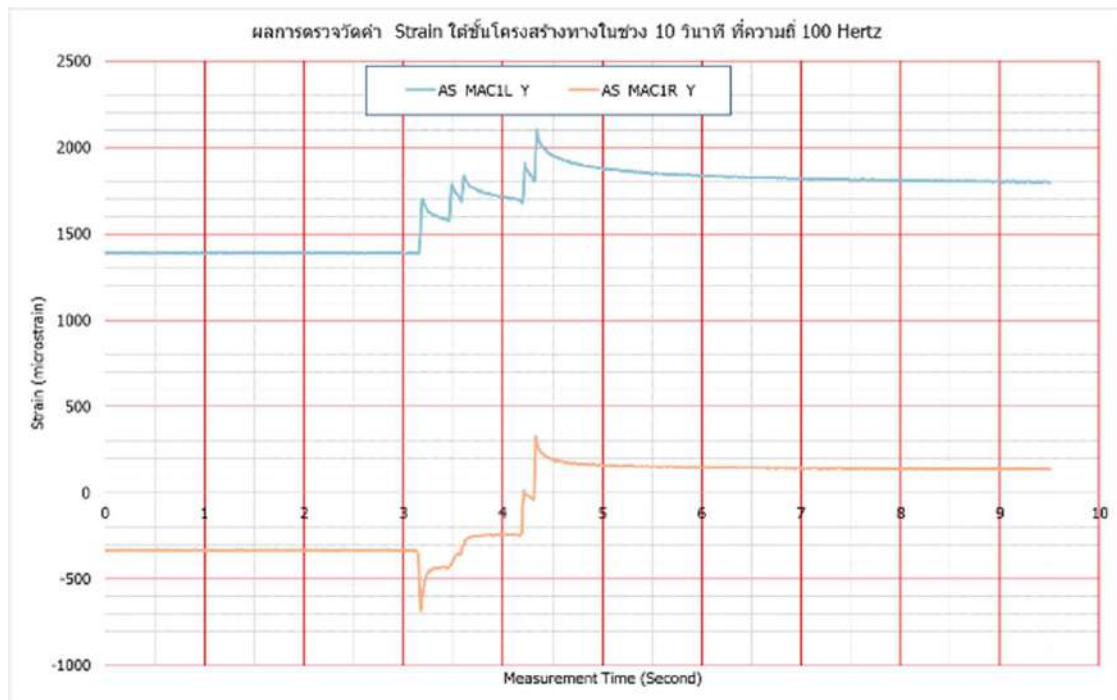
รูปที่ 5.168 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ระดับใต้ชั้น Base



รูปที่ 5.169 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ระดับกึ่งกลางชั้น Base



รูปที่ 5.170 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด
สำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ระดับใต้ชั้นผิวทาง AC



รูปที่ 5.171 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด
สำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC

5.9 ผลการทดสอบวัสดุก่อสร้างแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุถมบดอัดโครงสร้างชั้นทางจากแหล่งวัสดุที่มีผลการรับรองคุณภาพของวัสดุ (General Test) จากกรมทางหลวง มีรายละเอียดดังนี้

- วัสดุประเภทหิน สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต สำหรับชั้น Asphalt Concrete Wearing Course และ Asphalt Concrete Binder Course ใช้จากแหล่งโรงโม่หินนันทประเสริฐ อ.พะยุหะคีรี จ. นครสวรรค์
- วัสดุประเภทหิน สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต สำหรับชั้น Asphalt Bound Base โรงผสมแอสฟัลท์ หจก.จันทร์วงษ์ศิลา อ.ตาคลี จ.นครสวรรค์
- วัสดุประเภทหินคลุก สำหรับชั้นพื้นทาง (Base) ใช้จากแหล่งวัสดุ โรงโม่หินศิลาลานทอง 2 ทล.1 กม.243+900 LT
- วัสดุประเภทลูกรัง สำหรับชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ใช้จากแหล่งวัสดุ แหล่งบ่อลูกรังบ้านกล้า ต.ธรรมามูล อ.เมือง จ.ชัยนาท

ในระหว่างก่อสร้างคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบวัสดุถมบดอัดที่แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง (Control Test) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ชั้นผิวทาง Asphalt Concrete Wearing Course (มาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532)
 - การทดสอบ Compaction โดยวิธี Marshall (มาตรฐาน ทล.-ท. 604/2517) $\geq 98\%$
- ชั้นผิวทาง Asphalt Concrete Binder Course (มาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532)
 - การทดสอบ Compaction โดยวิธี Marshall (มาตรฐาน ทล.-ท. 604/2517) $\geq 97\%$
- ชั้นผิวทาง Asphalt Concrete Bound Base (มาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532)
 - การทดสอบ Compaction โดยวิธี Marshall (มาตรฐาน ทล.-ท. 604/2517) $\geq 98\%$
- ชั้นพื้นทาง (Base) วัสดุประเภทหินคลุก (มาตรฐาน ทล.-ม. 201/2544)
 - การทดสอบ CBR (มาตรฐาน ทล.-ท. 109/2517) $\geq 80\%$
 - การทดสอบ Compaction $\geq 95\%$ ของ Compaction สูงสุด (มาตรฐาน ทล.-ท. 108/2517)
 - การทดสอบ Liquid Limit (มาตรฐาน ทล.-ท. 102/2515) $\leq 25\%$
 - การทดสอบ Plastic Index (มาตรฐาน ทล.-ท. 103/2515) $\leq 6\%$
 - การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง (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) $\geq 25\%$
 - การทดสอบ Compaction $\geq 95\%$ ของ Compaction สูงสุด (มาตรฐาน ทล.-ท. 108/2517)
 - การทดสอบ Liquid Limit (มาตรฐาน ทล.-ท. 102/2515) $\leq 35\%$
 - การทดสอบ Plastic Index (มาตรฐาน ทล.-ท. 103/2515) $\leq 11\%$

- การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง (มาตรฐาน ทล.-ท. 205/2517)
ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 = 25 - 45% และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 = 5 - 20%

5.10 การติดตั้งระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามโครงสร้างถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามและชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานในการติดตั้งดังต่อไปนี้

5.10.1 การติดตั้งโครงสร้างและตู้อุปกรณ์ควบคุมในภาคสนาม

คณะผู้วิจัยได้ติดตั้งตู้อุปกรณ์ควบคุมและบ่อพักสายสัญญาณ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 5.172 ถึงรูปที่ 5.173



รูปที่ 5.172 ติดตั้งรั้วตาข่ายพร้อมโครงหลังคาเมทัลชีทและตู้ควบคุม



รูปที่ 5.173 บ่อพักสายสัญญาณ

5.10.2 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุม

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) หน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) อุปกรณ์ UPS อุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) และระบบไฟฟ้าและเครือข่ายที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆภายในตู้ควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 5.174



รูปที่ 5.174 ภาพรวมในตู้ควบคุม

5.10.3 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและเดินสายสัญญาณหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) พร้อมดำเนินการตั้งค่าและเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบเครือข่ายเข้ากับหน่วยประมวลผลภาคสนาม ดังแสดงในรูปที่ 5.175



รูปที่ 5.175 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)

5.10.4 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV) และอุปกรณ์บันทึกภาพ

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและตั้งค่ากล้องวงจรปิด (CCTV) ที่รองรับ Digital WDR พร้อมเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าและสายสัญญาณ และเชื่อมต่อสัญญาณจากกล้องวงจรปิดและระบบเครือข่ายเข้ากับอุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) ดังแสดงในรูปที่ 5.176 และ รูปที่ 5.177



รูปที่ 5.176 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV)



รูปที่ 5.177 ภาพบันทึกจากกล้องวงจรปิด (CCTV)

5.10.5 การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าและเครือข่าย

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการขออนุญาตเพื่อเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าจากแนวสายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อให้ให้อุปกรณ์ต่างๆ ติดตั้งเครื่องสำรองไฟและอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า รวมถึงระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากภาคสนามมายังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย เพื่อประมวลข้อมูลและแสดงผลการตรวจวัดต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 5.178 ถึง รูปที่ 5.181



รูปที่ 5.178 การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 5.179 การเชื่อมต่อระบบเครือข่ายความเร็วสูงจากผู้ให้บริการ (Internet Service Provider : ISP)



รูปที่ 5.180 อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC)



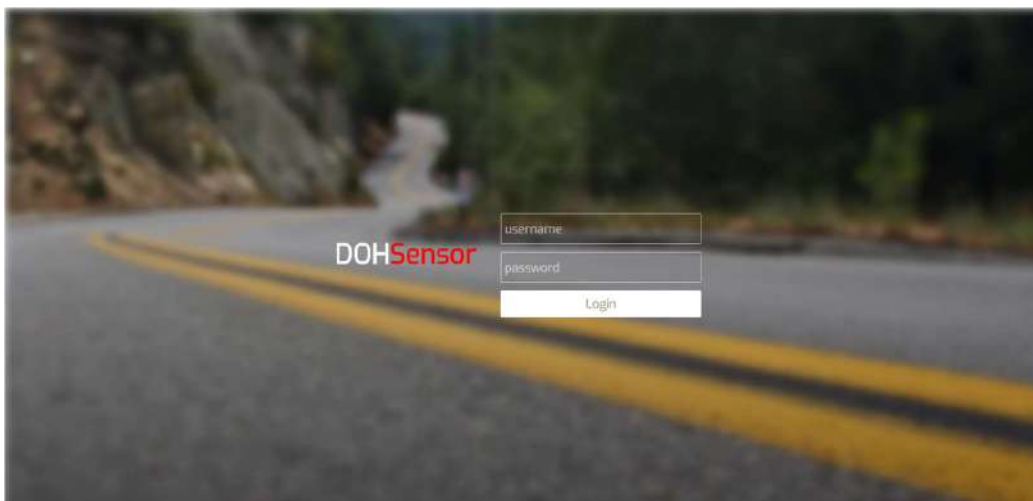
รูปที่ 5.181 อุปกรณ์ UPS สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

6. ระบบสารสนเทศฐานข้อมูลผลการตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างถนน

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

6.1 หน้าเข้าสู่ระบบ

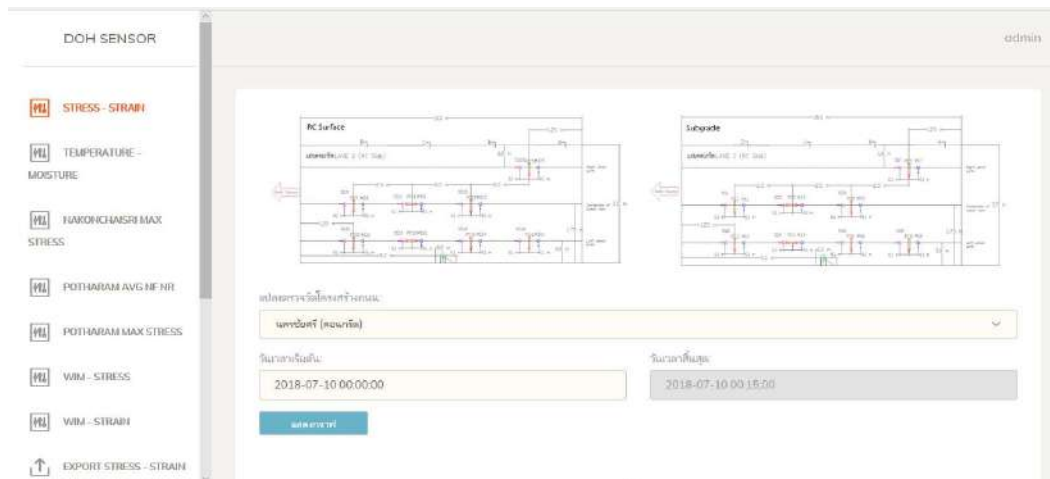
ผู้ใช้งานสามารถเข้าสู่ระบบ โดยการกรอก username กับ password และกด Login เพื่อเข้าใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 6.1



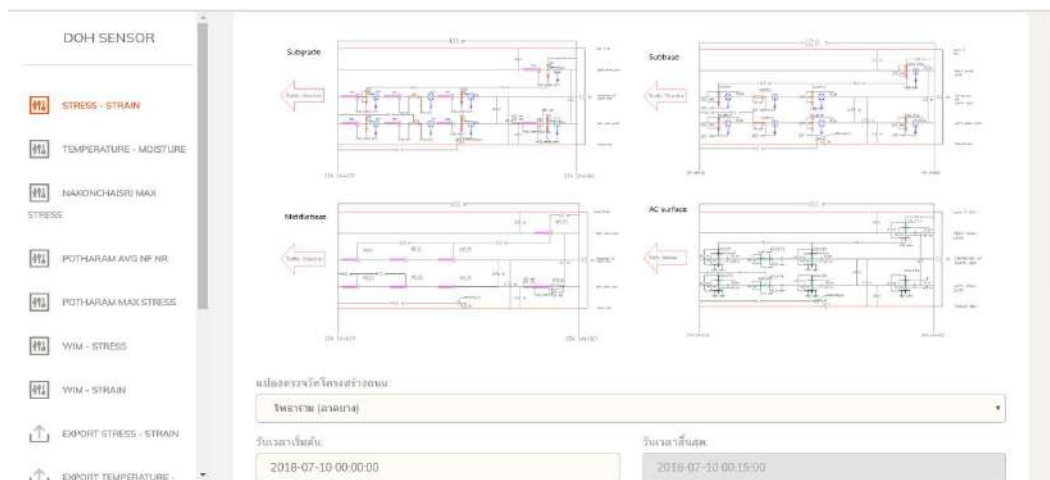
รูปที่ 6.1 หน้าเข้าสู่ระบบ

6.2 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain)

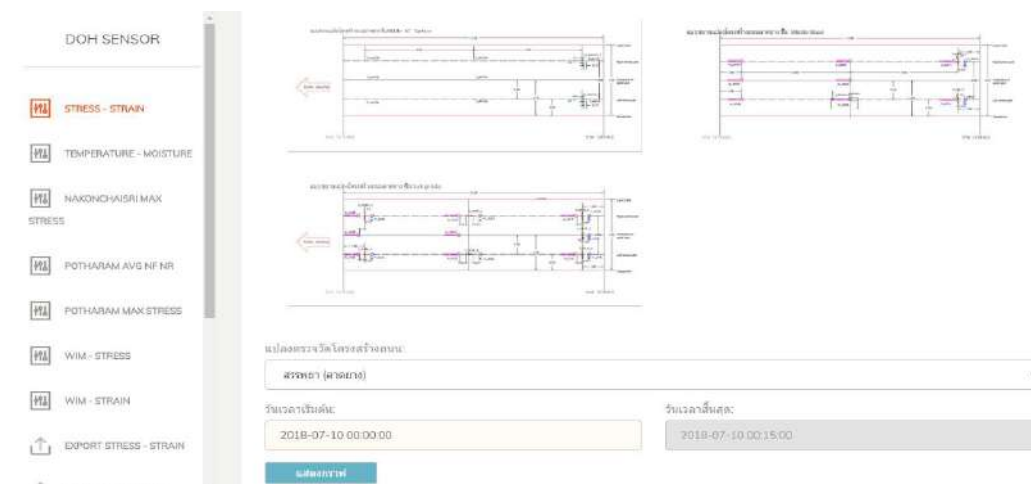
การแสดงผลข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงได้ โดยเมื่อผู้ใช้งานเปลี่ยนตำแหน่งแปลงแผนผังการติดตั้งจะเปลี่ยนตามตำแหน่งแปลงที่เลือก เช่น กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก นครชัยศรี (คอนกรีต) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 6.2 กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก โพธาราม (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 6.3 และกรณีที่ผู้ใช้งานเลือก สรรพพยา (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.2 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain

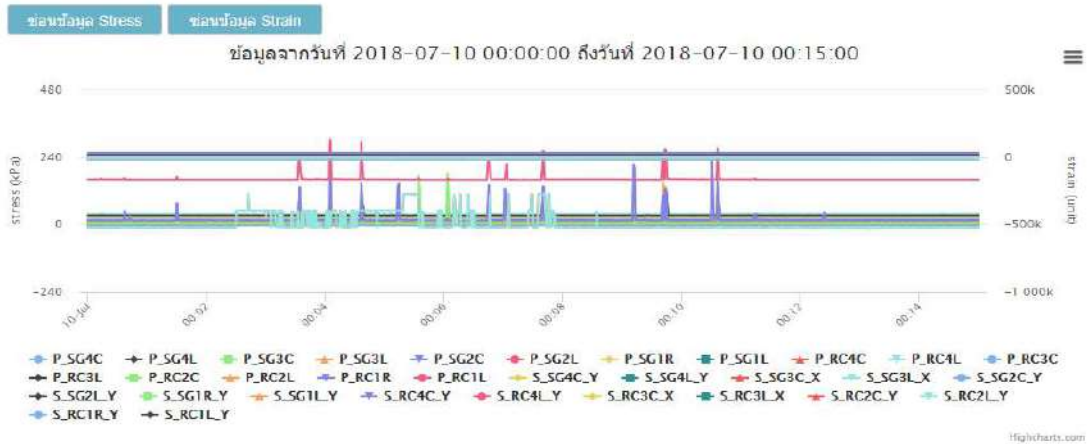


รูปที่ 6.3 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain

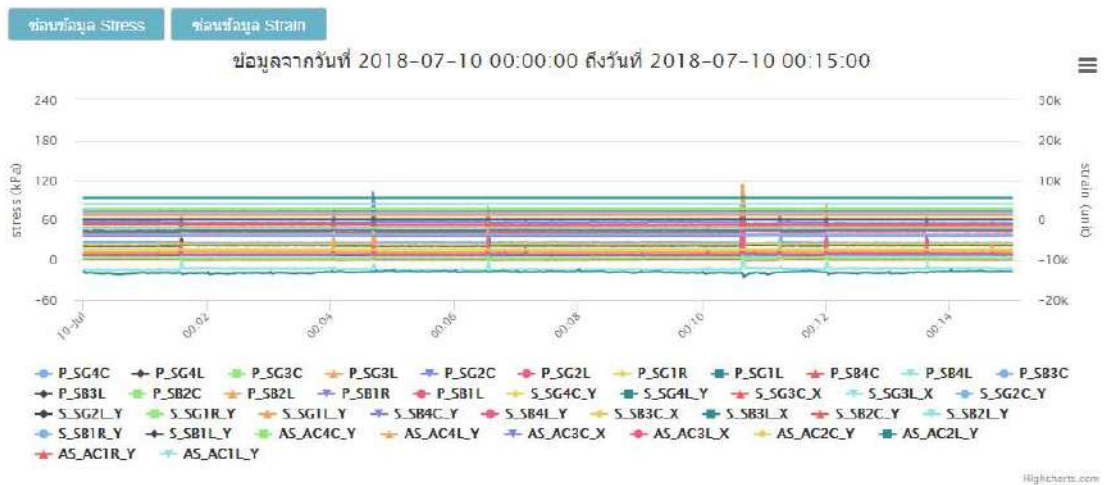


รูปที่ 6.4 การเลือกแปลงสรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain

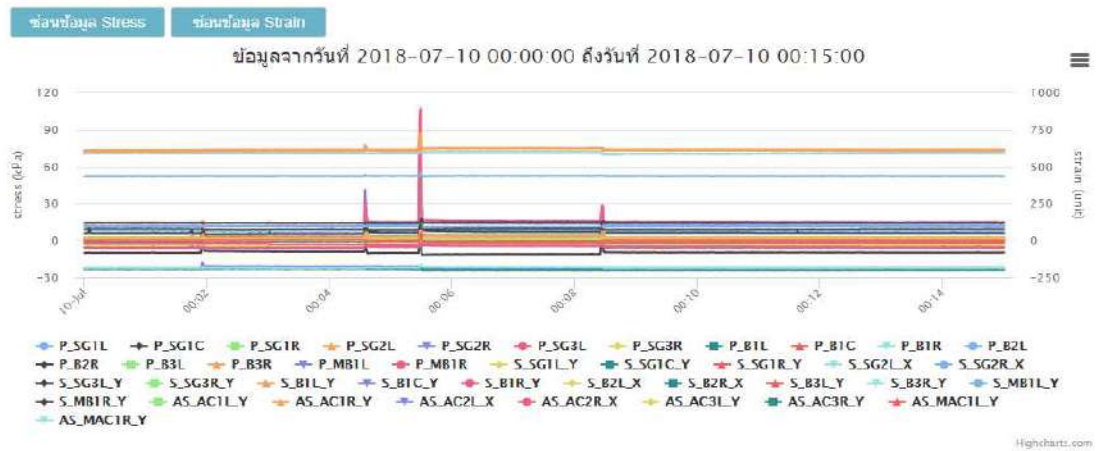
จากนั้นผู้ใช้งานต้องเลือกเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดที่จะแสดงข้อมูล โดยเมื่อผู้ใช้งานเลือกเวลาเริ่มต้น ระบบจะทำการระบุเวลาสิ้นสุดให้อัตโนมัติโดยเพิ่มเวลาจากเวลาเริ่มต้นไปอีก 15 นาที จากนั้นเมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มแสดงกราฟ ระบบจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) ดังแสดงในรูปที่ 6.5 ถึง รูปที่ 6.7



รูปที่ 6.5 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)

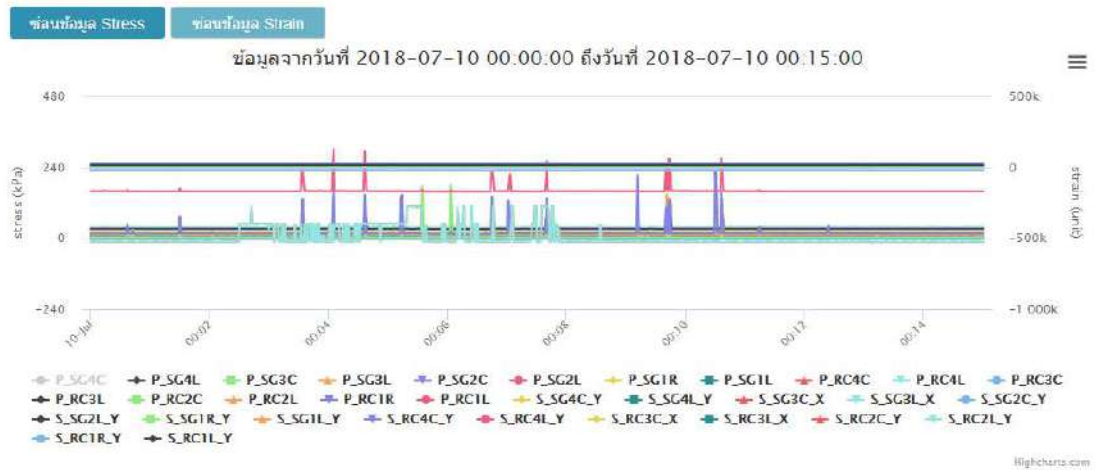


รูปที่ 6.6 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงโพธาราม(ลาดยาง)

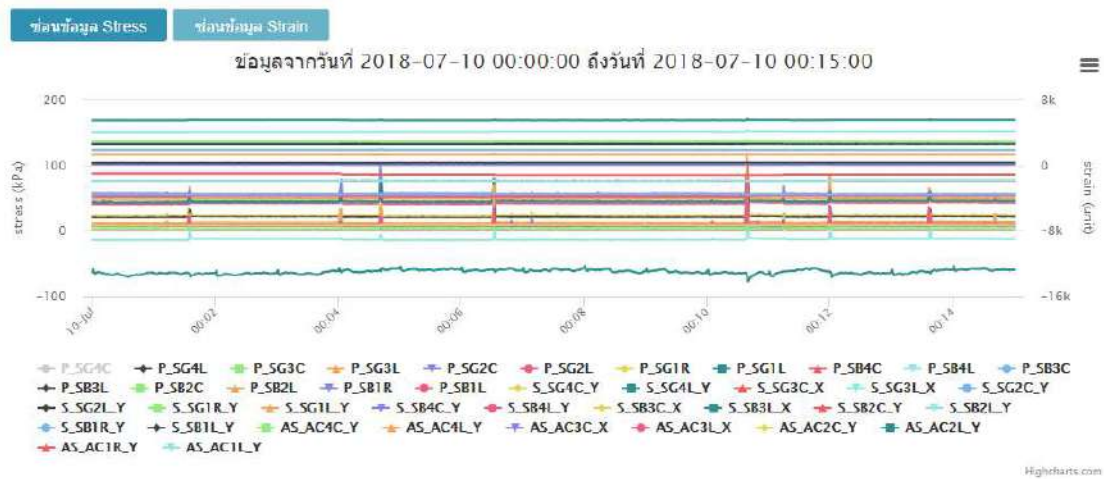


รูปที่ 6.7 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงสรรพยา(ลาดยาง)

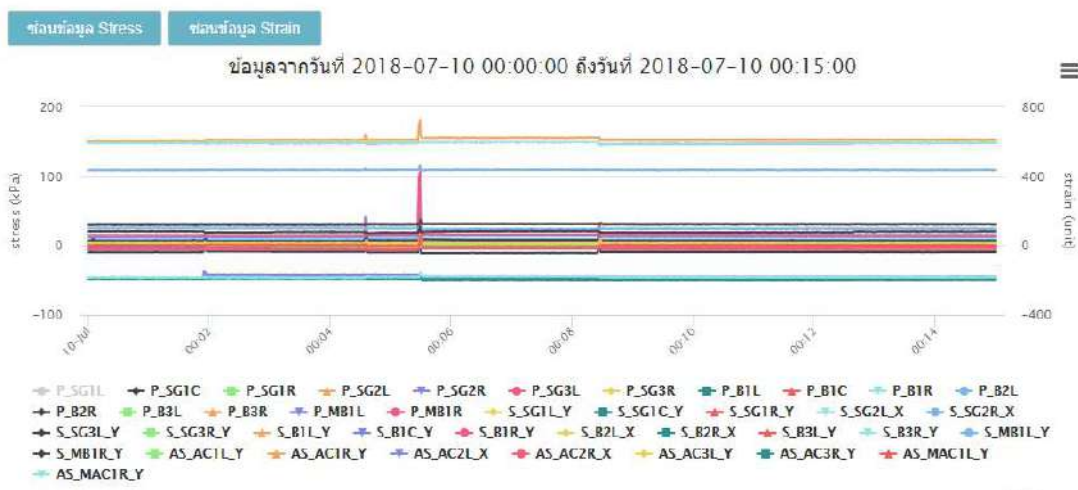
ผู้ใช้งานสามารถซ่อนหรือแสดงข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องการเห็นและไม่ต้องการเห็นโดยการกดปุ่มที่ค่าต้องการซ่อนหรือแสดง ดังแสดงในรูปที่ 6.8 ถึงรูปที่ 6.16



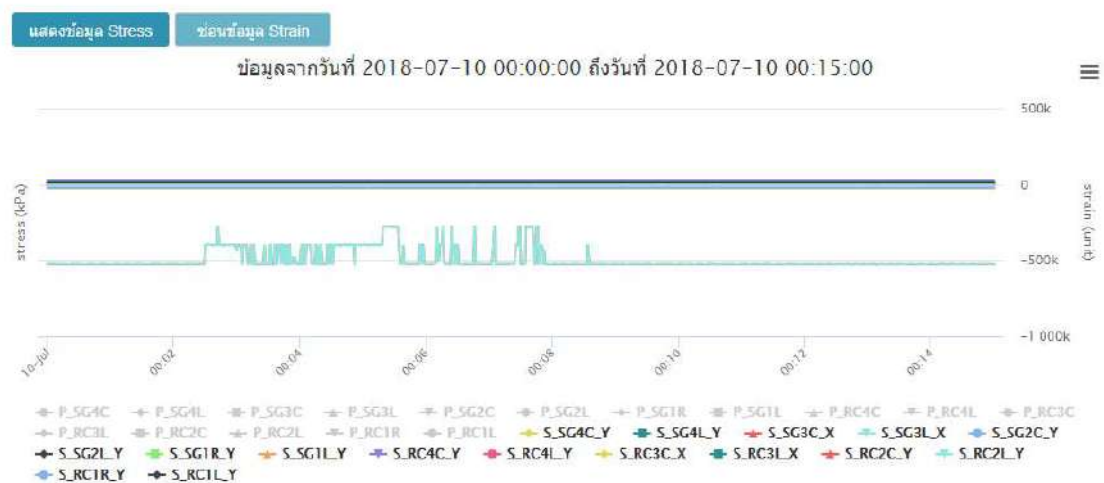
รูปที่ 6.8 การซ่อนข้อมูล Stress ของ P_SG4C แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)



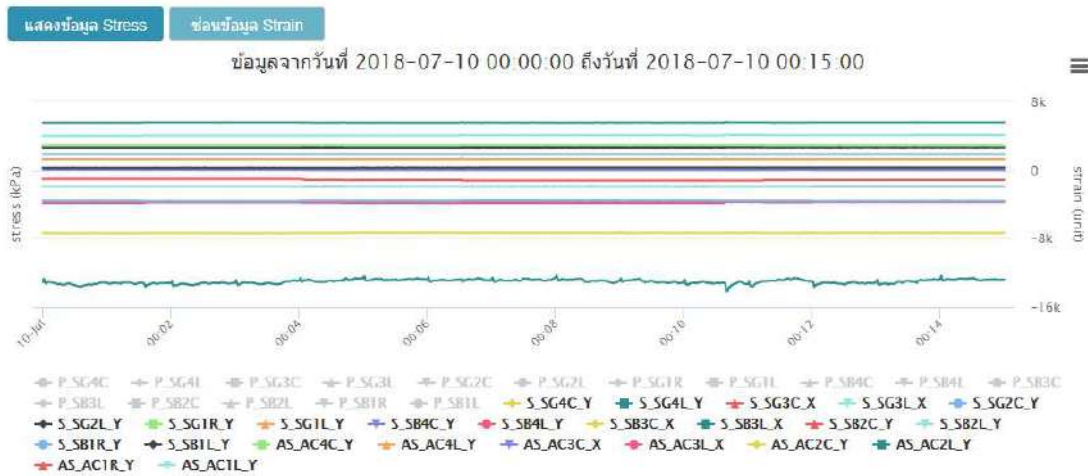
รูปที่ 6.9 การซ้อนข้อมูล Stress ของ P_SG4C แปลงโพธาราม(ลาดยาง)



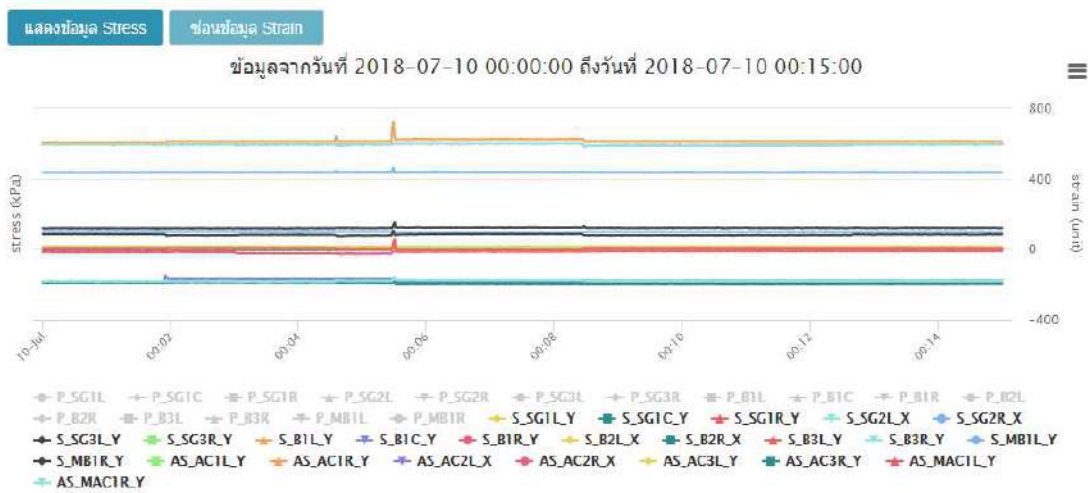
รูปที่ 6.10 การซ้อนข้อมูล Stress ของ P_SG1L ของแปลงสรรพยา(ลาดยาง)



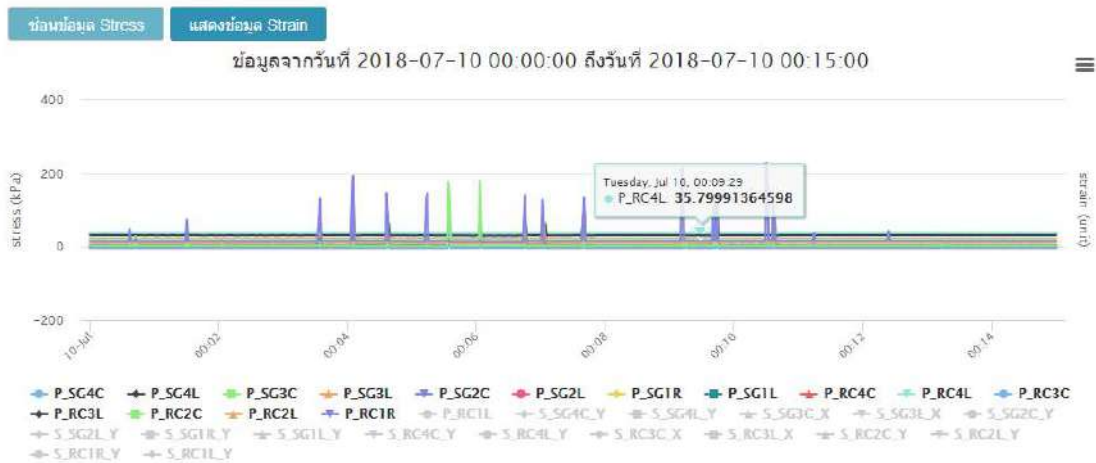
รูปที่ 6.11 การซ้อนข้อมูล Stress ทั้งหมด แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)



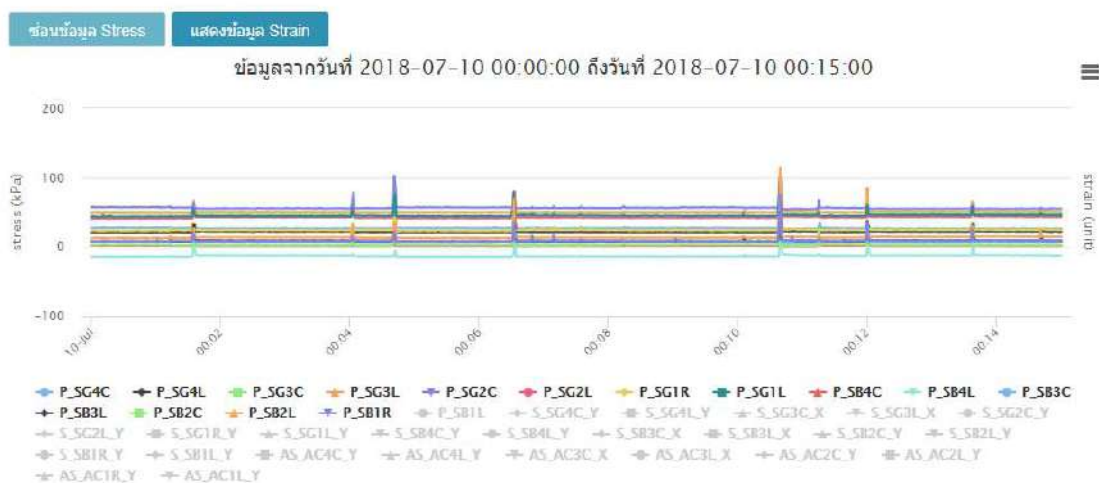
รูปที่ 6.12 การซ่อนข้อมูล Stress ทั้งหมด แปลงโพธาราม(ลาดยาง)



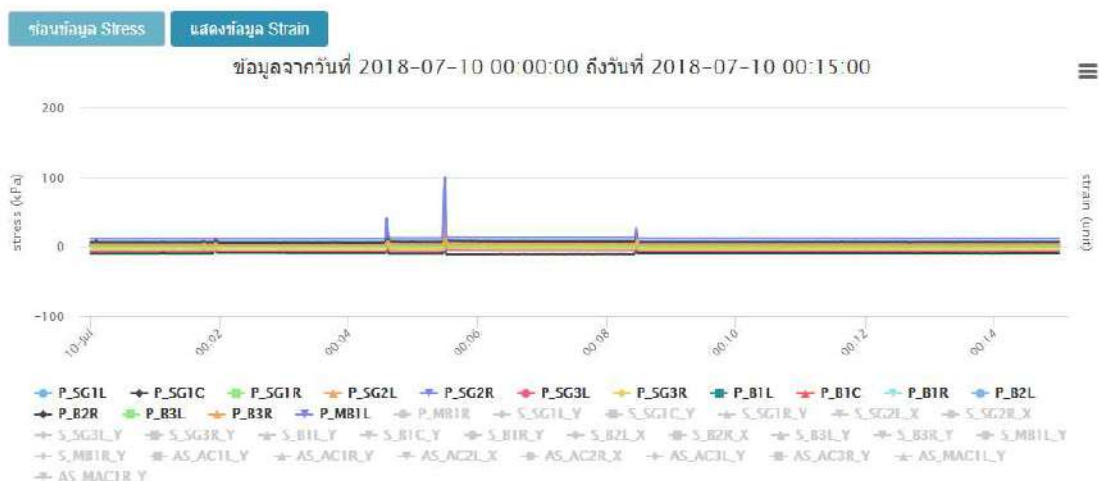
รูปที่ 6.13 การซ่อนข้อมูล Stress ทั้งหมด แปลงสรรพยา(ลาดยาง)



รูปที่ 6.14 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)



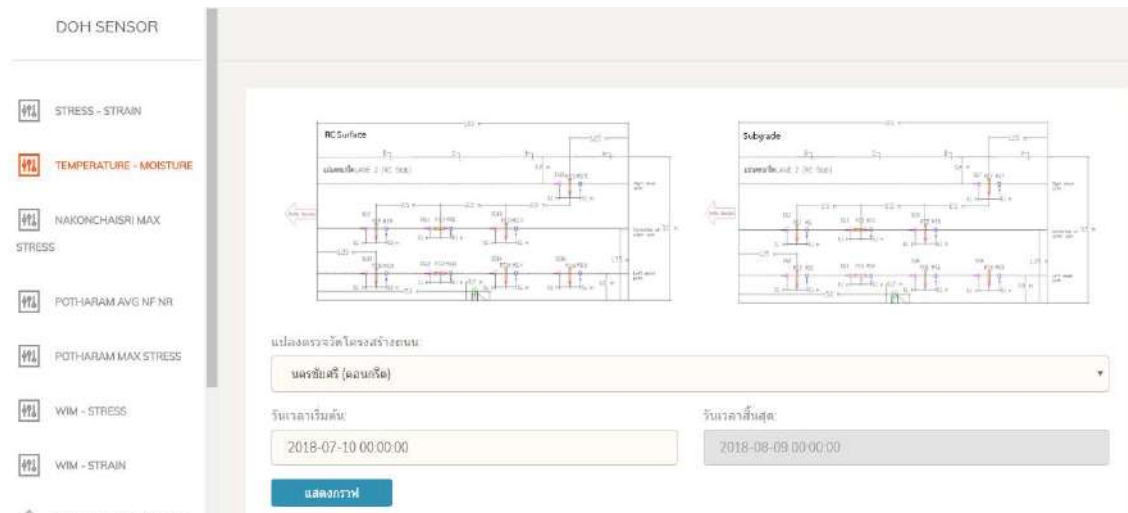
รูปที่ 6.15 การซ้อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงโพธาราม(ลาดยาง)



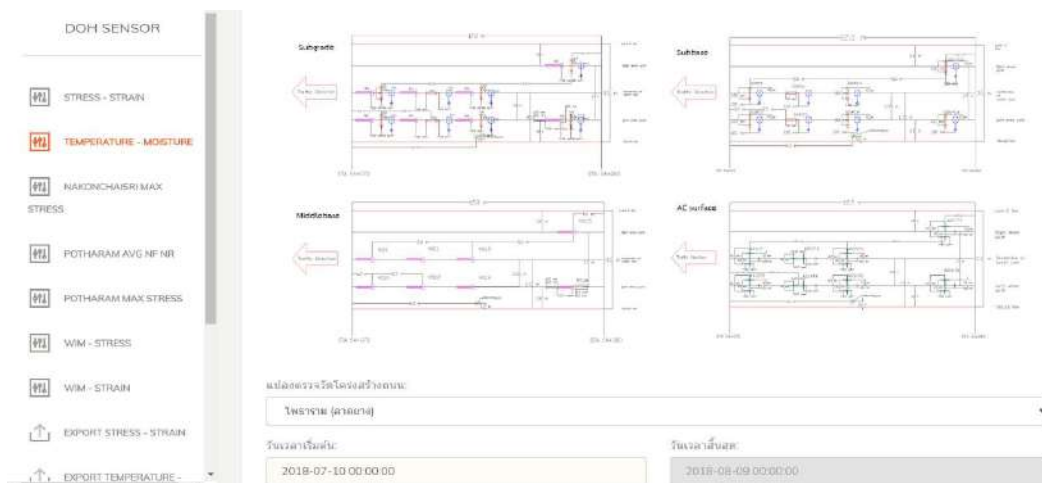
รูปที่ 6.16 การซ้อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงสรรพยา(ลาดยาง)

6.3 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) และ ความชื้น (Moisture Content)

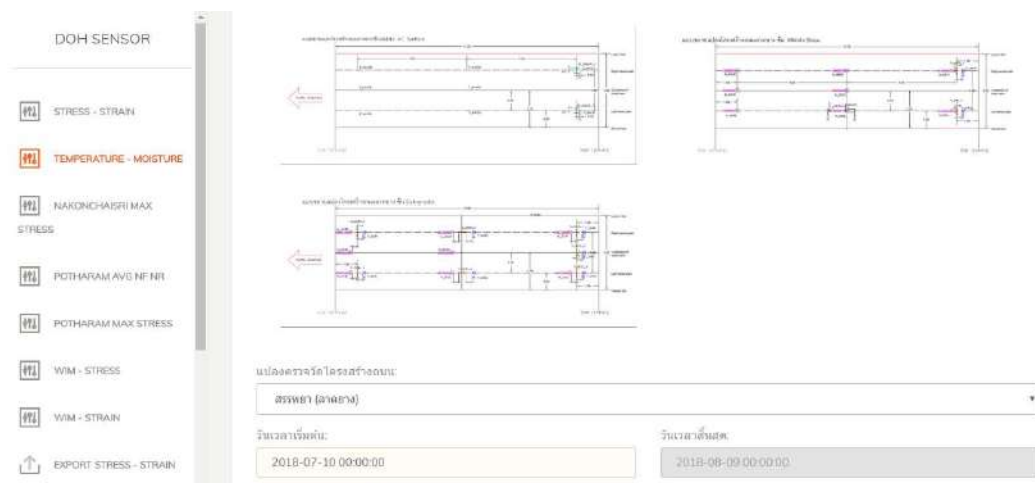
การแสดงผลข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) และ ความชื้น (Moisture Content) ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงได้ โดยเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแปลงภาพแผนผังการติดตั้งจะเปลี่ยนตามตำแหน่งแปลงที่เลือก เช่น กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก นครชัยศรี (คอนกรีต) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 6.17 กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก โพธาราม (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 6.18 และกรณีที่ผู้ใช้งานเลือก สรรพยา (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.17 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture

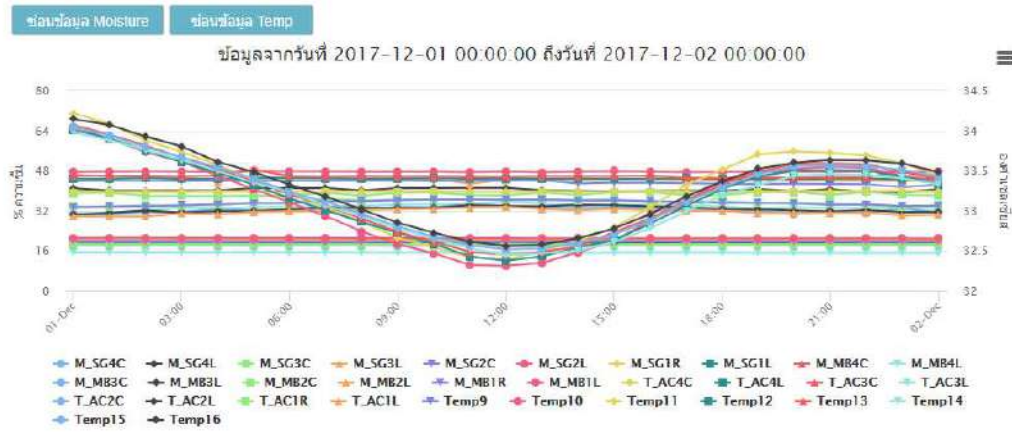


รูปที่ 6.18 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture

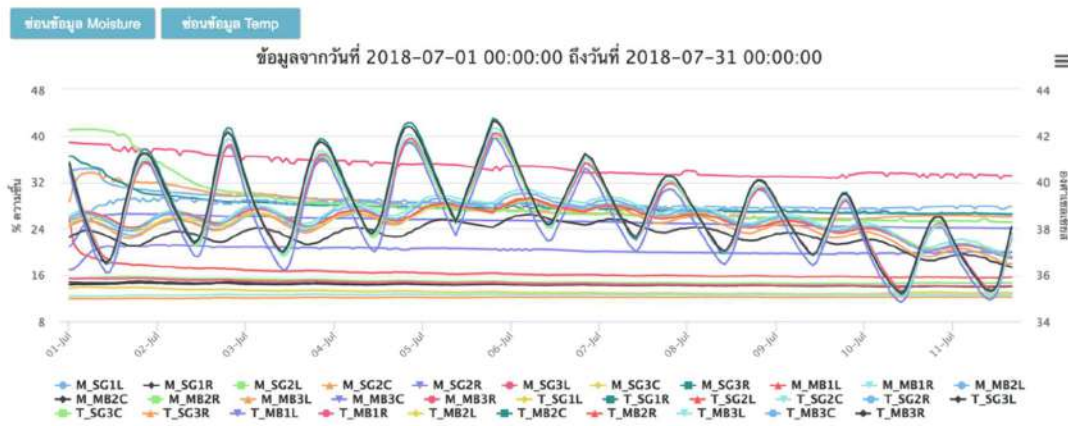


รูปที่ 6.19 การเลือกแปลงสุรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture

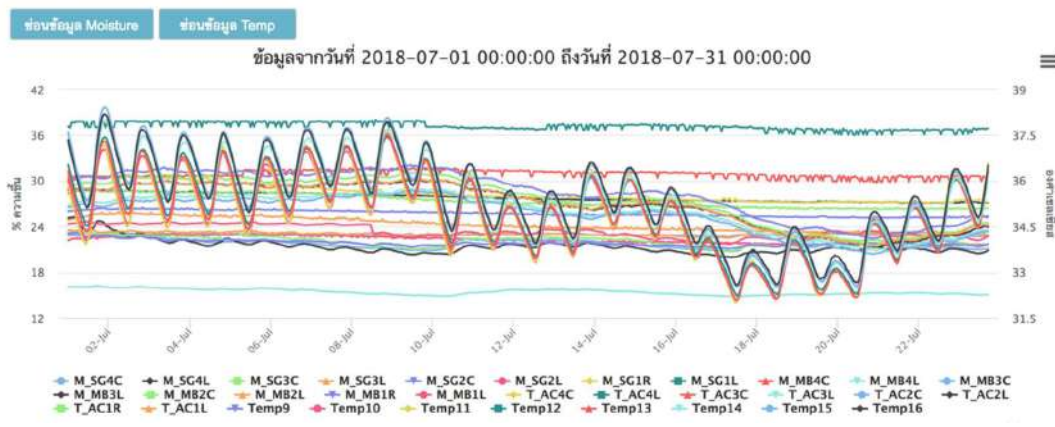
จากนั้นผู้ใช้งานต้องเลือกเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุด โดยเมื่อผู้ใช้งานเลือกเวลาเริ่มต้นระบบจะทำการระบุเวลาสิ้นสุดให้อัตโนมัติโดยเพิ่มเวลาจากเวลาเริ่มต้นไปอีก 1 วัน จากนั้นเมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มแสดงกราฟ ระบบจะแสดงกราฟข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) และ ความชื้น (Moisture Content) ดังแสดงในรูปที่ 6.20 ถึง รูปที่ 6.22



รูปที่ 6.20 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงนครชัยศรี (คอนกรีต)

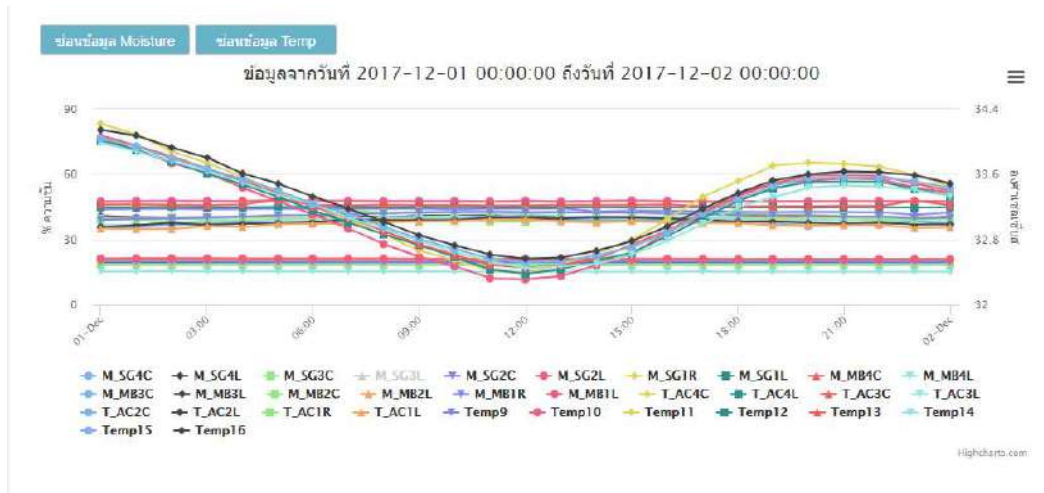


รูปที่ 6.21 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงโพธาราม (ลาดยาง)

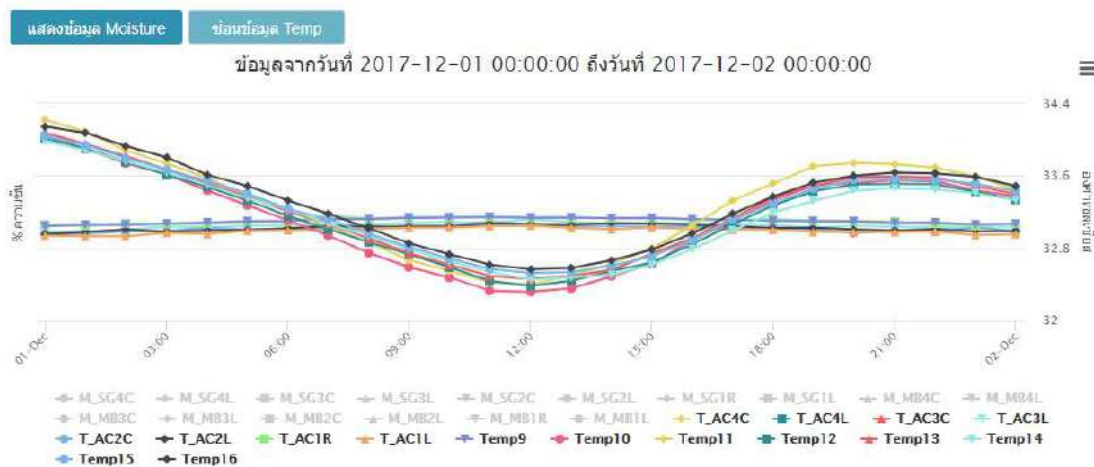


รูปที่ 6.22 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงสรรพยา (ลาดยาง)

ผู้ใช้งานสามารถซ่อนหรือแสดงข้อมูลที่ใช้ต้องการเห็นและไม่ต้องการเห็นโดยการกดปุ่มที่ค่าต้องการซ่อนหรือแสดงดังแสดงในรูปที่ 6.23 ถึง รูปที่ 6.24



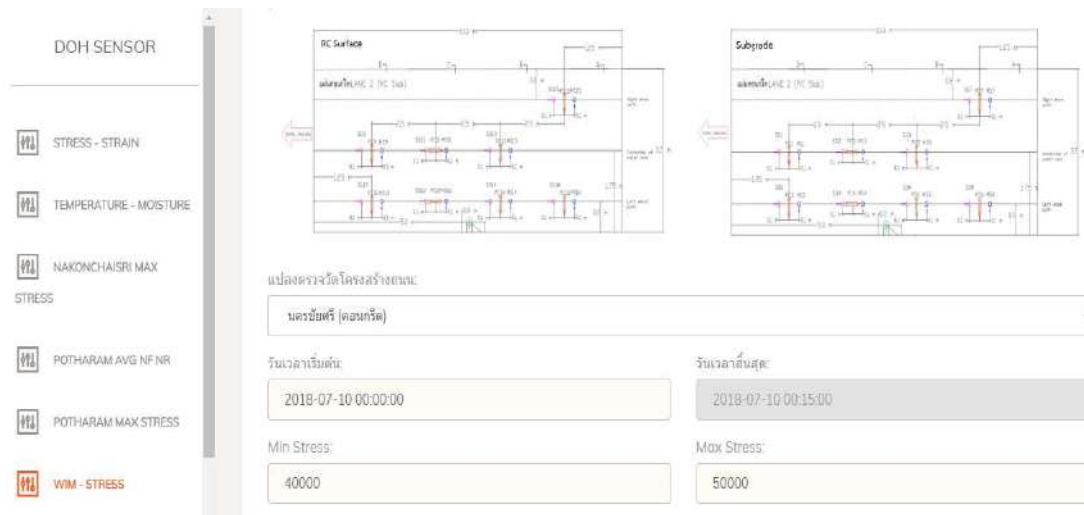
รูปที่ 6.23 การซ่อนข้อมูล Temperature-Moisture ของ M_SG3L



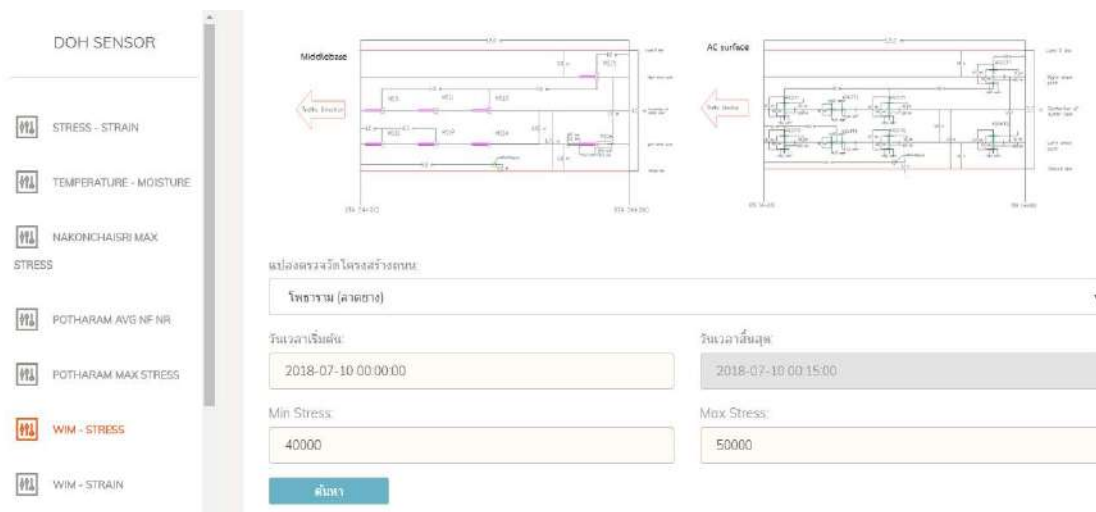
รูปที่ 6.24 การซ่อนข้อมูล Temperature-Moisture

6.4 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเค้น (Stress)

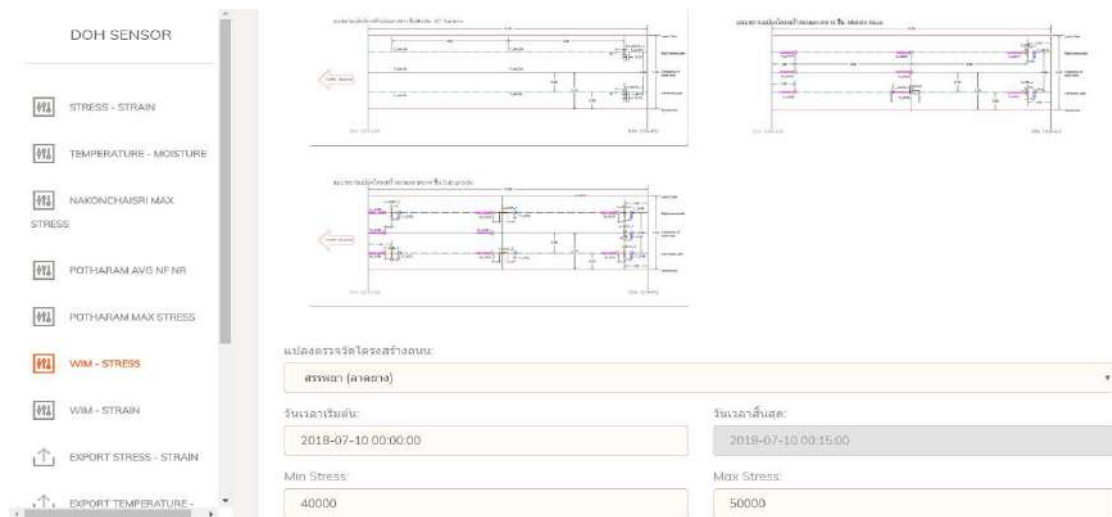
การแสดงผลข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเค้น (Stress) ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงได้ โดยเมื่อผู้ใช้งานเปลี่ยนตำแหน่งแปลงภาพแผนผังการติดตั้งจะเปลี่ยนตามตำแหน่งแปลงที่เลือก เช่น กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก นครชัยศรี (คอนกรีต) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 6.25 กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก โพธาราม (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 6.26 และกรณีที่ผู้ใช้งานเลือก สรรพพยา (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 6.27



รูปที่ 6.25 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress



รูปที่ 6.26 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาตยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress

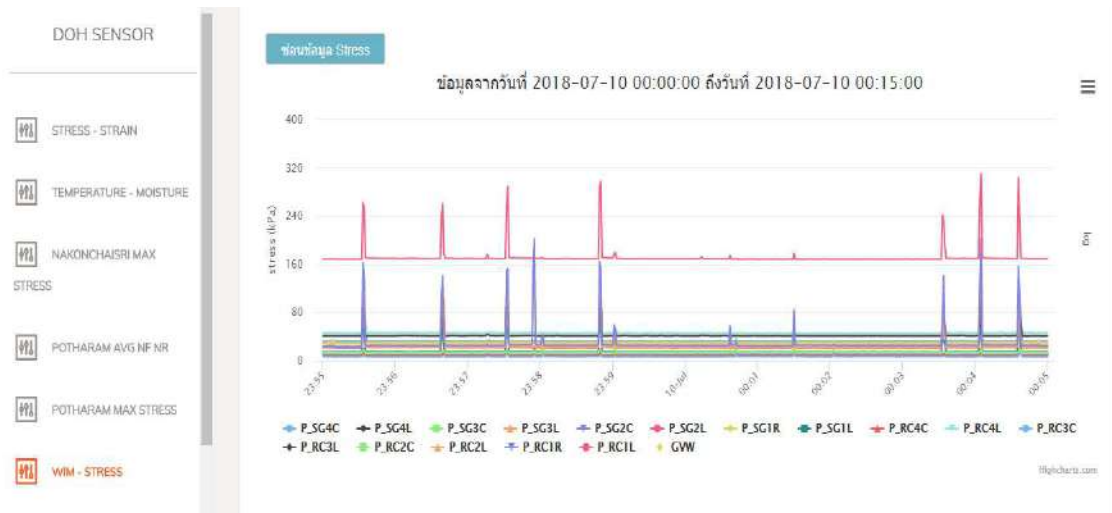


รูปที่ 6.27 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress

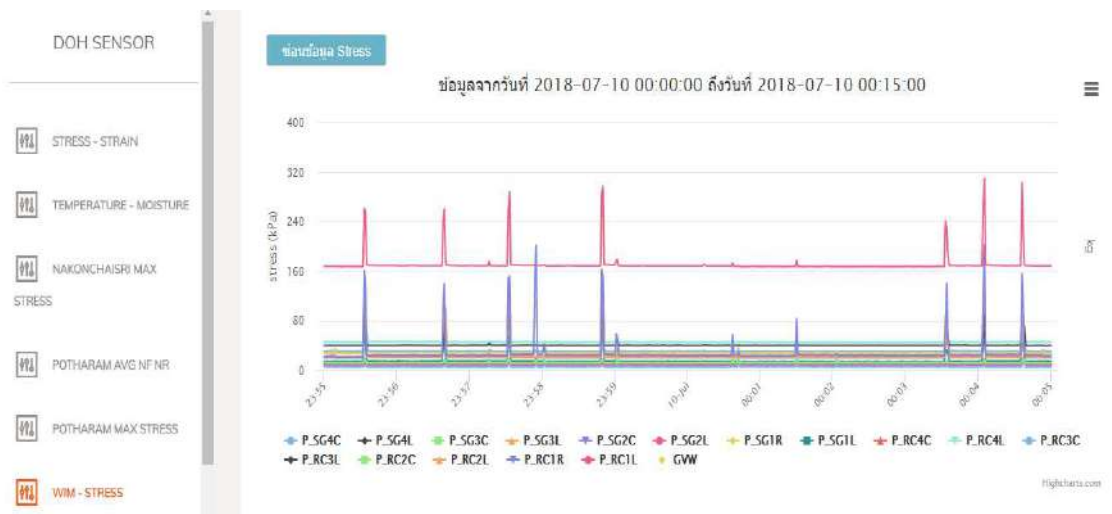
ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลง เวลา ค่าความเค้นต่ำที่สุด (Min Stress) และค่าความเค้นสูงที่สุด (Max Stress) ที่ต้องการดูข้อมูล เมื่อเลือกเวลาเริ่มต้นเวลาสิ้นสุดระบบจะทำการกำหนดเอง โดยการห่างออก จากเวลาเริ่มต้น 15 นาที จากนั้นกดปุ่มค้นหา ระบบจะแสดงข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเค้น (Stress) ที่มีค่าความเค้นต่ำที่สุด (Min Stress) และ ค่าความเค้นสูง ที่สุด (Max Stress) และวันเวลาตามที่ใช้ระบุในช่วงนั้นว่ามีกี่ครั้ง ในแต่ละครั้งผู้ใช้งานสามารถกดปุ่มแสดง กราฟของข้อมูลในเวลาขณะนั้นที่ต้องการดูข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 6.28 โดยเมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มแสดงกราฟแล้ว ระบบจะทำการแสดงข้อมูล WIM-Stress ดังแสดงใน นอกจากนี้ผู้ใช้งานสามารถซ่อนหรือแสดงข้อมูลบางอย่าง หรือทั้งหมดได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.29 ถึง รูปที่ 6.33

DOH SENSOR	วันที่เวลา	
	2018-07-10 00:00:00	แสดงกราฟ
	2018-07-10 00:00:01	แสดงกราฟ
	2018-07-10 00:00:02	แสดงกราฟ
	2018-07-10 00:00:03	แสดงกราฟ
	2018-07-10 00:00:04	แสดงกราฟ
	2018-07-10 00:00:05	แสดงกราฟ
	2018-07-10 00:00:06	แสดงกราฟ
	2018-07-10 00:00:07	แสดงกราฟ
	2018-07-10 00:00:08	แสดงกราฟ
	2018-07-10 00:00:09	แสดงกราฟ

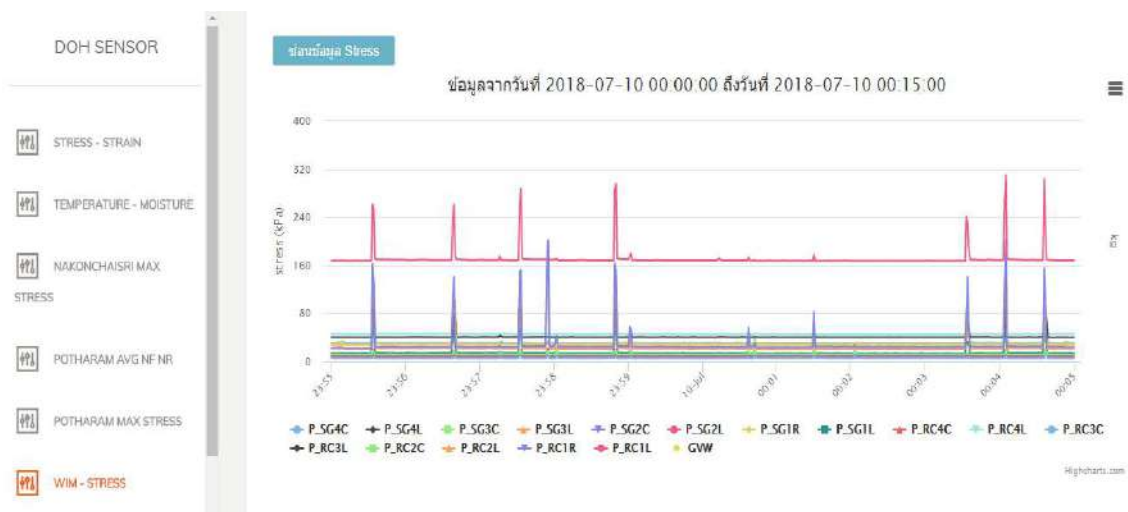
รูปที่ 6.28 ช่วงของข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress ตามที่ผู้ใช้งานเลือก



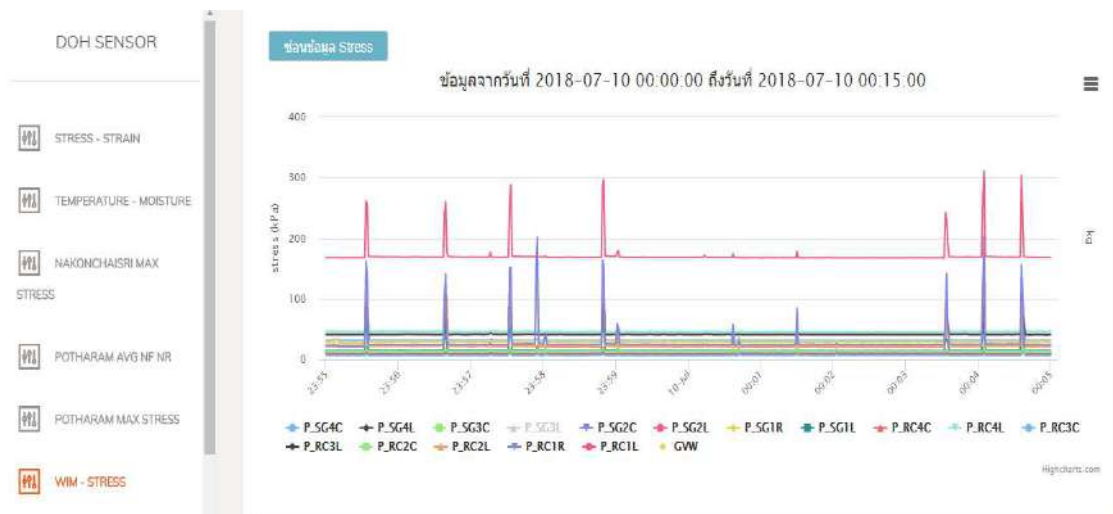
รูปที่ 6.29 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)



รูปที่ 6.30 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงโพธาราม(ลาดยาง)



รูปที่ 6.31 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงสรรพยา(ลาดยาง)



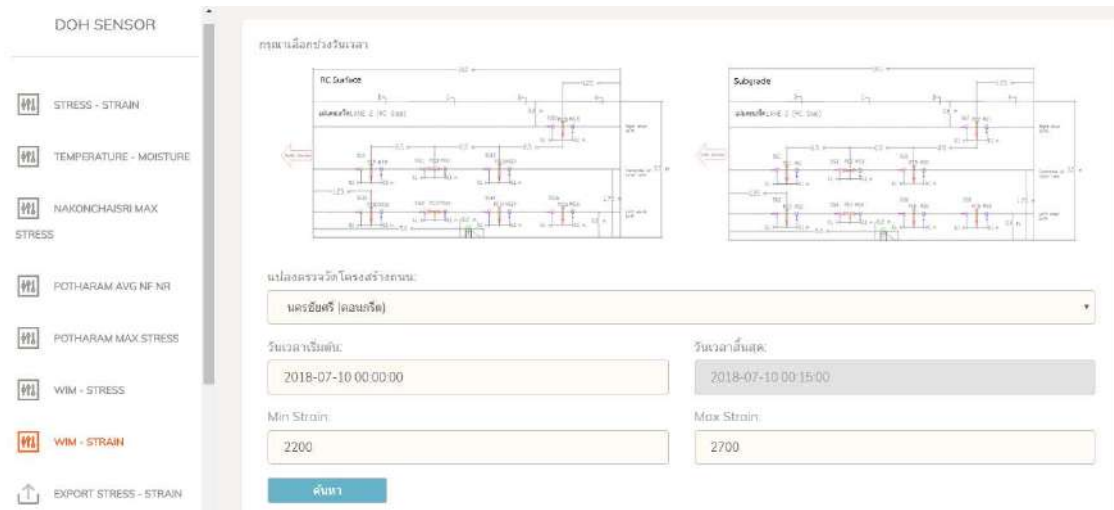
รูปที่ 6.32 การซ่อนข้อมูล Stress ของ P_SG3L ของกราฟ Traffic and Axle Load Data



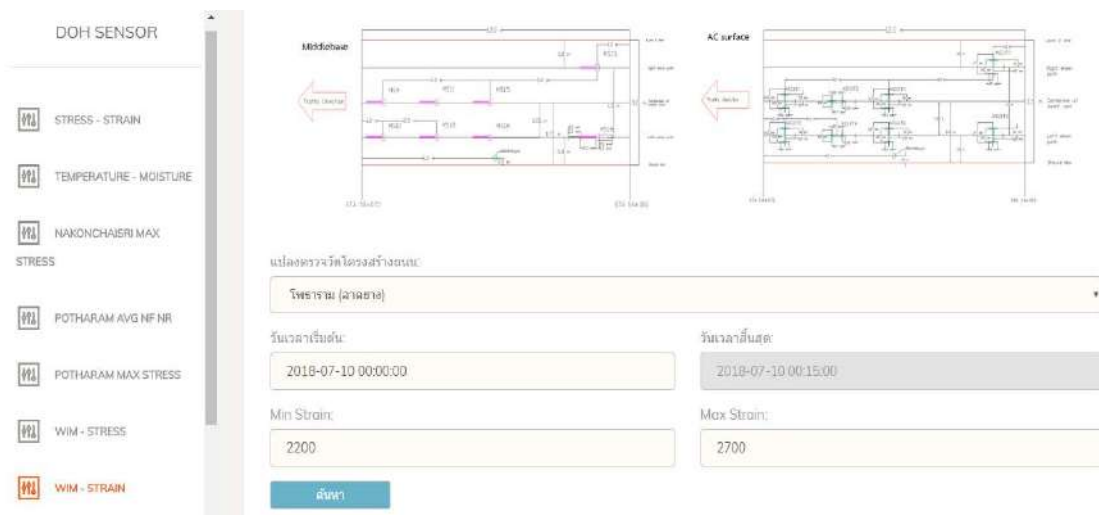
รูปที่ 6.33 การซ่อนข้อมูล Stress ทั้งหมดของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress

6.5 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลลา (Traffic and Axle Load Data)และ ความเครียด (Strain)

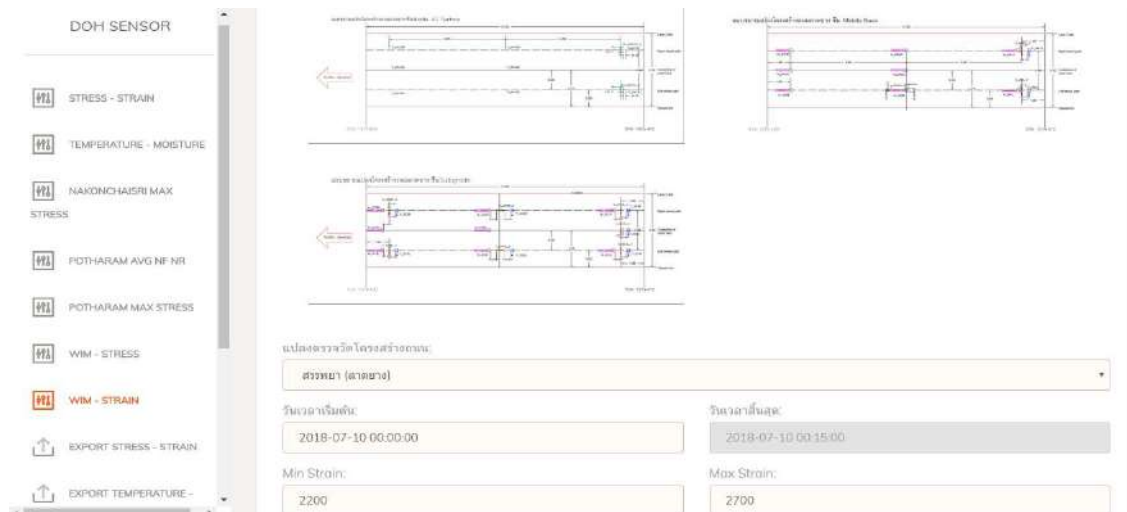
การแสดงผลข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเครียด (Strain) ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงได้ โดยเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแปลงภาพแผนผังการติดตั้งจะเปลี่ยนตามตำแหน่งแปลงที่เลือก เช่น กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก นครชัยศรี (คอนกรีต) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปแบบที่ 6.34 กรณีที่ผู้ใช้งานเลือก โพธาราม (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปแบบที่ 6.35 และกรณีที่ผู้ใช้งานเลือก สรรพยา (ลาดยาง) จะแสดงแผนผังการติดตั้งในรูปแบบที่ 6.36



รูปที่ 6.34 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain

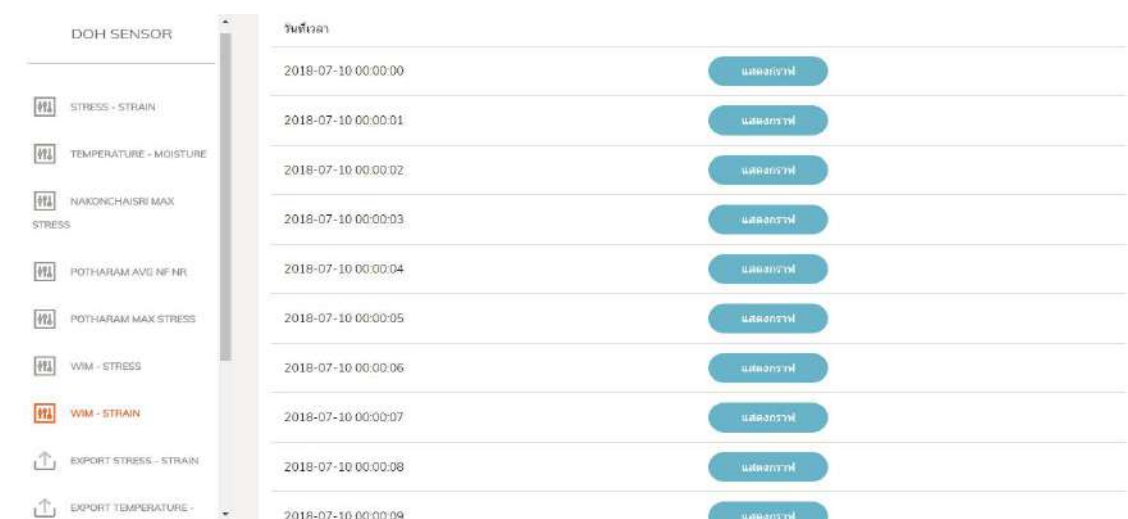


รูปที่ 6.35 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain

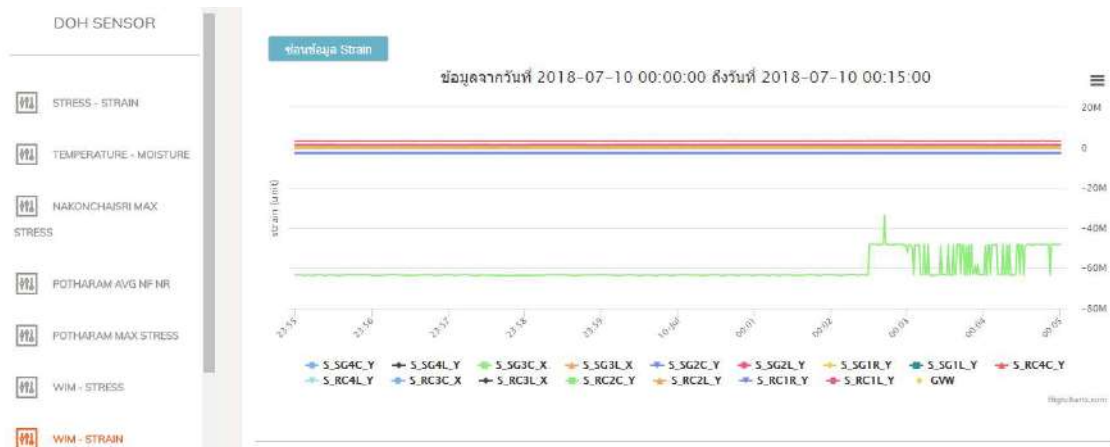


รูปที่ 6.36 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain

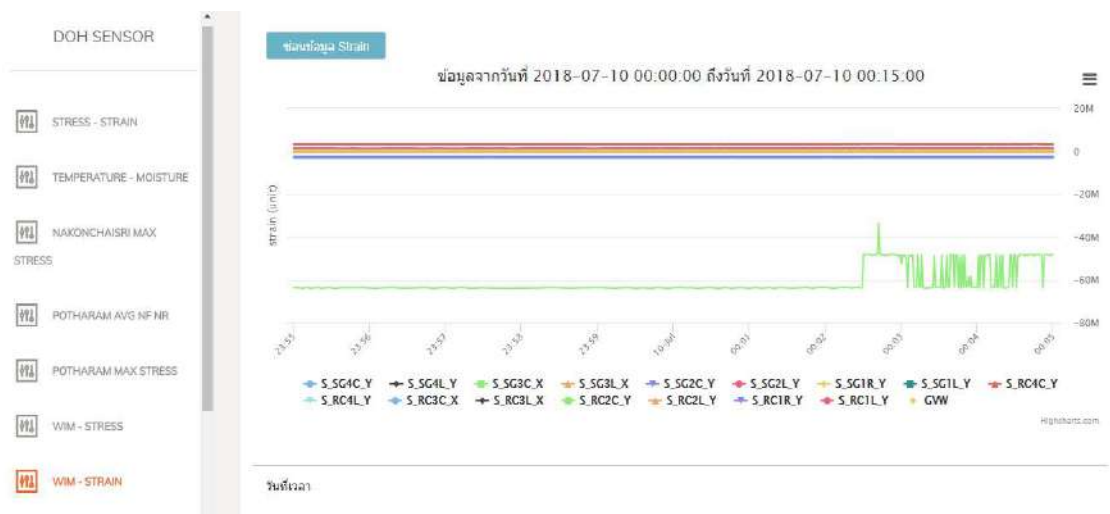
ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลง เวลา ค่าความเครียดต่ำที่สุด (Min Strain) และ ค่าความเครียดสูงที่สุด (Max Strain) ที่ต้องการดูข้อมูล เมื่อเลือกเวลาเริ่มต้นเวลาสิ้นสุดระบบจะทำการกำหนดเอง โดยการห่างออกจากเวลาเริ่มต้น 15 นาที จากนั้นกดปุ่มค้นหา ระบบจะทำการแสดงข้อมูลของน้ำหนักลงเพลลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเครียด (Strain) ที่มีค่าความเครียดต่ำที่สุด (Min Strain) และ ค่าความเครียดสูงที่สุด (Max Strain) และวันเวลาตามที่ใช้ระบุในช่วงนั้นว่ามีกี่ครั้ง ในแต่ละครั้งสามารถกดปุ่มแสดงกราฟของข้อมูลในเวลาขณะนั้นที่ต้องการดูข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 6.37 โดยเมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มแสดงกราฟแล้วระบบจะทำการแสดงข้อมูล WIM-Stress ดังแสดงในรูปที่ 6.38 ถึง รูปที่ 6.40 นอกจากนี้ผู้ใช้งานสามารถซ่อนหรือแสดงข้อมูลบางอย่างหรือทั้งหมดได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.41 ถึง รูปที่ 6.42



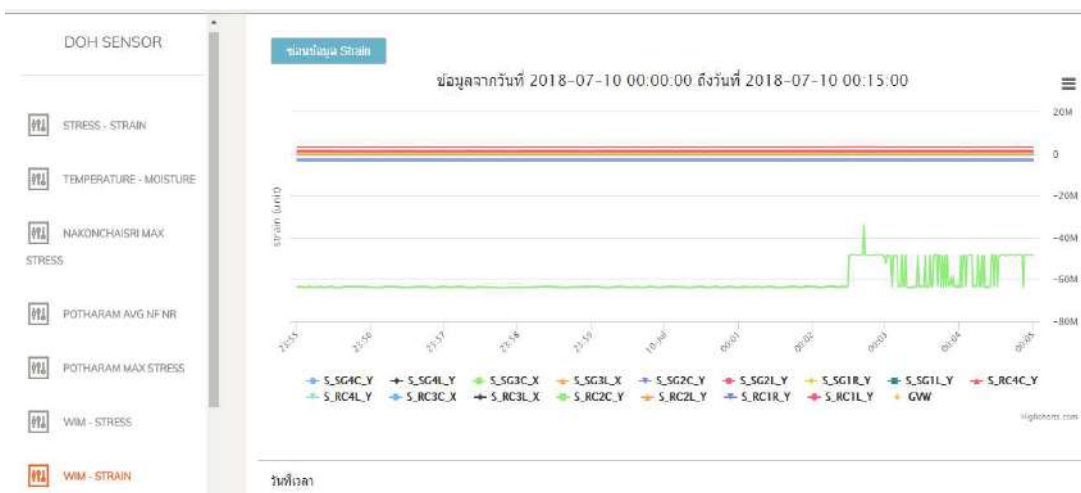
รูปที่ 6.37 ช่วงของข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain ตามที่ผู้ใช้งานเลือก



รูปที่ 6.38 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงนครชัยศรี (คอนกรีต)



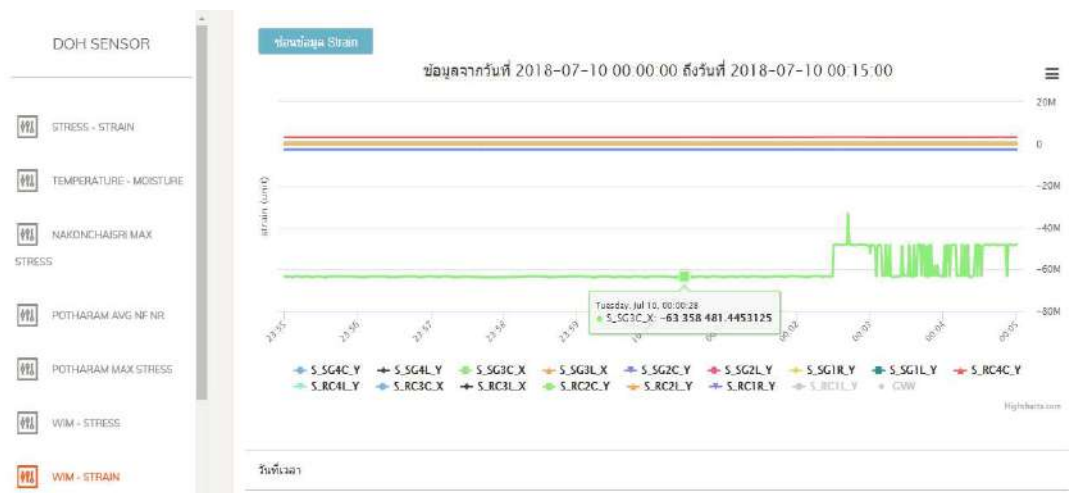
รูปที่ 6.39 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงโพธาราม(ลาดยาง)



รูปที่ 6.40 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงสรรพพยา(ลาดยาง)



รูปที่ 6.41 การซ่อนข้อมูล Strain ของ S_SG4C_Y ของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain



รูปที่ 6.42 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมดของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain

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

ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงและเวลา จากนั้นกดปุ่ม Export CSV ระบบจะทำการดาวน์โหลดไฟล์ CSV ซึ่งสามารถใช้ Microsoft Excel ในการเปิดได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.43

รูปที่ 6.43 การ Export ข้อมูล Stress-Strain

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

ผู้ใช้งานสามารถเลือกตำแหน่งแปลงและเวลา จากนั้นกดปุ่ม Export CSV ระบบจะทำการดาวน์โหลดไฟล์ CSV ซึ่งสามารถใช้ Microsoft Excel ในการเปิดได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.44

รูปที่ 6.44 การ Export ข้อมูล Temperature-Moisture

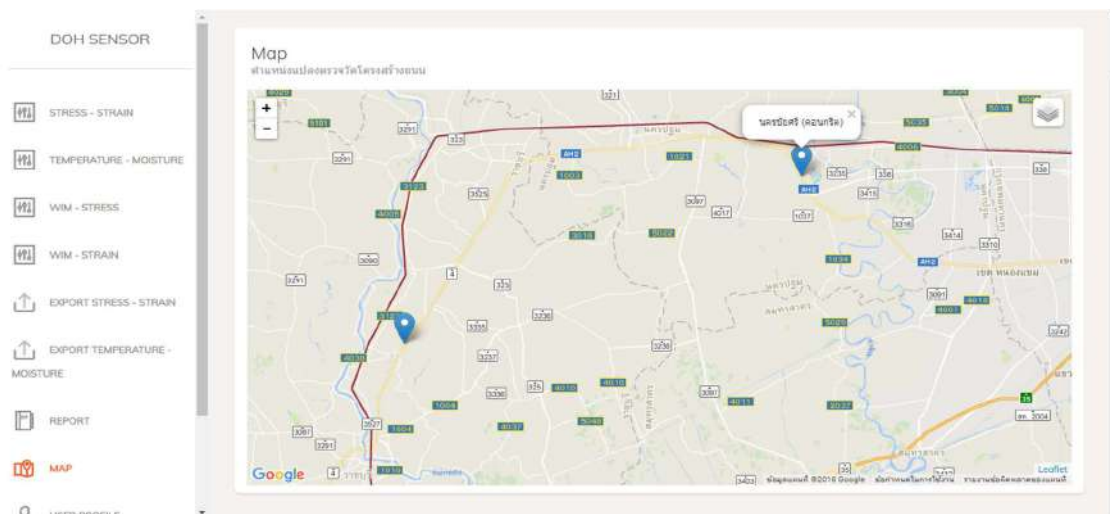
6.8 รายงานสรุป (Report)

การดูรายงานสรุป (Report) ให้ผู้ใช้งานจะต้องเลือกตำแหน่งแปลงและเวลา โดยผู้ใช้งานสามารถเรียกดูสรุปทั้งแบบรายวันหรือรายเดือนก็ได้ จากนั้นเมื่อผู้ใช้งานกดปุ่ม Export ระบบจะทำการดาวน์โหลดไฟล์ CSV ซึ่งสามารถใช้ Microsoft Excel ในการเปิดได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.45

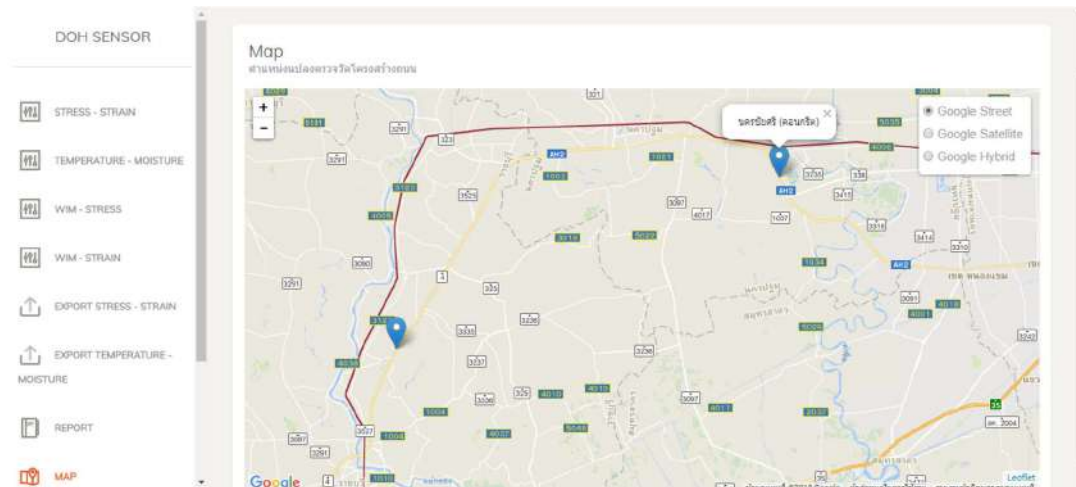
รูปที่ 6.45 รายงานสรุป (Report)

6.9 แผนที่ (Map)

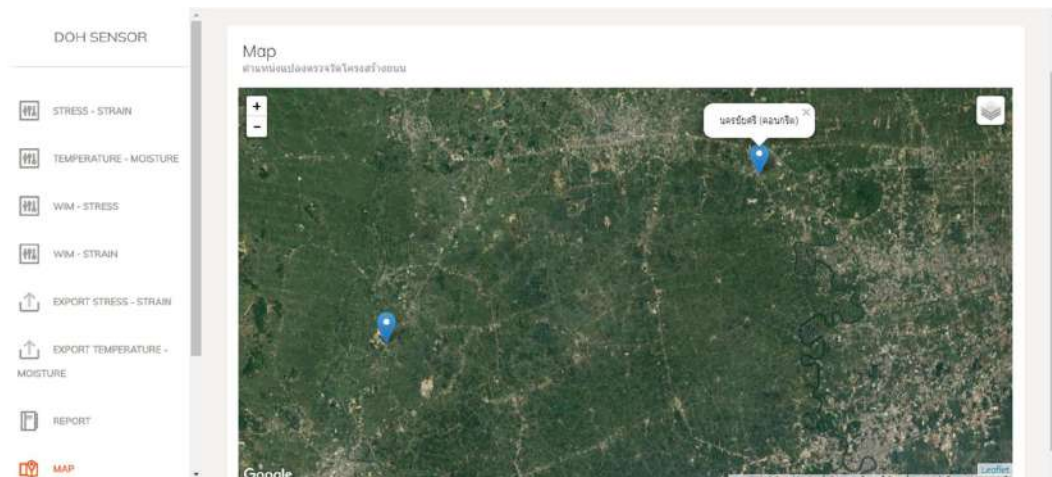
การเปิดแผนที่ (Map) ผู้ใช้งานสามารถเปิดดูตำแหน่งของแต่ละเส้นทางโดยจะโชว์รายละเอียดต่างๆ ได้ที่ Map ดังแสดงในรูปที่ 6.46 โดยผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนพื้นหลังการแสดงผลได้มีให้เลือก 3 ภาพแบบคือ Google Street และ Google Satellite และ Google Hybrid ดังแสดงในรูปที่ 6.47 ถึง รูปที่ 6.49



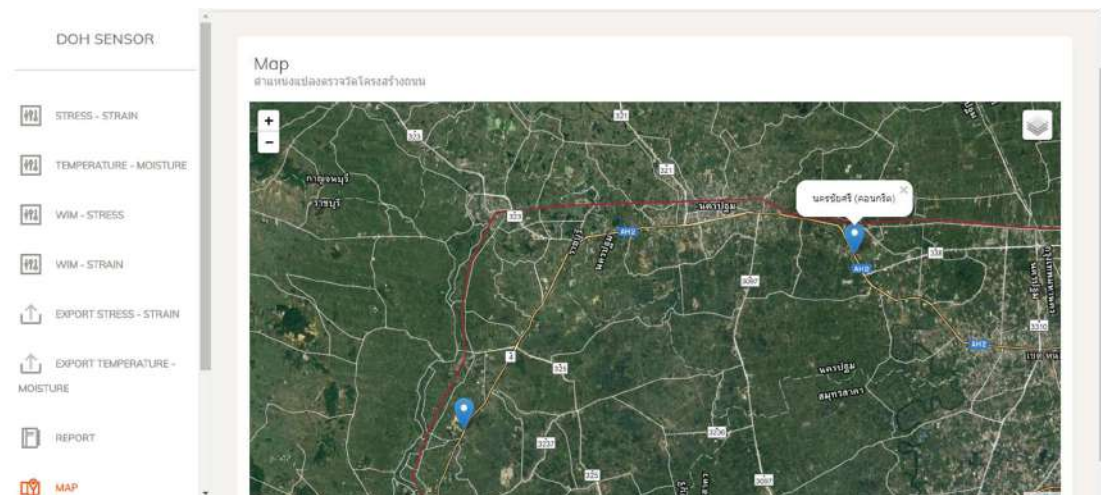
รูปที่ 6.46 แผนที่ (Map)



รูปที่ 6.47 แผนที่แบบ Google Street



รูปที่ 6.48 แผนที่แบบ Google Satellite



รูปที่ 6.49 แผนที่แบบ Google Hybrid

6.10 ระบบรักษาความปลอดภัยโดยใช้รหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password)

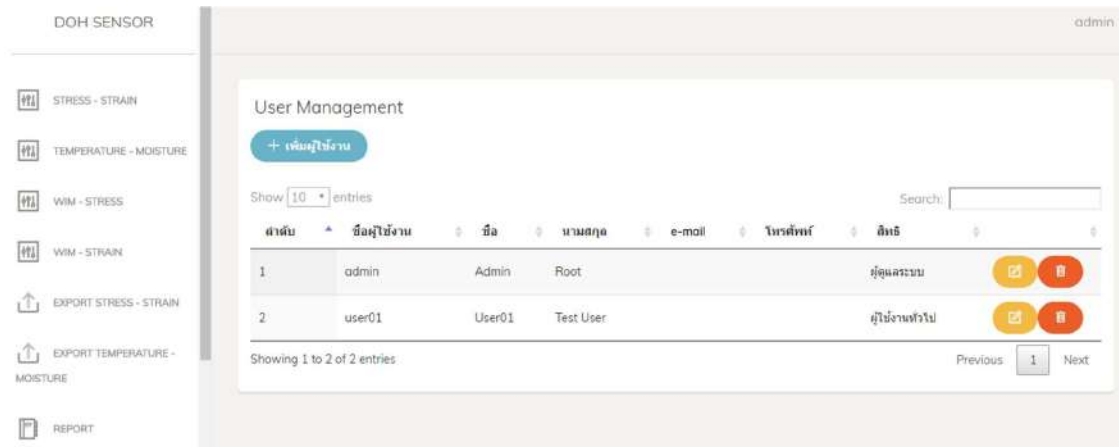
ผู้ใช้งานสามารถสร้างรหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password) เพื่อจำกัดสิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูล โดยผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนรหัสผ่านและข้อมูลส่วนตัวได้ด้วยตนเอง เมื่อแก้ไขแล้วเสร็จผู้ใช้งานต้องกดปุ่มบันทึกดังแสดงในรูปที่ 6.50

The screenshot shows a web application interface for a 'DOH SENSOR'. On the left is a sidebar menu with options: STRESS - STRAIN, TEMPERATURE - MOISTURE, WIM - STRESS, WIM - STRAIN, EXPORT STRESS - STRAIN, EXPORT TEMPERATURE - MOISTURE, REPORT, and MAP. The main content area is titled 'Edit Profile'. It contains several input fields: 'ชื่อผู้ใช้งาน' (Username) with 'admin', 'รหัสผ่าน' (Password), 'ยืนยันรหัสผ่าน' (Confirm Password), 'อีเมล' (Email) with 'Admin', and 'ตำแหน่ง' (Position) with 'Admin'. There is a dropdown menu for 'เลือกผู้ใช้งาน' (Select User) which is currently open, showing a list of roles including 'ผู้ดูแลระบบ' (System Administrator) and 'ผู้ใช้งานทั่วไป' (General User). At the bottom of the form are two buttons: 'บันทึก' (Save) in blue and 'ยกเลิก' (Cancel) in orange.

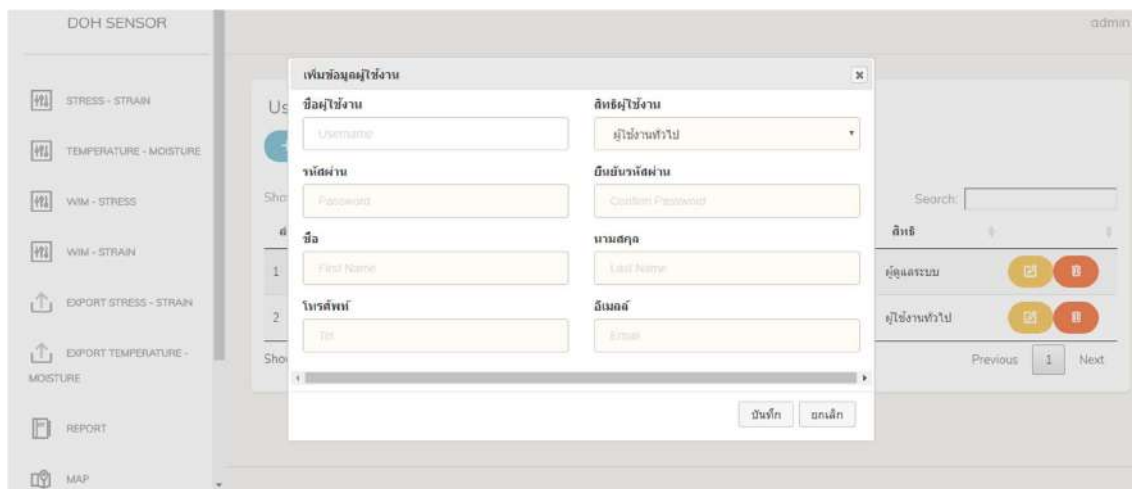
รูปที่ 6.50 ระบบรักษาความปลอดภัยโดยใช้รหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password)

6.11 ระบบบริหารบัญชีผู้ใช้งาน (User Account Management)

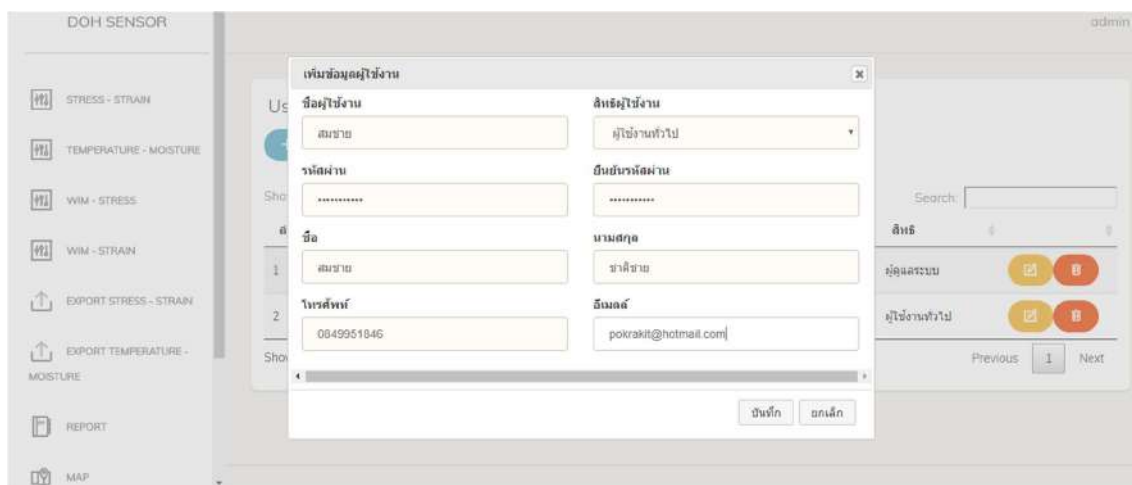
ผู้ใช้งานสามารถจัดการกับข้อมูลสมาชิกได้ เช่น เพิ่มสมาชิก แก้ไขข้อมูลส่วนตัว ลบสมาชิก ดังแสดงในรูปที่ 6.51 เมื่อต้องการเพิ่มผู้ใช้งาน ผู้ใช้งานสามารถกดปุ่มเพิ่มผู้ใช้งาน จากนั้นระบบจะแสดงหน้าต่างขึ้นมาให้กรอกข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 6.52 เมื่อผู้ใช้งานกรอกเสร็จแล้วให้กดปุ่ม บันทึก เป็นอันเสร็จขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 6.53 การเพิ่มผู้ใช้งานดังแสดงใน เมื่อเพิ่มผู้ใช้งานสำเร็จระบบจะมีรายชื่อผู้ใช้งานที่เพิ่มเข้ามาเพิ่มดังแสดงในรูปที่ 6.54 เมื่อต้องการแก้ไขข้อมูลผู้ใช้งานกดปุ่มแก้ไขข้อมูลผู้ใช้งานดังแสดงในรูปที่ 6.55 การลบข้อมูลผู้ใช้งานทำได้โดยการกดปุ่มลบข้อมูลผู้ใช้งาน จากนั้นระบบจะให้กดยืนยันการลบข้อมูลผู้ใช้งานดังแสดงในรูปที่ 6.56



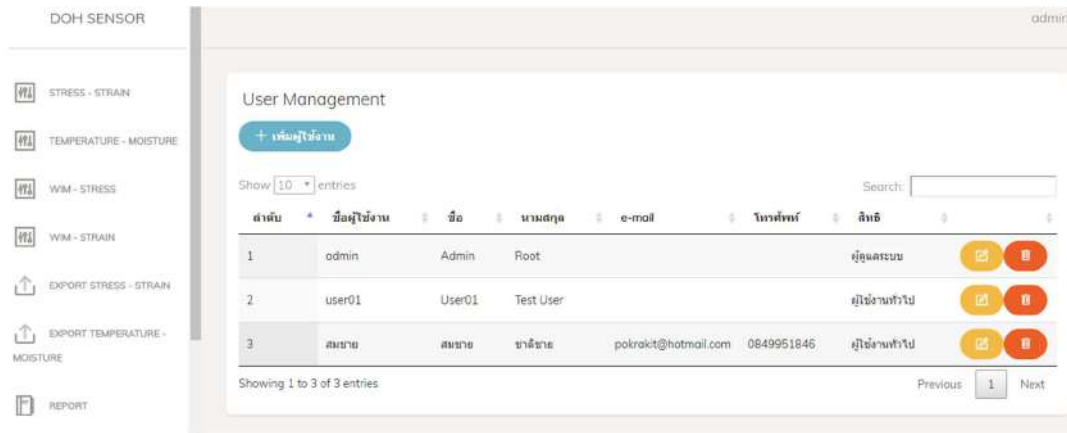
รูปที่ 6.51 User Management



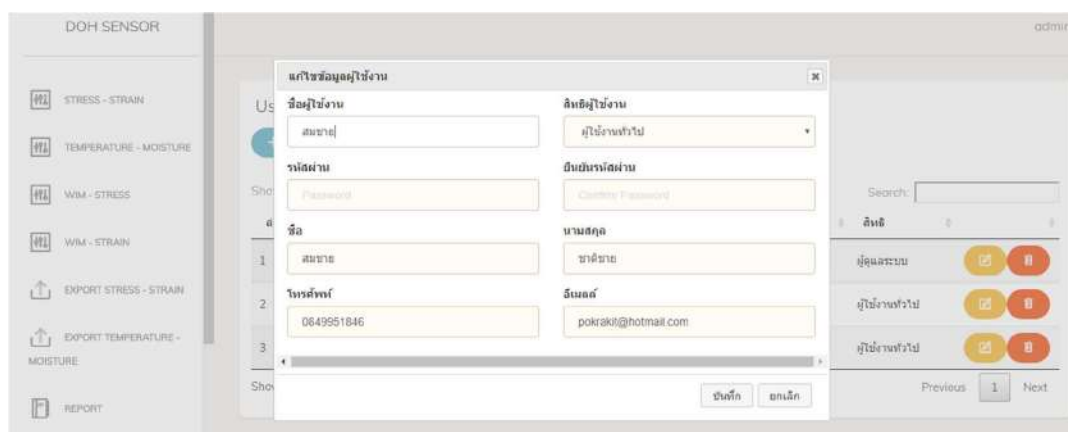
รูปที่ 6.52 เพิ่มผู้ใช้งาน



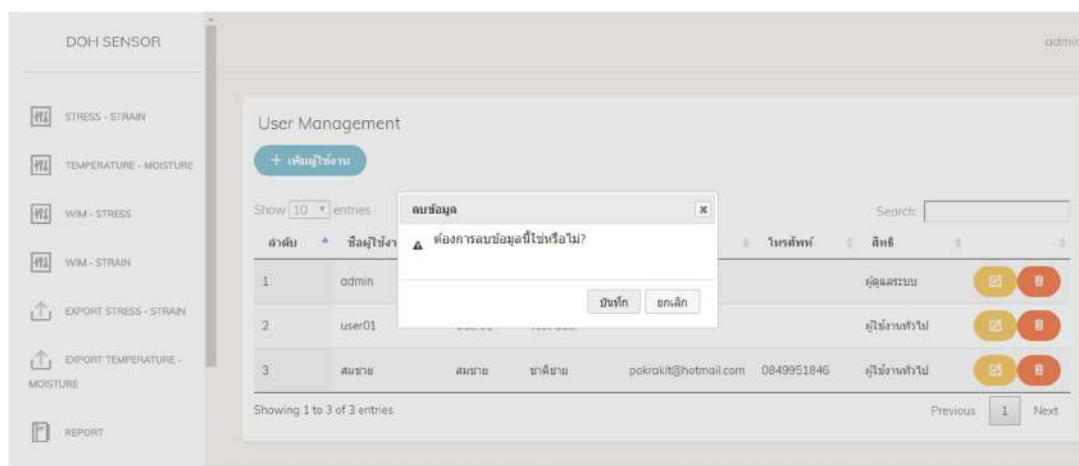
รูปที่ 6.53 กดปุ่มบันทึกเพื่อเพิ่มผู้ใช้งาน



รูปที่ 6.54 รายชื่อผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.55 การแก้ไขผู้ใช้งาน



รูปที่ 6.56 ข้อมูลผู้ใช้งานถูกลบ

7. การทดสอบรถบรรทุกไทยในสภาพควบคุมน้ำหนักลงเพลาลำ

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบรถบรรทุกไทยในสภาพควบคุมน้ำหนักลงเพลาลำตามประกาศพิกัดน้ำหนักบรรทุกซึ่งแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลาลำ ได้แก่ เพลาลำเดี่ยว-ยางเดี่ยว เพลาลำเดี่ยว-ยางคู่ เพลาลำคู่-ยางคู่ และสามเพลาลำ-ยางคู่ โดยการนำรถบรรทุกไปวิ่งทดสอบบนแปลงโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต โดยมีกำหนดการทดสอบดังต่อไปนี้

1) วันที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2561

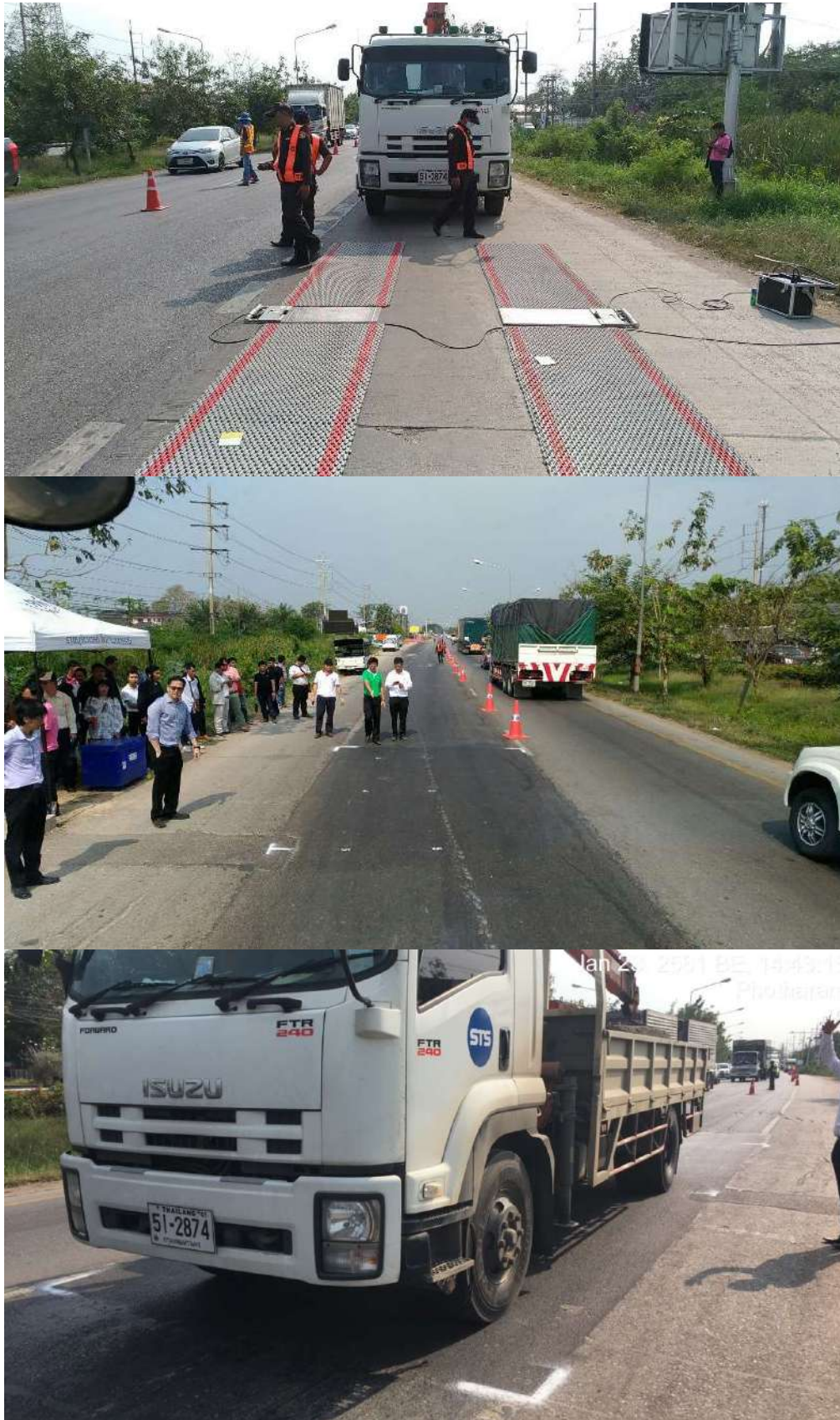
สอบเทียบ (Calibration) ระหว่างข้อมูลน้ำหนักลงเพลาลำกับข้อมูลผลการตรวจวัดที่ได้จากแปลงทดสอบถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี และแปลงทดสอบถนนคอนกรีต อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม โดยใช้รถ 2 เพลาลำ 6 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุก 15 ตัน (ตรวจวัดแรงดันของลมยางก่อนการทดสอบ) ดังแสดงในรูปที่ 7.1 โดยแบ่งกรณีการทดสอบดังต่อไปนี้

- ความเร็วทดสอบ: หดุนิ่ง, ไกล่หดุนิ่ง, 40 กม./ชม., 60 กม./ชม. และ 70-80 กม./ชม.
- น้ำหนักบรรทุกเพลาลำหลังในการทดสอบ: 5.5 ตัน/เพลาลำ, 8 ตัน/เพลาลำ และ 11 ตัน/เพลาลำ

2) วันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2561

สอบเทียบ (Calibration) ระหว่างข้อมูลน้ำหนักลงเพลาลำกับข้อมูลผลการตรวจวัดที่ได้จากแปลงทดสอบถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี และแปลงทดสอบถนนคอนกรีต อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม โดยใช้รถกึ่งพ่วง 6 เพลาลำ 22 ล้อ (Semi-Trailer) พิกัดน้ำหนักบรรทุก 50.5 ตัน (ตรวจวัดแรงดันของลมยางก่อนการทดสอบ) ดังแสดงในรูปที่ 7.2 โดยแบ่งกรณีการทดสอบดังต่อไปนี้

- ความเร็วทดสอบ: หดุนิ่ง, ไกล่หดุนิ่ง, 40 กม./ชม., 60 กม./ชม. และ 70-80 กม./ชม.
- น้ำหนักบรรทุกของเพลาลำคู่ในการทดสอบ: 10 ตัน/เพลาลำ
- น้ำหนักบรรทุกของสามเพลาลำในการทดสอบ: 8.5 ตัน/เพลาลำ



รูปที่ 7.1 การทดสอบรถบรรทุก 2 เพลา 6 ล้อ พักน้ำหนักบรรทุก 15 ตัน ในวันที่ 23 ม.ค. 2561



รูปที่ 7.2 การทดสอบรถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุก 50.5 ตัน ในวันที่ 24 ม.ค. 2561

การสอบเทียบ (Calibration) ระหว่างข้อมูลน้ำหนักลงเพลากับข้อมูลผลการตรวจวัดที่ได้จากแปลงทดสอบ สามารถสรุปกรณีการทดสอบ โดยใช้รถ 2 เพลา 6 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุก 15 ตัน ดังแสดงในตารางที่ 7.1 และ กรณีการทดสอบทั้งหมดโดยใช้รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ (Semi-Trailer) พิกัดน้ำหนักบรรทุก 50.5 ตัน ดังแสดงในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.1 กรณีการทดสอบทั้งหมดโดยใช้รถ 2 เพลลา 6 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุกทุก 15 ตัน

ลำดับ	ประเภทรถ	ความเร็ว	น้ำหนักเพลาลงจริง (ตัน)		
			นน. ล้อซ้าย	นน. ล้อขวา	นน. เพลารวม
1	6 ล้อ	หยุดนิ่ง	2.7	2.85	5.55
2	6 ล้อ	เกือบหยุดนิ่ง	2.7	2.85	5.55
3	6 ล้อ	80 กม./ชม.	2.7	2.85	5.55
4	6 ล้อ	60 กม./ชม.	2.7	2.85	5.55
5	6 ล้อ	40 กม./ชม.	2.7	2.85	5.55
6	6 ล้อ	หยุดนิ่ง	3.75	4.3	8.05
7	6 ล้อ	เกือบหยุดนิ่ง	3.75	4.3	8.05
8	6 ล้อ	80 กม./ชม.	4.05	3.95	8
9	6 ล้อ	60 กม./ชม.	4.05	3.95	8
10	6 ล้อ	40 กม./ชม.	4.05	3.95	8
11	6 ล้อ	หยุดนิ่ง	4.8	6.1	10.9
12	6 ล้อ	เกือบหยุดนิ่ง	4.8	6.1	10.9
13	6 ล้อ	80 กม./ชม.	5.8	5.2	11
14	6 ล้อ	60 กม./ชม.	5.8	5.2	11
15	6 ล้อ	40 กม./ชม.	5.8	5.2	11

ตารางที่ 7.2 กรณีการทดสอบทั้งหมดโดยใช้รถกึ่งพ่วง 6 เพลลา 22 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุกทุก 50.5 ตัน

ลำดับ	ประเภทรถ	ความเร็ว
1	กึ่งพ่วง	หยุดนิ่ง
2	กึ่งพ่วง	เกือบหยุดนิ่ง
3	กึ่งพ่วง	60 กม./ชม.
4	กึ่งพ่วง	40 กม./ชม.
5	กึ่งพ่วง	20 กม./ชม.

เพลลา	น้ำหนักเพลาลงจริง (ตัน)			นน.รถรวม (ตัน)
	นน. ล้อซ้าย	นน. ล้อขวา	นน. เพลารวม	
1	2.75	2.70	5.45	43.40
2	5.00	4.70	9.70	
3	4.90	4.40	9.30	
4	3.40	2.95	6.35	
5	3.25	3.35	6.60	
6	3.10	2.90	6.00	

3) วันที่ 5, 6 และ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

สอบเทียบ (Calibration) ระหว่างข้อมูลน้ำหนักลงเพลากับข้อมูลผลการตรวจวัดที่ได้จากแปลงทดสอบ ถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท โดยใช้ รถบรรทุก 6 ล้อ และรถบรรทุกกึ่งพ่วง 22 ล้อ โดยแบ่งกรณีการทดสอบดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 รายละเอียดการทดสอบในสนาม

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



รูปที่ 7.3 การทดสอบรถบรรทุก 6 ล้อ และรถบรรทุกกึ่งพ่วง 22 ล้อ ในวันที่ 5, 6 และ 17 กรกฎาคม 2561

7.1 การวิเคราะห์ผลการสอบเทียบที่แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

7.1.1 ผลการสอบเทียบโดย รถ 2 เพลา 6 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุก 15 ตัน

จากการสอบเทียบ (Calibration) ระหว่างข้อมูลน้ำหนักลงเพลากับข้อมูลผลการตรวจวัดความเค้นและความเครียดในวัสดุชั้นทางในแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง ซึ่งดำเนินการในวันที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2561 ทดสอบโดยใช้ รถ 2 เพลา 6 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุก 15 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 7.4 โดยแบ่งกรณีการทดสอบดังต่อไปนี้

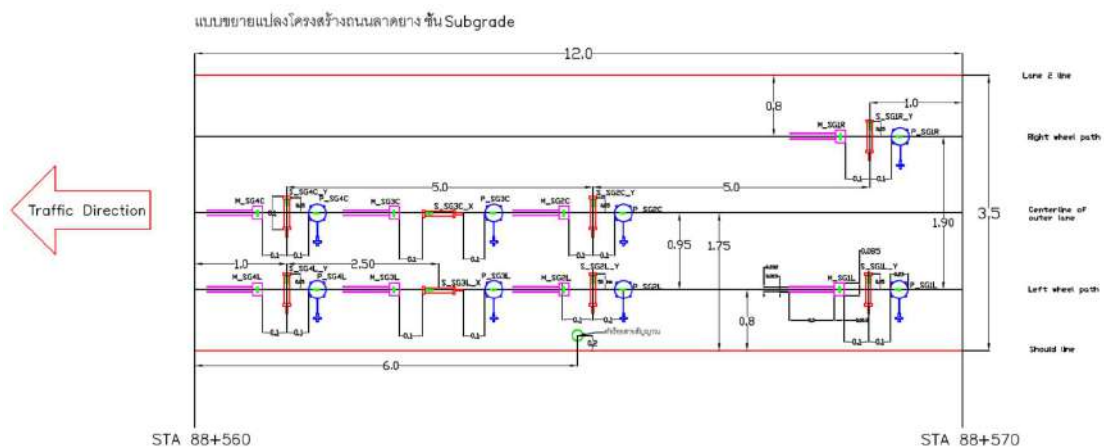
- ความเร็วทดสอบ: หยุดนิ่ง, ไกล่หยุดนิ่ง, 40 กม./ชม., 60 กม./ชม. และ 80 กม./ชม.
- น้ำหนักบรรทุกเพลาลงในการทดสอบ: 5.5 ตัน/เพลา, 8 ตัน/เพลา และ 11 ตัน/เพลา



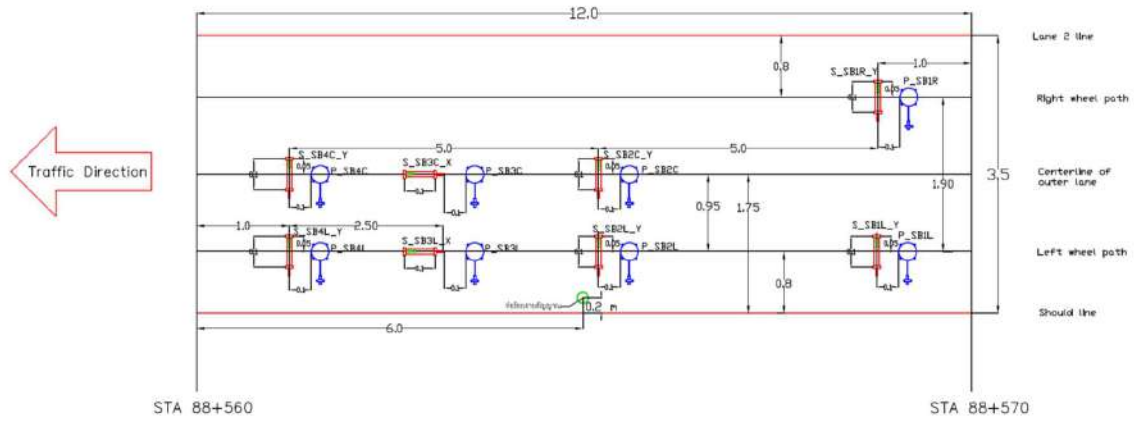
รูปที่ 7.4 รถบรรทุกซึ่งใช้ในการทดสอบรถ 2 เพลา 6 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุก 15 ตัน

➤ ความเค้นและความเครียดในกรณีรถหยุดนิ่ง

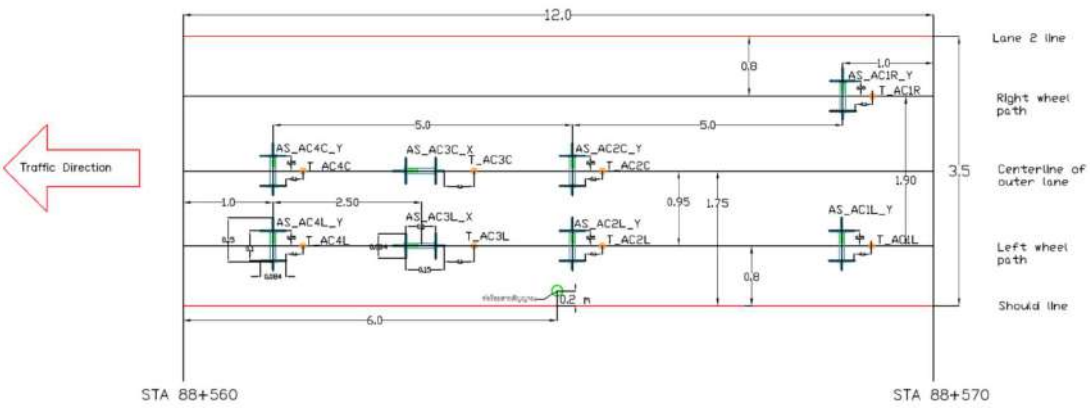
ในที่นี้จะได้แสดงตัวอย่างผลการทดสอบกรณีรถหยุดนิ่ง สำหรับกรณีน้ำหนักทดสอบลงเพลาหลัง 5.5 ตัน และ 11 ตัน โดยตำแหน่งของเพลาหลังอยู่ที่ ตำแหน่ง S2 สำหรับกรณีน้ำหนัก 5.5 ตัน และ ตำแหน่ง 3 สำหรับกรณีน้ำหนัก 11 ตัน รูปที่ 7.5 แสดงตำแหน่งอุปกรณ์วัด ตัวอย่างลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเค้นและความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับกรณีน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 7.6



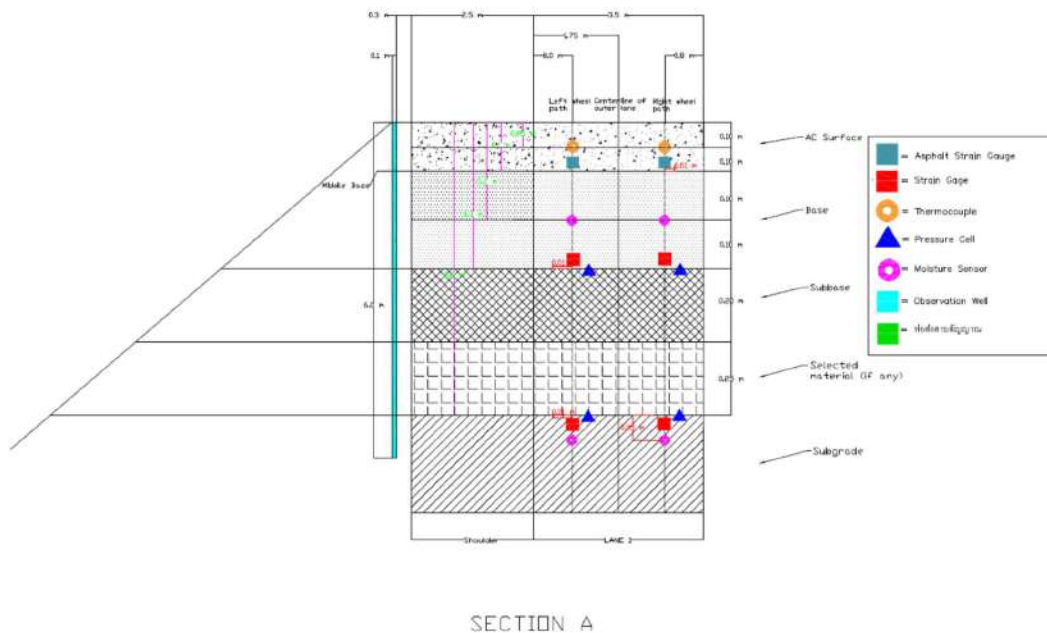
แบบขยายแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง ชั้น Subbase



แบบขยายแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง ชั้น Under AC Surface



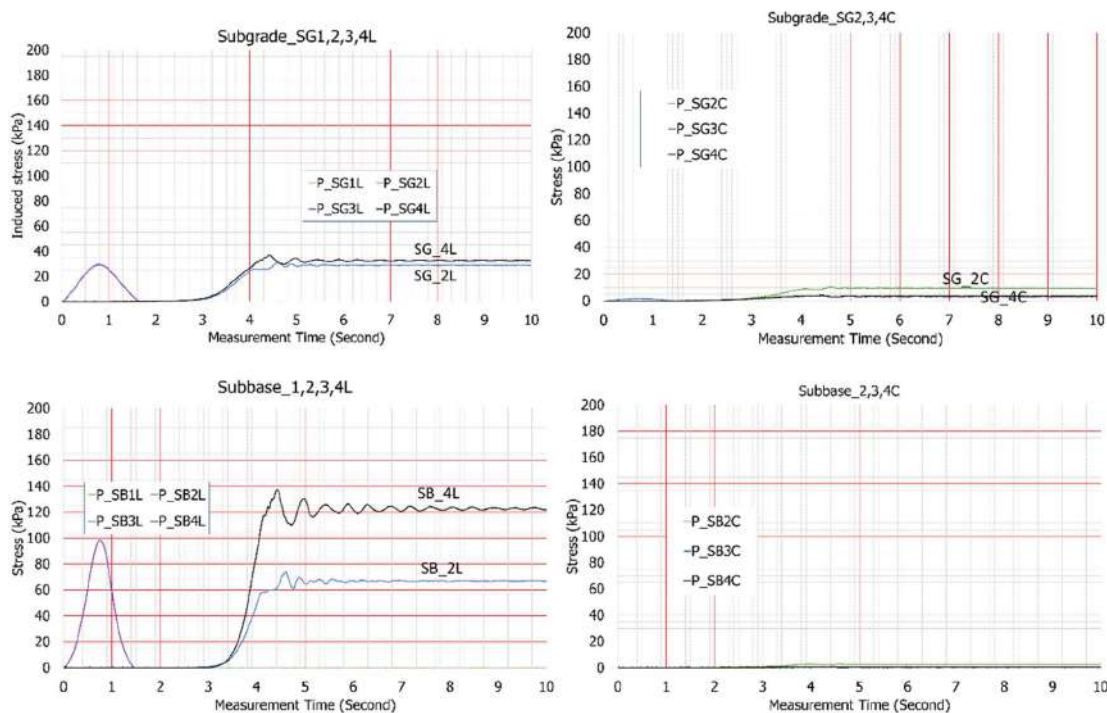
รูปที่ 7.5 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 7.12 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง (ต่อ)

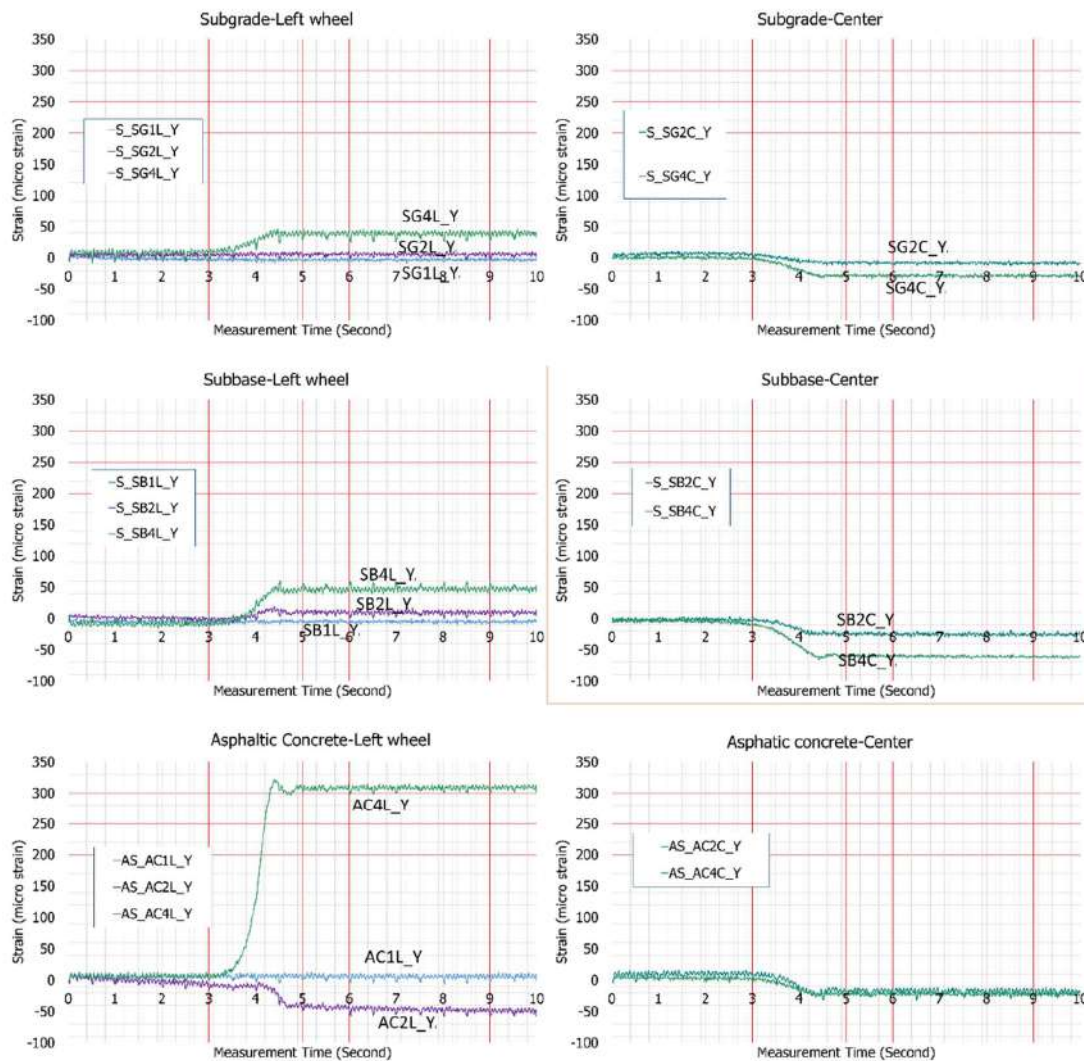
จากตัวอย่างผลดังแสดงในรูปที่ 7.6 จะเห็นได้ว่าความเค้นที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง ล้อซ้าย (L) มีค่าสูงกว่ากึ่งกลางช่องจราจร (C) อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเหนือชั้น Subbase ซึ่งค่าความเค้นที่กึ่งกลางช่องจราจรมีประมาณ 0-10% ของค่าความเค้นใต้ล้อซ้าย และค่าความเค้นเหนือชั้น Subbase ที่กึ่งกลางช่องจราจรมีประมาณ 30-40% ของค่าความเค้นใต้ล้อซ้าย

นอกจากนั้นยังเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า Stress ณ ช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ที่ตำแหน่งใต้ล้อซ้าย ทั้งชั้น Subgrade และชั้น Subbase จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นคลื่น Ripple แบบ Sinusoidal wave ซึ่งค่อยๆ ลดลง (Attenuation) จนกระทั่งมีค่าลดลงจนคงที่ในสภาวะที่รถหยุดนิ่งจนสนิท โดยค่า Max induced stress ที่เกิดขึ้นในช่วงใกล้รถหยุดจะมีค่าสูงกว่าค่า Induced stress ในสภาวะที่รถหยุดประมาณ 10%



รูปที่ 7.6 การเปลี่ยนแปลงความเค้น (Induced stress) ที่ Subgrade (SG) และ Subbase (SB) ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำหยุดนิ่ง (ตำแหน่ง 2 คือเพลาลัง และตำแหน่ง 4 คือเพลาน้ำ ตำแหน่ง L คือล้อซ้าย และตำแหน่ง C คือกลางช่องจราจร) สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาลัง 5.5 ตัน หยุดนิ่ง

รูปที่ 7.7 แสดงตัวอย่างค่าความเครียด (Strain) ในชั้น Subgrade (SG) Subbase (SB) และ Asphaltic concrete (AC) surface ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำหยุดนิ่ง (ตำแหน่ง 2 คือเพลาลัง และตำแหน่ง 4 คือเพลาน้ำ ตำแหน่ง L คือล้อซ้าย และตำแหน่ง C คือกลางช่องจราจร) สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาลัง 5.5 ตัน หยุดนิ่ง ค่าที่ตรวจวัดได้ ณ ตำแหน่งได้ล้อซ้าย มีค่าบวก ซึ่งแสดงถึง Tensile strain หรือ ความเครียดดึง โดยค่า Tensile strain ในชั้น Asphaltic concrete ณ ตำแหน่ง 4 L (ล้อหน้า) มีค่ามากที่สุดประมาณ 310 microstrain แต่ค่า ณ ตำแหน่ง 2L (ล้อหลัง) มีค่าติดลบ ซึ่งคาดว่าเกิดจากตำแหน่งล้อไม่ตรงกับตำแหน่ง Strain gauge 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



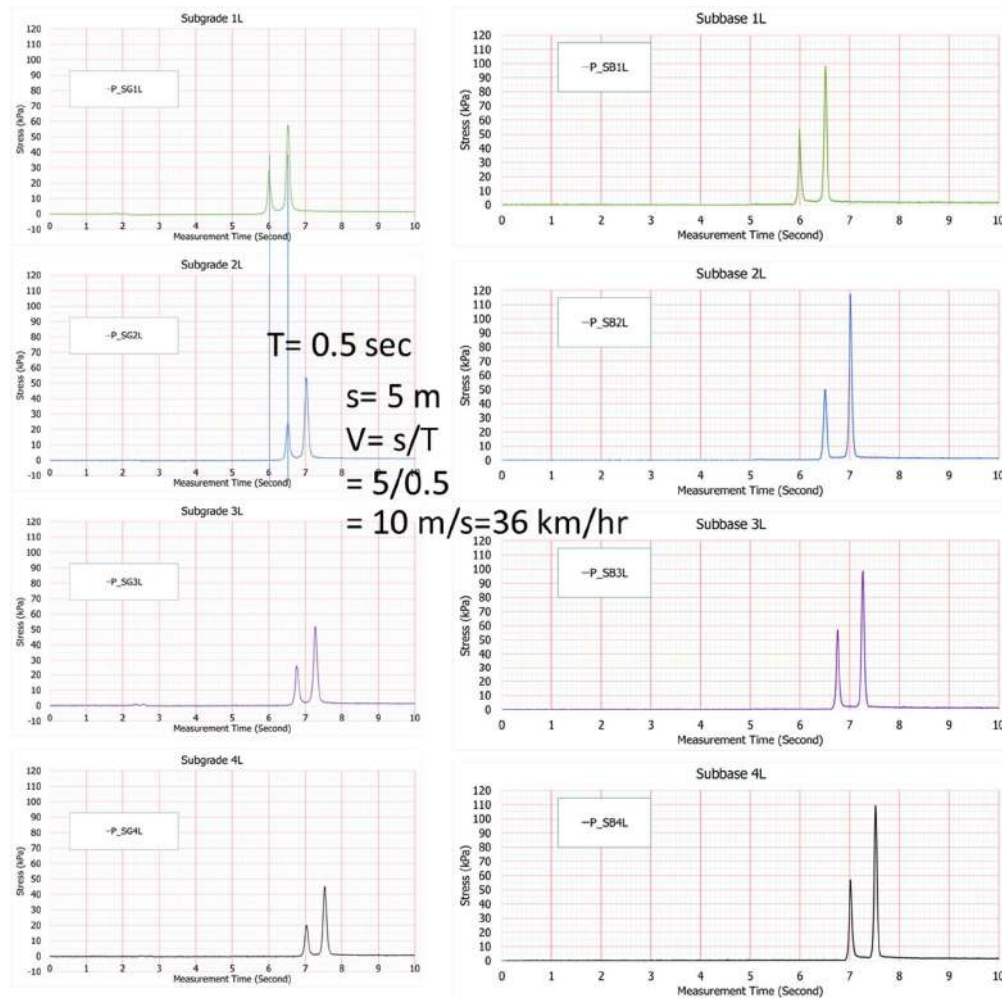
รูปที่ 7.7 การเปลี่ยนแปลงความเครียด (Induced strain) ที่ Subgrade (SG) Subbase (SB) และ Asphaltic concrete (AC) surface ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำหยุดนิ่ง (ตำแหน่ง 2 คือเพลาลัง และ ตำแหน่ง 4 คือเพลาน้ำ ตำแหน่ง L คือล้อซ้าย และตำแหน่ง C คือกลางช่องจราจร) สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาลัง 5.5 ตัน หยุดนิ่ง

➤ ความเค้นและความเครียดในกรณีรถวิ่งที่ความเร็วต่างๆ

ตัวอย่างผลการตอบสนองของค่าความเค้น (Stress) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade แสดงดังแสดงในรูปที่ 7.8 สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 กม.ต่อชั่วโมง จะเห็นได้ว่าในช่วงวินาทีที่ 6 เพลาน้ำได้ส่งถ่ายน้ำหนักลงที่เซนเซอร์วัดแรงดันแถวที่ 1 ก่อนและจึงไปที่ตำแหน่งแถวที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งสามารถอ่านค่าระยะเวลาที่รถบรรทุกใช้วิ่งจากเซนเซอร์แถวที่ 1 ไปถึงแถวที่ 2 ได้เท่ากับ 0.5 วินาที เมื่อทราบระยะห่างระหว่างเซนเซอร์แถวที่ 1 และ 2 เท่ากับ 5 เมตร

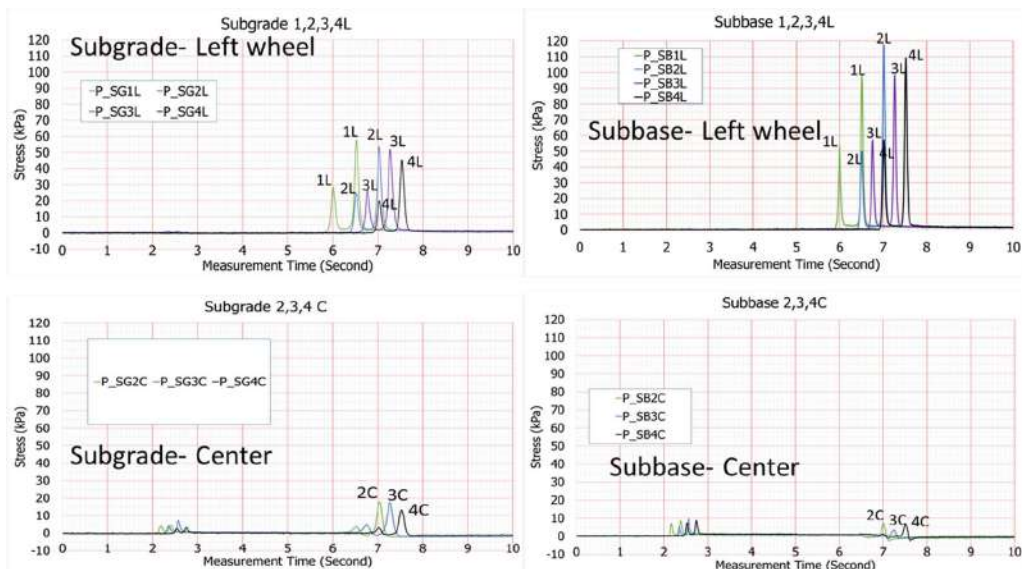
แล้วนำไปคำนวณค่าความเร็วได้เท่ากับ ระยะทาง/เวลา = 5 เมตร/0.5 วินาที = 10 เมตร/วินาที = 36 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับความเร็วที่กำหนดไว้

ค่าแรงดันที่วัดได้ เนื่องจากน้ำหนักเพลาลูกหน้า (Pulse แรงดันที่เกิดขึ้นครั้งแรก) สามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ย จากเซนเซอร์วัดแรงดัน ทั้ง 4 ตัว และค่าแรงดันจากน้ำหนักเพลาลูกหลัง จะคำนวณได้จาก Pulse แรงดันที่เกิดขึ้นครั้งที่สอง จากทุกเซนเซอร์มาเฉลี่ยกัน ค่าเฉลี่ยแรงดันนี้จะใช้ในการวิเคราะห์ผลขั้นต่อไป



รูปที่ 7.8 ค่าความเค้น (Stress) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade กรณีน้ำหนักกระทำเพลาลูกหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง

รูปที่ 7.9 เปรียบเทียบค่าความเค้น ที่เกิดขึ้น ไต้อซ้าย และบริเวณกึ่งกลาง สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade ซึ่งเห็นได้ว่า ค่า Stress ที่เกิดขึ้นไต้อซ้าย ในชั้น Subbase มีค่าประมาณสองเท่าของค่าที่เกิดขึ้นในชั้น Subgrade แต่หากพิจารณา Stress ที่เกิดขึ้นที่กึ่งกลางถนน พบว่า Stress ในชั้น Subgrade มีค่าสูงกว่าในชั้น Subbase ซึ่งเป็นลักษณะการกระจายของหน่วยแรงซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีการกระจายหน่วยแรงทั่วไป



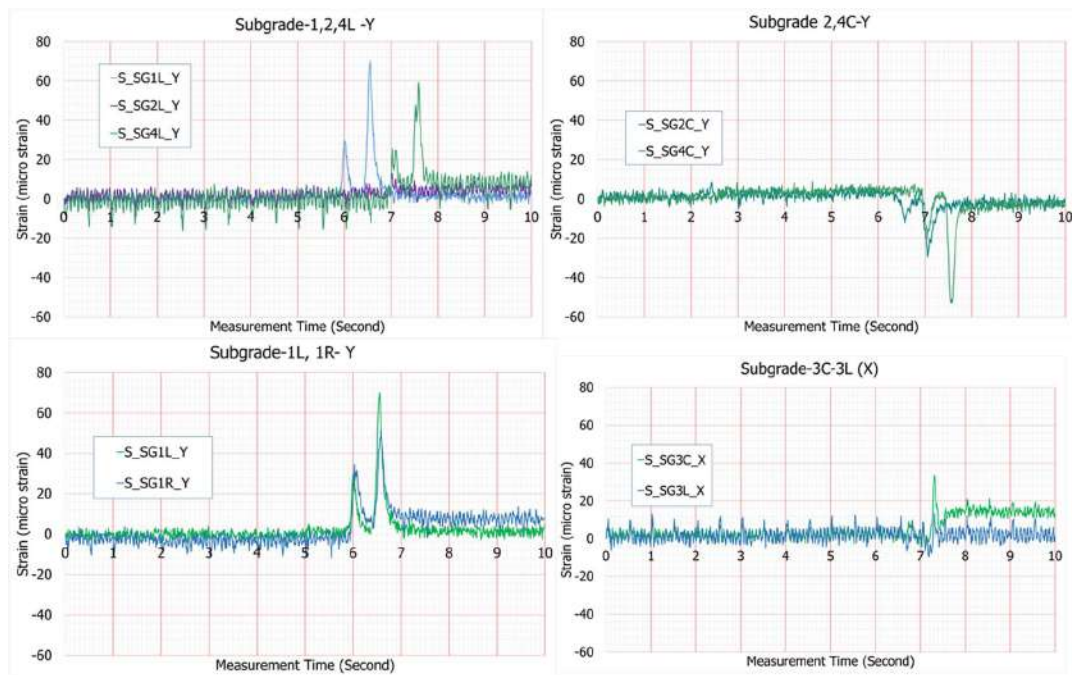
รูปที่ 7.9 ค่าความเค้น (Stress) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) และกึ่งกลาง สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade กรณีน้ำหนักรถบรรทุก 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง

ตัวอย่างลักษณะความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในชั้น Subgrade แสดงดังแสดงในรูปที่ 7.10 พบว่าค่า Strain ที่ได้ล้อซ้าย (1L, 2L และ 4L) ซึ่งติดตั้งในแนวราบทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) มีค่าตอบสนองกับแรงกระทำจากเพลาน้ำและเพลาลัง โดยมีลักษณะเป็น Tensile strain หรือการยืดตัวในแนวราบ ซึ่งสะท้อนถึงการอัดตัวในแนวดิ่ง แต่การตอบสนองของ Strain gauge ที่ตำแหน่ง 2L พบว่ามีน้อยกว่าที่จุดอื่นๆ คาดว่าอาจเกิดจากน้ำหนักล้อลงไม่ตรงตามตำแหน่งของ Strain gauge พอดี เนื่องจากขนาดของ Strain gauge 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 ซึ่งเกิดจากแรงอัดกระทำด้านข้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่งที่แนวล้อทำให้เกิดการอัดตัวออกด้านข้าง

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



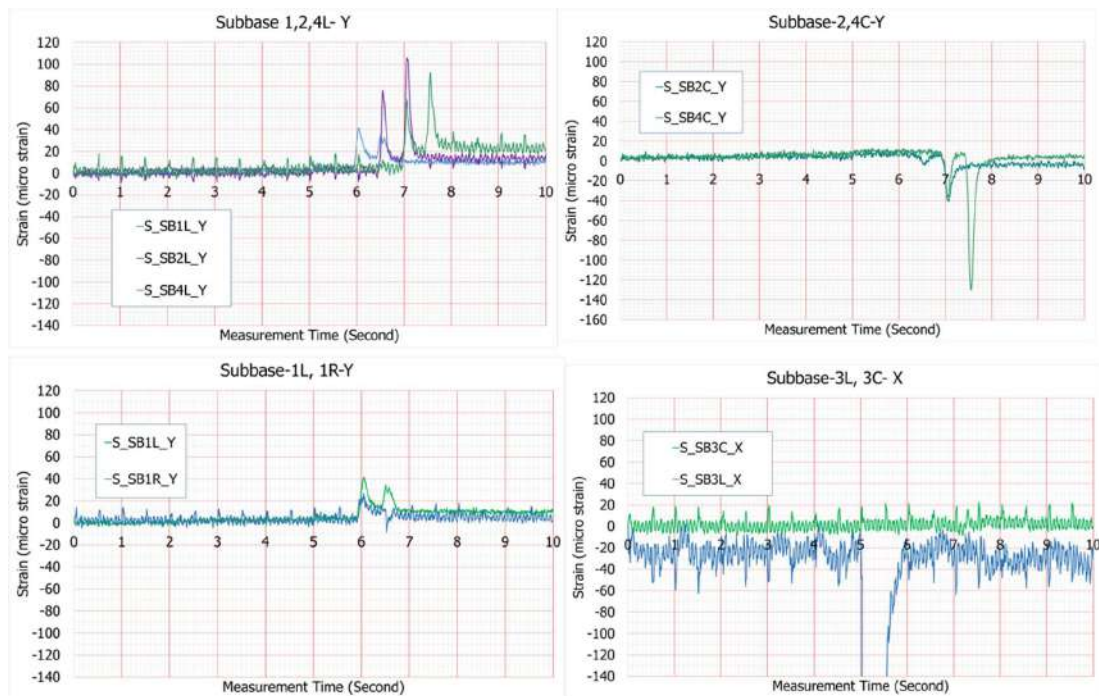
รูปที่ 7.10 ค่าความเครียด (Strain) ที่ Subgrade ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) กรณีน้ำหนักระทำเพลาลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง

ตัวอย่างความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในชั้น Subbase แสดงดังแสดงในรูปที่ 7.11 พบว่าค่า Strain ที่ไถล้อซ้าย (1L, 2L และ 4L) ซึ่งติดตั้งในแนวราบทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) มีค่าตอบสนองกับแรงกระทำจากเพลาลังและเพลาลัง โดยมีลักษณะเป็น Tensile strain หรือการยืดตัวในแนวราบ เช่นเดียวกับความเครียดในชั้น Subgrade โดยค่าความเครียดในชั้น Subbase จะมีค่าสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเค้น (Stress) ในชั้น Subbase ที่สูงกว่าในชั้น Subgrade เช่นกัน

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

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



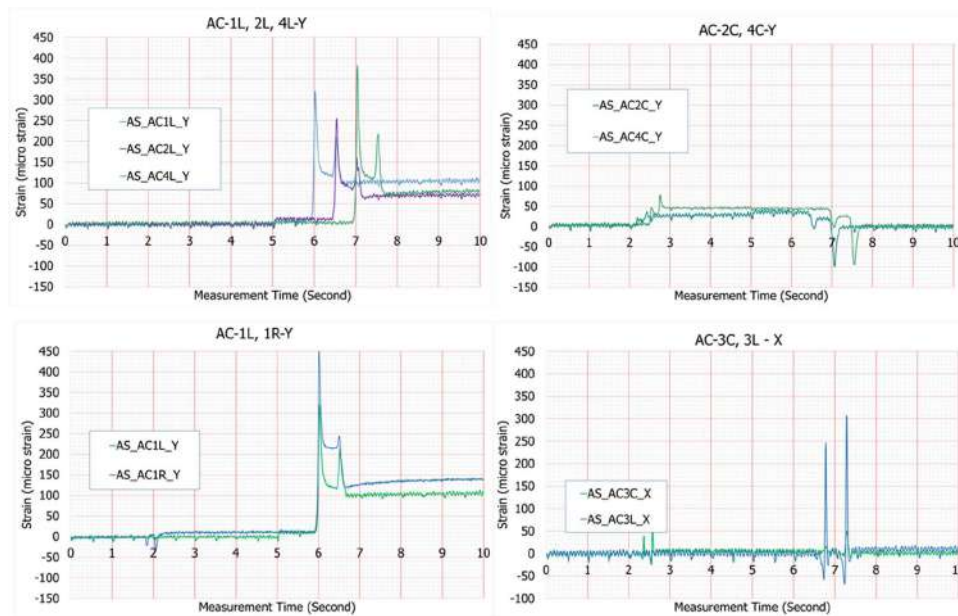
รูปที่ 7.11 ค่าความเครียด (Strain) ที่ Subbase ในทิศทางจรรยาจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) กรณีน้ำหนักรถบรรทุกเพลาล้อ 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง

รูปที่ 7.12 แสดงตัวอย่างความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในชั้น Asphaltic concrete พบว่าค่า Strain ที่ใต้ล้อซ้าย (1L, 2L และ 4L) ซึ่งติดตั้งในแนวราบทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) มีค่าตอบสนองกับแรงกระทำจากเพลาล้อหน้าและเพลาล้อหลัง 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 เมื่อรับน้ำหนักจากเพลาล้อหน้า โดยที่ตำแหน่ง 1R มีค่าสูงกว่า คาดว่าเกิดจากตำแหน่งของเซนเซอร์อยู่ตรงกับแนวล้อมากกว่า

ค่า Strain ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง (2C และ 4C) ทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) พบว่ามีค่าติดลบ แสดงถึง Compressive strain ซึ่งเกิดจากแรงอัดกระทำด้านข้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่งที่แนวล้อทำให้เกิดการอัดตัวออกด้านข้าง ซึ่งพบว่ามีค่า Strain ไม่สูงมากกว่ากรณี Subbase มากเท่ากับในกรณี Strain ที่ตำแหน่งล้อ L และ R

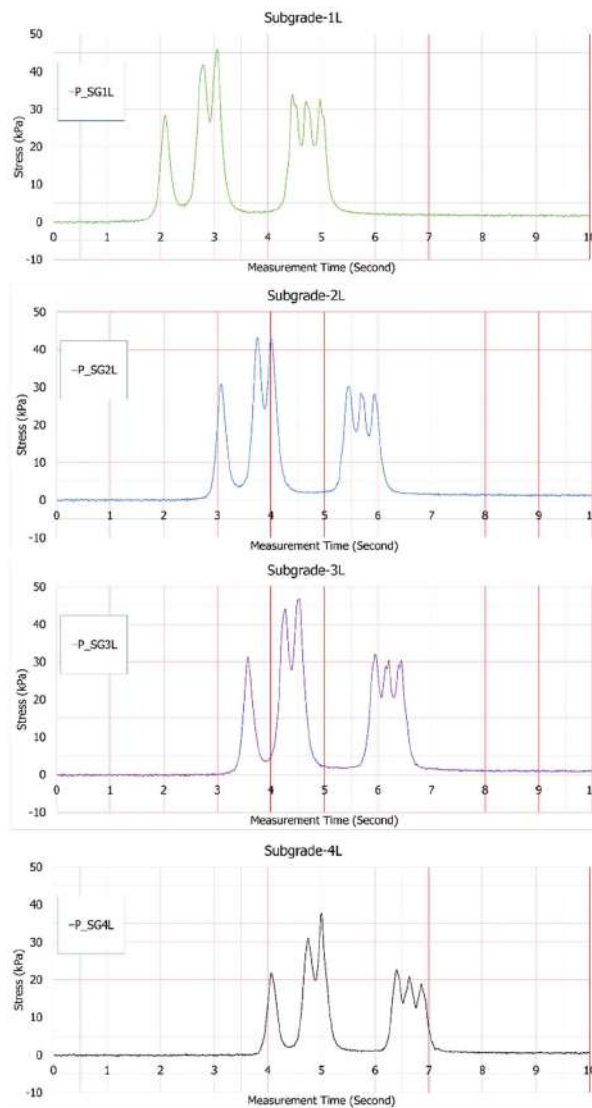
ค่า Strain ใน ชั้น AC ตามทิศการจราจร (Longitudinal-X) ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และล้อซ้าย (3C และ 3L) พบว่ามีการตอบสนองใกล้เคียงกับค่า Strain ในทิศทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) โดยมีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากระดับความลึกที่ติดตั้งเซนเซอร์ใน Asphalt Concrete อยู่ที่ประมาณ 20 ซม. จากผิวทาง ซึ่งสะท้อนว่าการแอ่นตัวของชั้น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



รูปที่ 7.12 ค่าความเครียด (Strain) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) และกึ่งกลาง ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) สำหรับชั้น Asphaltic Concrete กรณีน้ำหนักกระทำเพลาลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง

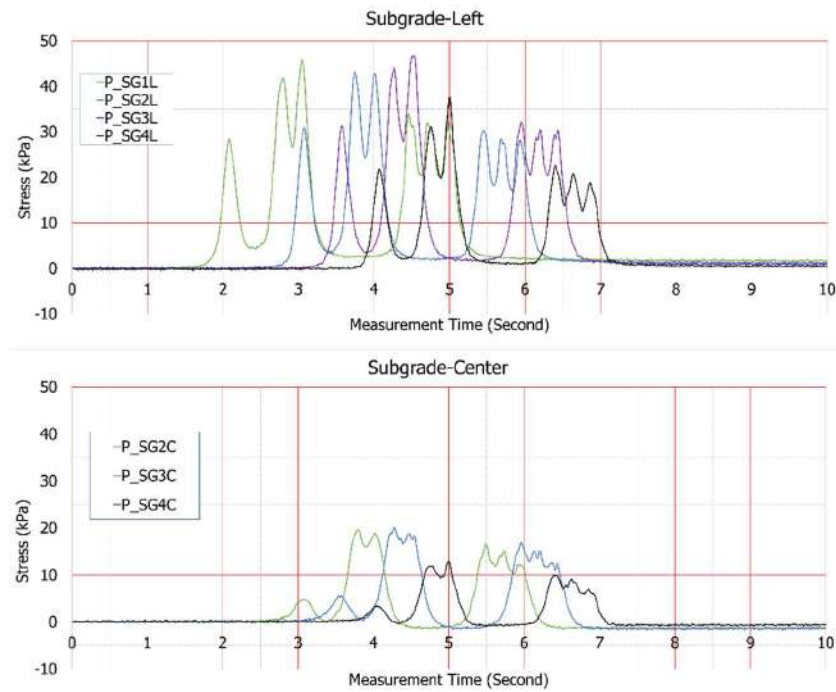
7.1.2 ผลการสอบเทียบโดย รถ 6 เพลา 22 ล้อ น้ำหนักบรรทุก 43.4 ตัน แปลงโพธาราม

เนื่องจากผลการทดสอบรถ 6 เพลา 22 ล้อ จะมีความคล้ายคลึงกับผลการทดสอบรถ 2 เพลา 6 ล้อ ดังนั้นจะแสดงตัวอย่างผลค่าความเค้นความเครียดกับเวลาเฉพาะบางกรณีเท่านั้น โดยเลือกแสดงกรณีวิ่งที่ความเร็ว 20 ก.ม. ต่อชั่วโมง รูปที่ 7.13 แสดงค่าค่าความเค้นใน ชั้น Subgrade ใต้ล้อซ้าย ที่ความเร็ว 20 km/hr พบว่าช่วงเวลาที่ Stress pulse เพิ่มขึ้นเนื่องจากเพลาน้ำ ณ จุดที่ 1L เทียบกับ 4L นำไปคำนวณเป็นความเร็วจะได้เท่ากับ 18 km/hr ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดได้ นอกจากยังพบว่า Stress pulse จากเพลาน้ำที่ 2 และ 3 มีลักษณะซ้อนทับกัน นั่นคือค่า Stress ที่เพิ่มขึ้นจากเพลาน้ำที่ 2 ยังไม่ลดลงถึงค่าศูนย์ แต่พบว่ามีค่า Stress จากเพลาน้ำที่ 3 ก็เพิ่มขึ้นซ้อนทับกับ Pulse ที่ 2 ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปที่เกิดขึ้นเมื่อเพลารถอยู่ใกล้กัน ดังเช่นลักษณะ Stress pulse จากเพลาน้ำที่ 4,5 และ 6



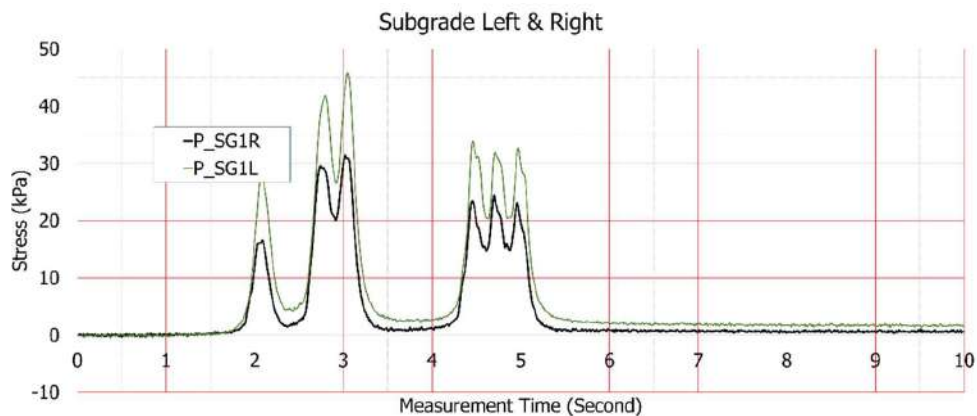
รูปที่ 7.13 ค่าความเค้นใน ชั้น Subgrade ใต้ล้อซ้าย ที่ความเร็ว 20 km/hr

ค่าความเค้นใน ชั้น Subgrade ที่กลางช่องจราจรเทียบกับใต้ล้อซ้าย ที่ความเร็ว 20 km/hr ดังแสดงใน รูปที่ 7.14 พบพฤติกรรมสอดคล้องกับกรณีรถบรรทุก 6 ล้อ โดย ค่าความเค้นที่ที่กลางช่องจราจรมีค่าน้อยกว่าค่าใต้ล้อ ซ้าย และยังพบว่า Stress pulse จากเพลาคี่ 2 และ 3 มีลักษณะซ้อนทับกันมากขึ้น ในตำแหน่งที่กลางช่อง จราจร มากกว่าตำแหน่งใต้ล้อ หรืออาจกล่าวได้ว่า ลักษณะการส่งผ่าน Stress ไปยังที่กลางช่องจราจรจะมี ความเป็น Dynamic น้อยกว่า ตำแหน่งใต้ล้อ ซึ่งอาจเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพ ที่สูงกว่า บริเวณใต้ล้อซ้าย



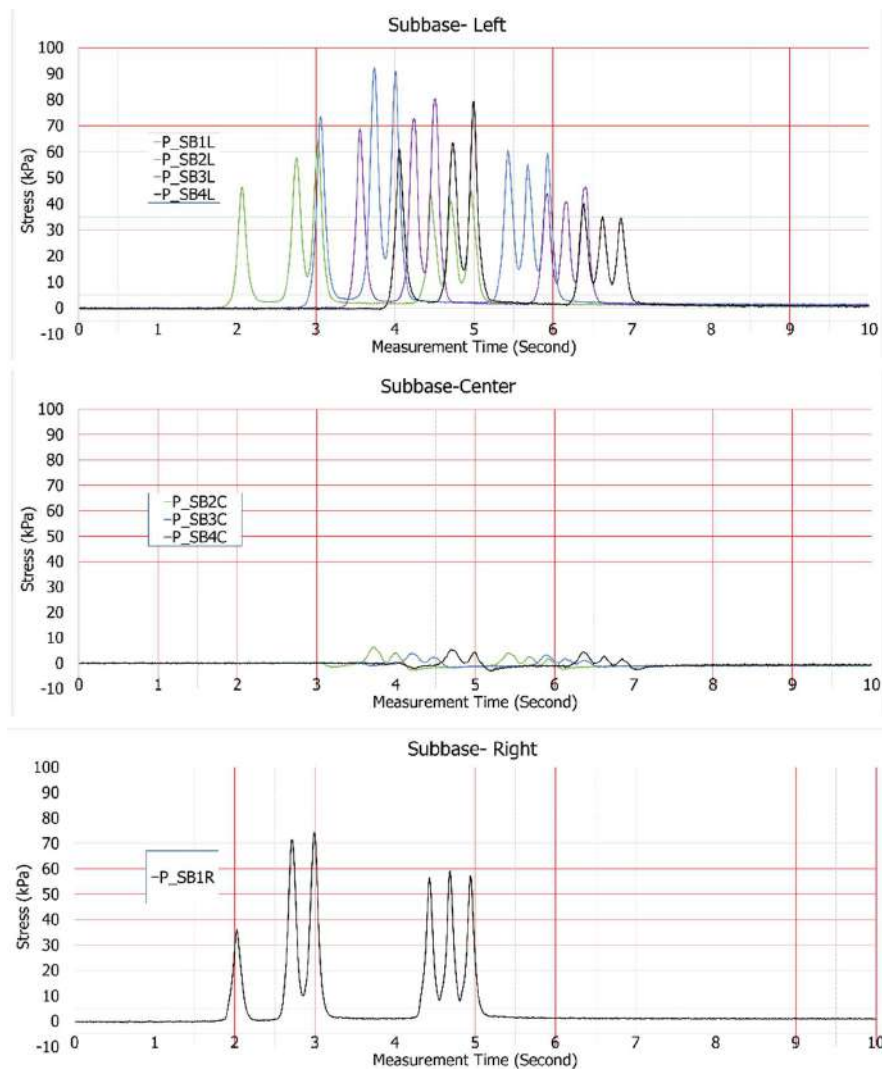
รูปที่ 7.14 ค่าความเค้นใน ชั้น Subgrade ใต้ล้อซ้ายและกึ่งกลาง ที่ความเร็ว 20 km/hr

ค่าความเค้นใน ชั้น Subgrade ใต้ล้อขวาเทียบกับใต้ล้อซ้าย ที่ความเร็ว 20 km/hr ดังแสดงในรูปที่ 7.15 พบพฤติกรรมสอดคล้องกับการนิรบรรทุก 6 ล้อ โดย ค่าความเค้นที่ใต้ล้อขวามีค่าน้อยกว่าค่าใต้ล้อซ้าย



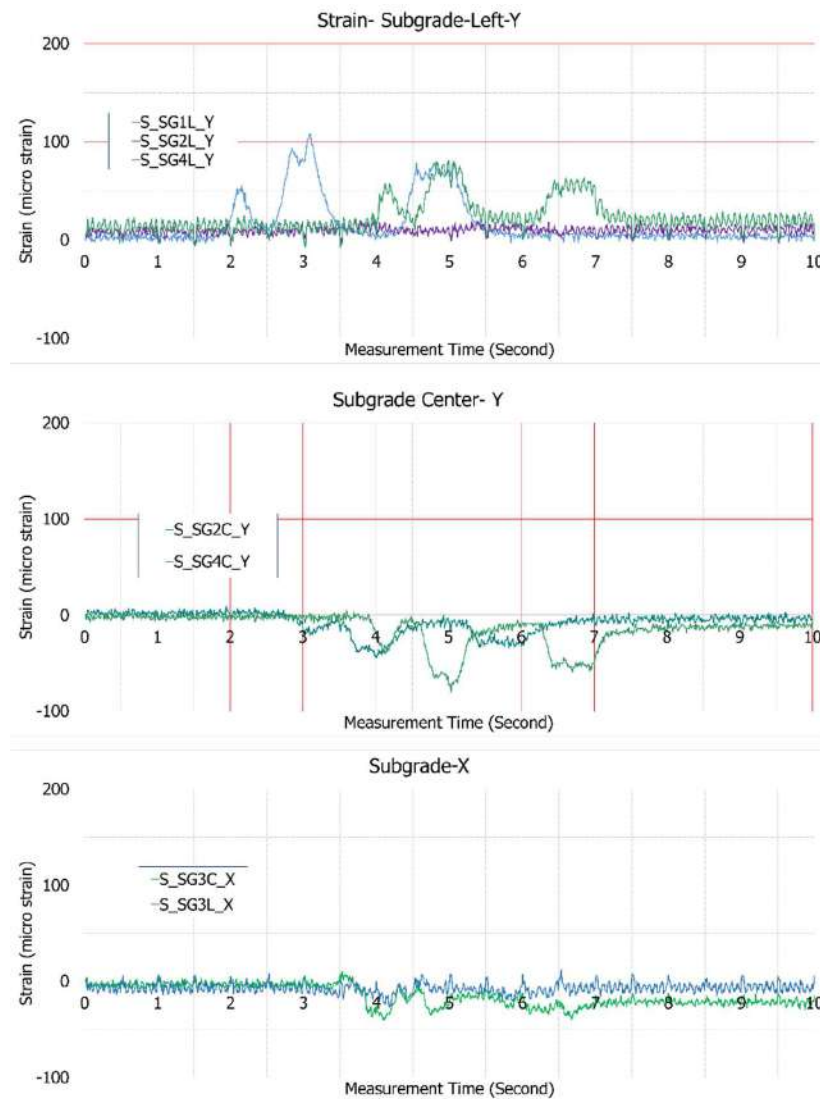
รูปที่ 7.15 ค่าความเค้นใน ชั้น Subgrade ใต้ล้อซ้ายและล้อขวา ที่ความเร็ว 20 km/hr

ค่าความเค้นใน ชั้น Subbase กึ่งกลางช่องจราจรเทียบกับใต้ล้อซ้าย ที่ความเร็ว 20 km/hr ดังแสดงในรูปที่ 7.16 พบพฤติกรรมสอดคล้องกับการนิรบรรทุก 6 ล้อ เช่นกัน โดย ค่าความเค้นที่กึ่งกลางมีค่าน้อยกว่าค่าใต้ล้อซ้าย และยังพบว่า Stress pulse จากเพลที่ 2 และ 3 มีลักษณะซ้อนทับกันมากขึ้น ในตำแหน่งกึ่งกลางช่องจราจร มากกว่าตำแหน่งใต้ล้อ หรืออาจกล่าวได้ว่า ลักษณะการส่งผ่าน Stress ไปยังกึ่งกลางช่องจราจร มีความเป็น Dynamic น้อยกว่าตำแหน่งใต้ล้อซ้าย ซึ่งอาจเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพ ที่สูงกว่าบริเวณใต้ล้อซ้าย สำหรับใต้ล้อขวา พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับใต้ล้อซ้าย



รูปที่ 7.16 ค่าความเค้นใน ชั้น Subbase ใต้ล้อซ้ายกึ่งกลาง และล้อขวา ที่ความเร็ว 20 km/hr

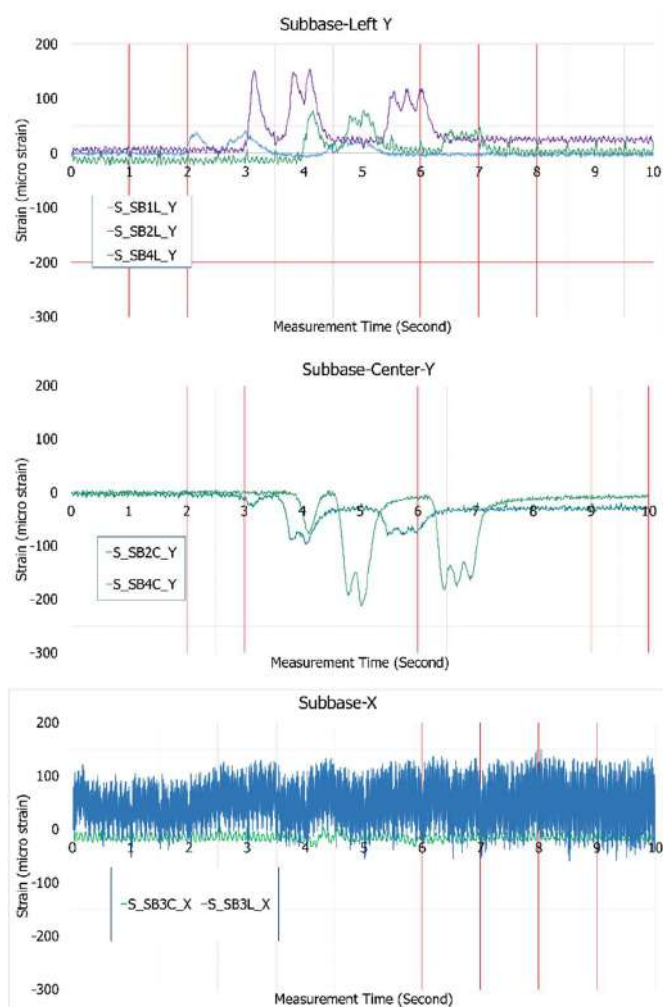
ค่าความเค้นใน ชั้น Subgrade ใต้ล้อซ้ายกึ่งกลาง และล้อขวา ในทิศทางจราบ (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราบ (Normal-Y) ที่ความเร็ว 20 km/hr ดังแสดงในรูปที่ 7.17 พบว่าลักษณะ Pulse ได้เพลที่ 2,3 และ 4,5,6 ไม่มีค่า Peak ที่แยกได้ชัดเจนเท่ากับกราฟค่าความเค้นดังแสดงในรูปที่ 7.16 ซึ่งคาดว่าอาจเป็นลักษณะการตอบสนองวัสดุในทิศทางแนวราบ เนื่องจากค่าความเค้นที่วัดเป็น Horizontal strain ในขณะที่ค่าความเค้นเป็น Vertical stress สำหรับแนวโน้มค่า Strain ในแต่ละทิศทางและแต่ละตำแหน่งพบว่า มีลักษณะสอดคล้องกับกรณีรถ 6 ล้อ



รูปที่ 7.17 ค่าความเครียดใน ชั้น Subgrade ไตล้อย้ายกึ่งกลาง และล้อขวา ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) ที่ความเร็ว 20 km/hr

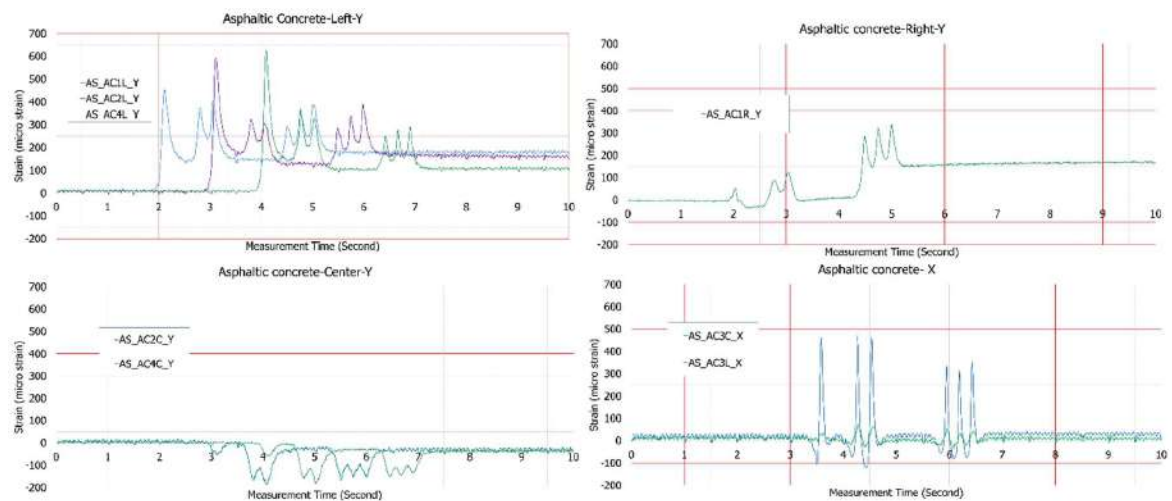
ค่าความเครียดใน ชั้น Subbase ไตล้อย้ายกึ่งกลาง และล้อขวา ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) ที่ความเร็ว 20 km/hr ดังแสดงในรูปที่ 7.18 พบว่าลักษณะ Pulse ไตเพลลาที่ 2,3 และ 4,5,6 มีค่า Peak ที่แยกได้ชัดเจนกว่ากรณีความเครียดในชั้น Subgrade ซึ่งคาดว่าเนื่องจากความเครียดในชั้น Subbase อยู่ใกล้ตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าความเครียดในตำแหน่งกึ่งกลาง พบว่ามีค่าติดลบ (Compressive strain) ในขณะที่ค่าความเครียดที่ไตล้อย้ายมีค่าบวก (Tensile strain) โดยทั้งสองกรณี มีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 100-200 microstrain ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่น่าสนใจ เนื่องจากค่าความเค้น (Stress) ในแนวตั้งกรณี (Subbase) ที่กึ่งกลางช่องจราจรมีค่าน้อยกว่ากรณีไตล้อย้ายอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากค่า Strain ที่วัดเป็นค่าในทิศทางแนวราบ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ค่า Horizontal stress ที่เกิดขึ้นในบริเวณกึ่งกลางช่องจราจร น่าจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า Horizontal stress

ได้ลือเช่นกัน พฤติกรรมที่พบเป็นตัวอย่างของการกระจายหน่วยแรงที่มีลักษณะไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง (Anisotropy) นั่นเอง



รูปที่ 7.18 ค่าความเครียดใน ชั้น Subbase ใต้ล้อซ้ายกึ่งกลาง และล้อขวา ในทิศทางจากราว (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) ที่ความเร็ว 20 km/hr

ความเครียดใน ชั้น AC ใต้ล้อซ้ายกึ่งกลาง และล้อขวา ในทิศทางจากราว (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) ที่ความเร็ว 20 km/hr ดังแสดงในรูปที่ 7.19 พบว่าลักษณะ Pulse ได้เพล่าที่ 2,3 และ 4,5,6 มีค่า Peak ที่แยกได้ชัดเจน และพบว่าความเครียดในทิศทาง X มีความยืดหยุ่น คือ สามารถกลับมาที่จุดเดิม (Recoverable) ได้ดีกว่าความเครียดในทิศทาง Y ซึ่งเป็นผลจากทิศทางการเคลื่อนที่ของแรงกระทำจากล้อรถ แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับกรณีการสอบเทียบรถ 2 เพล่า 6 ล้อ



รูปที่ 7.19 ค่าความเครียดใน ชั้น AC ใต้ล้อซ้ายกึ่งกลาง และล้อขวา ในทิศทางจราจร (Longitudinal-X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) ที่ความเร็ว 20 km/hr

7.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในกรณีต่างๆ

จากผลการตอบสนองของค่าความเค้น (Stress) และความเครียดที่วัดได้ทุกกรณีดังสรุปในตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2 สามารถนำมาสรุปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแต่ละตำแหน่งได้ดังแสดงในรูปที่ 7.20 ถึงรูปที่ 7.24

รูปที่ 7.20 เปรียบเทียบค่าความเค้น เหนือชั้น Subgrade และ Subbase บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลาง ช่องจราจร ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเหนือชั้น Subgrade และ Subbase ได้ดังนี้

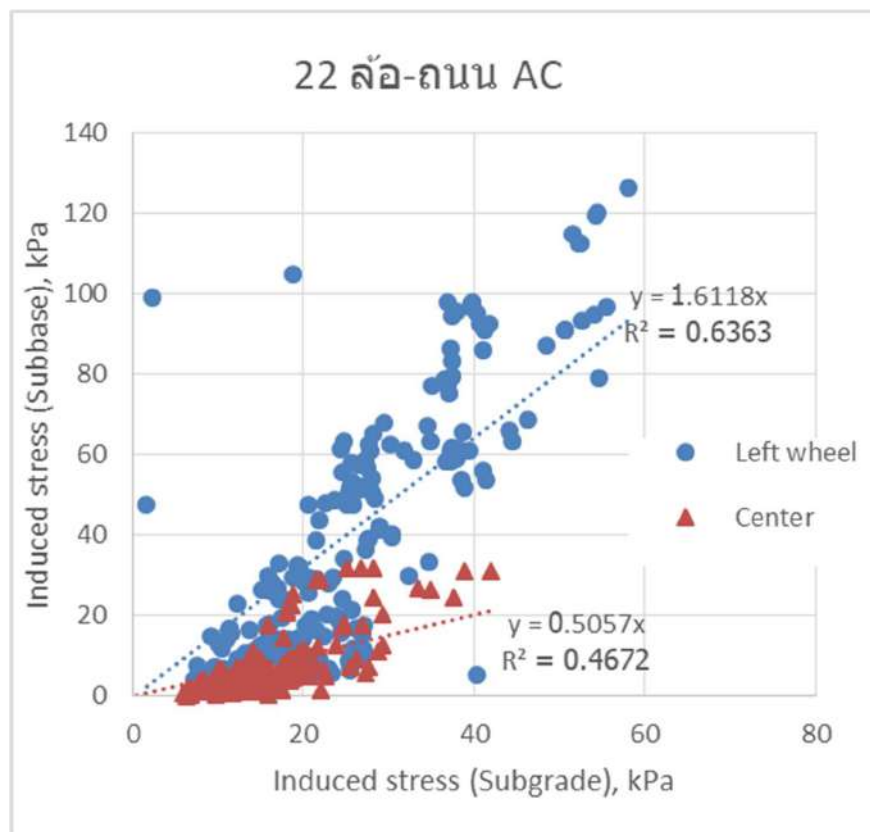
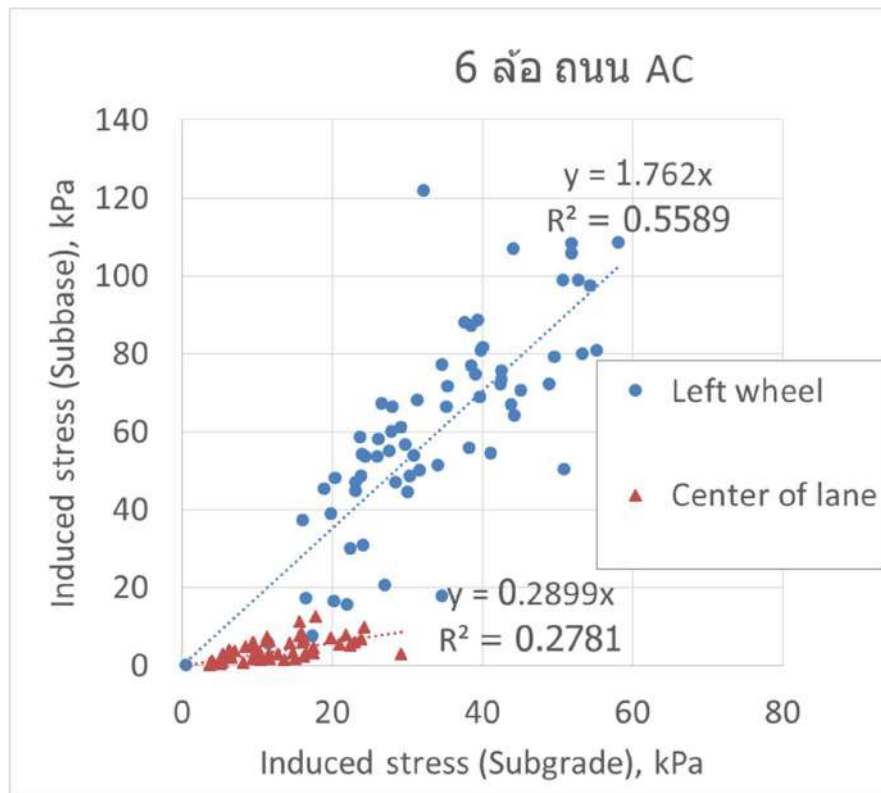
กรณีรถ 6 ล้อ

- Left wheel, $\sigma_{\text{subbase}} = 1.762 \sigma_{\text{subgrade}}$
- Center of lane, $\sigma_{\text{subbase}} = 0.290 \sigma_{\text{subgrade}}$

กรณี รถ 22 ล้อ

- Left wheel, $\sigma_{\text{subbase}} = 1.612 \sigma_{\text{subgrade}}$
- Center of lane, $\sigma_{\text{subbase}} = 0.506 \sigma_{\text{subgrade}}$

ซึ่งบ่งชี้ว่า รถขนาดใหญ่ (ล้อขนาดใหญ่ขึ้น) ส่งผลต่อการกระจายแรงในชั้นทาง โดยมีแนวโน้มให้แรงกระทำที่กึ่งกลางช่องจราจรในชั้น Subbase มีสัดส่วนเพิ่มขึ้น

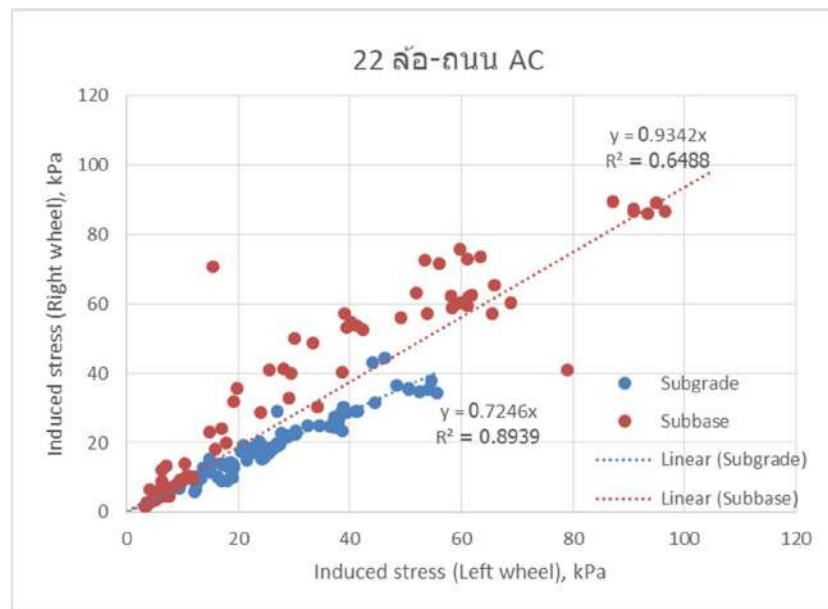
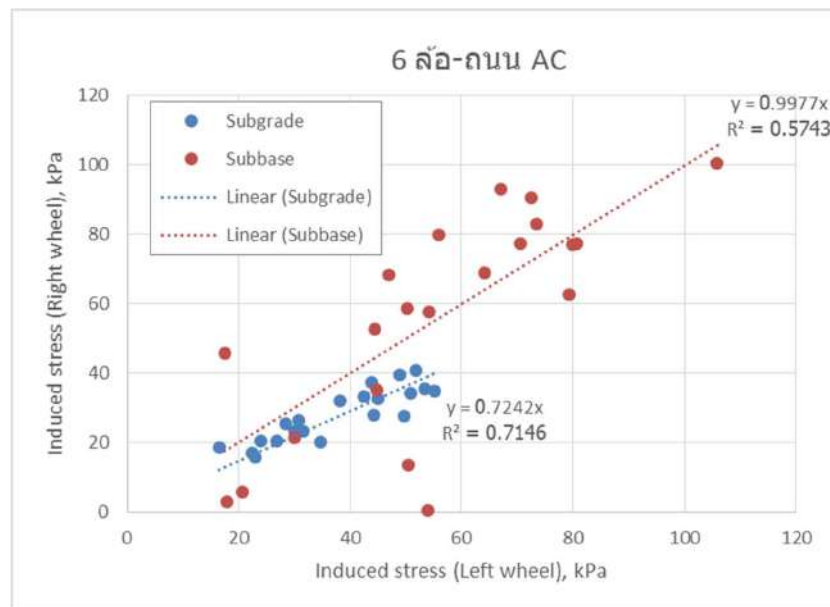


รูปที่ 7.20 ค่าความเค้น เหนือชั้น Subgrade และ Subbase บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร

รูปที่ 7.21 เปรียบเทียบค่าความเค้น (Stress) เหนือชั้น Subgrade และ Subbase บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองกรณี พบว่า

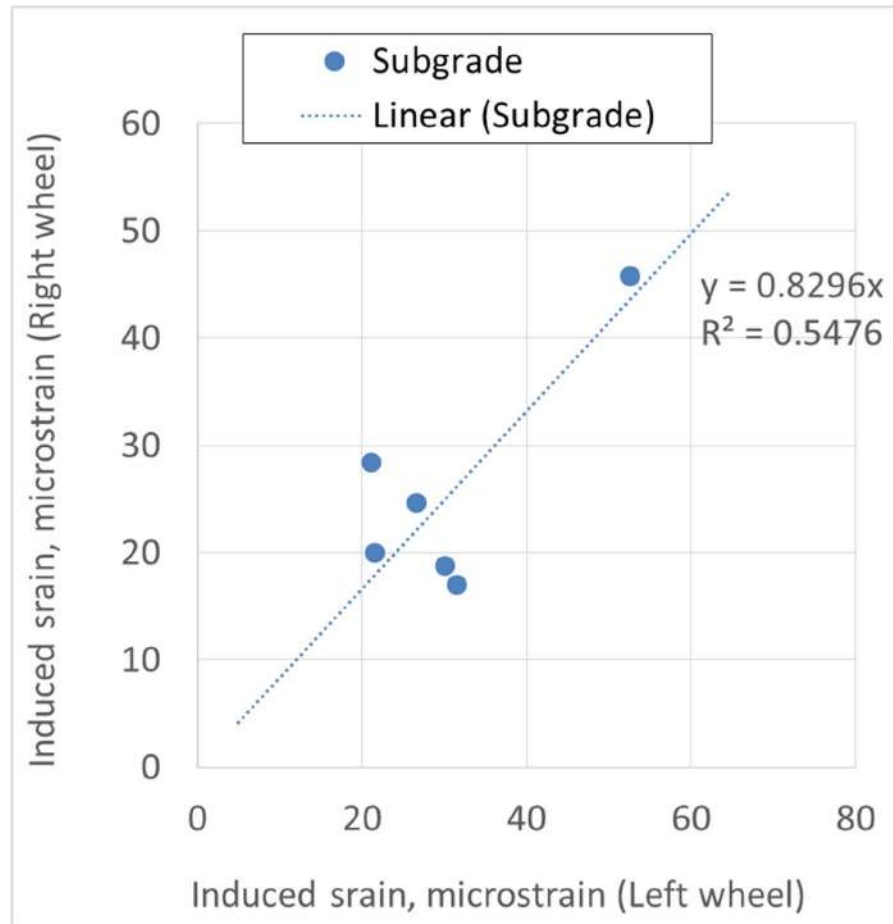
- ความเค้นเหนือชั้น Subbase บริเวณใต้ล้อขวา มีค่าโดยประมาณเท่ากับค่า บริเวณใต้ล้อซ้าย (0.93-1 เท่า)
- ความเค้นเหนือชั้น Subgrade บริเวณใต้ล้อขวา มีค่าประมาณ 0.72 เท่าของ ค่าบริเวณใต้ล้อซ้าย

ซึ่งบ่งชี้ว่าขนาดรถบรรทุกไม่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น (Stress) บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา ทั้งในชั้น Subgrade และ Subbase



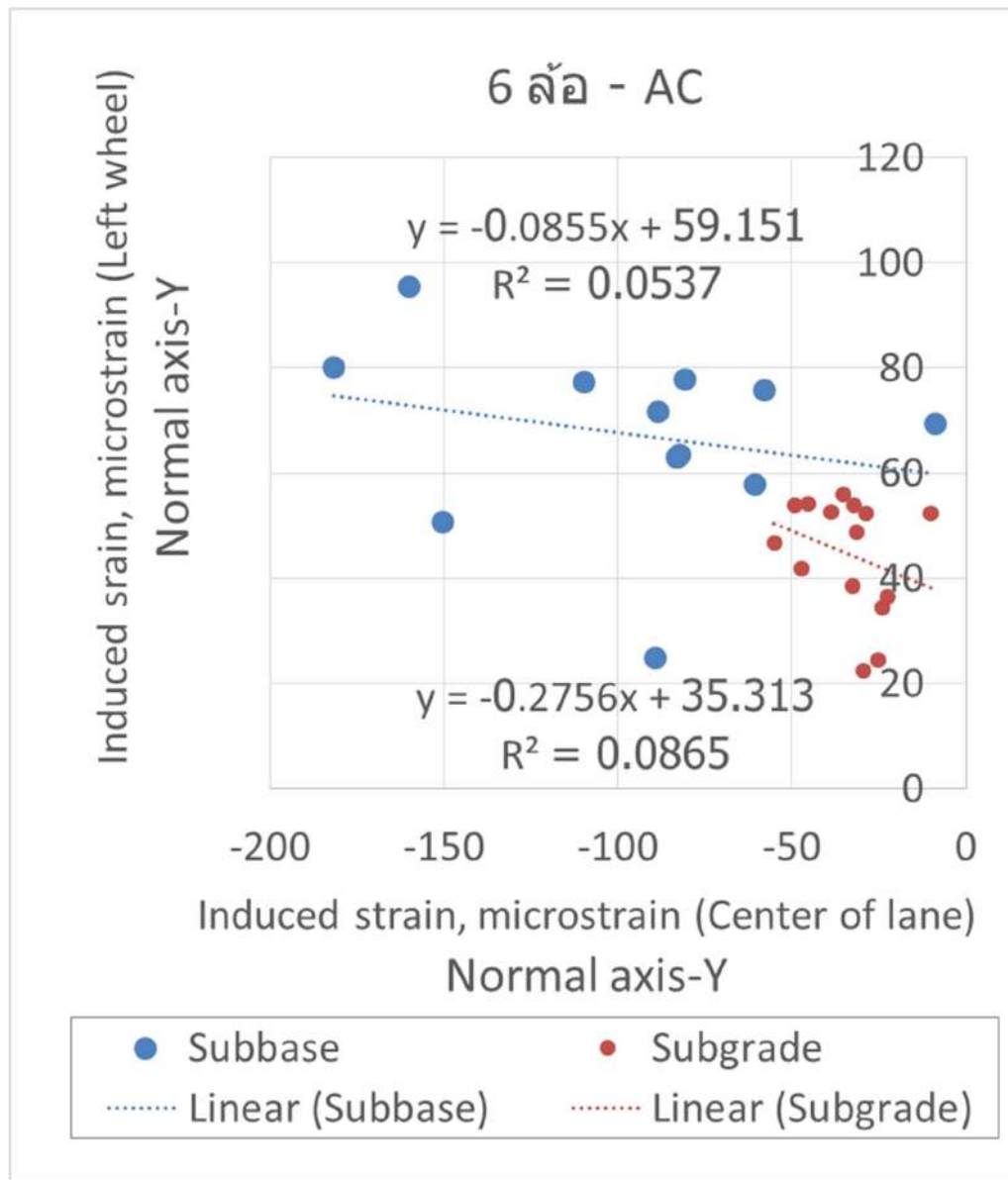
รูปที่ 7.21 ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา เหนือชั้น Subgrade และ Subbase

รูปที่ 7.22 เปรียบเทียบค่าความเครียด (Strain) เหนือชั้น Subgrade บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสองกรณี พบว่ามีความสอดคล้องกับค่าความเค้น ทั้งนี้ค่าความเครียดเหนือชั้น Subbase พบว่าข้อมูลยังไม่สมบูรณ์จึงยังไม่นำเสนอความสัมพันธ์



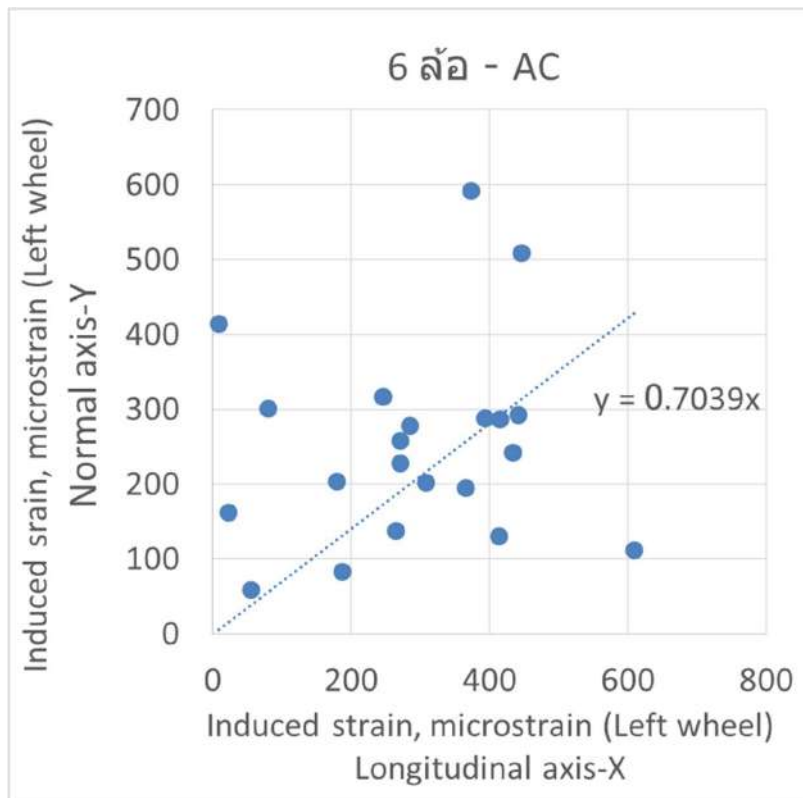
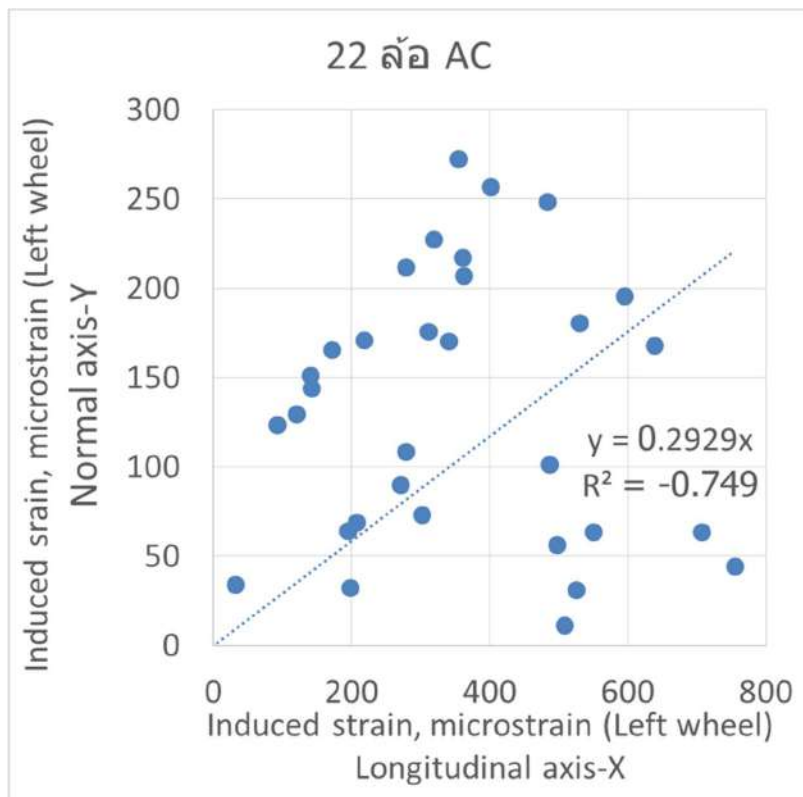
รูปที่ 7.22 ค่าความเครียด บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา ชั้น Subgrade

รูปที่ 7.23 แสดง ค่าความเครียด บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลาง ชั้น Subgrade และ Subbase พบว่าข้อมูลความเครียดมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก และอาจกล่าวได้ว่าค่าความเครียด ไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนต่อกัน เหมือนกรณีความเค้น



รูปที่ 7.23 ค่าความเครียด บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลาง ชั้น Subgrade และ Subbase

รูปที่ 7.24 เปรียบเทียบค่าความเครียด (Strain) ในชั้น Asphaltic concrete บริเวณ ล้อซ้าย ในทิศ การจราจร (Longitudinal-X) เปรียบเทียบกับทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) ซึ่งพบว่ามีค่าความเครียดใน ทิศทาง X มีแนวโน้มสูงกว่าในทิศทาง Y แต่จากความแปรปรวนของข้อมูลค่อนข้างมากจึงไม่สามารถยืนยันได้ ชัดเจน



รูปที่ 7.24 ค่าความเครียด ชั้น Asphaltic concrete (AC) surface บริเวณ ล้อซ้าย ในทิศการจราจร (Longitudinal-X) ทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y)

7.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดและความเร็วรถบรรทุก กรณีถนนลาดยาง

รูปที่ 7.25 ถึง รูปที่ 7.27 แสดงค่าความเค้นและความเครียด ใน ชั้น Subgrade Subbase และ 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 7.25 ค่าความเค้น ชั้น Subgrade และ Subbase ที่ความเร็วรถต่างๆ



รูปที่ 7.26 ค่าความเครียด ชั้น Subgrade และ Subbase ที่ความเร็วรถต่างๆ

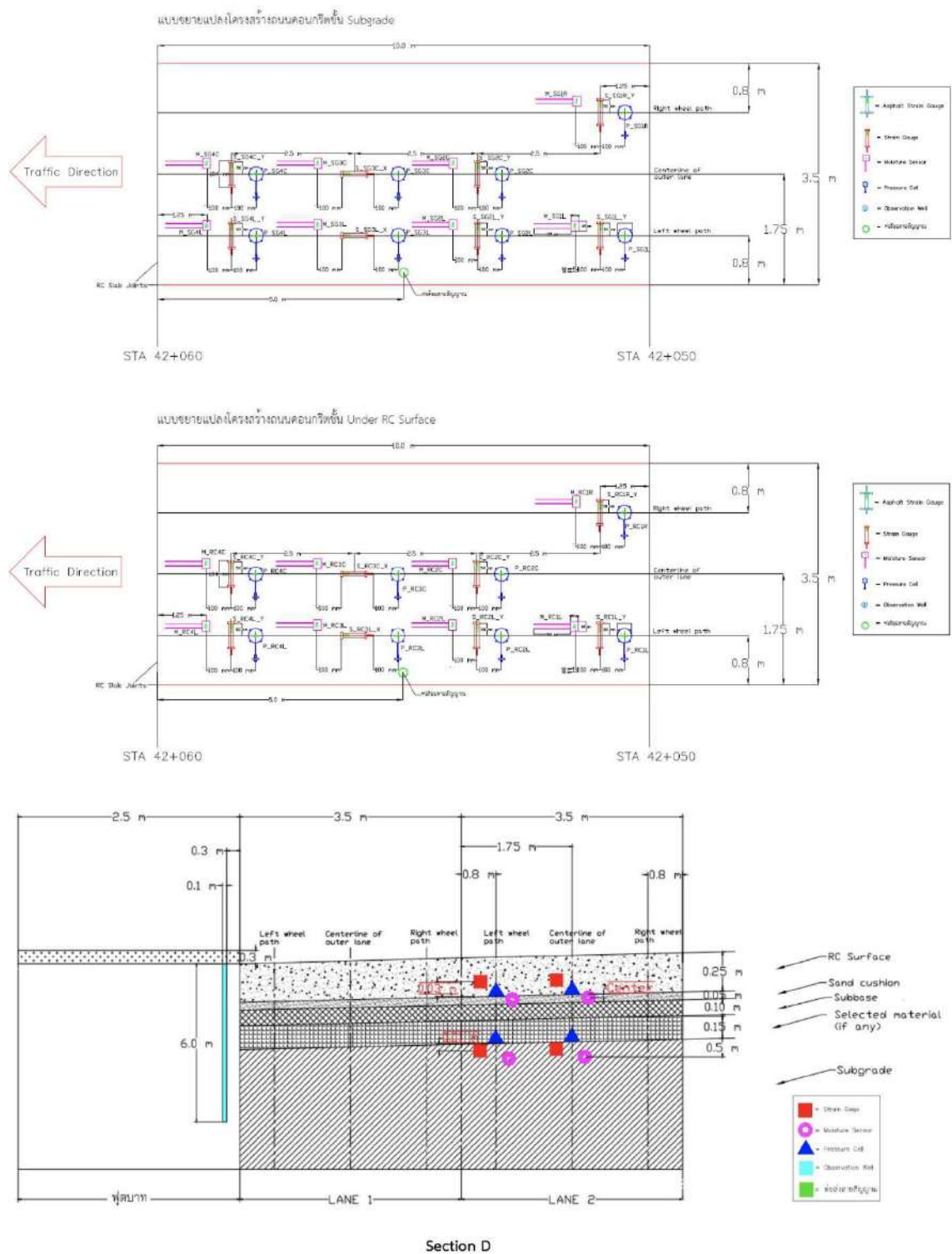


รูปที่ 7.27 ค่าความเครียด ชั้น AC ที่ความเร็วรถต่างๆ

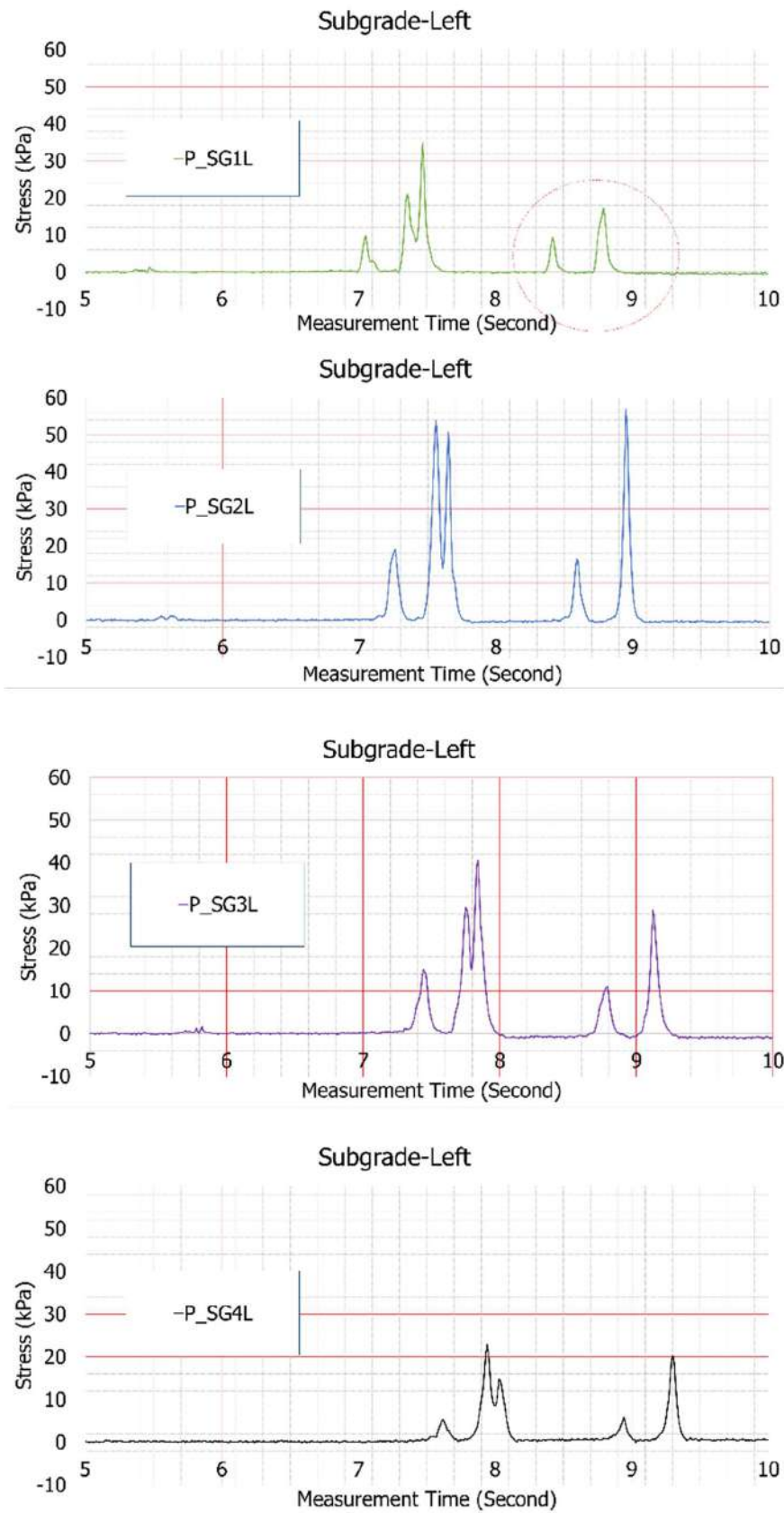
7.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)

รูปที่ 7.28 แสดงภาพตัดและตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ สำหรับแปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)

รูปที่ 7.29 แสดงตัวอย่างผลการสอบเทียบโดย รถ 2 เพลา 6 ล้อ ลักษณะการตอบสนองความเค้นเป็นซึฟเฟอร์ (Pulse) เช่นเดียวกับถนนลาดยาง พบว่ารถบรรทุกทดสอบส่งผ่านแรงหลังจากวินาทีที่ 8 ไปแล้ว โดยลักษณะ Pulse ที่เกิดขึ้นนำไปคำนวณความเร็วรถบรรทุกได้ประมาณ 50 km/hr เนื่องจากในการทดสอบไม่มีการปิดการจราจร จึงทำให้ขั้รถบรรทุกได้ความเร็วสูงสุดตามการจราจรด้านหน้า



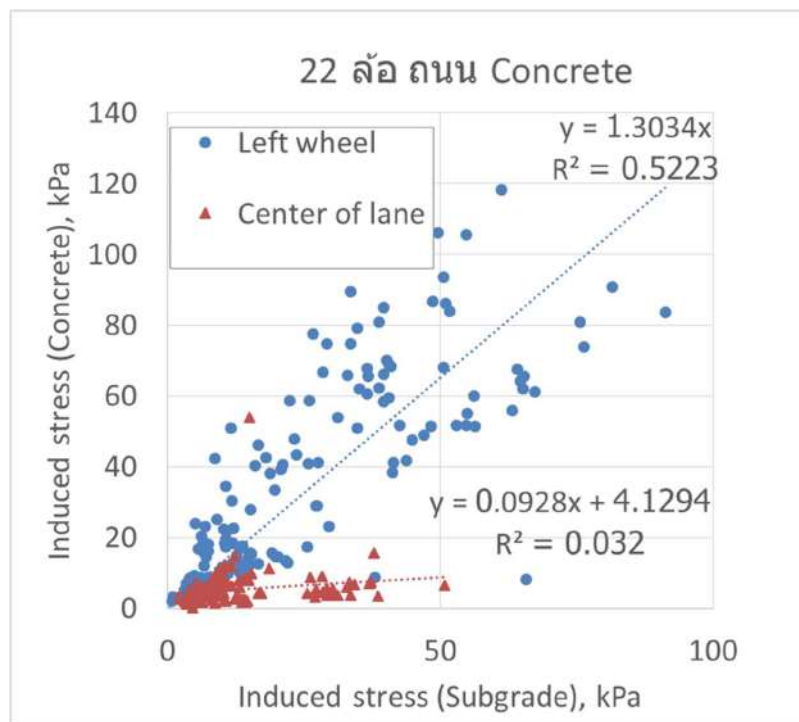
รูปที่ 7.28 ภาพตัดและตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ สำหรับแปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)



รูปที่ 7.29 ค่าความเค้น ใต้ล้อซ้าย ในชั้น Subgrade แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) รถ 2 เพลา 6 ล้อ
รถวิ่งด้วยความเร็ว 50 km/hr

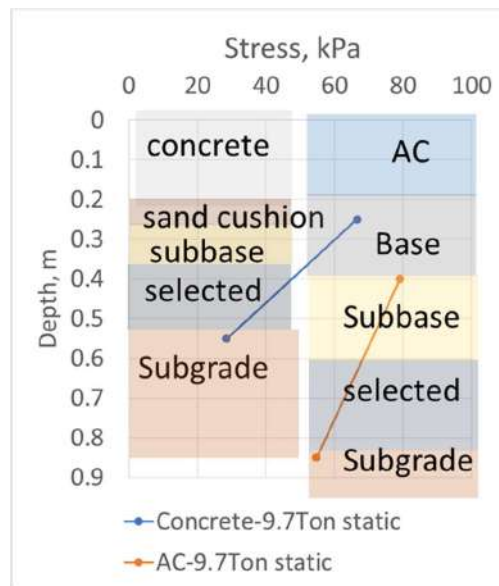
ค่าความเค้น (Stress) ในชั้น Subgrade เทียบกับใต้ชั้นคอนกรีต จากแปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) กรณี รถ 6 เพลา 22 ล้อ ดังแสดงในรูปที่ 7.30 พบว่าใต้ล้อซ้าย ค่าความเค้นในชั้นคอนกรีตมีค่าสูงกว่าในชั้น Subgrade ประมาณ 30% ในขณะที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่องจราจร ค่าความเค้นในชั้นคอนกรีตมีค่าต่ำมากเพียง 10% ของค่าความเค้นในชั้น Subgrade ดังสมการ

- Left wheel, $\sigma_{\text{concrete}} = 1.303 \sigma_{\text{subgrade}}$
- Center of lane, $\sigma_{\text{concrete}} = 0.093 \sigma_{\text{subgrade}} + 4.1$



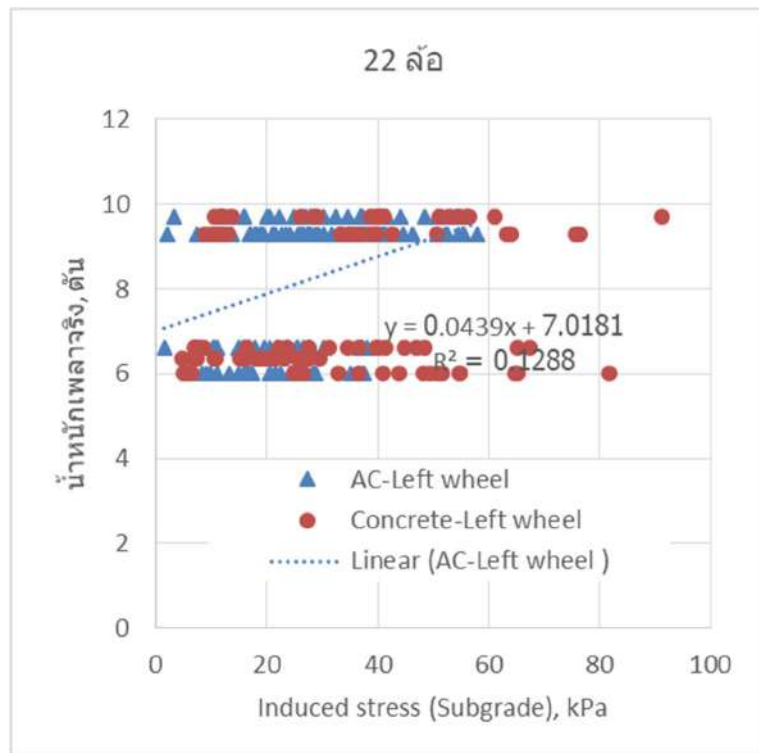
รูปที่ 7.30 ค่าความเค้น ในชั้น Subgrade และใต้ชั้นคอนกรีต ใต้ล้อซ้ายและล้อขวา แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) รถ 2 เพลา 6 ล้อ

ซึ่งสัดส่วนดังกล่าวแตกต่างจากกรณีถนนลาดยาง เนื่องจากความลึกของ Pressure cell ในชั้น Subgrade กรณีถนนลาดยาง (โพธาราม) และถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) มีความแตกต่างกัน และ พฤติกรรมของผิวทางและวัสดุ Subgrade ที่แตกต่างกัน หากเปรียบเทียบค่าความเค้นกับความลึก ในกรณีรถหยุดนิ่ง น้ำหนักเพลา 9.7 ตัน ทั้งกรณีถนนลาดยางและถนนคอนกรีตจะได้ดังแสดงในรูปที่ 7.31 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความเค้นในถนนคอนกรีต ที่ชั้น Subgrade มีแนวโน้มน้อยกว่าถนนลาดยาง ซึ่งเป็นไปตามหลักการทางวิศวกรรม

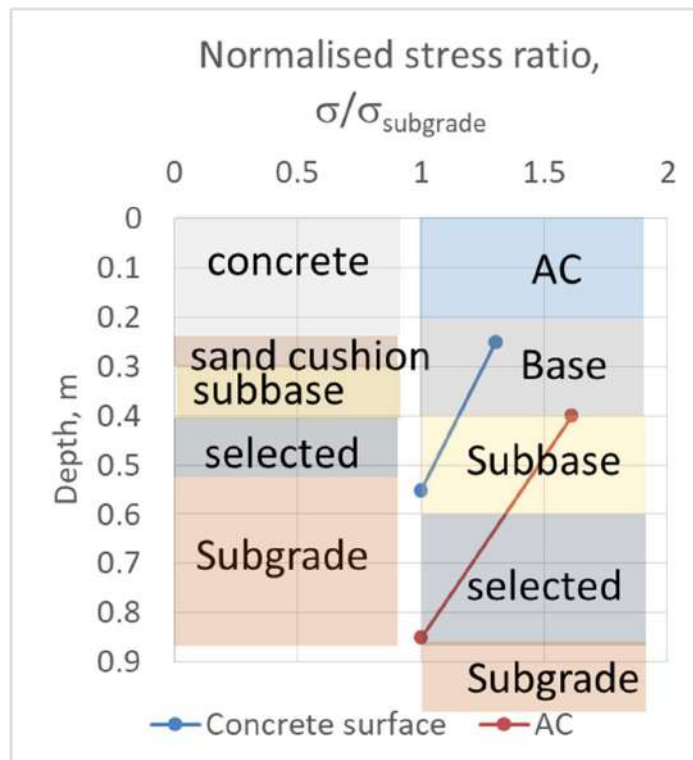


รูปที่ 7.31 ค่าความเค้นกับความลึก ในกรณีรถหยุดนิ่ง น้ำหนักเพลลา 9.7 ตัน ทั้งกรณีถนนลาดยางและถนนคอนกรีต

รูปที่ 7.32 แสดงค่าน้ำหนักเพลลาจริงและค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นในชั้น Subgrade ได้ล้อซ้าย กรณีถนนลาดยาง และถนนคอนกรีต ซึ่งพบว่าค่าความเค้นไม่มีการเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักเพลลาอย่างชัดเจนมากนัก และโดยทั่วไปแล้วค่าความเค้นในชั้น Subgrade ที่ความลึก 0.85 ม. (กรณีถนนลาดยาง) มีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับความเค้นในชั้น Subgrade ที่ความลึก 0.55 ม. (กรณีถนนคอนกรีต) โดยพบว่าถนนคอนกรีตจะมีความแปรปรวนมากกว่าถนนลาดยาง หากนำค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นในชั้น Subgrade และความเค้นที่ชั้นอื่นๆ จากรูปที่ 7.30 สำหรับถนนคอนกรีต และรูปที่ 7.20 สำหรับถนนลาดยาง มาพล็อตเทียบกับความลึกจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 7.33 พบว่าค่าความเค้นในถนนคอนกรีต ที่ความลึกเดียวกันมีค่าน้อยกว่าถนนลาดยาง กล่าวได้ว่าถนนคอนกรีตลดทอนค่าความเค้นในชั้น Subgrade ได้ดีกว่า

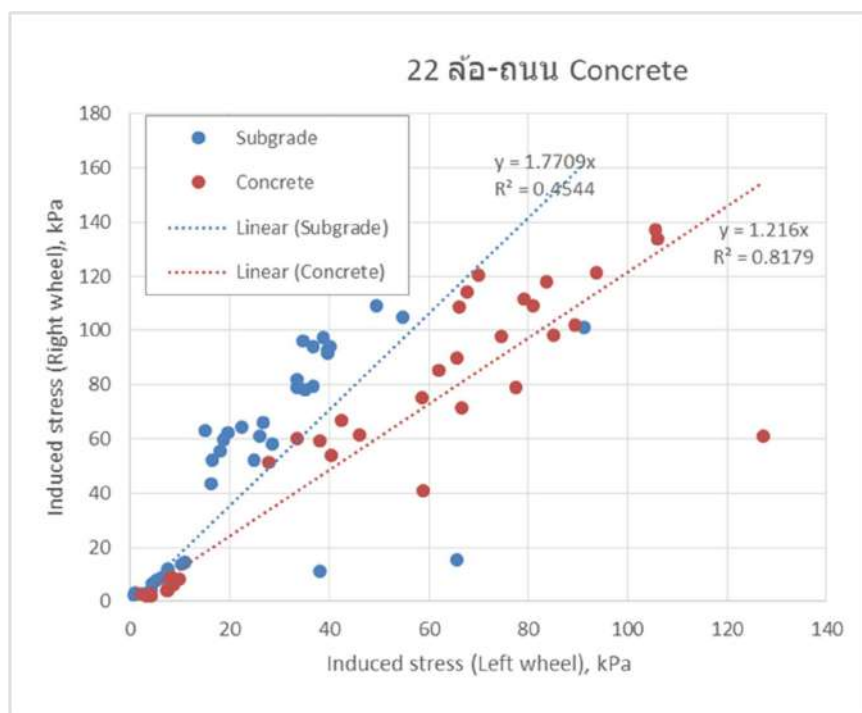


รูปที่ 7.32 น้ำหนักเพลาล้อและค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นในชั้น Subgrade ใต้ล้อซ้าย กรณีถนนลาดยาง และ ถนนคอนกรีต



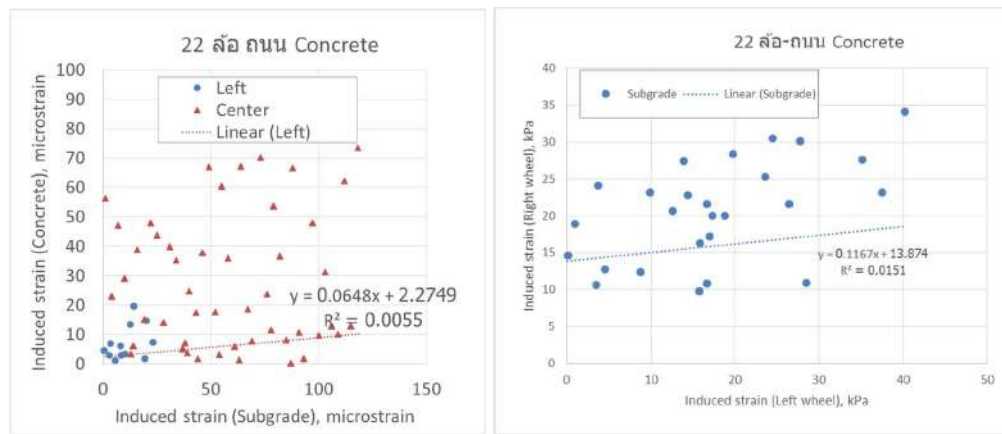
รูปที่ 7.33 ค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเค้นที่ชั้น Subgrade หรือ Normalised stress กับ ความลึก เปรียบเทียบกรณีถนนคอนกรีตและถนนลาดยางซึ่ง

รูปที่ 7.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นใต้ล้อซ้ายและใต้ล้อขวา กรณีแปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) พบว่า ความเค้นใต้ล้อขวา มีค่าสูงกว่าใต้ล้อซ้ายประมาณ 22% ในชั้นคอนกรีต และใต้ล้อขวาสูงกว่าล้อซ้าย 77% ในชั้น Subgrade ซึ่งแตกต่างจากกรณีถนนลาดยาง (ความเค้นใต้ล้อซ้ายสูงกว่าล้อขวา) คาดว่าเกิดจากพฤติกรรมผิวทางและชั้น Subgrade ที่แตกต่างกัน (Different rigidity) หรืออาจเกิดจาก Inclusion effect ของอุปกรณ์วัดที่ต่างกันทั้งสองวัสดุผิวทาง อย่างไรก็ตามก็เป็นเพียงผลการศึกษาเบื้องต้น ต้องมีการติดตามผลในระยะยาวเพื่อยืนยันความถูกต้อง



รูปที่ 7.34 ความเค้นใต้ล้อซ้ายและล้อขวาชั้น Subgrade และชั้น concrete กรณีถนนคอนกรีต

รูปที่ 7.35 แสดงความเครียดชั้น Subgrade และชั้น concrete กรณีถนนคอนกรีต พบว่าความเครียดมีการกระจายตัวอย่างมาก ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่ชัดเจน แต่ก็พบว่าค่า Strain ในชั้น Subgrade มีแนวโน้มมากกว่าในชั้นคอนกรีต

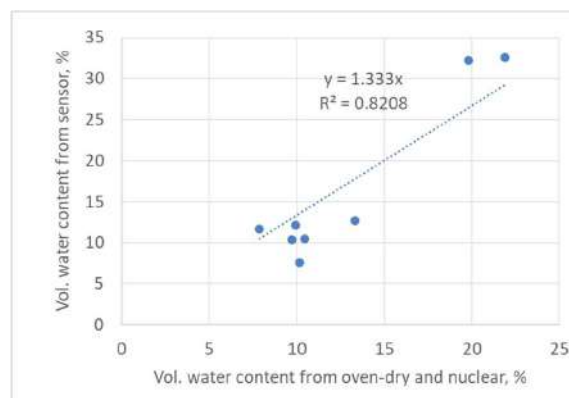


รูปที่ 7.35 ความเครียดชั้น Subgrade และชั้น concrete กรณีถนนคอนกรีต

7.3 ปัจจัยสภาพแวดล้อม- ความชื้นและอุณหภูมิ

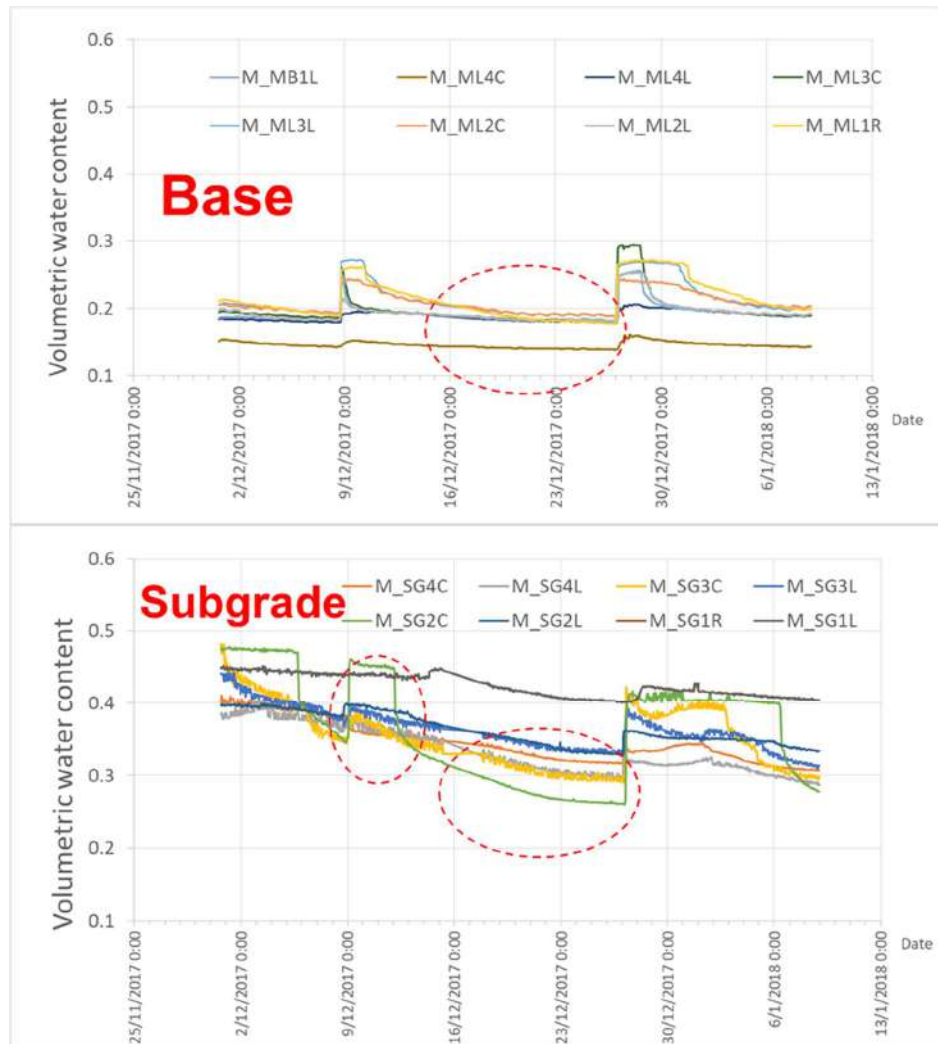
7.3.1 ความชื้น

ในการศึกษานี้ได้วัดความชื้นโดยปริมาตรของ (Volumetric water content, V_w/V_t) และ อุณหภูมิ โดยอุปกรณ์ Time-domain reflectometry technique (TDR) ซึ่งอาศัยการวัดค่า Dielectric constant ของวัสดุแต่ละชนิด (น้ำ อากาศ ของแข็ง) ที่แตกต่างกัน แม้ว่าทางผู้ผลิต Campbell Scientific จะมีการสอบเทียบ อุปกรณ์มาอยู่แล้ว แต่ในทางปฏิบัติควรมีการสอบเทียบในสนามอีกครั้ง โดยในการศึกษานี้ได้สอบเทียบค่าในสนามระหว่างค่า Vol. water content ที่อ่านจาก TDR และค่าจากการอบด้วยเตาอบและ Nuclear density ผลดังแสดงในรูปที่ 7.36 พบว่าค่าจาก TDR ที่วัดได้มีแนวโน้มสูงกว่าค่า Vol.water content จากเตาอบ ประมาณ 33%



รูปที่ 7.36 ผลสอบเทียบความชื้นวัดโดยอุปกรณ์ TDR และค่าจากการอบด้วยเตาอบและ Nuclear density

รูปที่ 7.37 แสดงความชื้นในชั้น Base และ Subgrade ถนนลาดยาง (โพธาราม) พบว่าในชั้น Subgrade ความชื้นมีค่าสูงกว่าแสดงถึงชนิดวัสดุมีขนาดเม็ดละเอียดมากกว่า แต่พบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นเกิดขึ้นรวดเร็วที่ชั้น base และอาจบ่งชี้ทิศทางของน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นจากด้านล่าง (Capillary rise) นอกจากนั้นพบว่า บริเวณตำแหน่ง M_SG2C มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นรวดเร็วที่จุดอื่น ซึ่งน่าสังเกตว่าอาจเป็นจุดอ่อนต่อไปในอนาคตได้ และประเด็นซึ่งควรติดตามต่อไปในอนาคต

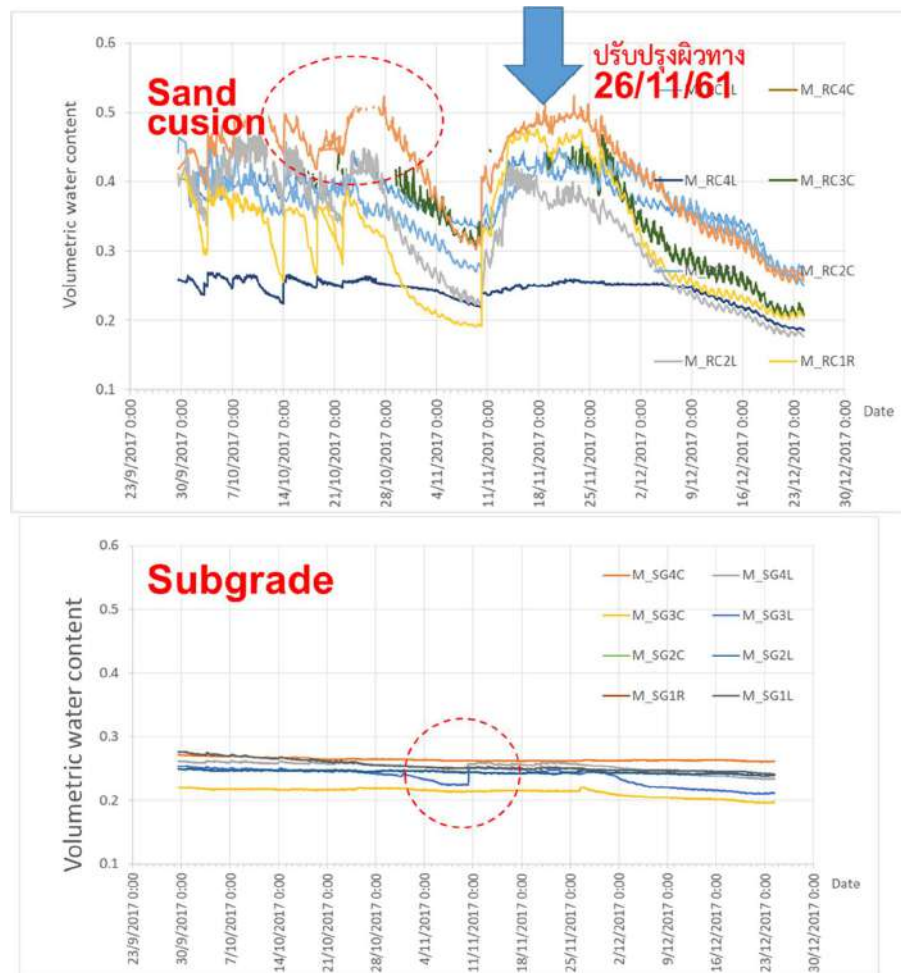


รูปที่ 7.37 ความชื้นในชั้น Base และ Subgrade ถนนลาดยาง (โพธาราม)

รูปที่ 7.38 แสดงความชื้นในชั้น Sand cushion และ Subgrade ถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) พบว่า ความชื้นในชั้นทรายใต้แผ่นพื้นคอนกรีตมีความแปรปรวนมากกว่า ความชื้นบริเวณ Subgrade ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยในอดีต Sargand et al. (2006)

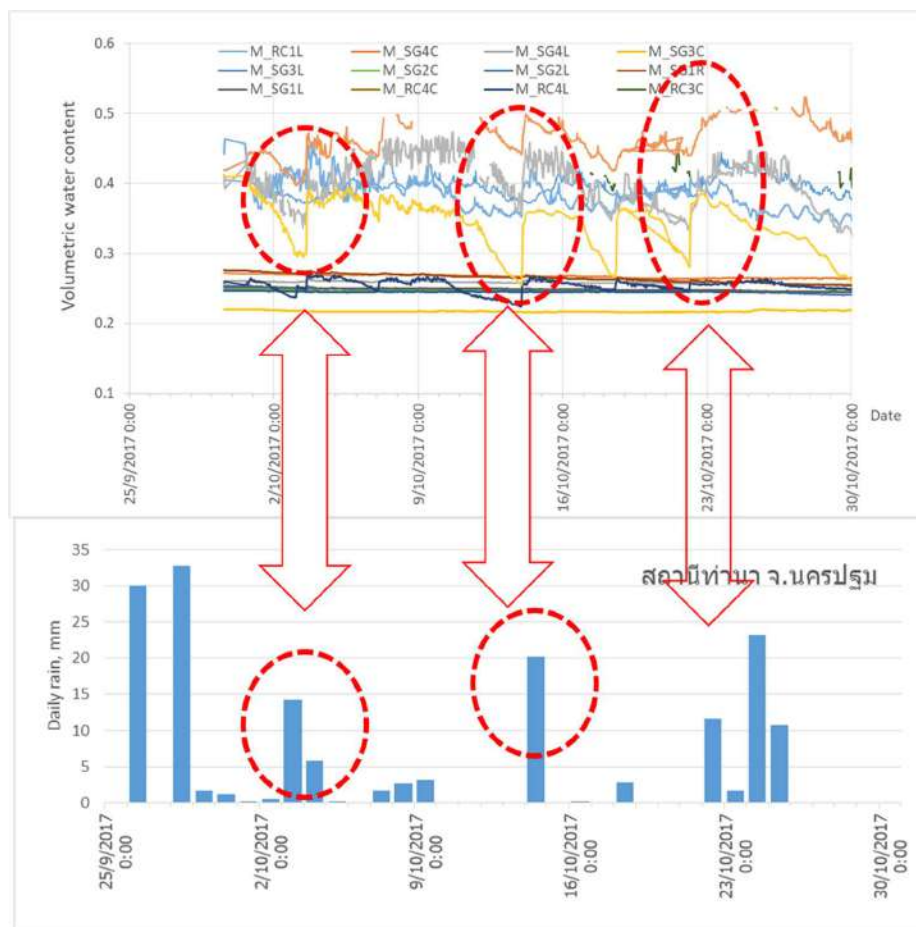
หรือกล่าวได้ว่าความชื้นมาจากด้านบนมากกว่าด้านล่างบริเวณตำแหน่ง RC2C RC1R, RC2L, SG3L เป็น ชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นมากที่สุด ซึ่งอาจบ่งชี้ได้ถึงจุดที่มีปัญหาความชื้นในชั้นทางต่อไปในอนาคต

อย่างไรก็ดีพบว่าความชื้นใต้ชั้นคอนกรีตมีลดลงอย่างรวดเร็วภายหลังการปรับปรุงผิวทางในวันที่ 26 พย. ซึ่งข้อมูลที่ได้เป็นการยืนยันประสิทธิภาพการป้องกันความชื้นได้



รูปที่ 7.38 ความชื้นในชั้น Sand cushion และ Subgrade ถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)

รูปที่ 7.39 แสดงความชื้นในชั้น Sand cushion และ Subgrade ถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) เทียบกับปริมาณน้ำฝน ซึ่งอ่านจากสถานีวัดสภาพอากาศท่านา จ.นครปฐม ของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (สสนก) พบว่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นในชั้นทรายใต้แผ่นพื้นคอนกรีตมีความสอดคล้องกับปริมาณน้ำฝน บางกรณีซึ่งพบความชื้นเพิ่มขึ้นแม้ว่ามีปริมาณน้ำฝนน้อยเนื่องจากสถานีวัดน้ำฝน ติดตั้งห่างจากแปลงทดลองพอสมควร ฝนที่วัดได้จึงไม่ใช่ตัวแทนของฝนที่แปลงทดลองอย่างแท้จริง



รูปที่ 7.39 ตัวอย่างความชื้นในชั้น Sand cushion และ Subgrade ถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) เทียบกับ ปริมาณน้ำฝน

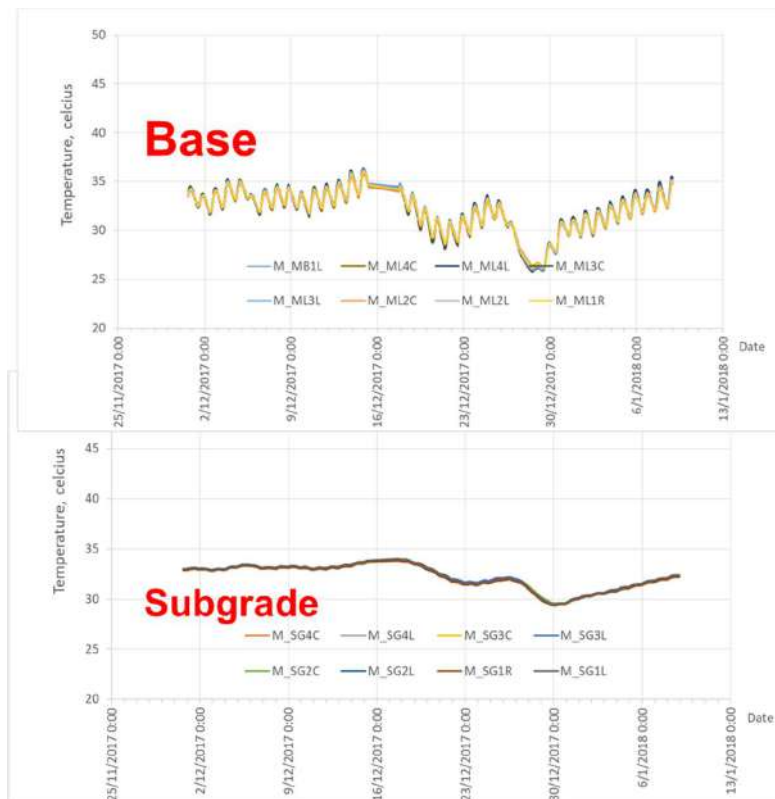
7.3.2 อุณหภูมิ

รูปที่ 7.40 แสดงอุณหภูมิในชั้น Base และ Subgrade กรณีถนนลาดยาง (โพธาราม) พบว่าอุณหภูมิในชั้นทรายใต้แผ่นพื้นคอนกรีตมีความแปรปรวนในช่วง 26-36 องศาเซลเซียสมากกว่า อุณหภูมิบริเวณ Subgrade ซึ่งอยู่ในช่วง 30-34 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไปตามหลักการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

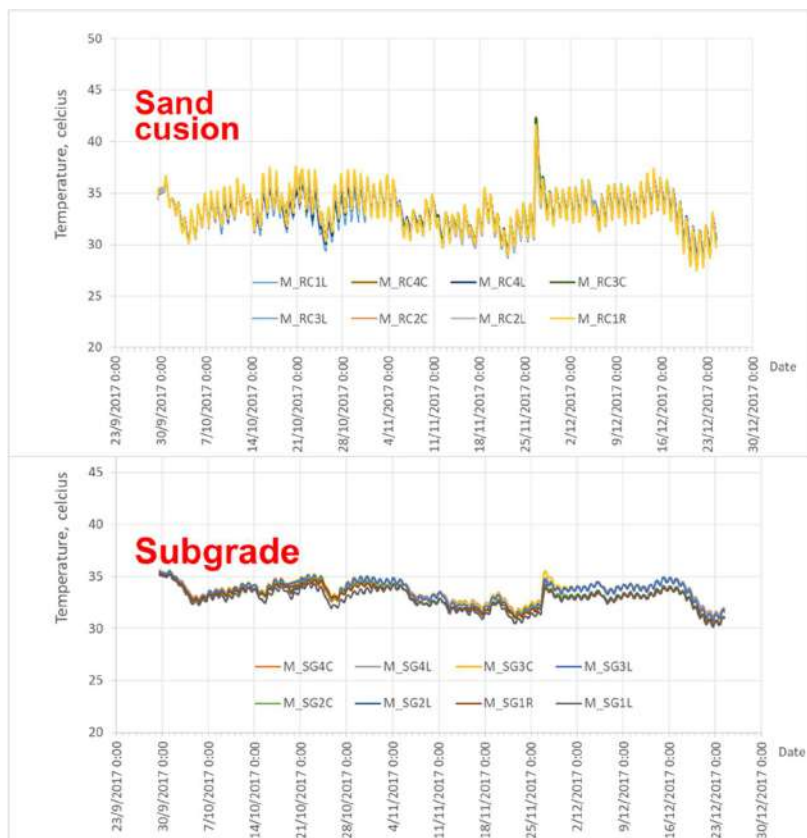
รูปที่ 7.41 แสดงอุณหภูมิในชั้น Sand cushion และ Subgrade ถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิในชั้นทรายใต้แผ่นพื้นคอนกรีตมีความแปรปรวนในช่วง 27-42 องศาเซลเซียสมากกว่า อุณหภูมิบริเวณ Subgrade ซึ่งอยู่ในช่วง 30-35 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าอุณหภูมิสูงกว่าแปลงถนนลาดยาง

ทั้งนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิในถนนลาดยางและถนนคอนกรีต เกิดเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน เช่นทิศทางการรับแสง เนื่องจากค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) สำหรับคอนกรีต และแอสฟัลต์มีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 900 J/kg•K.

(https://www.fhwa.dot.gov/pavement/sustainability/articles/pavement_thermal.cfm)



รูปที่ 7.40 อุณหภูมิในชั้น Base และ Subgrade ถนนลาดยาง (โพธาราม)



รูปที่ 7.41 อุณหภูมิในชั้น Sand cushion และ Subgrade ถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)

7.4 สรุป

ผลการสอบเทียบพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนทั้งแปลงคอนกรีต (นครชัยศรี) และแปลง Asphaltic concrete (โพธาราม) สรุปผลได้ดังนี้

ความเค้น (Stress) กรณีถนนลาดยาง

- บริเวณใต้ล้อซ้าย ความเค้นเนื้อชั้น Subbase มีค่าประมาณ 1.6-1.8 เท่าของ ความเค้นเนื้อชั้น Subgrade ขึ้นกับขนาดรถบรรทุก
- บริเวณกึ่งกลางถนน ความเค้นเนื้อชั้น Subbase มีค่าประมาณ 0.3-0.5 เท่าของ ความเค้นเนื้อชั้น Subgrade ขึ้นกับขนาดรถบรรทุก
- บริเวณใต้ล้อขวา ความเค้นเนื้อชั้น Subbase มีค่าโดยประมาณเท่ากับค่า บริเวณใต้ล้อซ้าย
- บริเวณใต้ล้อขวา ความเค้นเนื้อชั้น Subgrade มีค่าประมาณ 0.72 เท่าของ ค่าบริเวณใต้ล้อซ้าย

ความเครียด (Strain) กรณีถนนลาดยาง

- ค่าความเครียดมีการแปรปรวนของข้อมูลค่อนข้างมากกว่ากรณีความเค้น (อาจเกิดจากขนาดเซนเซอร์หรือลักษณะของวัสดุบดอัด) จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของค่า Strain แต่ละตำแหน่ง ที่ชัดเจนได้
- ค่าความเครียด (Strain) ในชั้น Asphaltic concrete บริเวณ ล้อซ้าย ในทิศการจราจร (Longitudinal-X) เปรียบเทียบกับทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) พบว่ามีความเครียดในทิศทาง X มีแนวโน้มค่าสูงกว่าในทิศทาง Y

ความเร็วรถบรรทุก

- ช่วงใกล้รถหยุดนิ่ง อิทธิพลจากการเบรกจะทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้นประมาณ 10%
- ค่าความเค้นและความเครียดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วรถบรรทุกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต

แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)

- ค่าความเค้นในถนนคอนกรีต ที่ความลึกเดียวกันมีค่าน้อยกว่าถนนลาดยาง กล่าวได้ว่าถนนคอนกรีตลดทอนค่าความเค้นในชั้น Subgrade ได้ดีกว่า
- กรณีแปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) พบว่า ความเค้นใต้ล้อขวา มีค่าสูงกว่าใต้ล้อซ้ายประมาณ 22% ในชั้นคอนกรีต และใต้ล้อขวาสูงกว่าล้อซ้าย 77% ในชั้น Subgrade ซึ่งแตกต่างจากกรณีถนนลาดยาง (ความเค้นใต้ล้อซ้ายสูงกว่าล้อขวา) อย่างไรก็ตามก็ต้องมีการติดตามผลในระยะยาวเพื่อยืนยันความถูกต้อง

ความชื้นและอุณหภูมิ

- ความชื้นในชั้นทรายใต้แผ่นพื้นคอนกรีตมีความแปรปรวนมากกว่า ความชื้นบริเวณ Subgrade ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต

- ความชื้นในชั้น Subgrade ได้ผิวทางลาดยาง มีค่าสูงกว่าแสดงถึงชนิดวัสดุมีขนาดเม็ดละเอียดมากกว่า และแต่การคายน้ำรวดเร็วกว่าชั้น base และอาจบ่งชี้ทิศทางของน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นจากด้านล่าง (Capillary rise)
- อุณหภูมิใต้ชั้นผิวทางมีความแปรปรวนมากกว่า อุณหภูมิบริเวณ Subgrade ซึ่งเป็นไปตามหลักการ ถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

8. การวิเคราะห์ค่าการตอบสนองตามทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดและ แบบจำลองโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากภาคสนามกับผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นทางภาคทฤษฎี เพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของเครื่องมือตรวจวัดที่ได้ดำเนินการติดตั้งไว้ใต้โครงสร้างชั้น และเพื่อที่จะเข้าใจถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของชั้นทางภายใต้แรงกระทำอันจะส่งผลให้การออกแบบ การประเมินสภาพและการทำนายอายุทางหลวงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

8.1 กรณีศึกษาเบื้องต้น

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบครั้งนี้ได้จากการทดสอบในสนามโดยการวิ่งทดสอบของรถบรรทุก 6 ล้อ และรถบรรทุกกึ่งพ่วง 22 ล้อ อันนำมาซึ่งข้อมูลค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกดทับจากเพลาดียว-ล้อเดี่ยว เพลาดียว-ล้อคู่ เพลาคู่-ล้อคู่ และสามเพลาล้อคู่ที่น้ำหนักบรรทุกแตกต่างกัน โดยในการเปรียบเทียบนั้นจะใช้ข้อมูลตรวจวัดในกรณีรถบรรทุกหนึ่งซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 รายละเอียดการทดสอบในสนาม

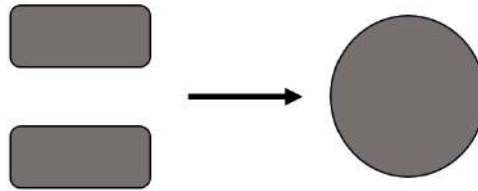
ประเภทรถบรรทุก	ประเภทเพลาทดสอบ	น้ำหนักบรรทุก	ความเร็ว (กม./ชม.)	แรงดันลมยาง
รถบรรทุก 6 ล้อ	เพลาดียว-ล้อเดี่ยว	4 ตัน	หยุดนิ่ง, 20, 60	120 ปอนด์/ตร.นิ้ว
	เพลาดียว-ล้อคู่	11 ตัน	หยุดนิ่ง, 20, 60	120 ปอนด์/ตร.นิ้ว
รถกึ่งพ่วง 22 ล้อ	เพลาคู่-ล้อคู่	10 ตัน	หยุดนิ่ง, 20, 60	130 ปอนด์/ตร.นิ้ว
	สามเพลาล้อคู่	8.5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

ส่วนทฤษฎีที่นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเบื้องต้นนี้ประกอบไปด้วย

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

8.2 สมมติฐานและคุณสมบัติวัสดุ

ค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นโครงสร้างทางนั้นเป็นผลเนื่องจากทั้งแรงกระทำที่เกิดขึ้นและคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาก่อสร้างชั้นทางแต่ละชั้น ในการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตมีการวิเคราะห์แรงกระทำเนื่องจากล้อรถในรูปแบบที่หลากหลายทั้งเป็นรูปวงรีหรือวงกลมที่มีจำนวนวงเท่ากับจำนวนล้อรถที่กดทับลงบนชั้นทางนั้น โดยในการวิเคราะห์ศึกษานี้ได้กำหนดให้ลักษณะการกระจายของแรงกระทำจากล้อรถลงสู่ชั้นทางเป็นรูปวงกลม 1 วง แทนจำนวนล้อรถ 2 ล้อ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.1 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี LEA Model ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำลงตามตำแหน่งล้อรถจริงด้วยเช่นกัน ส่วนการวิเคราะห์โดยวิธี Finite Element นั้นใช้การวิเคราะห์แบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่จำลองสภาพได้เหมือนสภาวะแวดล้อมและแรงกระทำต่างๆได้อย่างเสมือนจริงที่สุด



รูปที่ 8.1 ลักษณะการกระจายแรงรูปวงกลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลนี้

คุณสมบัติวัสดุชั้นทางที่นำมาวิเคราะห์นั้นประกอบไปด้วยค่าอีลาสติคโมดูลัส (Elastic Modulus, E) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากการทดสอบ Falling Weight Deflectometer โดยสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบกรมทางหลวง ค่าความหนาของชั้นโครงสร้างทาง (Thickness, h) และรวมถึงค่าความหนาเทียบเท่า (Equivalent Thickness, H_e) ในกรณีที่ทำการแปลงชั้นโครงสร้างทางหลายชั้นให้กลายเป็นโครงสร้างทางชั้นเดียวโดยวิธีการวิเคราะห์ของ Odemark โดยคุณสมบัติวัสดุชั้นทางสำหรับการคำนวณทางทฤษฎีดังแสดงในตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 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

8.3 การเปรียบเทียบข้อมูลภาคสนามและการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้น้ำหนักบรรทุกจริง

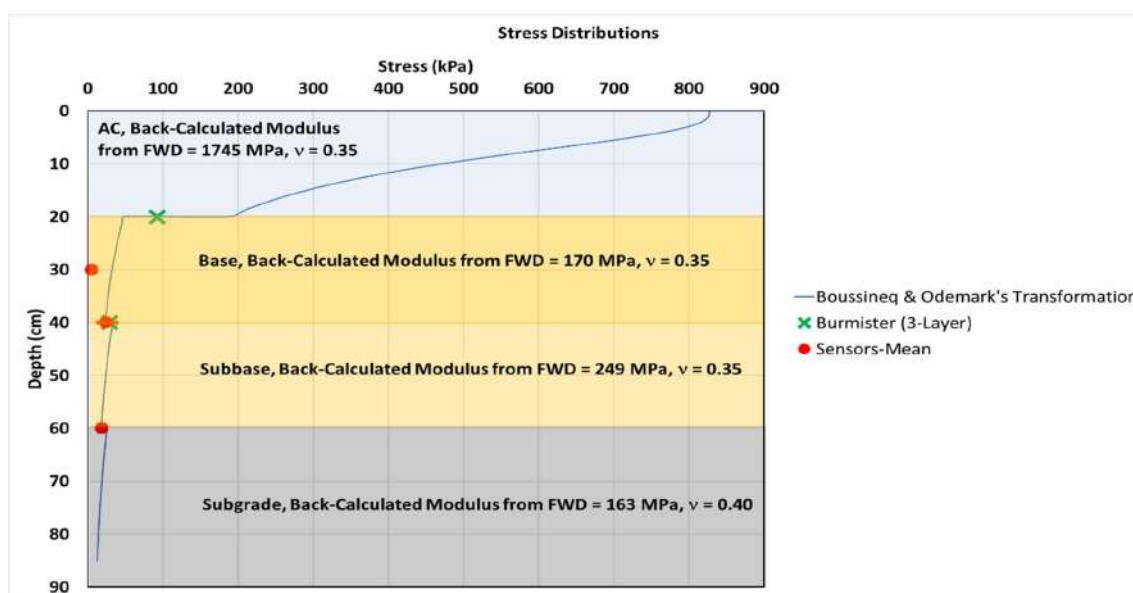
คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาถึงค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำจากรถบรรทุก โดยใช้การวิ่งทดสอบด้วยรถบรรทุก 6 ล้อ และรถกึ่งพ่วง 22 ล้อ เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของชั้นโครงสร้างทางที่จะเกิดขึ้นและทราบถึงผลกระทบจากปัจจัยต่างๆในสภาพแวดล้อมใช้งานจริง โดยในการทดสอบนั้นได้ดำเนินการให้รถบรรทุกวิ่งเข้ามาจอดทับที่ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (ด้วยลักษณะเพลลาที่แตกต่างกัน) และจอดค้างไว้ประมาณ 20-30 วินาที จากนั้นจึงนำรถออกจากแปลงทดสอบ เมื่อดำเนินการทดสอบในสนามแล้วเสร็จจึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความเค้นและความเครียดที่ตรวจวัดในสนามกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีต่อไป

ทั้งนี้รูปที่ 8.2 ถึง รูปที่ 8.13 แสดงตัวอย่างการกระจายความเค้นในแนวตั้งและความเครียดทั้งในแนวตั้งฉากและในแนวนอนกับทิศทางจราจรที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายลงเพลลาประเภทต่างๆ ทั้งเพลลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว เพลลาเดี่ยว-ล้อคู่ เพลาคู่-ล้อคู่ และสามเพลลา-ล้อคู่ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเค้นและความเครียดที่ตรวจวัดได้กับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของ Boussinesq and Odemark พบว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งในตำแหน่งใต้ชั้นพื้นทางและชั้นดินเดิมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎีซึ่งมีความแตกต่างกันสูงสุดเพียง 7 kPa เท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบที่ตำแหน่งกึ่งกลางชั้นพื้นทางพบว่าค่าความแตกต่างนั้นเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 26-64 kPa ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าความเค้นที่ตรวจวัดได้จากตำแหน่งกึ่งกลางชั้นพื้นทางนั้นมีค่าต่ำกว่าที่คำนวณได้และยังนับว่ามีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นที่ตรวจวัดได้จากตำแหน่งใต้ชั้นพื้นทางเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเค้นในแนวตั้งบริเวณส่วนบนของชั้นดินเดิมพบว่าความแตกต่างนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วงประมาณ 4-12 kPa เท่านั้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับทฤษฎีของ Burmister (3-Layer) พบว่าค่าความแตกต่างของความเค้นในแนวตั้งบริเวณตำแหน่งใต้ชั้นพื้นทางมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 5-17 kPa ซึ่งนับว่าใกล้เคียงกับค่าเปรียบเทียบจากทฤษฎีของ Boussinesq and Odemark เป็นอย่างมาก

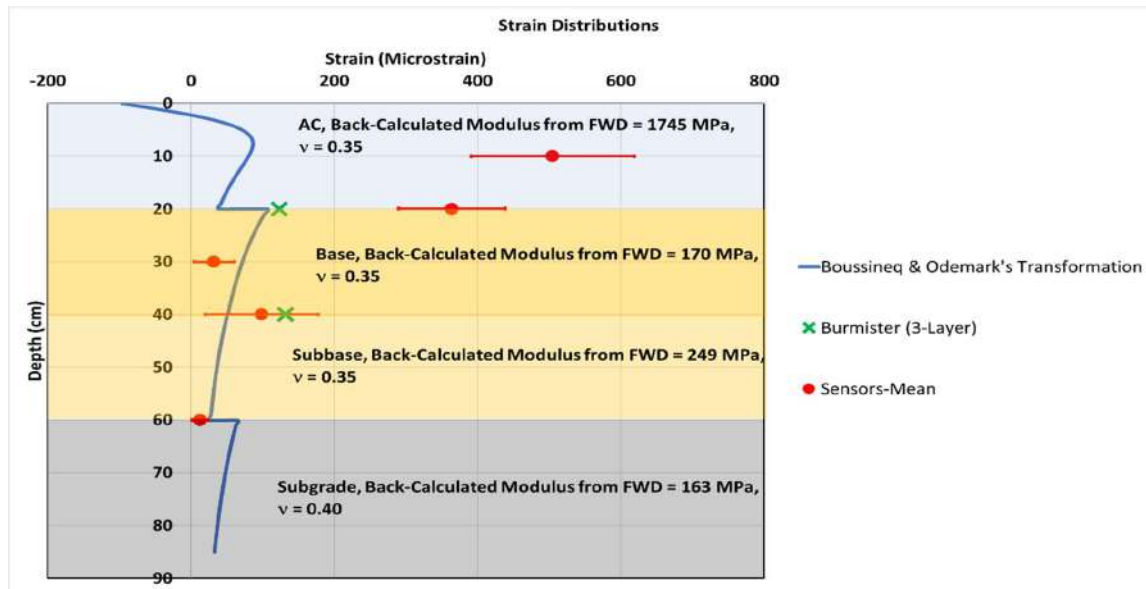
ในส่วนของค่าความเครียดในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรนั้นพบว่าค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้บริเวณตำแหน่งใต้ชั้นพื้นทางมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีของ Boussinesq and Odemark เช่นกัน โดยความแตกต่างมีค่าตั้งแต่ 45-82 microstrain ส่วนในตำแหน่งกึ่งกลางชั้นพื้นทางและตำแหน่งชั้นดินเดิมนั้นมีค่าความแตกต่างมากขึ้นมาอยู่ในช่วง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

ในส่วนของค่าความเครียดในแนวนอนกับทิศทางจราจรนั้นพบว่าค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้บริเวณตำแหน่งใต้ชั้นพื้นทางมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎีเช่นกัน โดยความแตกต่างมีค่าตั้งแต่ 4-24

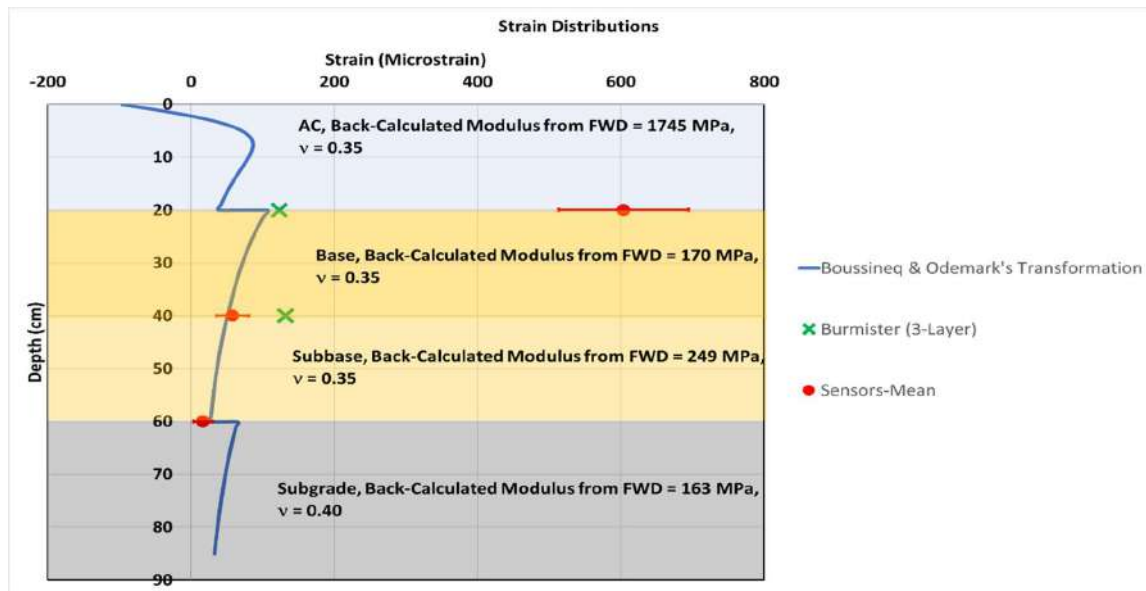
microstrain ส่วนในตำแหน่งกึ่งกลางชั้นพื้นทางในทิศทางนี้นั้นไม่มีผลตรวจวัดจากเครื่องมือตรวจวัด ในขณะที่ตำแหน่งชั้นดินเดิมนี้มีค่าความแตกต่างมากขึ้นมาอยู่ในช่วง 43-119 microstrain โดยผลการเปรียบเทียบยังพบว่าค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้บริเวณชั้นผิวทางนั้นมีค่าแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้ค่อนข้างมากในระดับหลักร้อย microstrain เช่นเดียวกับการเปรียบเทียบในแนวตั้งฉาก อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความเครียดที่วัดได้ในสนามในทุกกรณีนั้นมีลักษณะเป็น Tensile Strain ซึ่งแตกต่างจากที่พบเจอในแนวตั้งฉากที่ตรวจพบเจอ Tensile Strain เฉพาะในรูปแบบเพลาลัดเดียว-ลัดเดียวเท่านั้น (รูปแบบอื่นในแนวตั้งฉากตรวจวัดได้เป็น Compressive Strain ทั้งสิ้น) ซึ่งพฤติกรรมที่แตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากตำแหน่งลัดที่กดทับบน Strain Gage ดังอธิบายไว้ในย่อหน้าถัดไป ในขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับทฤษฎีของ Burmister พบว่าค่าความแตกต่างของความเครียดบริเวณตำแหน่งได้ชั้นผิวทางและใต้ชั้นพื้นทางมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 78-490 และ 78-190 microstrain ตามลำดับ



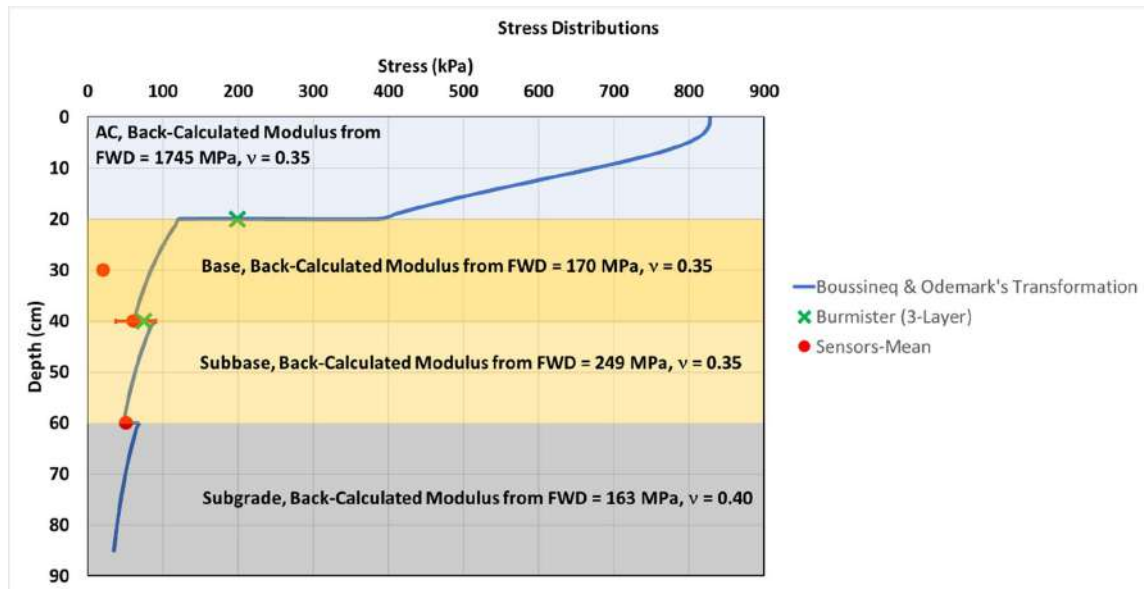
รูปที่ 8.2 การกระจายความเค้นในแนวตั้งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาลัดเดียว-ลัดเดียว น้ำหนักเพลาลัด 4 ตัน



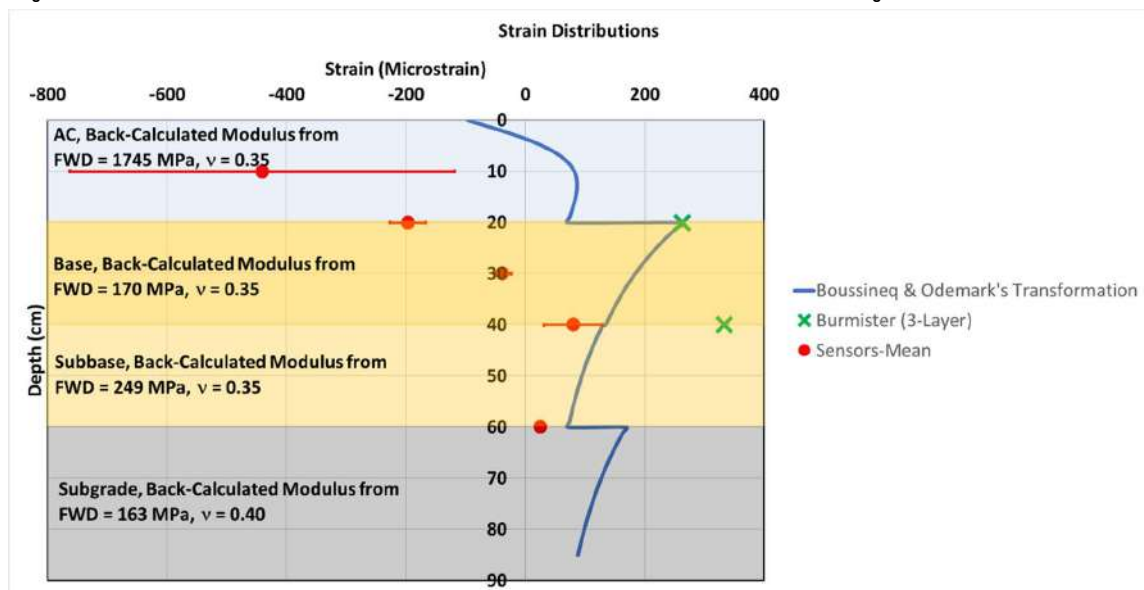
รูปที่ 8.3 การกระจายความเครียดในแนวตั้งจากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาล้อเดียว น้ำหนักเพลาล้อ 4 ตัน



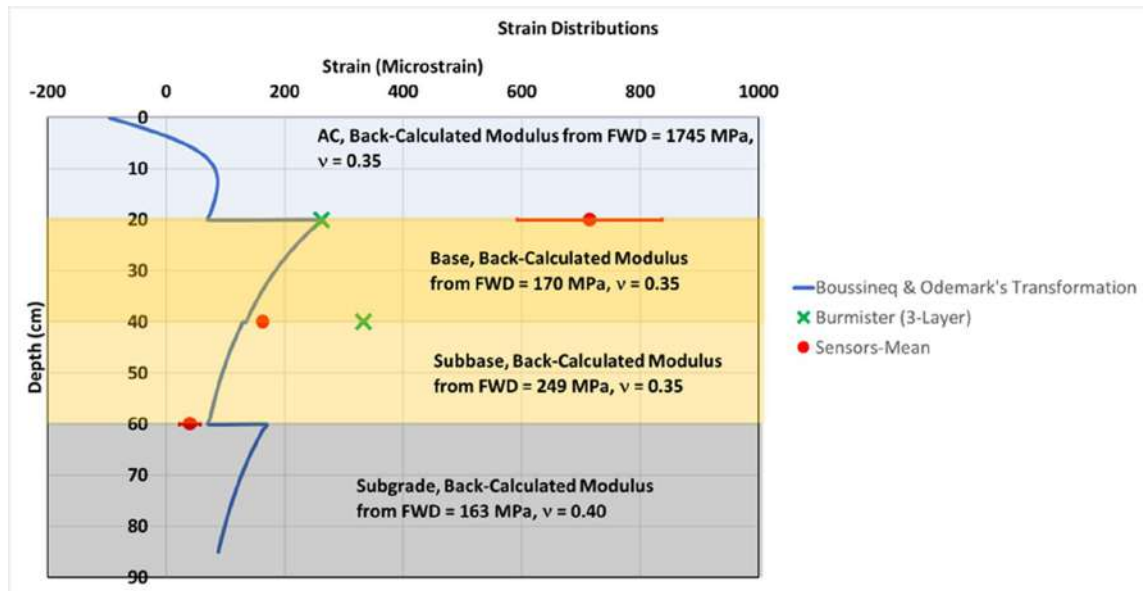
รูปที่ 8.4 การกระจายความเครียดในแนวนอนกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาล้อเดียว น้ำหนักเพลาล้อ 4 ตัน



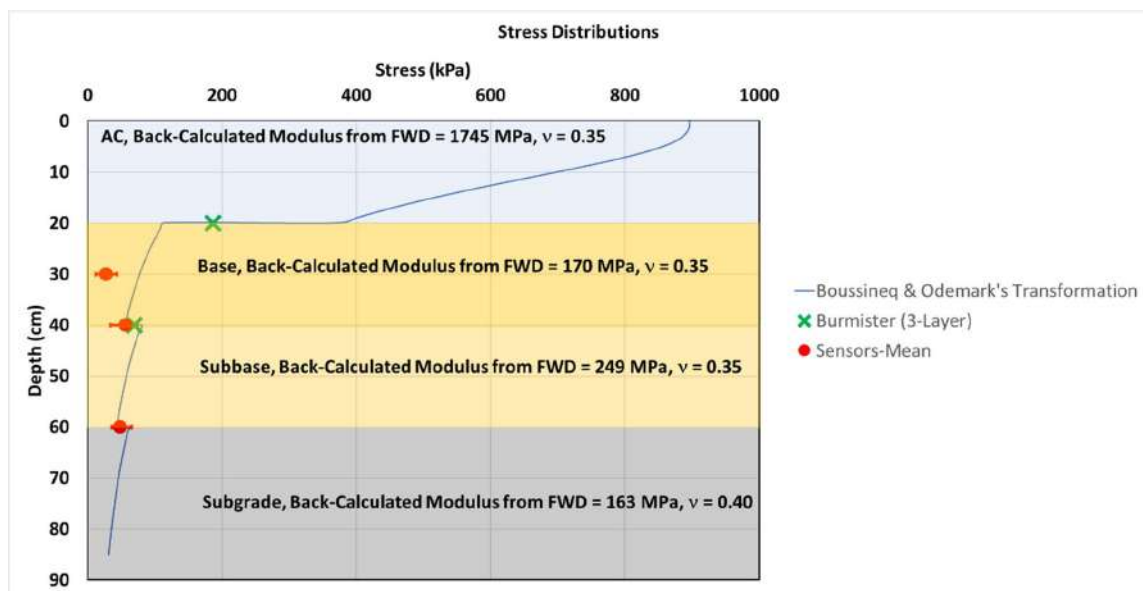
รูปที่ 8.5 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลลาเดี่ยวล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 11 ตัน



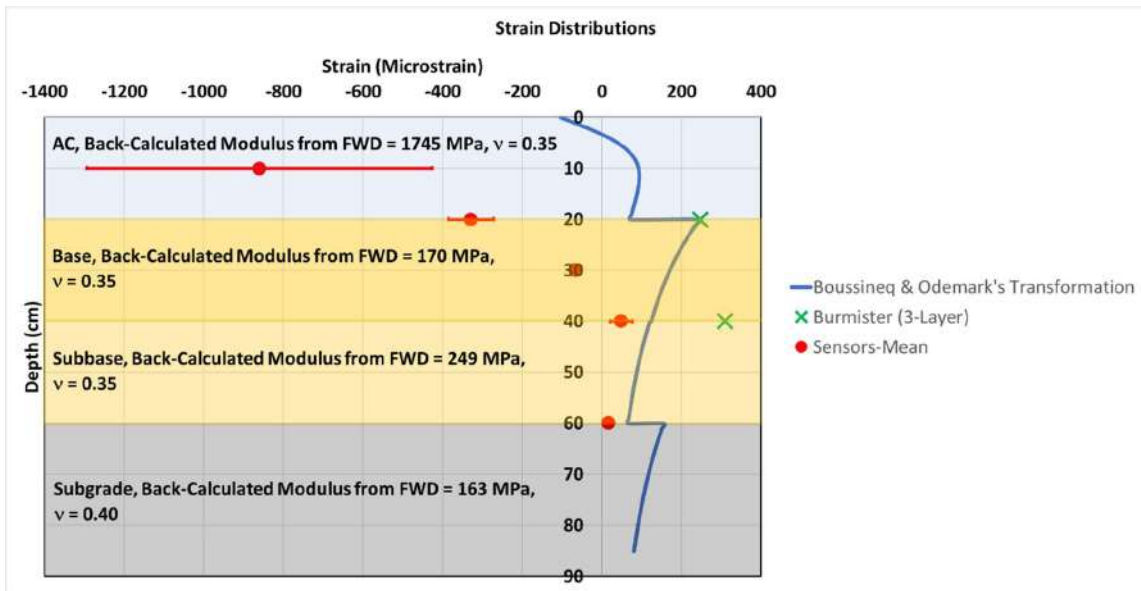
รูปที่ 8.6 การกระจายความเครียดในแนวดิ่งจากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลลาเดี่ยวล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 11 ตัน



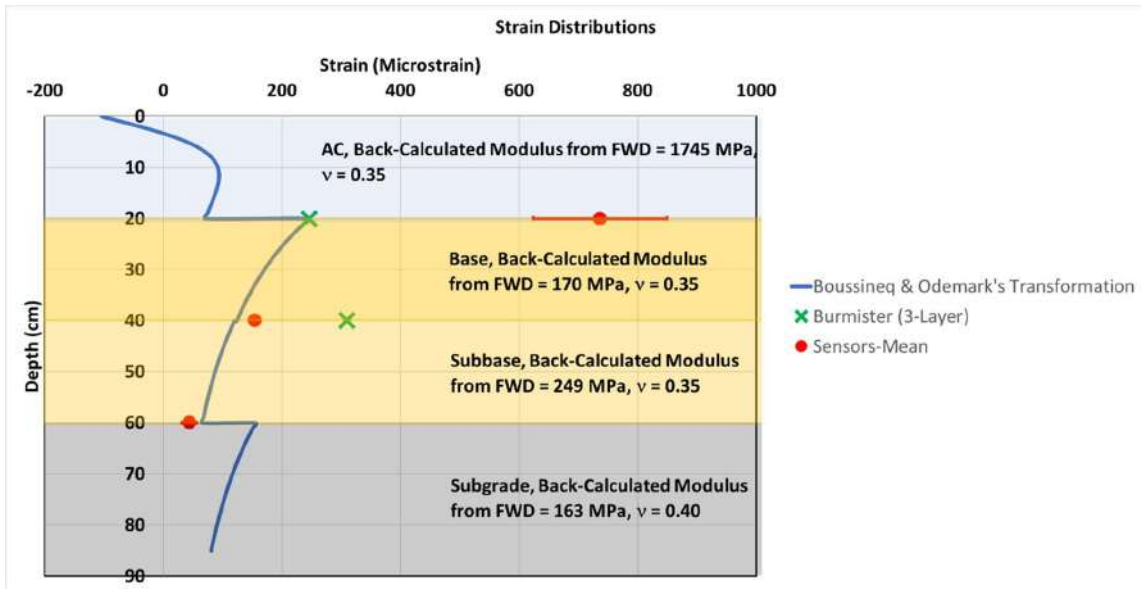
รูปที่ 8.7 การกระจายความเครียดในแนวนอนกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาคู่ล้อคู่
น้ำหนักเพลาคู่ 11 ตัน



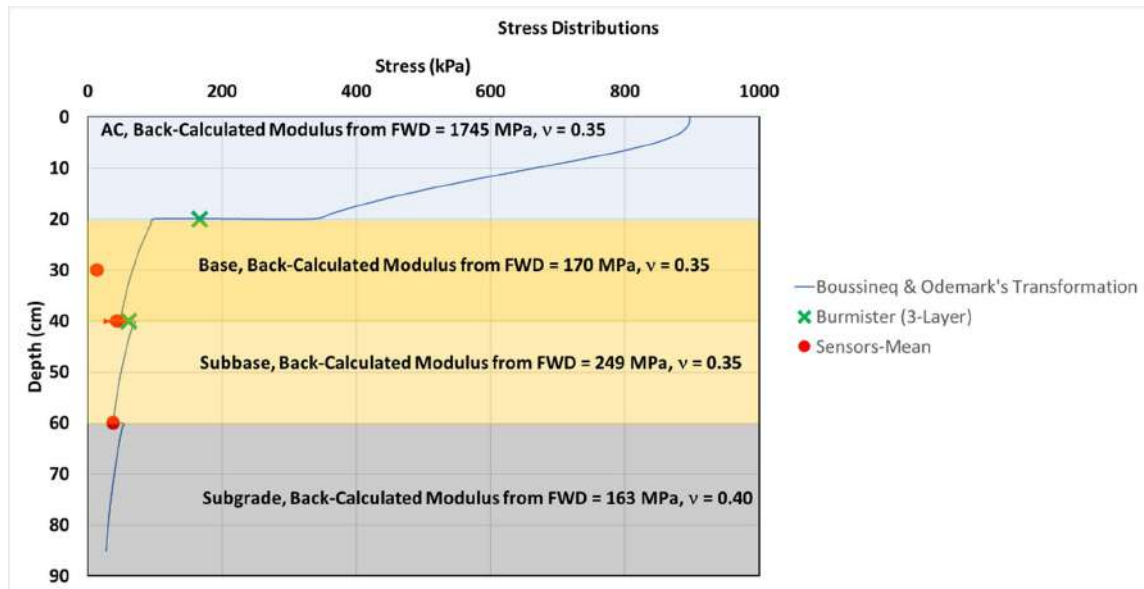
รูปที่ 8.8 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาคู่ล้อคู่ น้ำหนักเพลาคู่ 10 ตัน



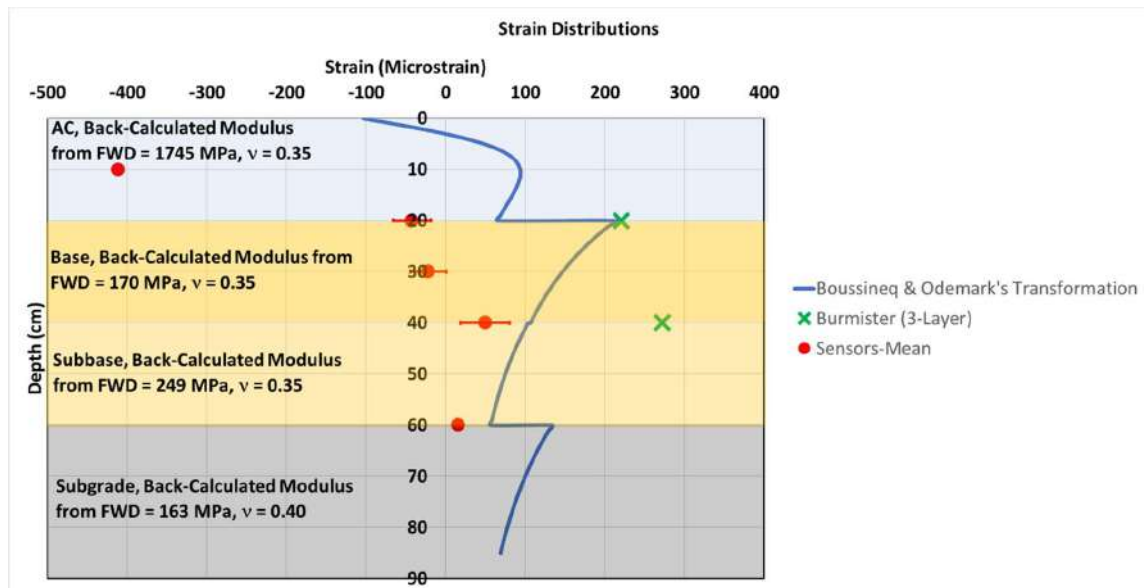
รูปที่ 8.9 การกระจายความเครียดในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาคู่ล้อคู่
น้ำหนักเพลาล้อ 10 ตัน



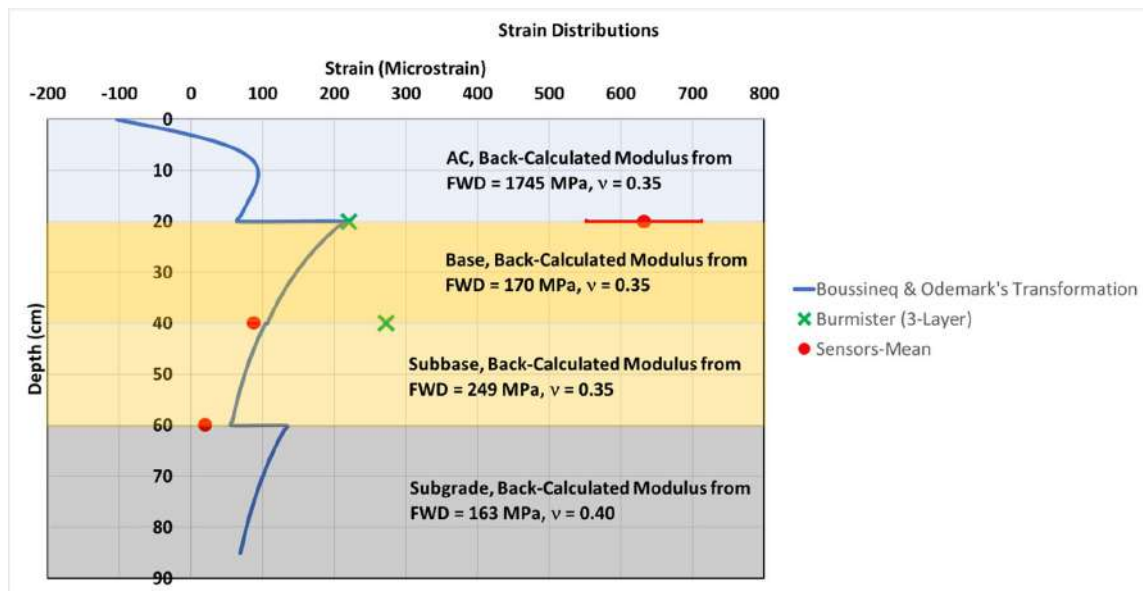
รูปที่ 8.10 การกระจายความเครียดในแนวนอนกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาคู่ล้อคู่
น้ำหนักเพลาล้อ 10 ตัน



รูปที่ 8.11 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 8.5 ตัน



รูปที่ 8.12 การกระจายความเครียดในแนวดิ่งจากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 8.5 ตัน



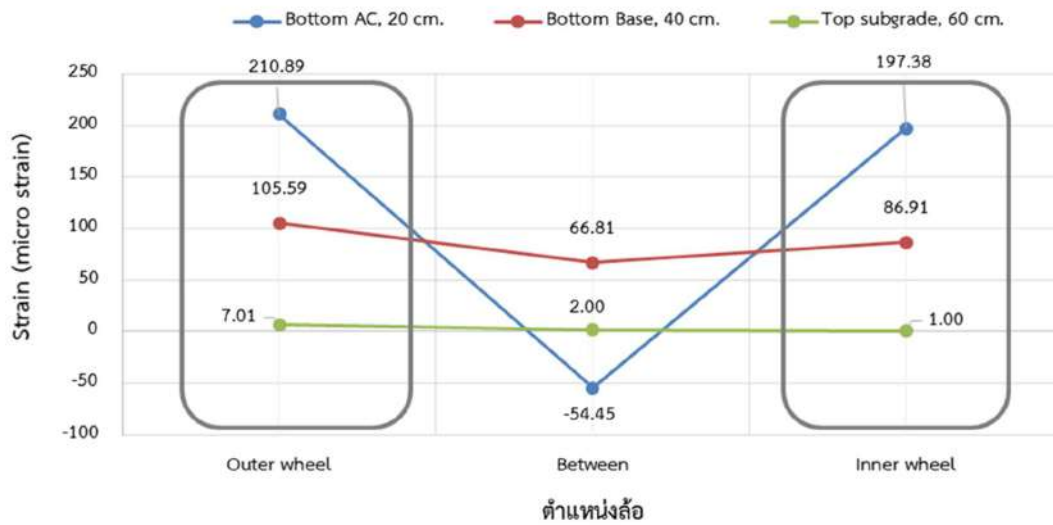
รูปที่ 8.13 การกระจายความเครียดในแนวนานกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่
น้ำหนักเพลาน้ำหนัก 8.5 ตัน

เนื่องจากผลการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นใต้ชั้นผิวทางมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากตำแหน่งการกดทับของล้อรถ (กรณีเพลาน้ำหนักเดี่ยว-ล้อคู่) บน Strain Gage ทั้งที่ตำแหน่งใต้ล้อด้านนอก ด้านใน และที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อคู่ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 8.14 โดยใช้พิกัดน้ำหนักเพลาทดสอบทั้ง 4 และ 11 ตัน โดยผลการทดสอบทั้งสองกรณีแสดงให้เห็นว่าสำหรับ Strain Gage ที่ติดตั้งในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจรนั้น ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อมีลักษณะเป็น Compressive Strain ส่วนค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งใต้ล้อมีลักษณะเป็น Tensile Strain ดังแสดงในรูปที่ 8.15 และ รูปที่ 8.16 และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ Strain Gage ที่ติดตั้งในแนวนานกับทิศทางจราจรนั้นพบว่าค่าความเครียดที่เกิดขึ้นทั้งบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อและตำแหน่งใต้ล้อมีลักษณะเป็น Tensile Strain ทั้งสิ้นดังแสดงในรูปที่ 8.17 และ รูปที่ 8.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งกดทับบน Strain Gage ส่งผลอย่างมากต่อความแปรปรวนของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้ชั้นผิวทาง

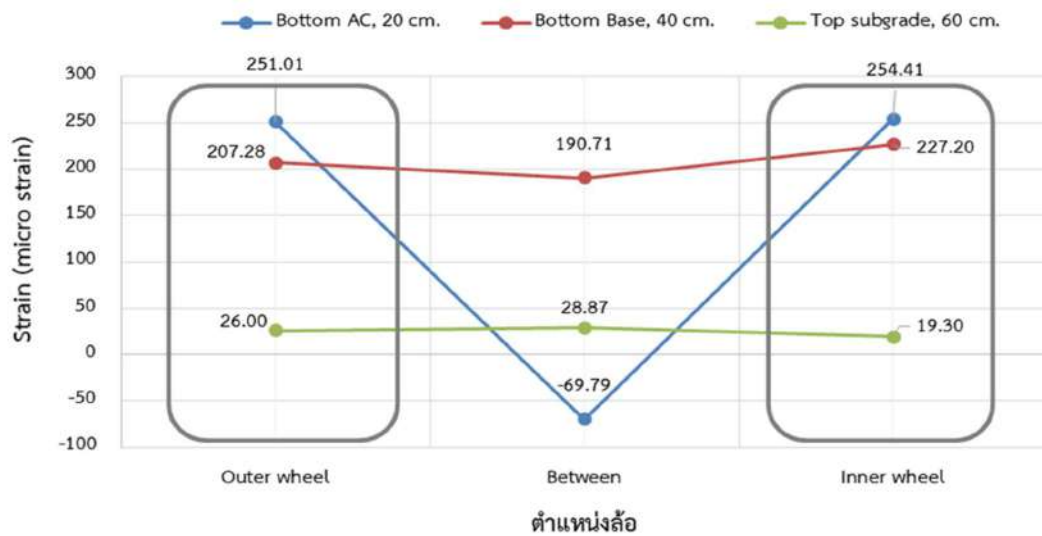
สุดท้ายนี้ผลการเปรียบเทียบทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นนั้นมีค่าความแปรปรวนของข้อมูลค่อนข้างน้อยและค่าที่ตรวจวัดได้ค่อนข้างสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ยกเว้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางชั้นพื้นทางที่มีค่าค่อนข้างต่ำกว่าที่คำนวณได้ ในขณะที่ค่าความเครียดนั้นมีความแปรปรวนสูงมากเนื่องจากขนาดของ Pressure Cell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



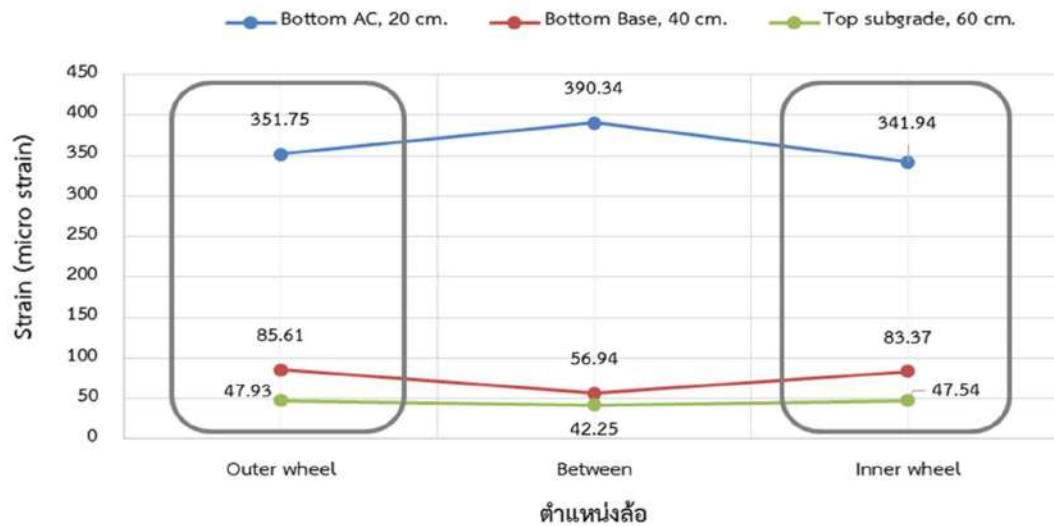
รูปที่ 8.14 ตำแหน่งกตัทับของลื้อรถบรรทุกบน Strain Gage ดังนี้ A) กึ่งกลางระหว่างลื้อคู่ B) ใต้ลื้อด้านใน C) ใต้ลื้อด้านนอก



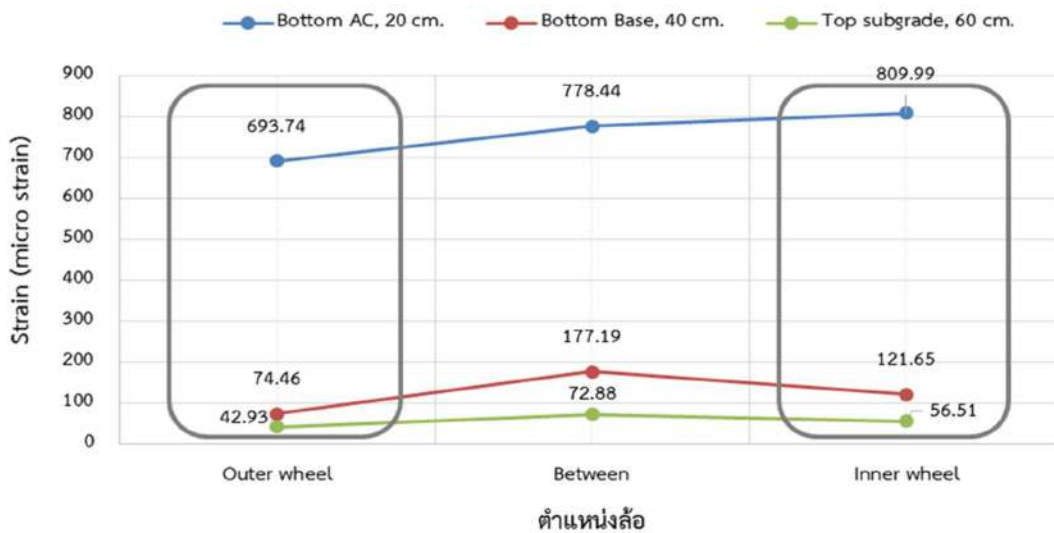
รูปที่ 8.15 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุกทุก 4 ตัน



รูปที่ 8.16 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุกทุก 11 ตัน



รูปที่ 8.17 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวนานกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 4 ตัน

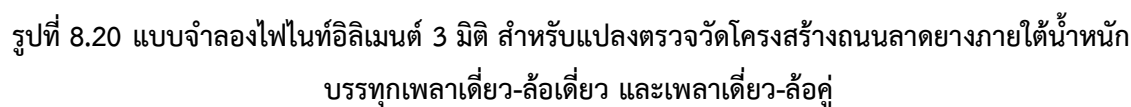


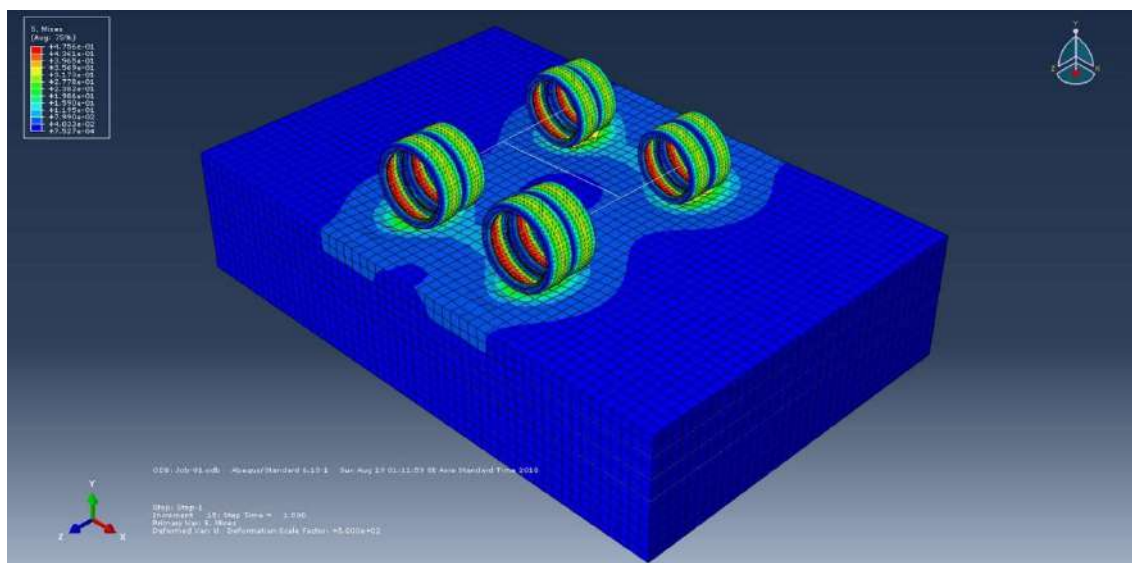
รูปที่ 8.18 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวนานกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 11 ตัน

8.4 การพัฒนาแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์

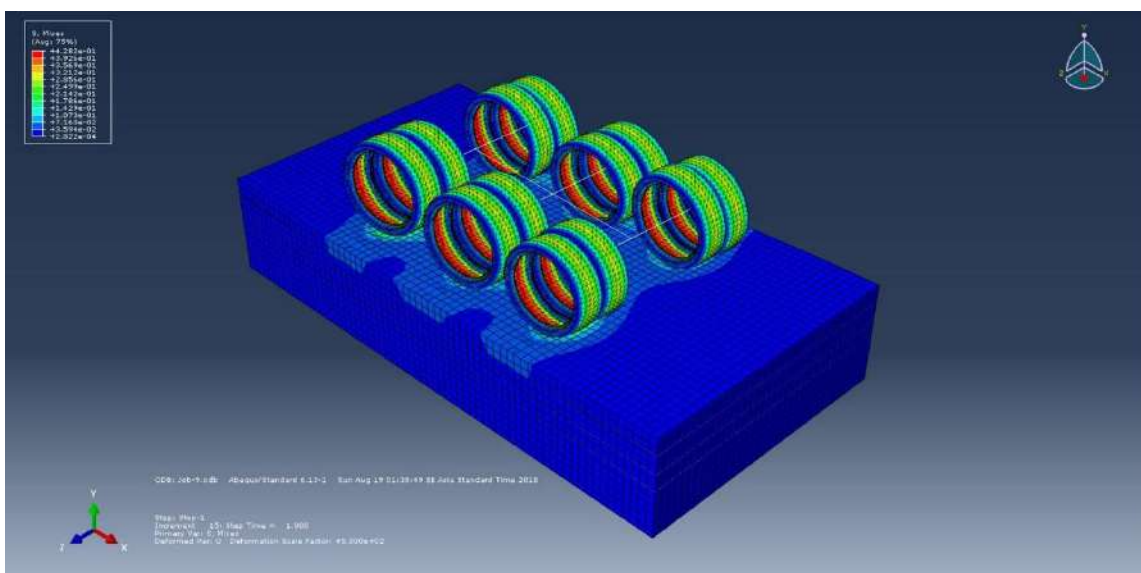
เนื่องจากการศึกษาวิจัยนี้ มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งในแนวนานและแนวตั้งฉากกับทิศทางจราจร ดังนั้น การใช้แบบจำลองแบบ 2 มิติ เช่น แบบจำลองชนิดระนาบความเครียด (2-D Plane Strain) หรือ แบบจำลอง 2 มิติ ชนิด สมมาตรรอบแกน (Axi-symmetry) ไม่สามารถแสดงพฤติกรรมในแนวตั้งฉากกับระนาบของแบบจำลองได้ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ คณะผู้วิจัยจึงเลือกพัฒนาแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ 3 มิติ (3-D) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแปลงตรวจวัดในทุกระดับความลึก และทุกทิศทาง โดยพิจารณาตามตำแหน่งที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในสนาม มากำหนดระยะต่างๆ ในแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ และเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดพฤติกรรมของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้แรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกประเภทต่างๆ

รูปที่ 8.19 แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น (Patch Test) สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้การทดสอบ FWD





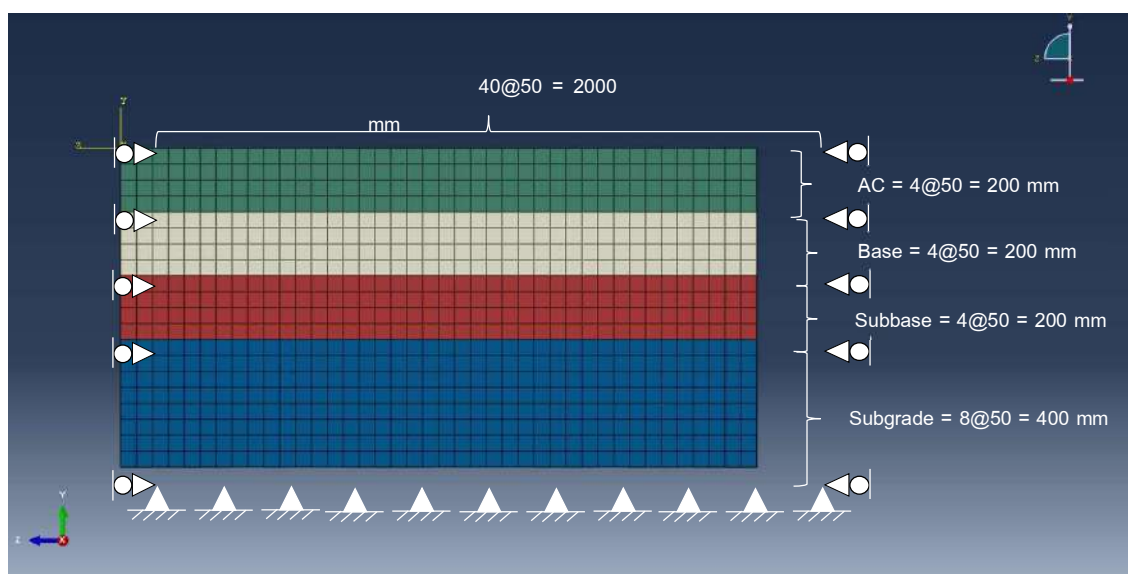
รูปที่ 8.21 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกเพลาคู่-ล้อคู่



รูปที่ 8.22 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกสามเพลาล้อคู่

ชนิดของอีลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางคือ ชนิด 8-Node Linear Brick, Reduced Integration (C3D8R) ซึ่งเป็นการสร้างรูปแบบอีลิเมนต์ตามที่ผู้ใช้กำหนด (User define) และยังช่วยการกำหนดพิกัดตำแหน่งอุปกรณ์ตรวจวัดได้ง่าย นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้ทำการศึกษาผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ของแบบจำลองต่อขนาดของอีลิเมนต์ (Mesh Size) เนื่องจากขนาดของอีลิเมนต์ (Element) มีผลต่อระยะเวลาในการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ คณะผู้วิจัยได้พิจารณาขนาดของ Mesh Size เท่ากับ 10, 20 25, 50, 100 และ 200 มม. โดยพบว่า เมื่อ

Mesh Size มีขนาดเล็กถึง จะส่งผลให้ระยะเวลาในการประมวลผลเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ เช่น ค่าความเค้นแนวตั้ง ค่าความเครียดแนวตั้ง และค่าการทรุดตัว พบว่า แบบจำลองที่ใช้ Mesh Size ขนาดเล็ก จะให้ค่าความเครียดแนวตั้งน้อยกว่าแบบจำลองที่ใช้ Mesh Size ขนาดใหญ่ ทั้งนี้ค่าการทรุดตัวไม่ต่างกัน ในท้ายสุดเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขนาดของ Mesh Size เท่ากับ 50 มม. สำหรับการกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขสภาพการยึดรั้ง (Boundary Condition) ในการวิเคราะห์ให้เหมาะสมและสอดคล้องกับสภาพปัญหา ได้แก่ การกำหนดข้อจำกัดในการเคลื่อนตัว (Displacement Constraint) หรือแรงกระทำภายนอกที่กระทำให้สอดคล้องสภาพการใช้งานจริง คณะผู้วิจัยได้กำหนดการยึดรั้งแบบ Roller Support บริเวณด้านข้างของแบบจำลอง โดยกำหนดให้โครงสร้างชั้นทางมีระยะตามยาวเป็นอนันต์ (Infinite Distance) และกำหนดการยึดรั้งแบบยึดแน่น (Fixed Support) ใต้ชั้นดินเดิม (Subgrade) ทั้งนี้จากการศึกษาของ Kuo และคณะ (1995) สรุปได้ว่าการจำลองสภาพการยึดรั้งดังกล่าวสามารถใช้ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ โดยไม่กระทบกับผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ขอบเขตและเงื่อนไขสภาพการยึดรั้ง (Boundary Condition) สำหรับแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 8.23



รูปที่ 8.23 ขอบเขตและเงื่อนไขสภาพการยึดรั้งสำหรับแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ

- คุณสมบัติของวัสดุและตัวแปรต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

ในขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยระเบียบวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ จะมีการพัฒนาสร้างแบบจำลองสำหรับวัสดุชั้นทางชนิดต่างๆ ที่ประกอบเป็นโครงสร้างถนน โดยแบบจำลองจะถูกแบ่งเป็นอีลิเมนต์ (ชิ้นส่วน) แต่ละชิ้นส่วนจะมีค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองตามชนิดของวัสดุชั้นทางที่จำลองอยู่ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์จะได้สมการตัวแทนของชิ้นส่วนย่อยนั้น เมื่อนำสมการของทุกชิ้นส่วนย่อยมาประกอบกัน แล้วให้แรงกระทำที่ถูกต้องและเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม แล้วทำการแก้สมการพร้อมกันจะได้คำตอบ ซึ่งโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์จะช่วยให้การสร้างสมการย่อย และแก้สมการคำตอบสุดท้าย โดยผู้ใช้โปรแกรมต้องกำหนดขนาด

ลักษณะ ขอบเขตของปัญหาให้เหมาะสม กำหนดพฤติกรรมของวัสดุที่สมเหตุสมผล ผ่านทางแบบจำลองวัสดุย่อยส่วนหรือค่าตัวแปรจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมา พร้อมทั้งคุณสมบัติที่ถูกต้อง ในส่วนนี้จะอธิบายการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุชั้นทาง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

○ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)

แบบจำลองพฤติกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตต้องสะท้อนถึงการเสียรูปถาวรต่อน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำซ้ำได้อย่างสมเหตุสมผล จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการจำลองพฤติกรรมแบบ Elasto-Plastic ซึ่งสะท้อนการเสียรูปถาวรได้ โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆประกอบการวิเคราะห์สภาวะพลาสติก เช่น Yield Surface, Plastic Potential, Creep Deformation และ Consistency Condition เป็นต้น ทำให้ยากแก่การแก้ปัญหาเชิงตัวเลขในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งค่าตัวแปรเหล่านี้ต้องมีการทดสอบแบบจำลองแบบย่อยส่วนเพื่อศึกษาหาค่าตัวแปรที่ซับซ้อนดังกล่าว แต่เนื่องจากไม่ได้รับบัพในข้อกำหนดว่าด้วยการทดสอบเพื่อหาค่าตัวแปรเหล่านี้ คณะผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อประยุกต์ใช้ในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสำหรับการศึกษา จากข้อมูลผลการศึกษาที่รวบรวมทั้งหมด พบว่ายังไม่มีแบบจำลองใดที่สามารถจำลองพฤติกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตภายใต้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic Load) และสามารถนำมาประยุกต์ร่วมกับระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ปัญหาจริงอย่างถูกต้องได้ ซึ่งแต่ละแบบจำลองต่างมีข้อจำกัดต่างกันไป

สำหรับการศึกษาครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ตัดสินใจเลือกใช้แบบจำลองในตระกูลของพลาสติกชนิดพื้นฐานในการพัฒนา เพื่อแก้ปัญหาในเรื่องของการนำมาประยุกต์ร่วมกับระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ปัญหาจริงในอนาคต โดยคณะผู้วิจัยได้มีฐานโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณร่วมกับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้สามารถที่จะพัฒนาต่อยอดได้ จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในอดีต (Perkins 2001) พบว่าการใช้แบบจำลอง Constitutive Model สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต แบบ Elasto-Plastic โดยมีสมมุติฐานว่าคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Material) ได้นำมาใช้อธิบายการเกิดการเสียรูปแบบถาวรของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแบ่งกระบวนการวิเคราะห์ค่าความเครียด (ϵ_{ij}) ออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ความเครียดแบบอีลาสติก และแบบพลาสติก ดังสมการที่ (26)

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p \quad (26)$$

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)

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

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

โดยที่ f คือ Yield Function

ค่าการเปลี่ยนแปลงความเครียดแบบพลาสติกได้กำหนดให้มีทิศทางตั้งฉากกับสมการของ Plastic Potential Function ดังสมการที่ (29) โดยเรียกหลักการนี้ว่า Normality Rule

$$\epsilon_{ij}^p = \varphi \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (29)$$

โดยที่ g คือ Plastic Potential Function ซึ่งในบางกรณีได้มีการกำหนดให้ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของ Plastic Potential Function เป็นฟังก์ชันเดียวกับ Yield Function เรียกว่า Associate Flow Rule

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

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

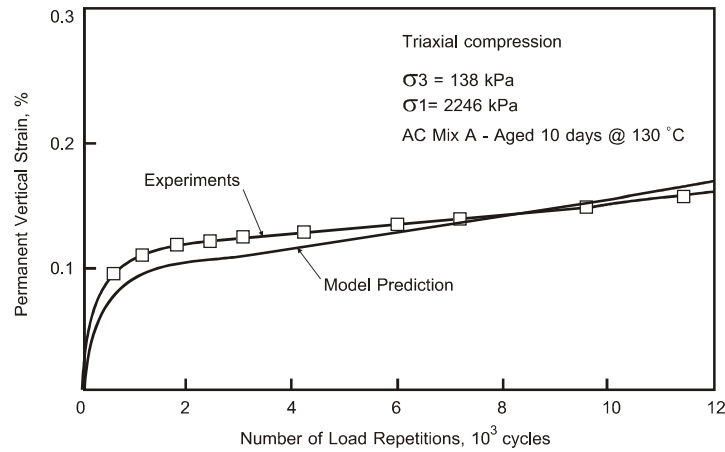
$$\frac{d\epsilon_3^p}{d\epsilon_1^p} = -\frac{\sigma_1}{2K\sigma_3} \quad (31)$$

โดยที่ $K = \tan^2(45 + \phi_f/2)$

ϵ_3^p = ความเครียดแบบพลาสติกในแนวระนาบ (Plastic Lateral Strain)

ϵ_1^p = ความเครียดแบบพลาสติกในแนวดิ่ง (Plastic Axial Strain)

ค่าความสัมพันธ์จากสมการที่ (29) จะใช้ในการทำนายค่าการเสียรูปแบบถาวรในช่วงของการทดสอบที่จำนวนรอบมีค่าน้อยเท่านั้น ส่วนเมื่อจำนวนรอบมีค่ามากขึ้น (การเสียรูปเพิ่มขึ้น) อิทธิพลของแบบจำลองความหนืดแบบอีลาสติกจะมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8.24 (Ramsamooj และคณะ 1997)



รูปที่ 8.24 แสดงผลการเปรียบเทียบการทำนายผลของค่าการเสียรูปแบบถาวรของแบบจำลองกับผลการทดสอบ (Ramsamooj และคณะ 1997)

จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะที่จำเป็นในวิธีการวิเคราะห์ที่จะพัฒนาขึ้น ทั้งในแง่ของพฤติกรรมที่เกี่ยวข้อง และลักษณะการรับแรงกระทำ คณะผู้วิจัยได้เลือกแบบจำลองประเภท Isotropic และ Linear-Elastic สำหรับจำลองคุณสมบัติของแบบจำลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างถนนลาดยางในสภาวะอีลาสติก และใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนารูปแบบจำลองของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต คณะผู้วิจัยได้ศึกษาแบบจำลองจากรวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จากนั้นได้ดำเนินการพัฒนาแบบจำลอง Linear-Elastic ในโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ ซึ่งสามารถใช้แบบจำลอง Isotropic และ Linear-Elastic โดยค่าคุณสมบัติและตัวแปรต่างๆที่ใช้สำหรับจำลองวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ได้จากผลการทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD)

○ พื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม (Base, Subbase, and Subgrade)

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

สำหรับดินเดิม (Subgrade) จัดเป็นดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพียงพอหรือผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นในการรองรับโครงสร้างถนนลาดยาง (Flexible Pavement) ดังนั้นแบบจำลอง Elasto-Plastic, Mohr-Coulomb จึงมีความเหมาะสมเพียงพอในการแสดงพฤติกรรมเป็นอีลาสติกที่ระดับความเค้นต่ำ และเป็นพลาสติกที่ระดับความเค้นสูง เช่นเดียวกับพื้นทางดังที่กล่าวไว้ข้างต้น คณะผู้วิจัยได้ทำการจำลองพฤติกรรมพื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม เป็นแบบ Elasto-Plastic โดยใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb ในช่วงระยะแรกของการพัฒนาแบบจำลอง คณะผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลอง Elasto-Plastic, Mohr-Coulomb Model สำหรับพื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม ในโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยมีค่าพารามิเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) อัตราส่วนปัวซองค์ (Poisson's Ratio) ค่า Cohesion ค่า

Friction Angle และค่า Dilation Angle โดยค่าคุณสมบัติและตัวแปรต่างๆที่ใช้สำหรับจำลองวัสดุพื้นทาง รองพื้นทาง และดินเดิม ได้จากผลการทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) รายละเอียดสรุปใน ภาคผนวก จ ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในแบบจำลอง Mohr-Coulomb คือ Cohesion, Friction Angle และ Dilation Angle จะใช้ค่าอ้างอิงจากงานวิจัยของ Moayedi และคณะ (2009)

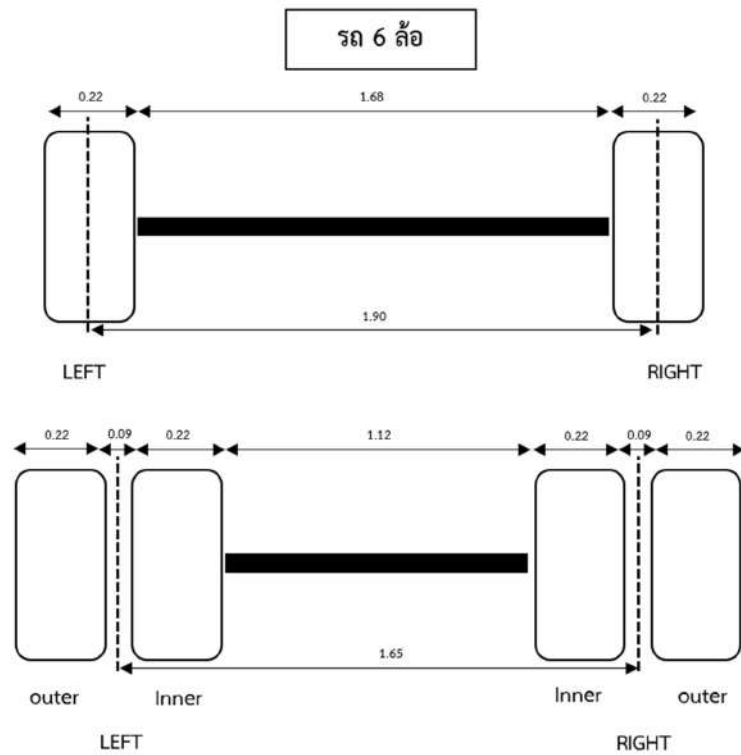
- น้ำหนักบรรทุกและรูปแบบน้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น คณะผู้วิจัยได้พิจารณาน้ำหนักกระทำต่อแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ตามรูปแบบการทดสอบ FWD โดยกำหนดแรงกระทำเป็นแผ่นจานโลหะ (Metal Plate) รัศมีเท่ากับ 150 มม. น้ำหนักกระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่แผ่นจานโลหะ ขนาดหน่วยแรงเท่ากับ 0.756 MPa ตามวิธีการทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) ดังแสดงในรูปที่ 8.25

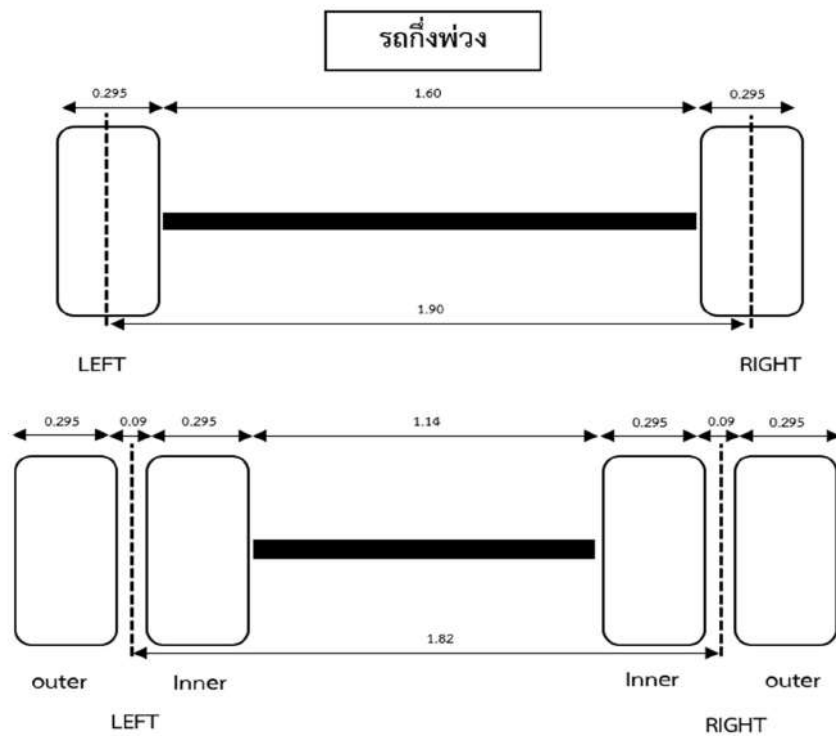


รูปที่ 8.25 การทดสอบ FWD

ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกเพลาดียว-ล้อเดี่ยว เพลาดียว-ล้อคู่ เพลาคู่-ล้อคู่ และสามเพลาล้อคู่ คณะผู้วิจัยได้พิจารณาน้ำหนักกระทำต่อแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ตามขนาดน้ำหนักบรรทุก ระยะห่างระหว่างเพลาล้อ และระยะห่างระหว่างล้อสำหรับรถบรรทุกที่ใช้ทดสอบจริง ดังแสดงในรูปที่ 8.26 และ รูปที่ 8.27 โดยมีรายละเอียดสรุปไว้ในรูปที่ 8.3



รูปที่ 8.26 ระยะห่างระหว่างเพลลาและระยะห่างระหว่างล้อสำหรับเพลลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว (แรงดันลมยาง 0.83 MPa) และเพลลาเดี่ยว-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.83 MPa)



รูปที่ 8.27 ระยะห่างระหว่างเพลลาและระยะห่างระหว่างล้อสำหรับเพลลาคู่-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.90 MPa) และสามเพลลา-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.90 MPa)

ตารางที่ 8.3 ข้อมูลน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์

ประเภทเพลาทดสอบ	น้ำหนัก ต่อ เพลา	จำนวน ล้อ/ เพลา	น้ำหนัก ต่อล้อ	แรงดัน ลมยาง	พื้นที่	L	ความ กว้าง = 0.6L	ความ ยาว = 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-ล้อคู่	8.5	4	2.125	0.90	23154.6	210.5	126	183

คณะผู้วิจัยได้กำหนดค่าตัวแปรสำหรับใช้ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ โดยพิจารณาจากผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการศึกษา ผลการทดสอบ FWD และอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา ค่าตัวแปรสำหรับใช้ในแบบจำลอง สรุปไว้ในตารางที่ 8.4

ตารางที่ 8.4 ค่าตัวแปรสำหรับใช้ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ

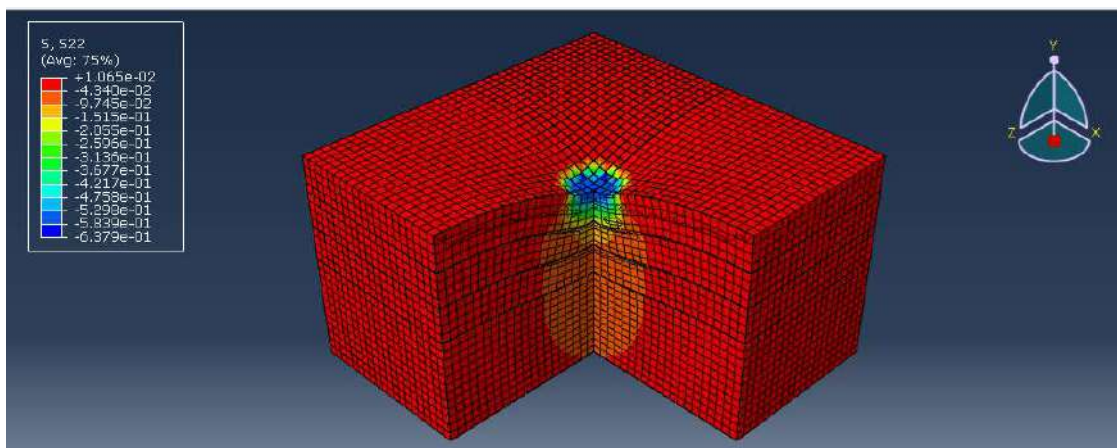
Material Input Parameters	AC Surface	Base	Subbase	Subgrade
Thickness (mm)	200	200	200	400
Elastic Modulus (MPa)	1,745	170	249	163
Poisson's Ratio	0.35	0.35	0.35	0.40
Unit Weight (kN/m ³)	25	22.7	22.7	19.8
Cohesion (kPa)**	-	30	30	8
Friction Angle **	-	43	43	36
Dilation Angle**	-	13	13	6

** อ้างอิงจากงานวิจัยของ Moayedi และคณะ (2009)

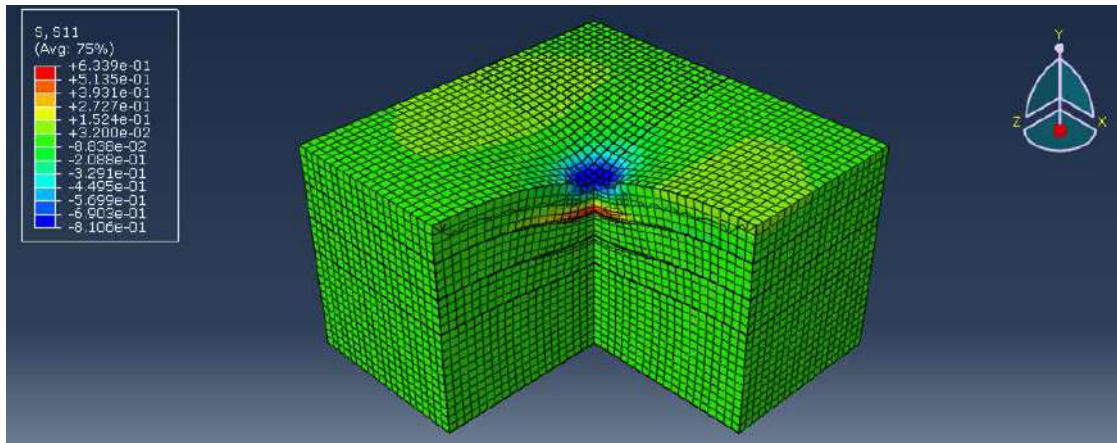
- ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ (3-D FEA Model) เบื้องต้น (Patch Test) สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้การทดสอบ FWD ขนาดกว้าง 2.0 เมตร ยาว 2.0 เมตร และลึก 1.0 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 8.28 ถึง รูปที่ 8.31 กราฟแสดงหน่วยแรงในแนวดิ่ง หน่วยแรงในแนวราบ ความเครียดแนวดิ่ง และความเครียดแนวราบ ตามระดับความลึก ดังแสดงในรูปที่ 8.32 ถึง รูปที่ 8.35 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 8.36 ผลการวิเคราะห์โดย 3-D FEA Model เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ LEA และผลการทดสอบ FWD แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้นสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง มีความเหมาะสมและสามารถนำไปใช้พัฒนาเป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยครอบคลุมพื้นที่ซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในชั้นโครงสร้างทาง (A Full-Scale 3-D FEA Model) เพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกประเภทต่างๆ

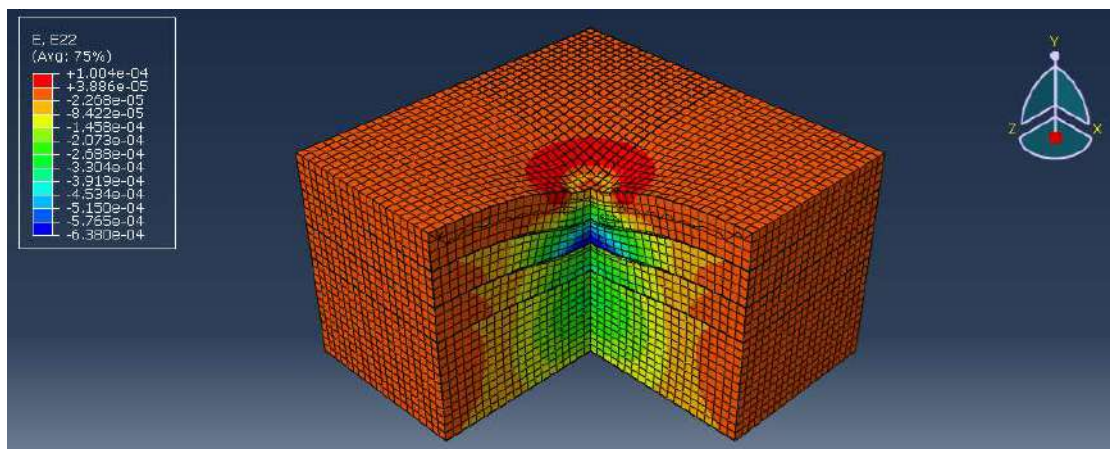
ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกเพลาล้อเดี่ยว-ล้อเดี่ยว เพลาล้อเดี่ยว-ล้อคู่ เพลาคู่-ล้อคู่ และสามเพลาล้อคู่ แสดงด้วยกราฟหน่วยแรงในแนวดิ่ง หน่วยแรงในแนวราบ ความเครียดแนวดิ่ง และความเครียดแนวราบ ตามระดับความลึก ดังแสดงในรูปที่ 8.37 ถึง รูปที่ 8.52 จากกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ 3-D FEA Model กับผลการวิเคราะห์ LEA พบว่า ทั้ง 3-D FEA Model และ LEA ให้ผลหน่วยแรงในแนวดิ่ง หน่วยแรงในแนวราบ ความเครียดแนวดิ่ง และความเครียดแนวราบสอดคล้องกันในทุกๆกรณี



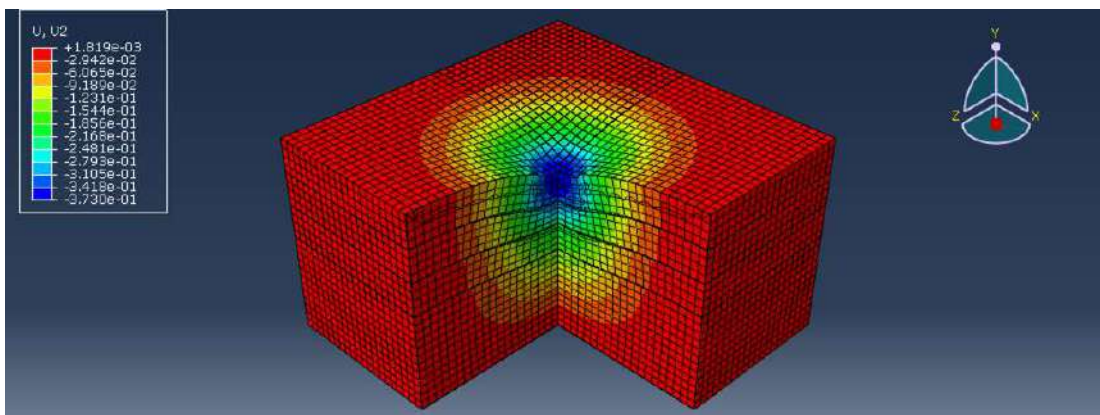
รูปที่ 8.28 ค่าหน่วยแรง S22 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น



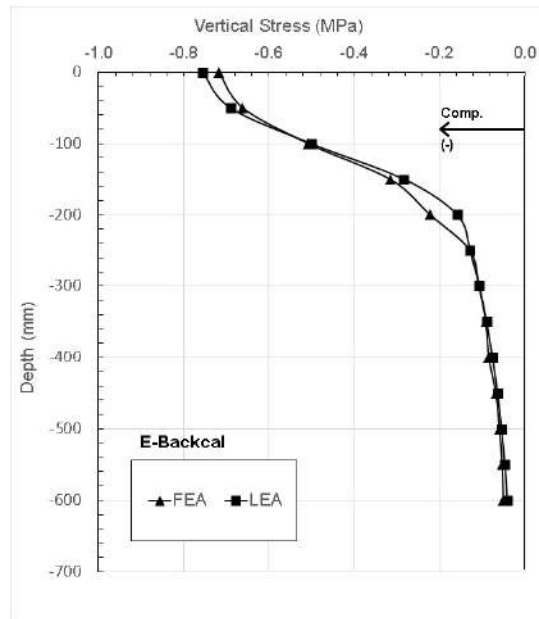
รูปที่ 8.29 ค่าหน่วยแรง S11 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น



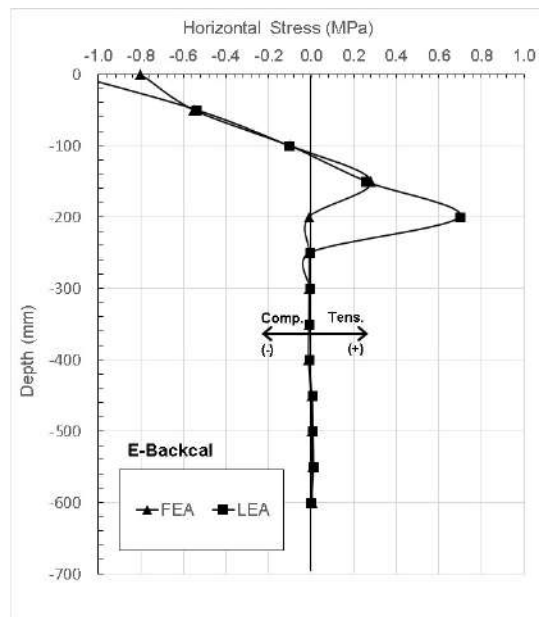
รูปที่ 8.30 ค่าความเครียด E22 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น



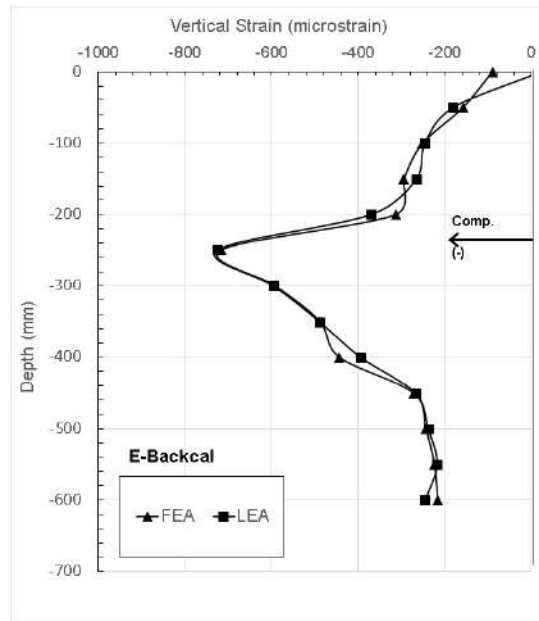
รูปที่ 8.31 ค่าการยุบตัว U2 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น



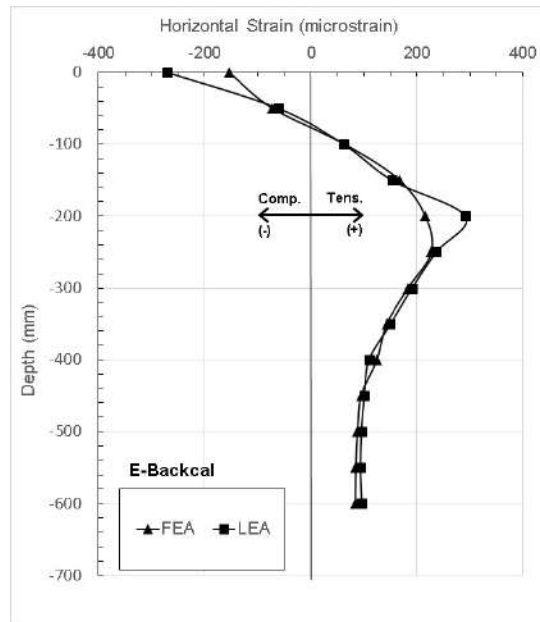
รูปที่ 8.32 กราฟแสดงหน่วยแรงในแนวดิ่งตามระดับความลึก



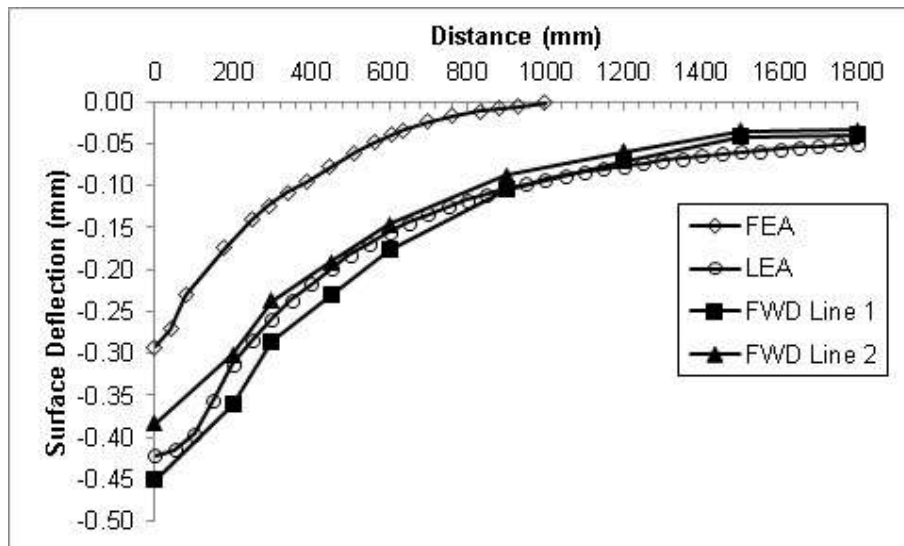
รูปที่ 8.33 กราฟแสดงหน่วยแรงในแนวราบตามระดับความลึก



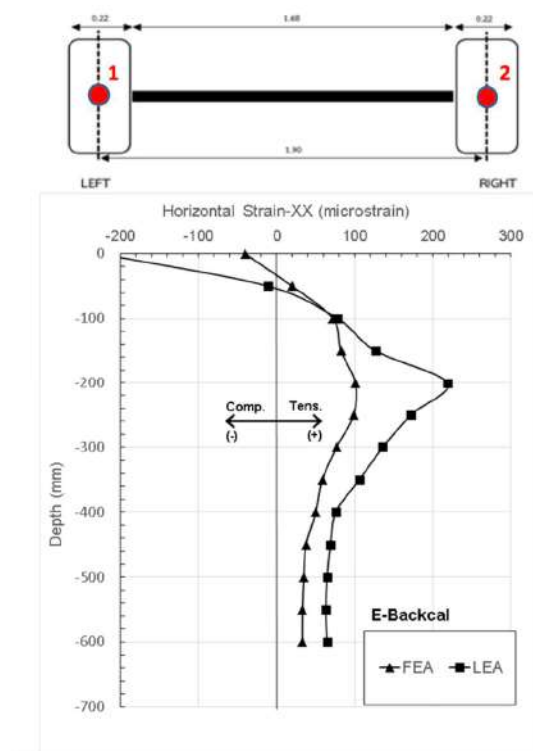
รูปที่ 8.34 กราฟแสดงความเครียดแนวตั้งตามระดับความลึก



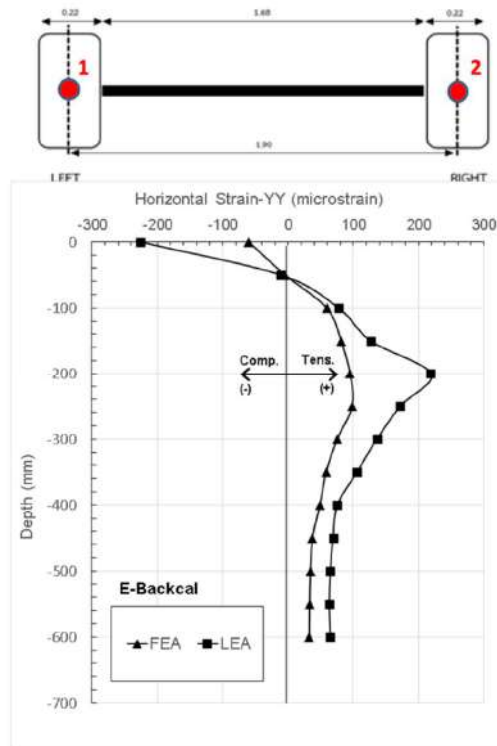
รูปที่ 8.35 กราฟแสดงความเครียดแนวราบตามระดับความลึก



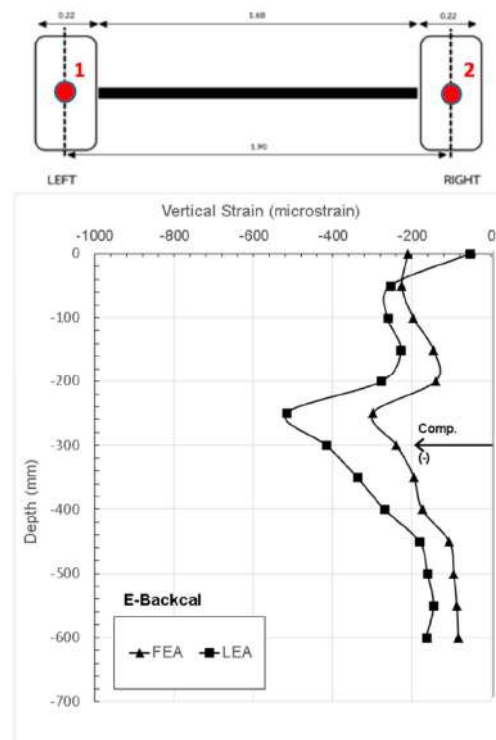
รูปที่ 8.36 ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น และ LEA เทียบกับค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ FWD



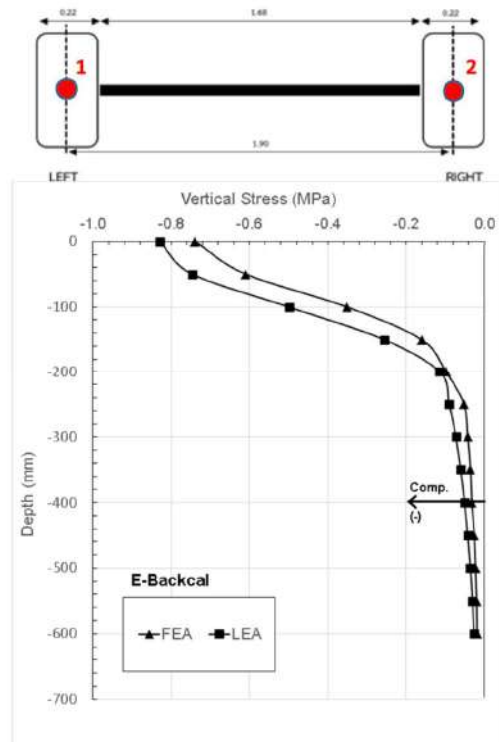
รูปที่ 8.37 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว



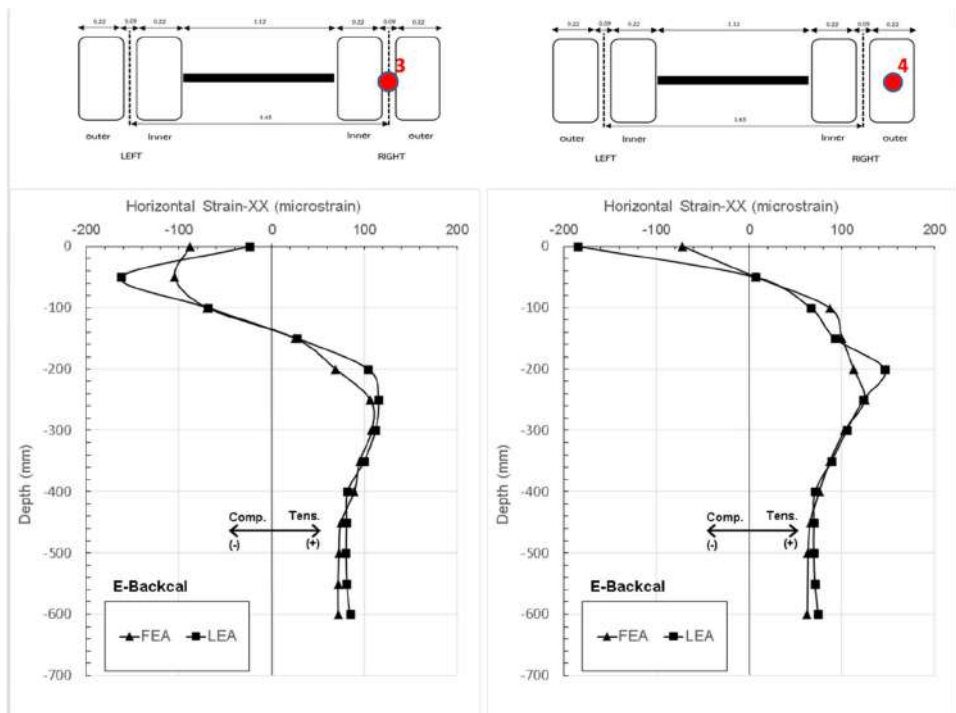
รูปที่ 8.38 ความเครียดแนวราบในแนวนานทิศทางจราบตามระดับความลึก กรณีเพลาดียว-ล้อเดี่ยว



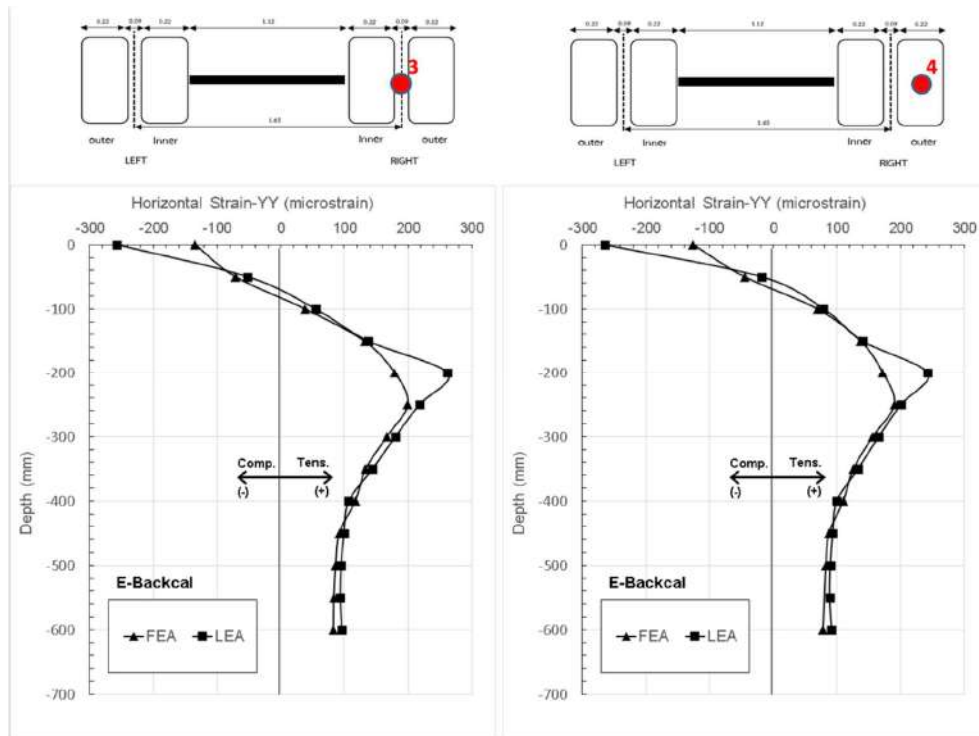
รูปที่ 8.39 ความเครียดแนวตั้งตามระดับความลึก กรณีเพลาดียว-ล้อเดี่ยว



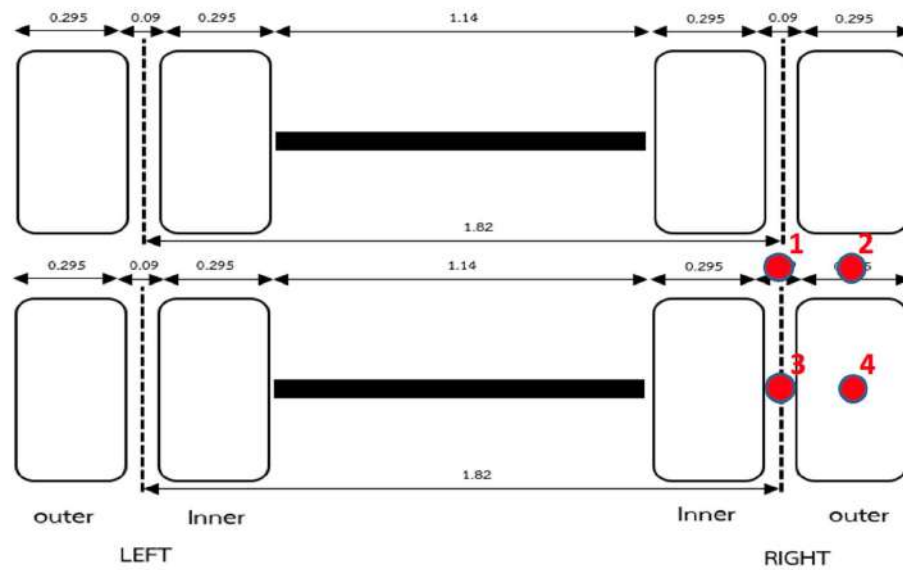
รูปที่ 8.40 ความเค้นแนวตั้งตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อยเดี่ยว



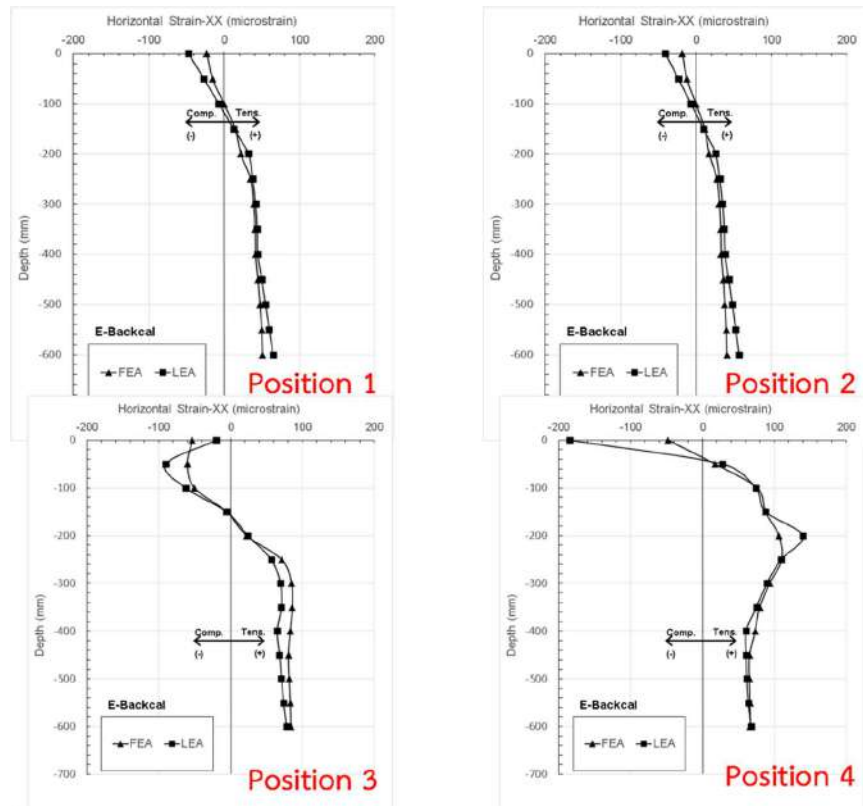
รูปที่ 8.41 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาเดี่ยว-ล้อยคู่



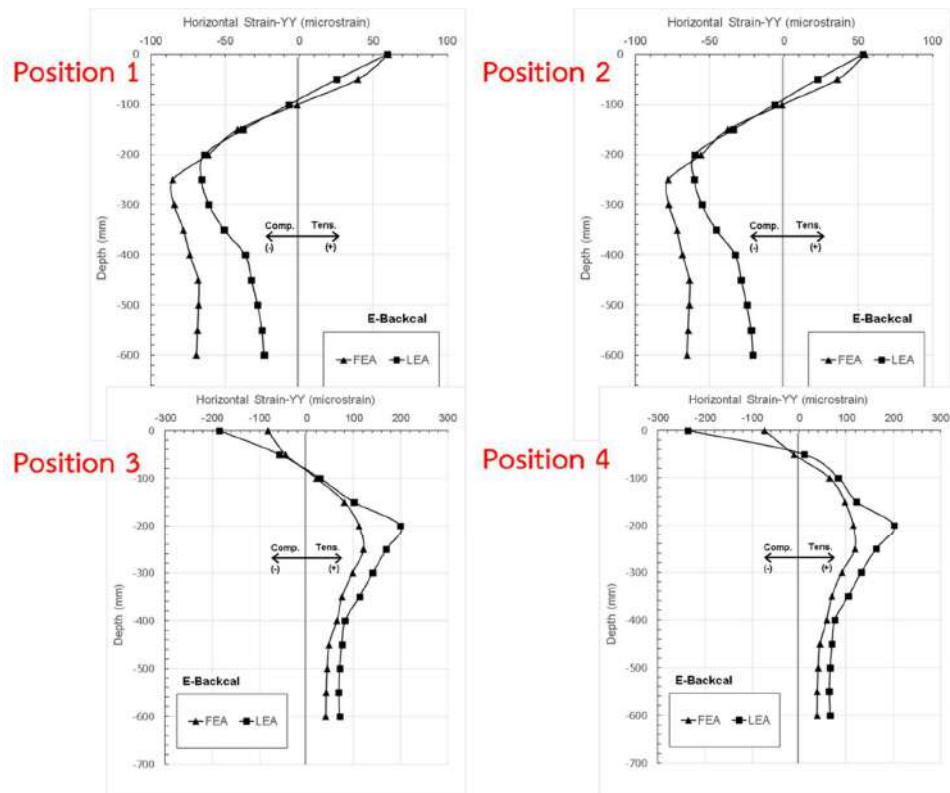
รูปที่ 8.42 ความเครียดแนวราบในแนวนอนทิศทางจากราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่เดียว-ล้อยู่



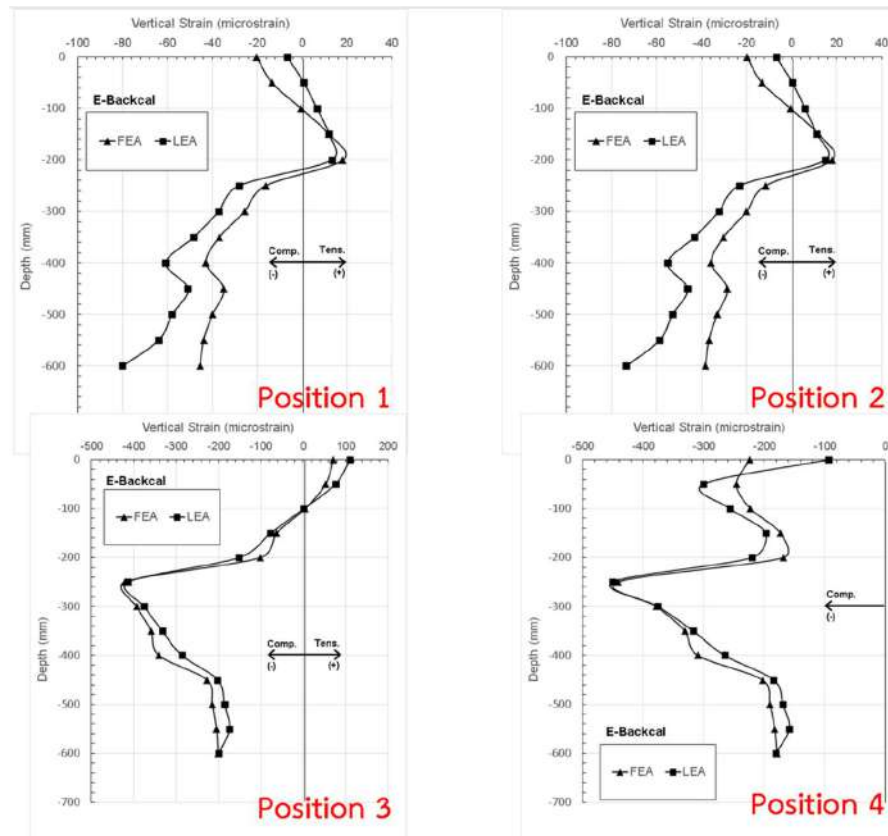
รูปที่ 8.43 ตำแหน่งล้อยที่ใช้วิเคราะห์ กรณีเพลาคู่-ล้อยู่



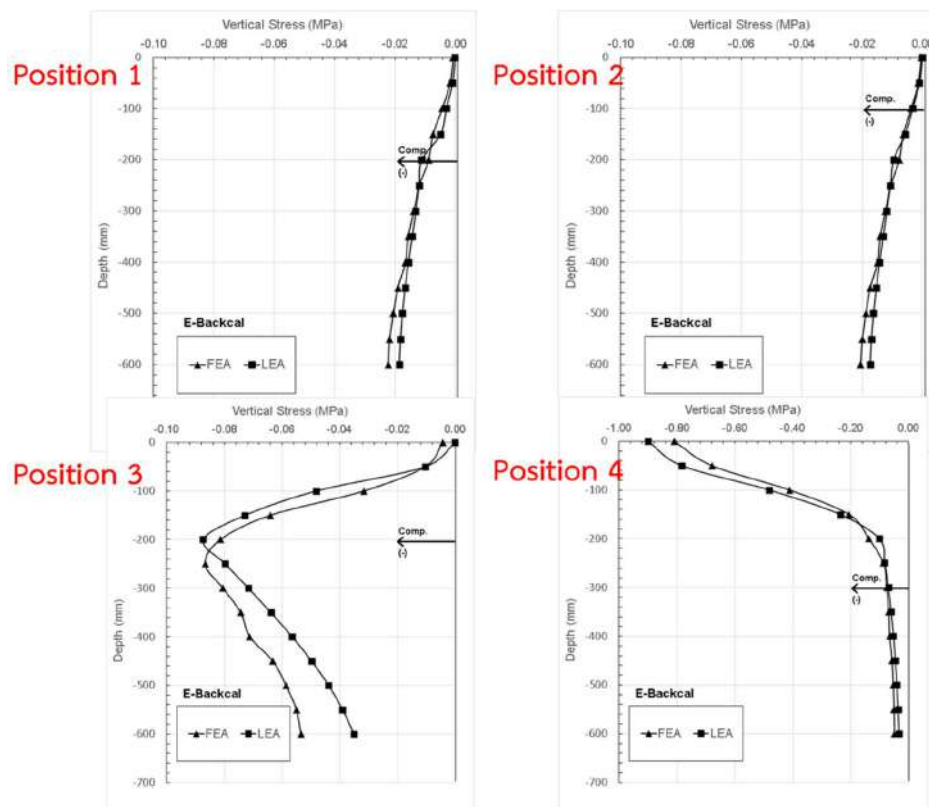
รูปที่ 8.44 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่



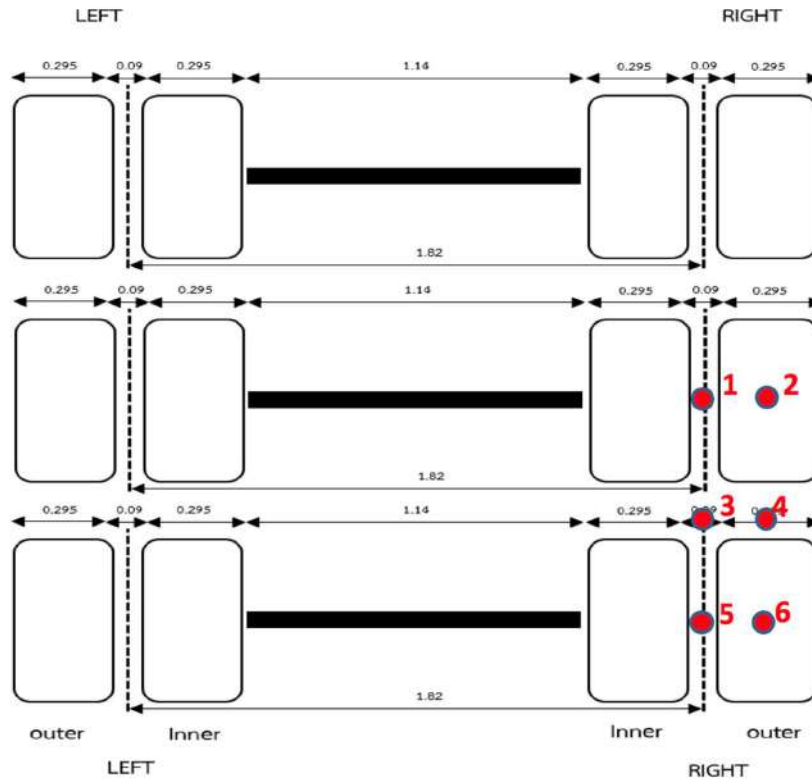
รูปที่ 8.45 ความเครียดแนวราบในแนวนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่



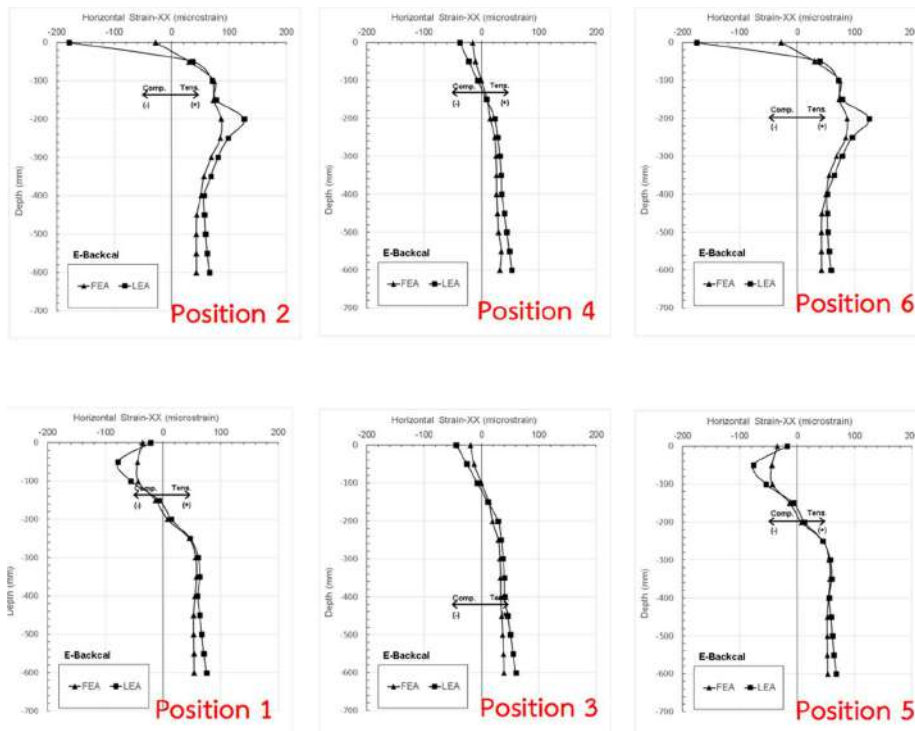
รูปที่ 8.46 ความเครียดแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่



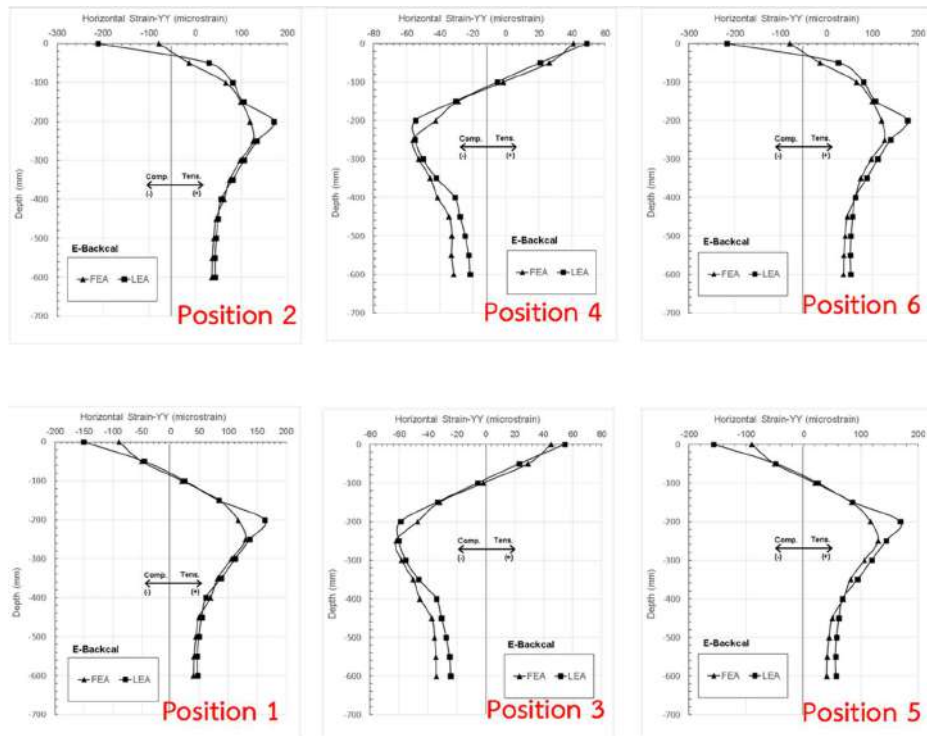
รูปที่ 8.47 ความเค้นแนวดิ่งตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่



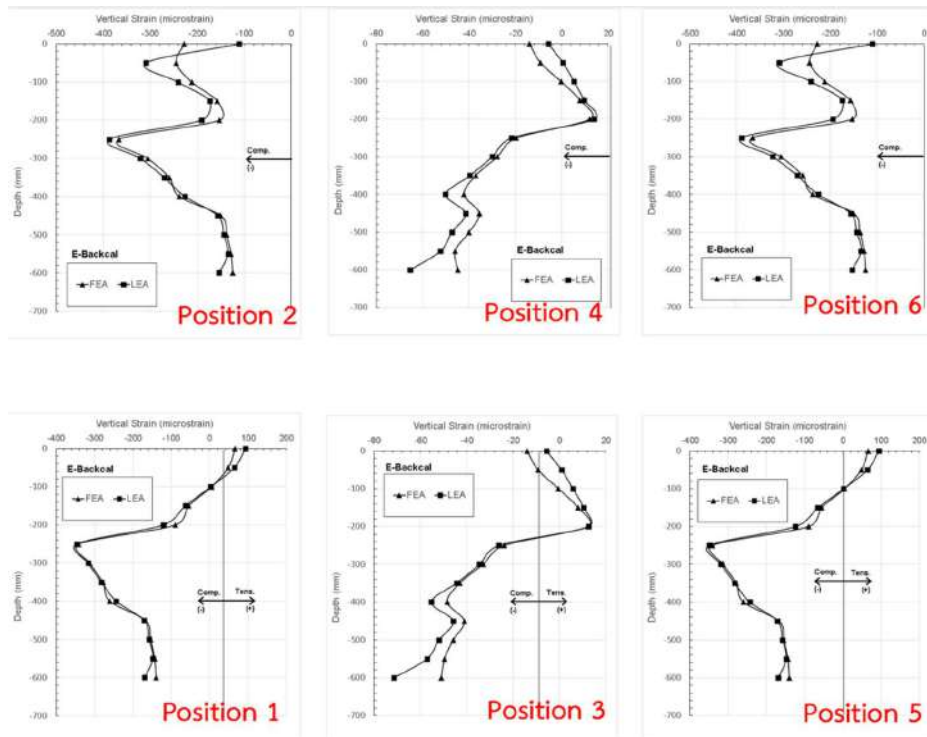
รูปที่ 8.48 ตำแหน่งล้อที่ใช้วิเคราะห์ กรณีสามเพลาล้อคู่



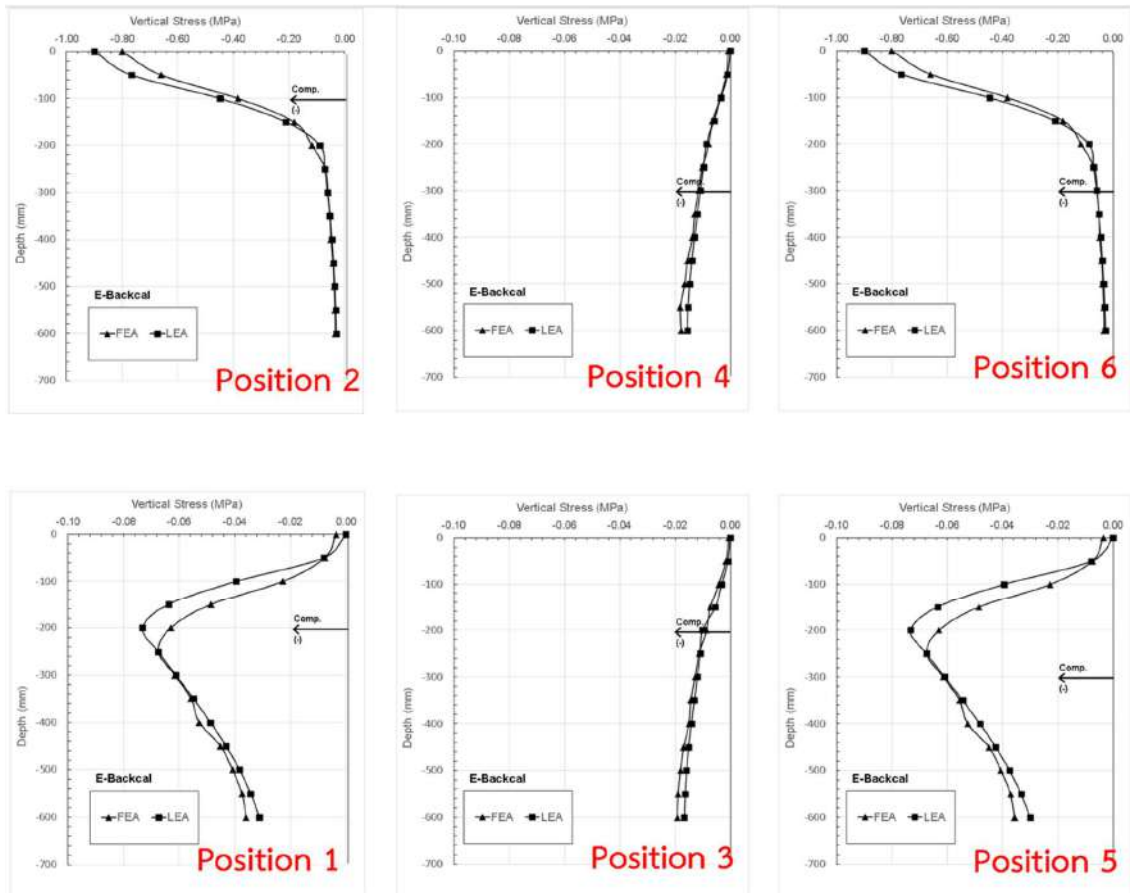
รูปที่ 8.49 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีสามเพลาล้อคู่



รูปที่ 8.50 ความเครียดแนวราบในแนวนานทิศทางจากรตามระดับความลึก กรณีสามเพลาล้อคู่



รูปที่ 8.51 ความเครียดแนวตั้งตามระดับความลึก กรณีสามเพลาล้อคู่



รูปที่ 8.52 ความเค้นในแนวตั้งตามระดับความลึก กรณีสามเพลลา-ล้อคู่

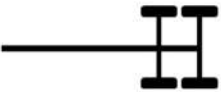
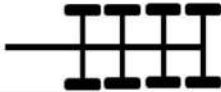
9. การวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุกไทย

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลาย (Load Equivalency Factor, LEF) ของรถบรรทุกไทยตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์อัตราการทำลายจากทฤษฎี โดยมีรายละเอียดดังนี้

9.1 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน

น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน หมายถึง น้ำหนัก น้ำหนักบรรทุก หรือน้ำหนักลงเพลลา ที่ห้ามเกินกว่าที่กำหนดไว้ตามกฎหมาย กรมทางหลวงประกาศน้ำหนักลงเพลลาที่ยอมให้สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่ยานพาหนะสามารถเดินบนทางหลวง แบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลลาและยาง สรุปไว้ในตารางที่ 9.1

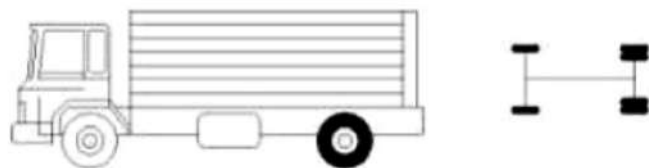
ตารางที่ 9.1 น้ำหนักลงเพลาย่อมให้สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่ยานพาหนะสามารถเดินบนทางหลวง

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

○ น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เปลาเดี่ยว-ยางคู่

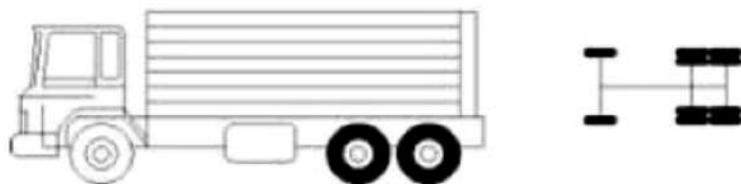
ยานพาหนะชนิดที่มี 2 เปลา 4 ล้อ ยาง 6 เส้น ชนิดเพลาท้าย (เพลาที 2) ใช้ยางคู่ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาดังนี้

- 1) สำหรับรถขนส่งผู้โดยสารต้องมีน้ำหนักลงเพลาท้าย (เพลาที 2) ไม่เกิน 11,000 กิโลกรัม
- 2) สำหรับยานพาหนะชนิดอื่นๆ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาท้าย (เพลาที 2) ไม่เกิน 11,000 กิโลกรัม หรือน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 15,000 กิโลกรัม (รูปที่ 9.1)



รูปที่ 9.1 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เปลาเดี่ยว-ยางคู่

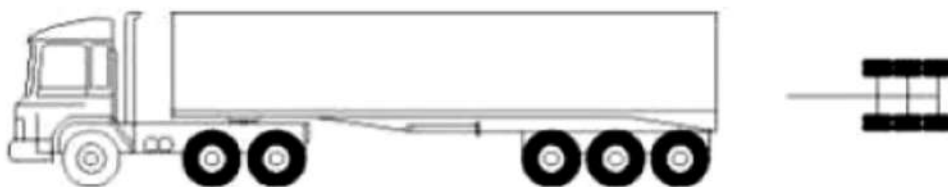
○ น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เพลาคู่-ยางคู่
ยานพาหนะชนิดที่มี 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ชนิดเพลาท้าย (เพลาที่ 2 และ เพลาที่ 3) เป็นเพลาคู่ ใ้ยางคู่ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาคู่ท้ายไม่เกิน 20,000 กิโลกรัม หรือน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 25,000 กิโลกรัม (รูปที่ 9.2)



รูปที่ 9.2 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เพลาคู่-ยางคู่

○ น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน สามเพลา-ยางคู่
ตัวรถลากจูงมี 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ชนิดเพลาท้าย (เพลาที่ 2 และ เพลาที่ 3) เป็นเพลาคู่ ใ้ยางคู่ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาคู่ท้ายไม่เกิน 20,000 กิโลกรัม หรือน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 25,000 กิโลกรัม ตัวรถกึ่งพ่วงเป็นชนิดสามเพลา ใ้ยางคู่ 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 9.3) 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 9.3 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน สามเพลา-ยางคู่

อนึ่ง กรณียานพาหนะที่ยื่นขออนุญาตมีจำนวนเพลากลุ่มเพลา หรือลักษณะของเพลากลุ่มเพลาแตกต่างจากตารางที่ 1 ผู้ขออนุญาตต้องแสดงรายการคำนวณค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้าง

ชั้นทาง โดยค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างชั้นทางสูงสุด ต้องไม่เกินความเครียด (Strain) ของเพลาคู่-ยางคู่ ที่มีน้ำหนักกลุ่มเพล่า ไม่เกิน 20,000 กิโลกรัม (เพลาละ 10,000 กิโลกรัม) พร้อมแนบเอกสารรายการคำนวณโดยวิศวกรโยธาระดับไม่ต่ำกว่าสามัญวิศวกร

9.2 การคำนวณ Load Equivalency Factor (LEF)

คือ แฟกเตอร์ปรับค่าน้ำหนักเพล่าต่างๆ ให้มีค่าเทียบเท่ากับน้ำหนักเพล่าเดี่ยวมาตรฐาน 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”

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

$$LEF = \left(\frac{W_{t1}}{W_{tx}} \right) \quad (32)$$

เมื่อ

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

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

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

W_{tx}	=	จำนวนของเพล่า
W_{t18}	=	จำนวนของน้ำหนักเพล่ามาตรฐาน
L_x	=	น้ำหนักของเพล่าหรือกลุ่มเพล่า
L_2	=	Axle code (1=เพล่าเดี่ยว, 2=เพล่าคู่, 3= เพล่า)
SN	=	Structural Number (Asphalt Institute แนะนำ SN = 5)
p_t	=	Terminal Serviceability (Asphalt Institute แนะนำ $p_t = 2.5$)
β_{18}	=	$0.40 + \frac{0.081(18+1)^{3.23}}{(SN+1)^{5.19} (1)^{3.23}}$

AASHTO (1986) ยังได้จัดทำตารางสรุปค่า LEF กรณีเพล่าเดี่ยว (Single Axle) และเพล่าคู่ (Tandem Axle) สำหรับถนนลาดยาง โดยใช้ค่า p_t และ SN เท่ากับ 2.5 และ 5 ตามลำดับ (Asphalt Institute, 1981) ดังแสดงในตารางที่ 9.2

ตารางที่ 9.2 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

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

เมื่อ n = จำนวนเท้าของอำนาจการทำลาย 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

$$LEF = \left(\frac{\text{Axle Load, } W_x}{\text{Standard Axle Load, } W_s} \right)^4 \quad (37)$$

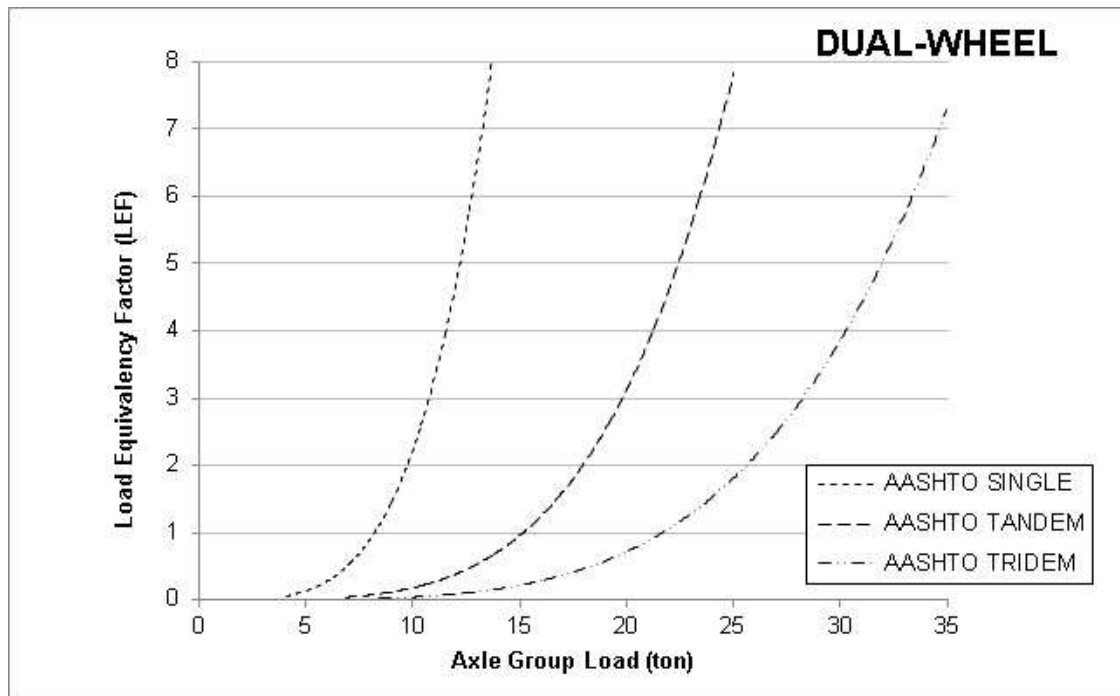
โดยน้ำหนักเพลามาตรฐาน (Standard Axle Group Load, W_s) แนะนำโดยหน่วยงานต่างๆ สรุปไว้ในตารางที่ 9.3

ตารางที่ 9.3 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

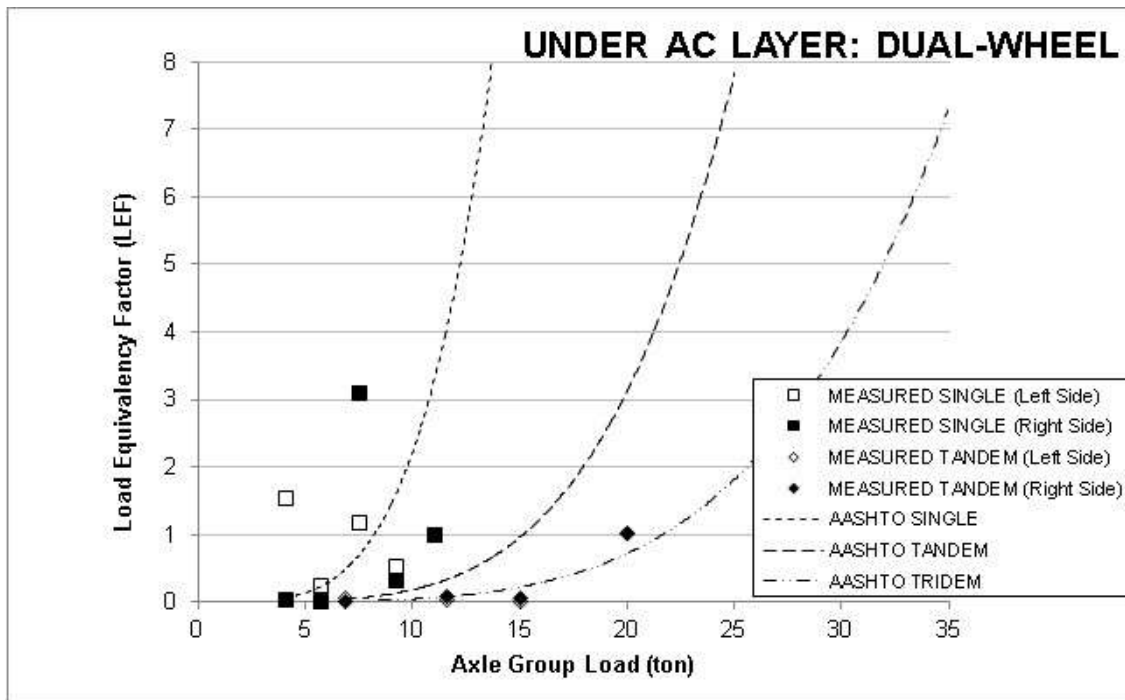
9.3 ผลการคำนวณ Load Equivalency Factor (LEF)

ผลการคำนวณค่า Load Equivalency Factor (LEF) โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986) ดังแสดงในรูปที่ 9.4 ค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) เพิ่มขึ้นตามน้ำหนักกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลา (Tridem)

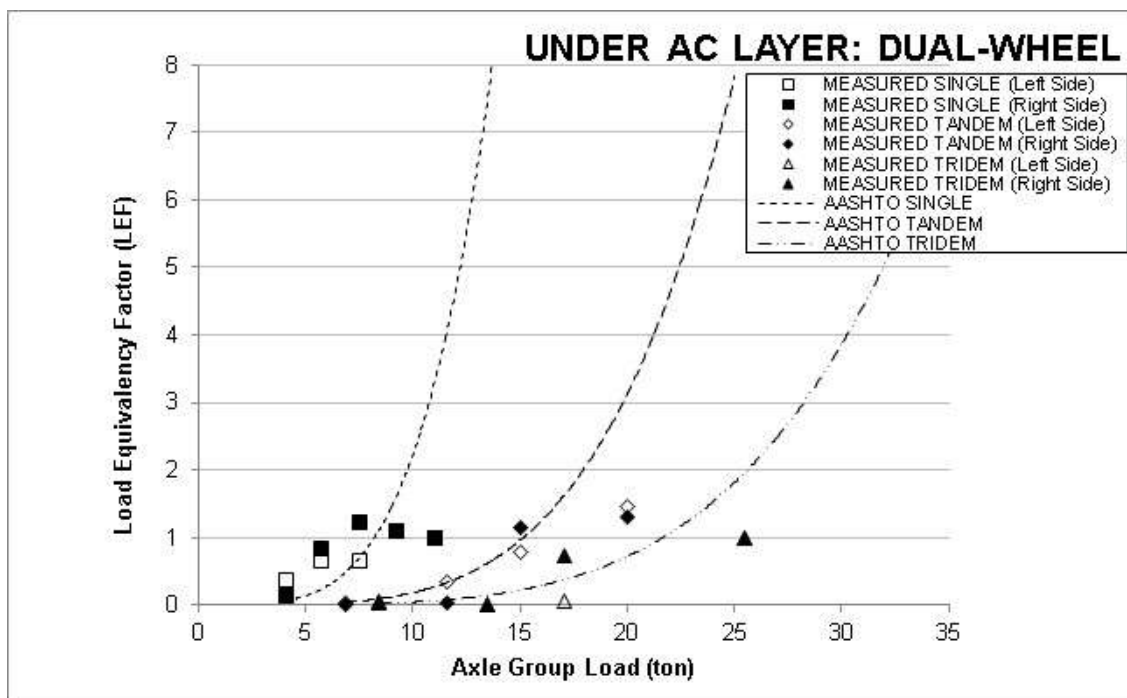


รูปที่ 9.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเพลลา (Axle Group Load) โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986)

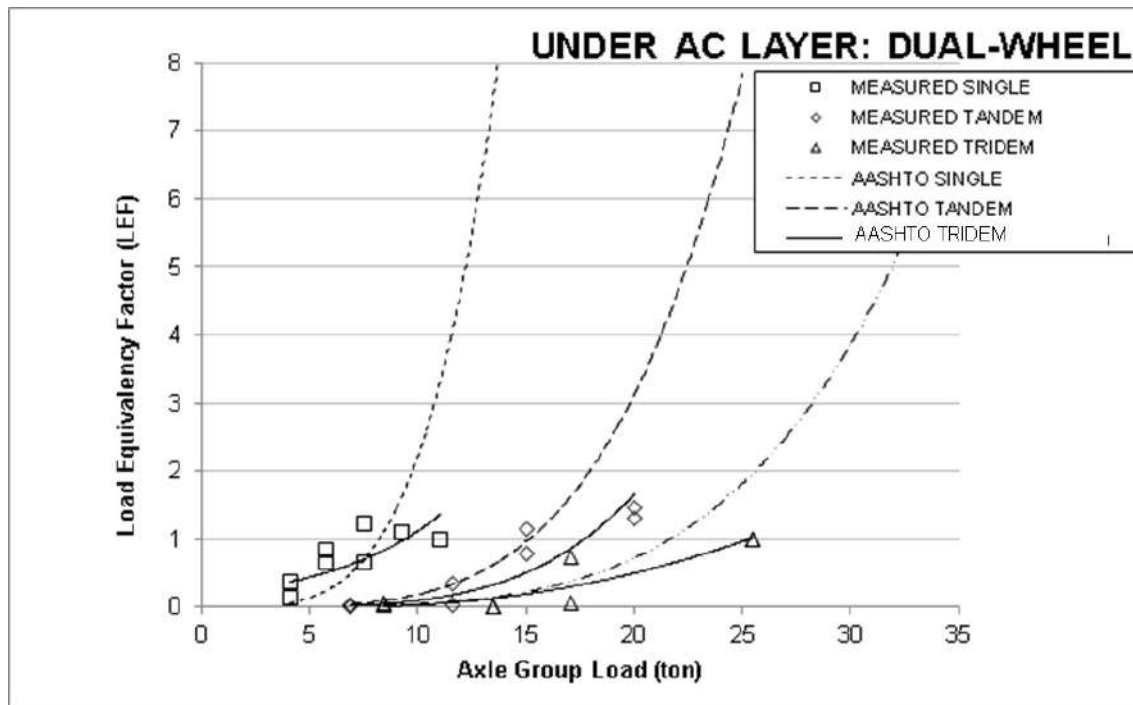
ผลการคำนวณค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัดจริงในสนาม (Mechanistic Approach) ดังแสดงในรูปที่ 9.5 ถึง รูปที่ 9.10 ค่าความเครียด (Strain) ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (AC) ตรวจวัดในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรและในแนวขนานทิศทางจราจร นำมาใช้คำนวณค่า LEF กรณียางคู่ ตามน้ำหนักกลุ่มเพลลา (Axle Group Load) โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลลา (Tridem) ดังแสดงในรูปที่ 9.5 และ รูปที่ 9.6 ตามลำดับ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กับน้ำหนักกลุ่มเพลลา พบว่า ค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากการตรวจวัดค่า Strain ใต้ผิว AC ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร มีความแปรปรวนสูงกว่าค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากการตรวจวัดค่า Strain ใต้ผิว AC ในแนวขนานทิศทางจราจร ค่า LEF คำนวณจากข้อมูลค่าความเครียดใต้ผิวทาง AC ตรวจวัดในแนวขนานทิศทางจราจรในรูปที่ 9.6 นำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงสถิติ ดังแสดงในรูปที่ 9.7 นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) ของการศึกษานี้ กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) ซึ่งเสนอโดย AASHTO (1986) ที่น้ำหนักกลุ่มเพลลาเดียวกัน ยังแสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของข้อมูลค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัดจะต่ำกว่าค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์



รูปที่ 9.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเพลลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain ได้ผิวทาง AC ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร (Mechanistic Approach)

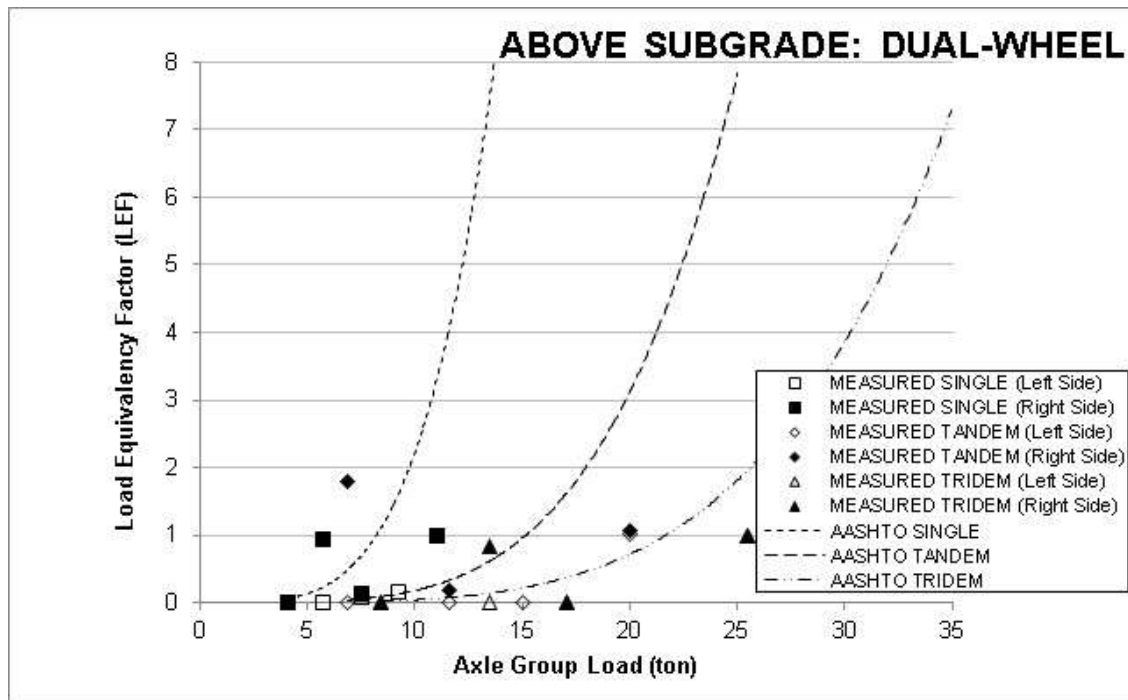


รูปที่ 9.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเพลลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain ได้ผิวทาง AC ในแนวขนานทิศทางจราจร (Mechanistic Approach)

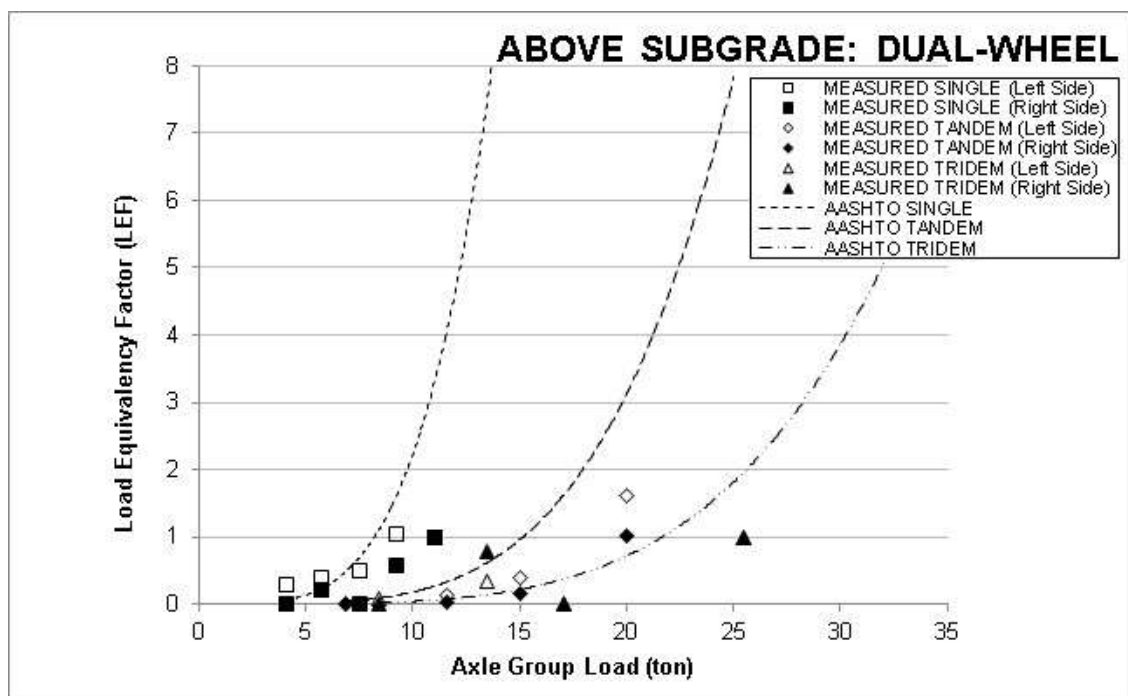


รูปที่ 9.7 การเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach)

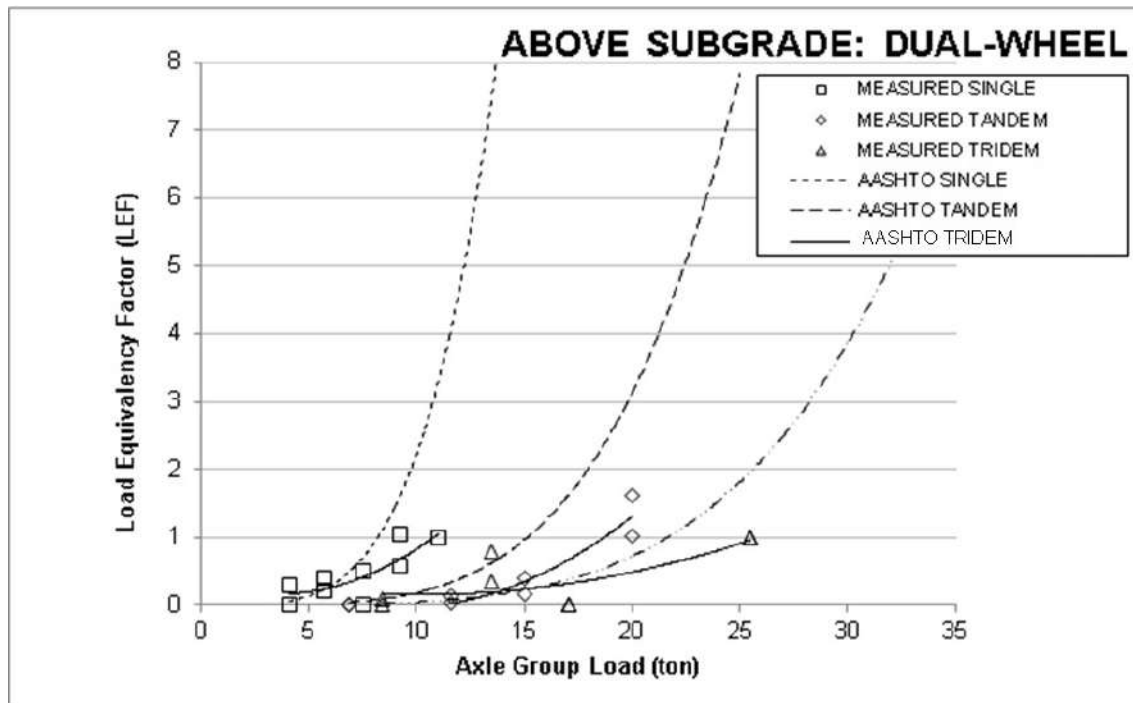
ในขณะที่ค่า Strain เหนือ Subgrade ตรวจวัดในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรและในแนวนานทิศทางจราจร นำมาใช้คำนวณค่า LEF กรณียางคู่ ตามน้ำหนักกลุ่มเพลลา (Axle Group Load) โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลลา (Tridem) เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 9.8 และรูปที่ 9.9 ตามลำดับ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กับน้ำหนักกลุ่มเพลลาพบว่า ค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากการตรวจวัดค่า Strain เหนือ Subgrade ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร มีความแปรปรวนสูงกว่าค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากการตรวจวัดค่า Strain เหนือ Subgrade ในแนวนานทิศทางจราจร ค่า LEF คำนวณจากข้อมูลค่าความเครียดเหนือ Subgrade ตรวจวัดในแนวนานทิศทางจราจรในรูปที่ 9.9 นำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงสถิติ ดังแสดงในรูปที่ 9.10 นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) ของการศึกษานี้ กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) ซึ่งเสนอโดย AASHTO (1986) ที่น้ำหนักกลุ่มเพลลาเดียวกัน ยังแสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของข้อมูลค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัดจะต่ำกว่าค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์



รูปที่ 9.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเพลลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain เหนือ Subgrade ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร (Mechanistic Approach)

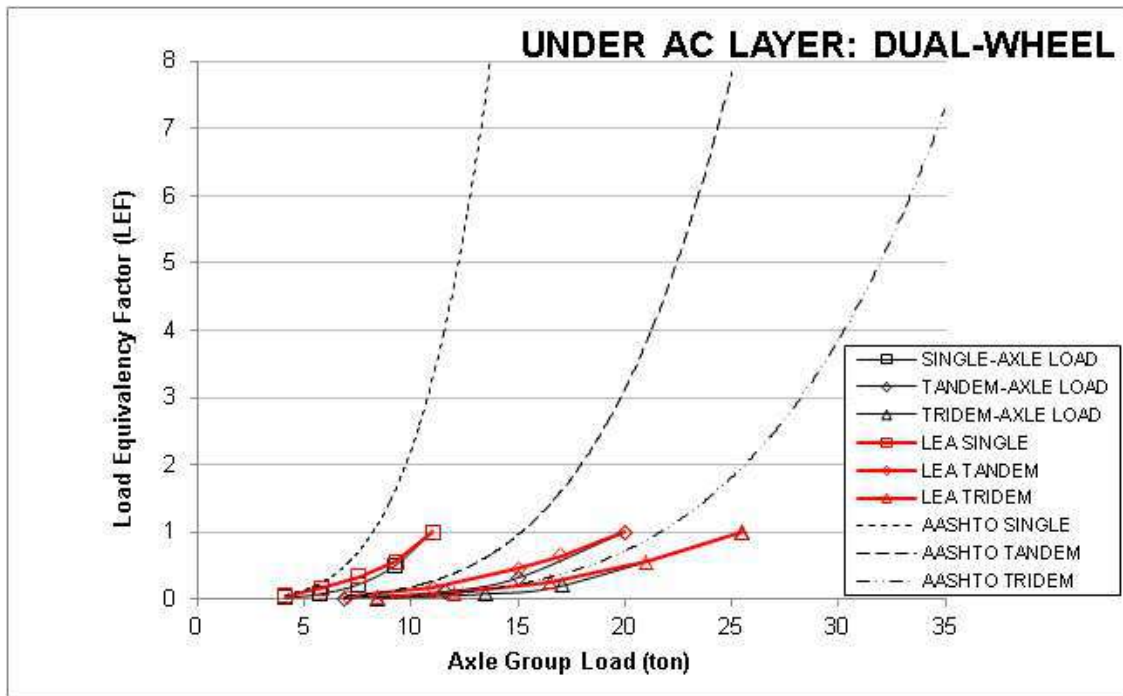


รูปที่ 9.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเพลลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain เหนือ Subgrade ในแนวขนานทิศทางจราจร (Mechanistic Approach)

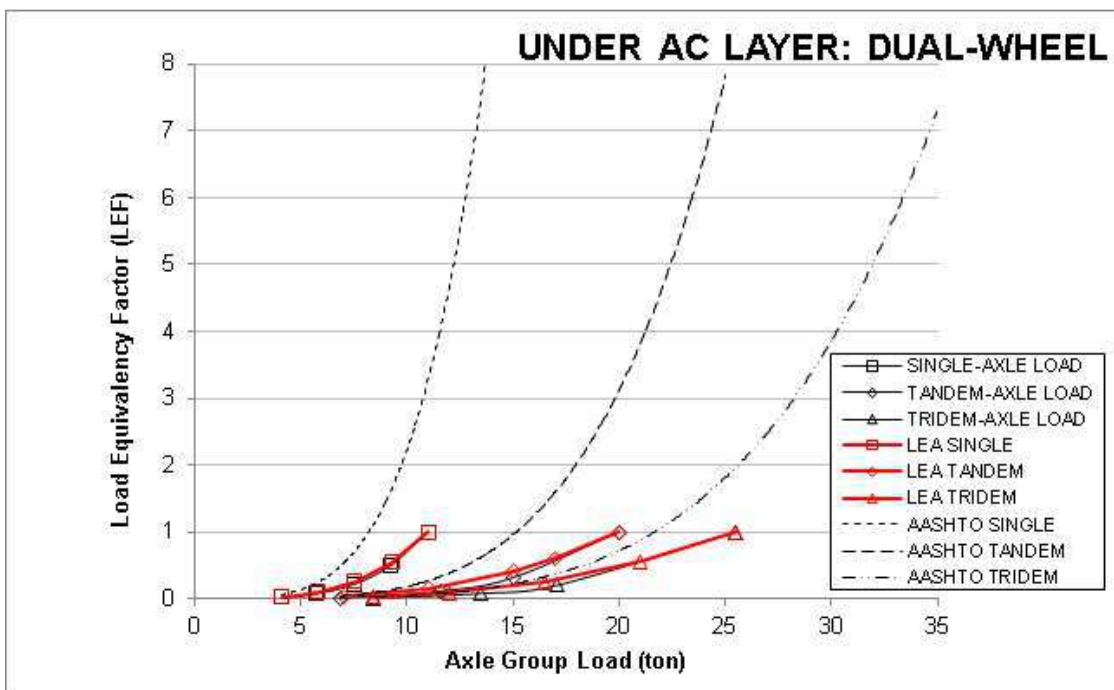


รูปที่ 9.10 การเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach)

ผลการคำนวณค่า LEF โดยการวิเคราะห์ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) ดังแสดงในรูปที่ 9.11 ถึงรูปที่ 9.13 ค่าความเครียด (Strain) ได้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (AC) คำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Linear Elastic Analysis (LEA) ทั้งในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรและในแนวนานทิศทางจราจร นำมาใช้คำนวณค่า LEF กรณียางคู่ ตามน้ำหนักลงกลุ่มเพลลา (Axle Group Load) โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลลา (Tridem) ดังแสดงในรูปที่ 9.11 และรูปที่ 9.12 ตามลำดับ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กับ น้ำหนักลงกลุ่มเพลลาพบว่า กรณีค่า Strain ในแนวนานทิศทางจราจร ค่า LEF ซึ่งคำนวณได้ด้วยโปรแกรม LEA ใกล้เคียงกับค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากกฎยกกำลังสี่ ในขณะที่กรณีค่า Strain ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร ค่า LEF ซึ่งคำนวณได้ด้วยโปรแกรม LEA แตกต่างกับค่า LEF ซึ่งคำนวณได้จากกฎยกกำลังสี่เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า ที่น้ำหนักลงกลุ่มเพลลาเดียวกัน แนวโน้มของข้อมูลค่า LEF โดยวิธีการวิเคราะห์ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) จะต่ำกว่าค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986)

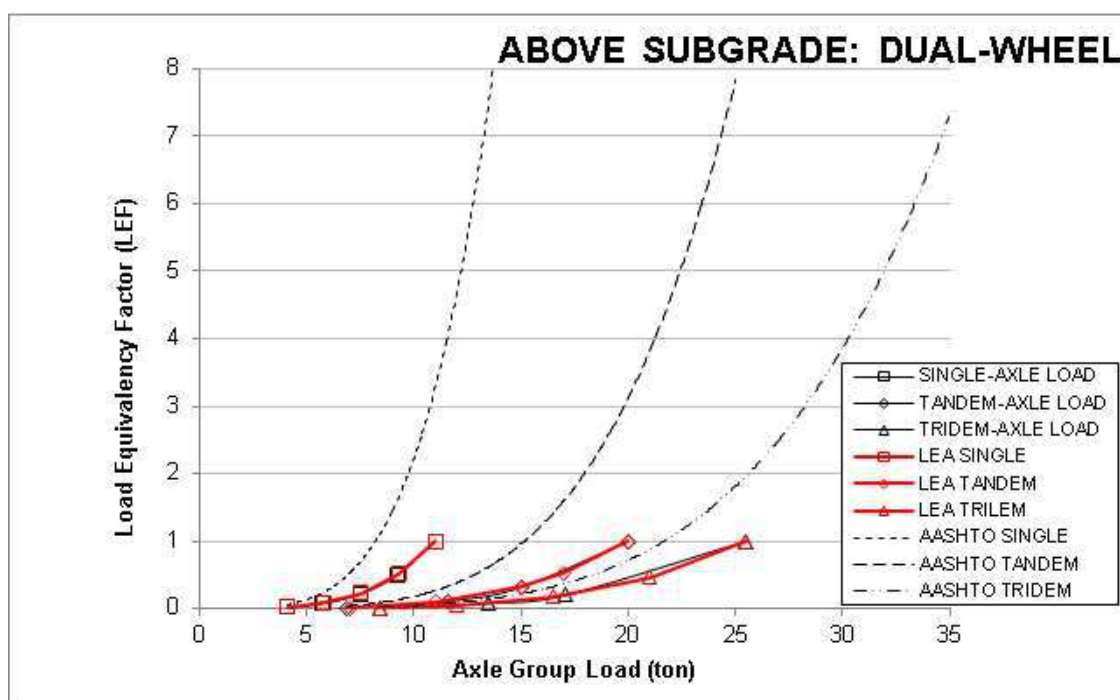


รูปที่ 9.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเพลลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain ได้ผิวทาง AC ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law)



รูปที่ 9.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเพลลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain ได้ผิวทาง AC ในแนวนอนทิศทางจราจร 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 ตามน้ำหนักกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลา (Tridem) เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 9.13 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กับน้ำหนักกลุ่มเพลา พบว่า ค่า LEF คำนวณได้จากโปรแกรม LEA ใกล้เคียงกับค่า LEF คำนวณได้จากกฎยกกำลังสี่ ทั้งนี้ค่า LEF วิเคราะห์จากค่า Strain เหนือ Subgrade ใกล้เคียงกว่าค่า LEF วิเคราะห์จากค่า Strain ได้ผิว AC นอกจากนี้ ยังพบว่า ที่น้ำหนักกลุ่มเพลาเดียวกัน แนวโน้มของข้อมูลค่า LEF โดยวิธีการวิเคราะห์ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) จะต่ำกว่าค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986)



รูปที่ 9.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain เหนือ Subgrade ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law)

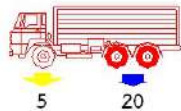
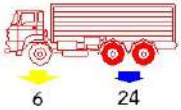
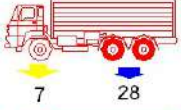
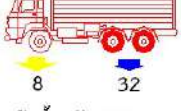
ผลการคำนวณค่า LEF กรณียางเดี่ยวและยางคู่ ตามน้ำหนักกลุ่มเพลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) กฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law) และวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986) สรุปไว้ในตารางที่ 9.4 และ ตารางที่ 9.5 ตามลำดับ โดยแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพลาเดี่ยว (Single) เพลาคู่ (Tandem) และสามเพลา (Tridem) ตัวอย่างการคำนวณค่า LEF สำหรับบรรทุกทุกสปีดพิกัดน้ำหนักรวมต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 9.14

ตารางที่ 9.4 ผลการคำนวณค่า LEF กรณียางเดี่ยว ตามน้ำหนักกลุ่มเพลลา (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 9.5 ผลการคำนวณค่า LEF กรณียางคู่ ตามน้ำหนักกลุ่มเพลลา (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 9.14 ตัวอย่างการคำนวณค่า LEF สำหรับรถบรรทุกสิบล้อพิกัดน้ำหนักรวมต่างๆ

10. การพัฒนาแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง

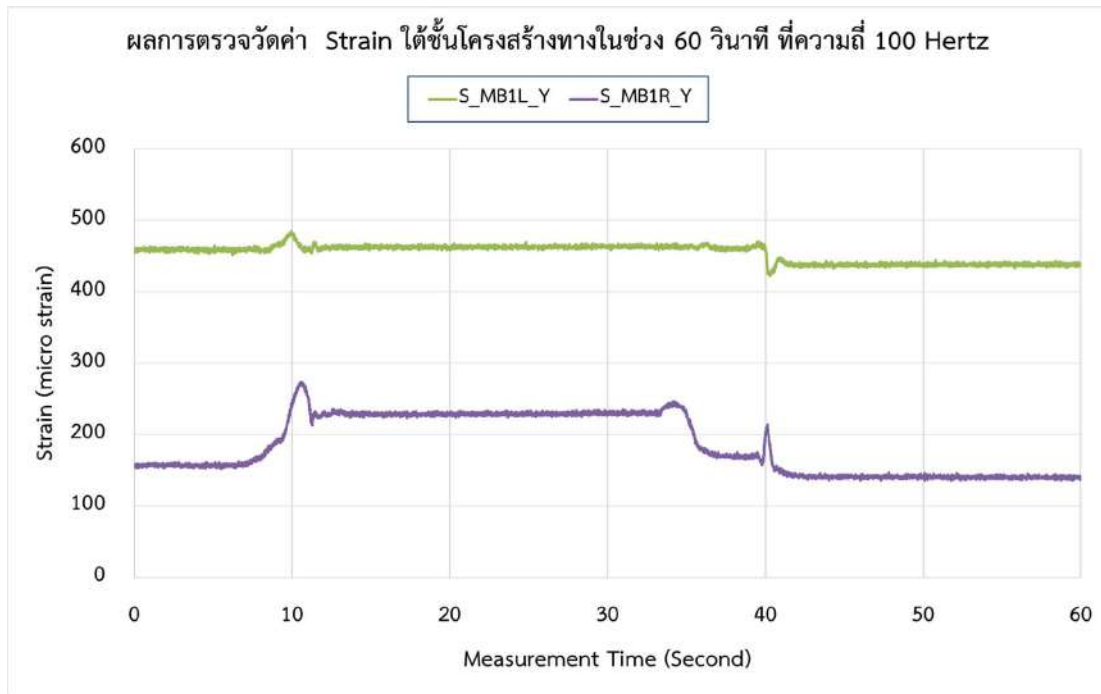
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง ตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนน ซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จ จำนวน 2 แปลงในระยะที่หนึ่ง และที่ติดตั้งเพิ่มเติม จำนวน 1 แปลงซึ่งจะประกอบด้วย 1) Simplified Model สำหรับงานปฏิบัติการ และ 2) Mechanistic (Analytical) Model สำหรับงานวิจัยวิชาการ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

10.1 ลักษณะกราฟความเค้นและความเครียดจากการทดสอบวิ่งรถบรรทุกผ่านแปลงตรวจวัดถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

ผลการทดสอบทดสอบรถ 6 ล้อ และรถกึ่งพ่วง แปลงถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท สามารถนำมาพล็อตเป็นค่าความเค้นและความเครียด เปรียบเทียบกับเวลา พบว่ามีลักษณะสอดคล้องกับผลการทดสอบในแปลงถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี จึงจะได้แสดงผลบางส่วนเท่านั้น รูปที่ 10.1 แสดงค่าความเค้น กรณีรถหุยนต์หนึ่งรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุกทุก 100% แบบหุยนต์หนึ่ง เพลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Pressure Cell ชั้น Top Subgrade (60 cm) แกวที่ 1 ซึ่งมีลักษณะความเค้นเพิ่มขึ้นในช่วงที่รถใกล้หุยนต์หนึ่ง หรือการเบรกรถทำให้เกิดแรงกระทำกับวัสดุชั้นทางมากขึ้นนั่นเองรูปที่ 10.2 แสดงค่าความเครียดในกรณีเดียวกัน ซึ่งพบลักษณะการเพิ่มขึ้นในช่วงรถใกล้หุยนต์หนึ่ง เช่นเดียวกัน

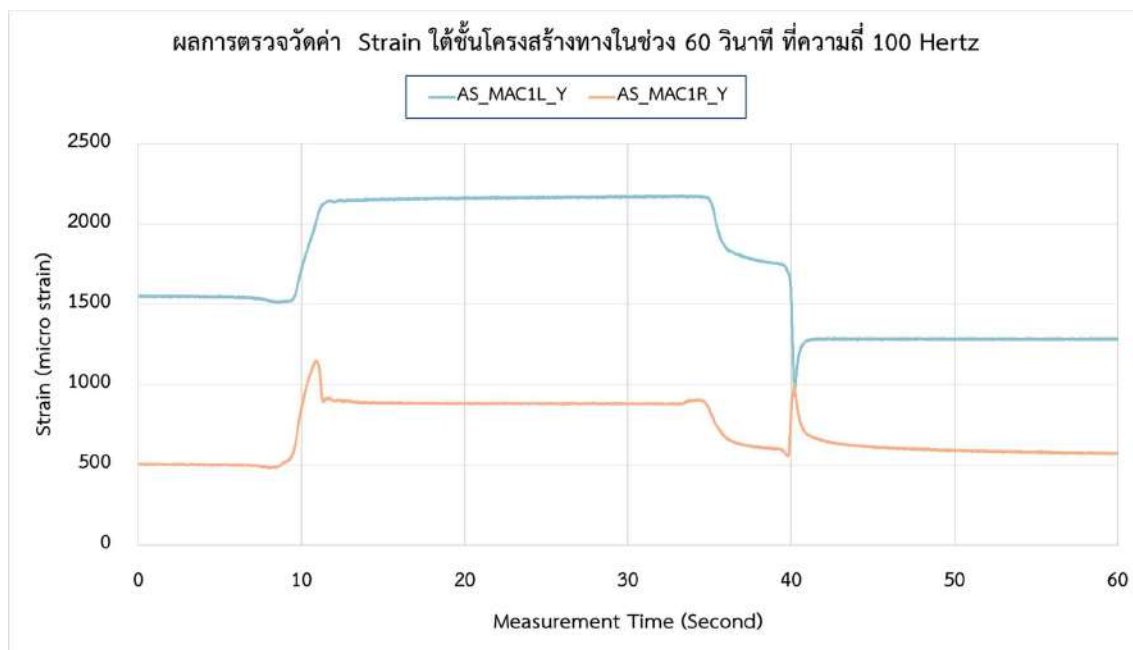


รูปที่ 10.1 ความเค้น กรณีรถหุยนต์หนึ่งรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุกทุก 100% แบบหุยนต์หนึ่ง เพลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Pressure Cell ชั้น Top Subgrade (60 cm) แกวที่ 1



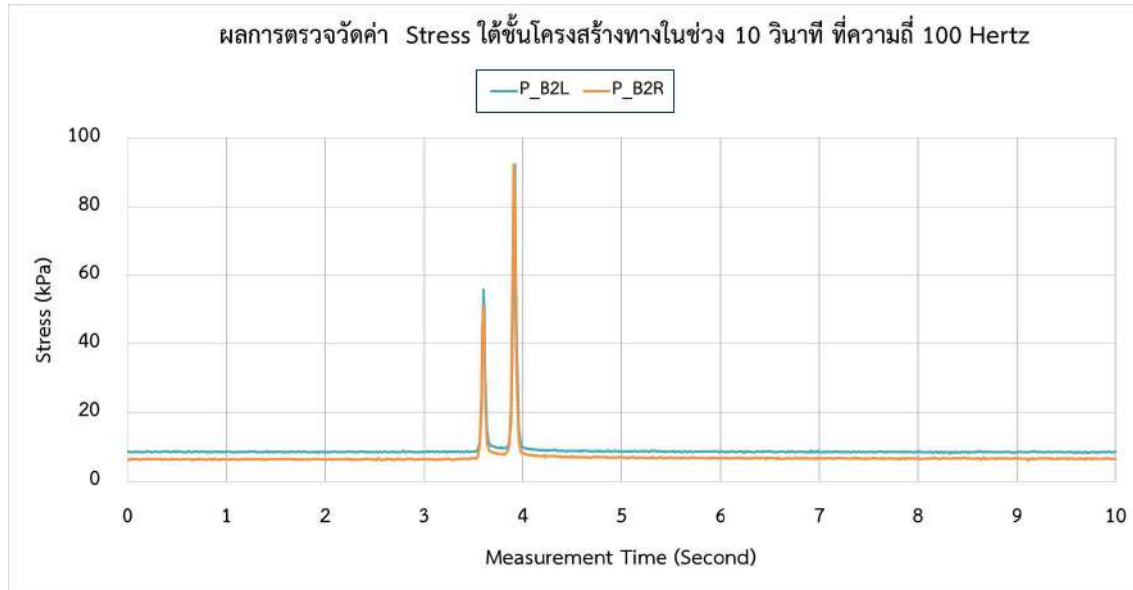
รูปที่ 10.2 ความเครียด กรณี รถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เพลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน
อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Middle Base (30 cm) แกวที่ 1

รูปที่ 10.3 แสดงความเครียดในชั้น Middle AC (10 cm) แกวที่ 1 กรณีเดียวกัน พบว่าความเครียดในชั้นวัสดุ AC มีลักษณะความหนืด (Viscous) โดยความเครียดจะไม่กลับมาเท่าเดิมทันทีภายหลังน้ำหนักบรรทุกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดในแปลงโพธารามเช่นเดียวกัน



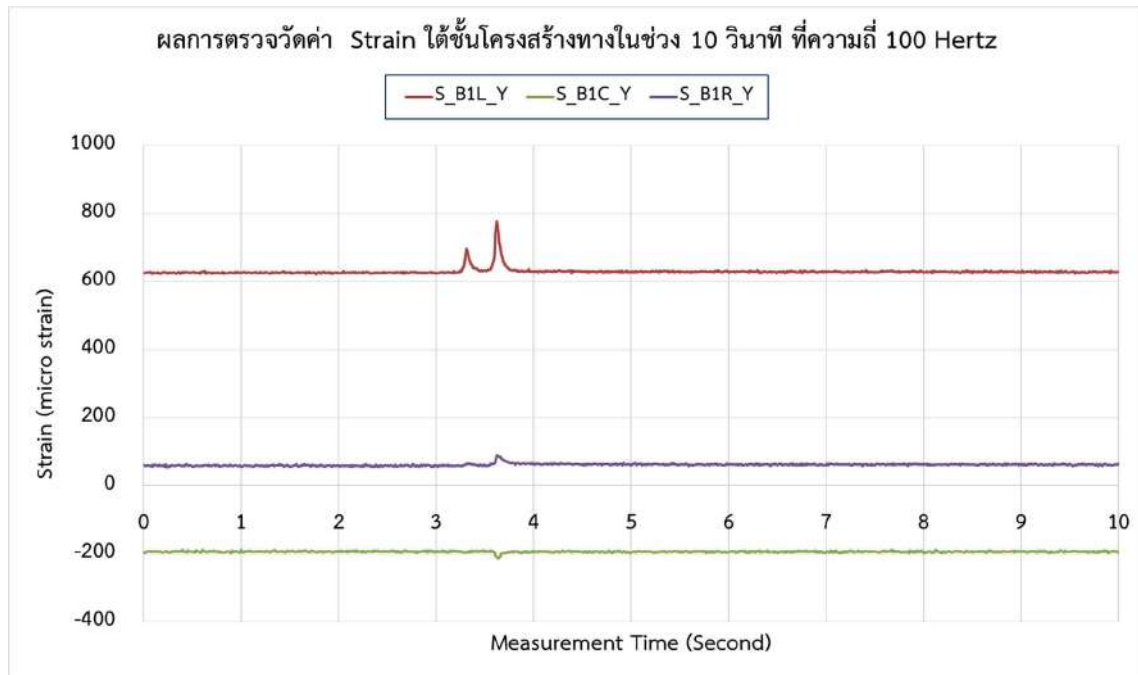
รูปที่ 10.3 ความเครียด กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เพลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน
อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Middle AC (10 cm) แกวที่ 1

ตัวอย่างผลการตรวจวัดในกรณีวิ่งที่ความเร็วต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 10.4 ถึง รูปที่ 10.6 จากรูปที่ 10.4 พบว่า ความเค้นที่ชั้น Bottom Base (40 cm) มีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นแบบ Pulse ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วรถบรรทุก และมีลักษณะสอดคล้องกับผลการศึกษาในแปลงโพธารามเช่นเดียวกัน



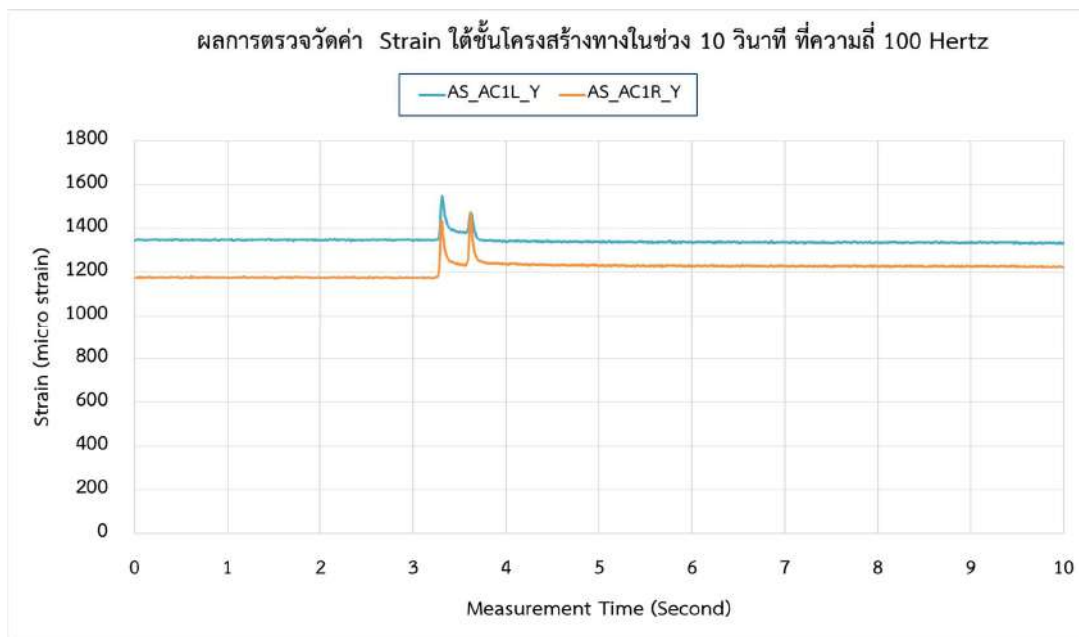
รูปที่ 10.4 ความเค้น กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Pressure Cell ชั้น Bottom Base (40 cm) แถวที่ 2

จากรูปที่ 10.5 แสดงความเครียดในชั้น Bottom base ที่ตำแหน่งใต้ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลางช่องจราจร ซึ่งพบว่าบริเวณใต้ล้อซ้ายมีแนวโน้มค่าความเครียดเพิ่มขึ้น (Tensile strain) หรือความสูงของ Pulse มากกว่าที่ใต้ล้อขวาซึ่งส่วนหนึ่งคาดว่าเนื่องจากล้อรถบรรทุกอาจไม่เหยียบเหนือตำแหน่งของอุปกรณ์ Strain Gage อย่างตรงที่เกี่ยว ส่วนค่าความเครียด ที่กึ่งกลางช่องจราจร พบว่ามีค่าลบหรือเป็นลักษณะของ Compressive strain ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในแปลงโพธารามเช่นกัน



รูปที่ 10.5 ความเครียด กรณี รถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Bottom Base (40 cm) แถวที่ 1

จากรูปที่ 10.6 แสดงความเครียดในชั้น Bottom AC ที่ตำแหน่งใต้ล้อซ้าย และล้อขวา พบการเพิ่มขึ้นของความเครียดในลักษณะ Pulse (Tensile strain) เช่นกันโดยพบว่าเมื่อน้ำหนักกระทำความผ่านไปแล้ว ค่าความเครียดไม่ลดกลับมาสู่จุดเดิม ซึ่งเป็นลักษณะ Viscous ดังได้กล่าวมาข้างต้น ลักษณะความเครียดนี้สอดคล้องกับผลการตรวจวัดในแปลงโพธารามเช่นกัน



รูปที่ 10.6 ความเครียด กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Asphalt Strain Gage ชั้น Bottom AC (20 cm) แถวที่ 1

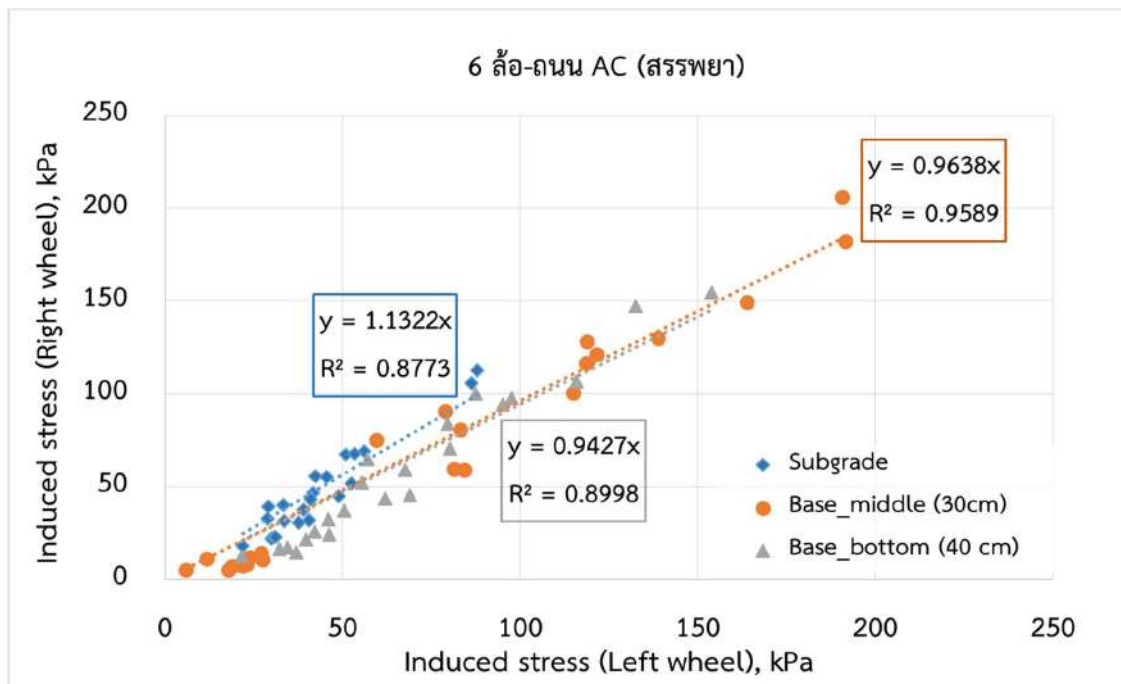
10.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดและตัวแปรต่างๆจากการทดสอบบึง

รถบรรทุกผ่านแปลงตรวจวัดถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

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

รูปที่ 10.7 แสดง ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา เหนือชั้น Subgrade และ Base จากความสัมพันธ์พบว่าค่า Stress ได้ล้อซ้ายและได้ล้อขวามีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ทั้งในชั้น Subgrade และในชั้น Base ที่ความลึก 30 ซม.และความลึก 40 ซม. ทั้งนี้มีแนวโน้มแตกต่างจากข้อมูลที่ได้จากแปลงทดสอบโพธาราม (เนื่องจากข้อมูลจากแปลงโพธาราม ที่ค่า Stress ในชั้น Subgrade ได้ล้อขวามีค่าน้อยกว่าได้ล้อขวา) สาเหตุที่เป็นไปได้ของความแตกต่างระหว่างแปลงสรรพยาและแปลงโพธารามนี้อาจเกิดเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เช่น

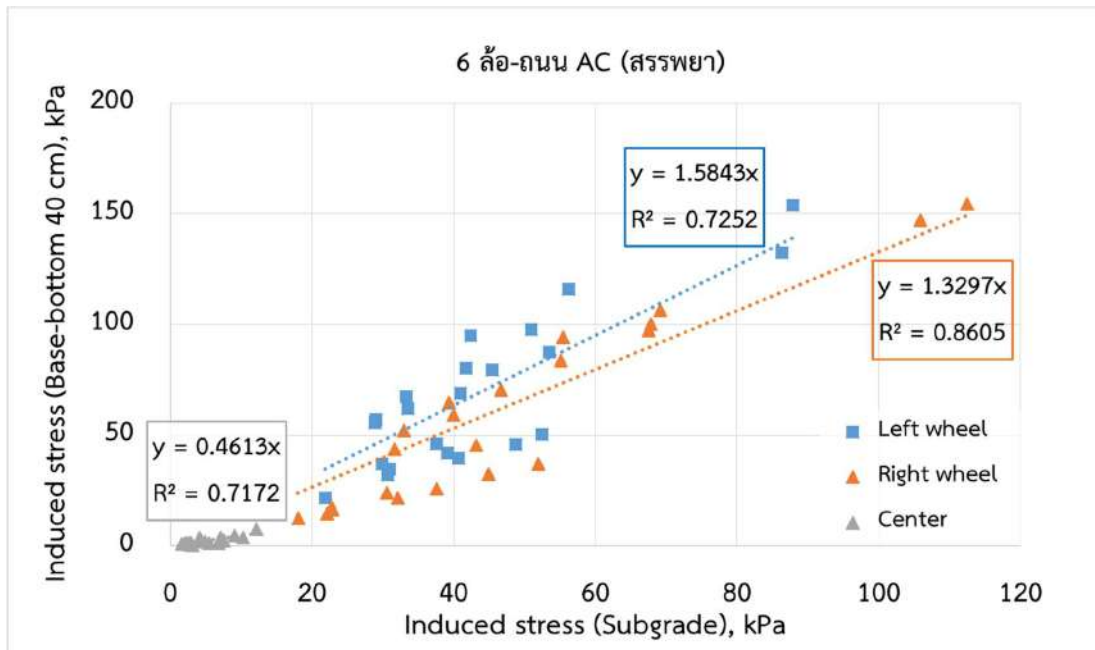
- ความแตกต่างของวัสดุชั้นทาง โดยแปลงทดสอบนครชัยศรีมีชั้นวัสดุ Selected material เพิ่มเติมเข้ามา
- ความชันของผิวทางมีความแตกต่างกัน
- ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งอุปกรณ์วัดและตำแหน่งล้อรถบรรทุก



รูปที่ 10.7 ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา เหนือชั้น Subgrade และ Base แปลงสรรพยา

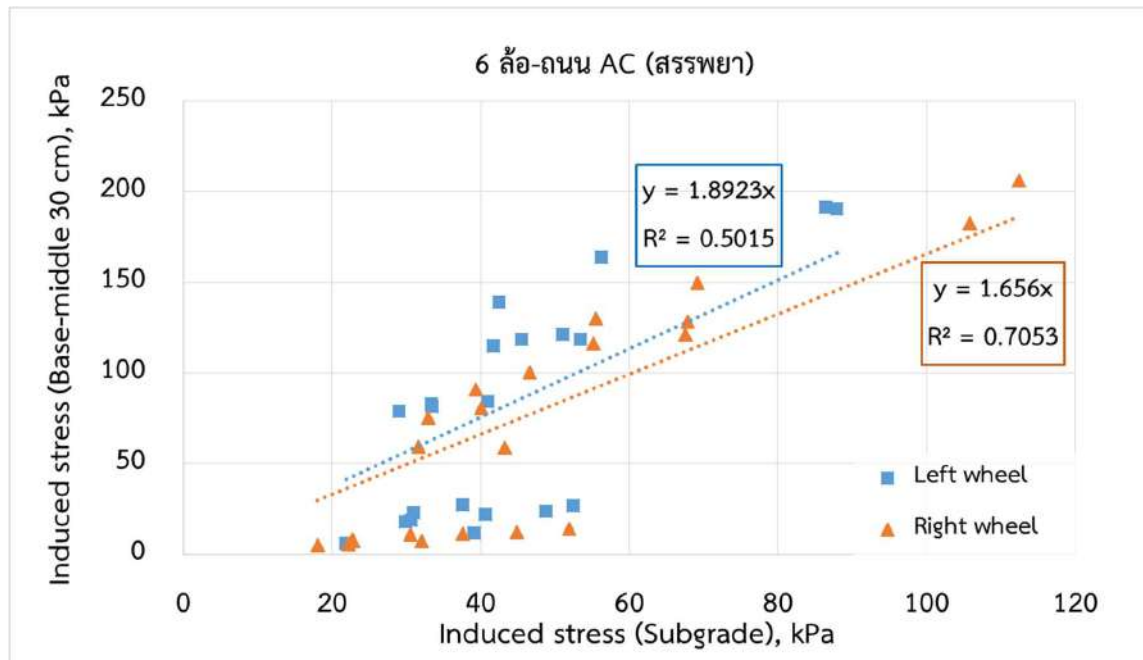
รูปที่ 10.8 แสดง ค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 40 ซม. (Bottom) ได้ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง จากความสัมพันธ์พบว่าบริเวณใต้ล้อซ้ายและใต้ล้อขวา ค่าความเค้นในชั้น Base

(ลึก 40 ซม.) มีค่าความเค้นมากกว่าความเค้นในชั้น Subgrade ประมาณ 30-60% ในขณะที่บริเวณกึ่งกลางช่องจราจร ความเค้นในชั้น Base มีค่าน้อยกว่าในชั้น Subgrade ประมาณ 50% ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับผลการตรวจวัดในแปลงโพธาราม



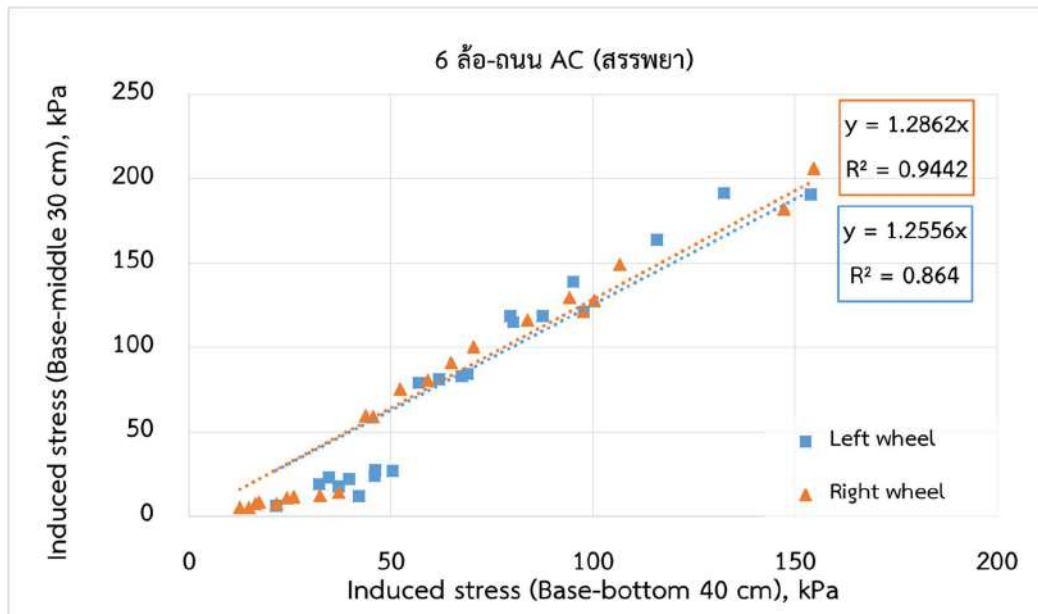
รูปที่ 10.8 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 40 cm (Bottom) ได้ ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง แปลงสรพยา

รูปที่ 10.9 แสดงค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 30 ซม. (Middle) ได้ ล้อซ้าย และ ล้อขวา จากความสัมพันธ์พบว่าบริเวณใต้ล้อซ้ายและใต้ล้อขวา ค่าความเค้นในชั้น Base (ลึก 30 ซม.) มีค่าความเค้นมากกว่าความเค้นในชั้น Subgrade ประมาณ 65-90%



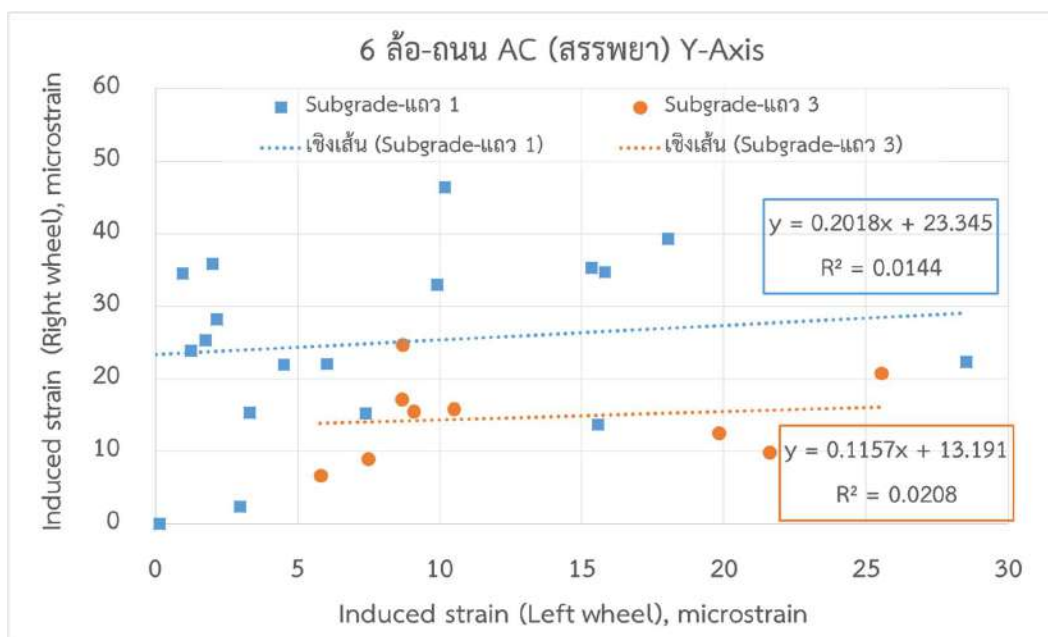
รูปที่ 10.9 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 30 cm (Middle) และได้ ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง แปลงสรรพยา

รูปที่ 10.10 แสดง ค่าความเค้น บริเวณชั้น Base ที่ความลึก 30 ซม. (Middle) และที่ความลึก 40 ซม. (Bottom) ได้ ล้อซ้าย และ ล้อขวา จากความสัมพันธ์พบว่าบริเวณใต้ล้อซ้ายและใต้ล้อขวา ค่าความเค้นในชั้น Base (ลึก 30 ซม.) มีค่าความเค้นมากกว่าที่ความลึก 40 ซม. (Bottom) ประมาณ 25-30% ซึ่งแสดงถึงการลดทอนค่าความเค้นตามความลึกในชั้น Base



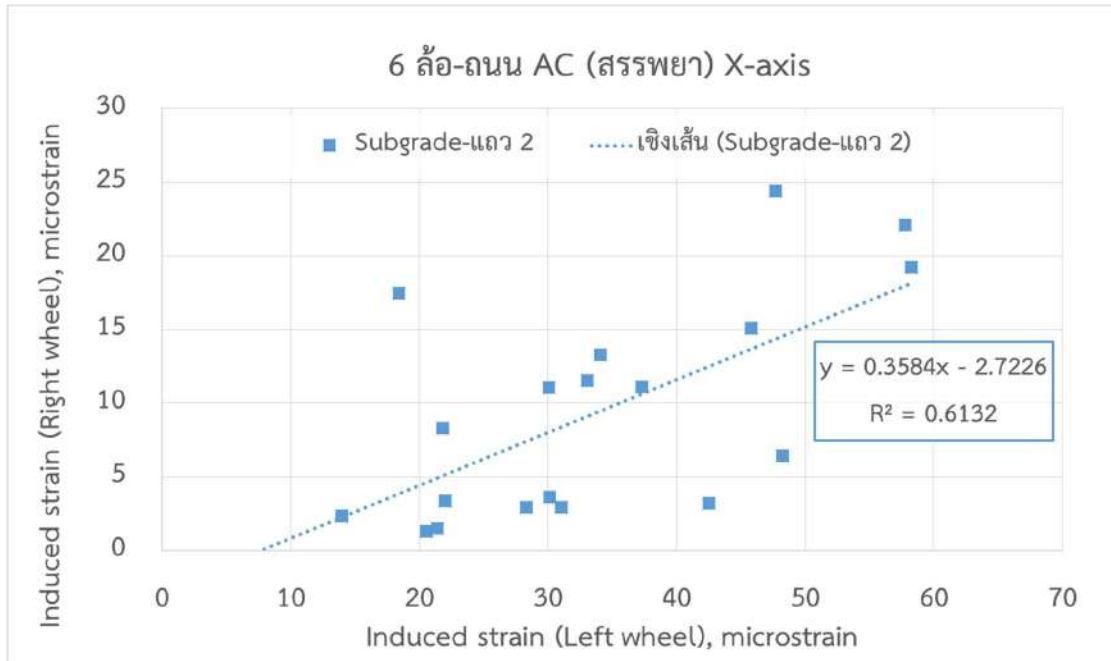
รูปที่ 10.10 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Base ที่ความลึก 30 cm (Middle) และ ชั้น Base ที่ความลึก 40 cm (Base) ได้ ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง แปลงสรรพยา

รูปที่ 10.11 แสดง ค่าความเครียดบริเวณชั้น Subgrade ได้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 1 และ แถวที่ 3 ทิศทางตั้งฉากกับถนน Strain Y (Normal-to-lane axis) พบว่าความเครียดมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่น่าเชื่อถือได้ แต่ก็พบว่าความเครียดใต้ล้อซ้ายมีแนวโน้มแปรปรวนมากกว่าใต้ล้อขวา และพบว่าบริเวณแถวที่ 1 มีแนวโน้มมีความมากกว่าแถวที่ 3 ซึ่งอาจเกิดจากตำแหน่งของเซนเซอร์ที่มีความแตกต่างกันในแต่ละแถวกัน



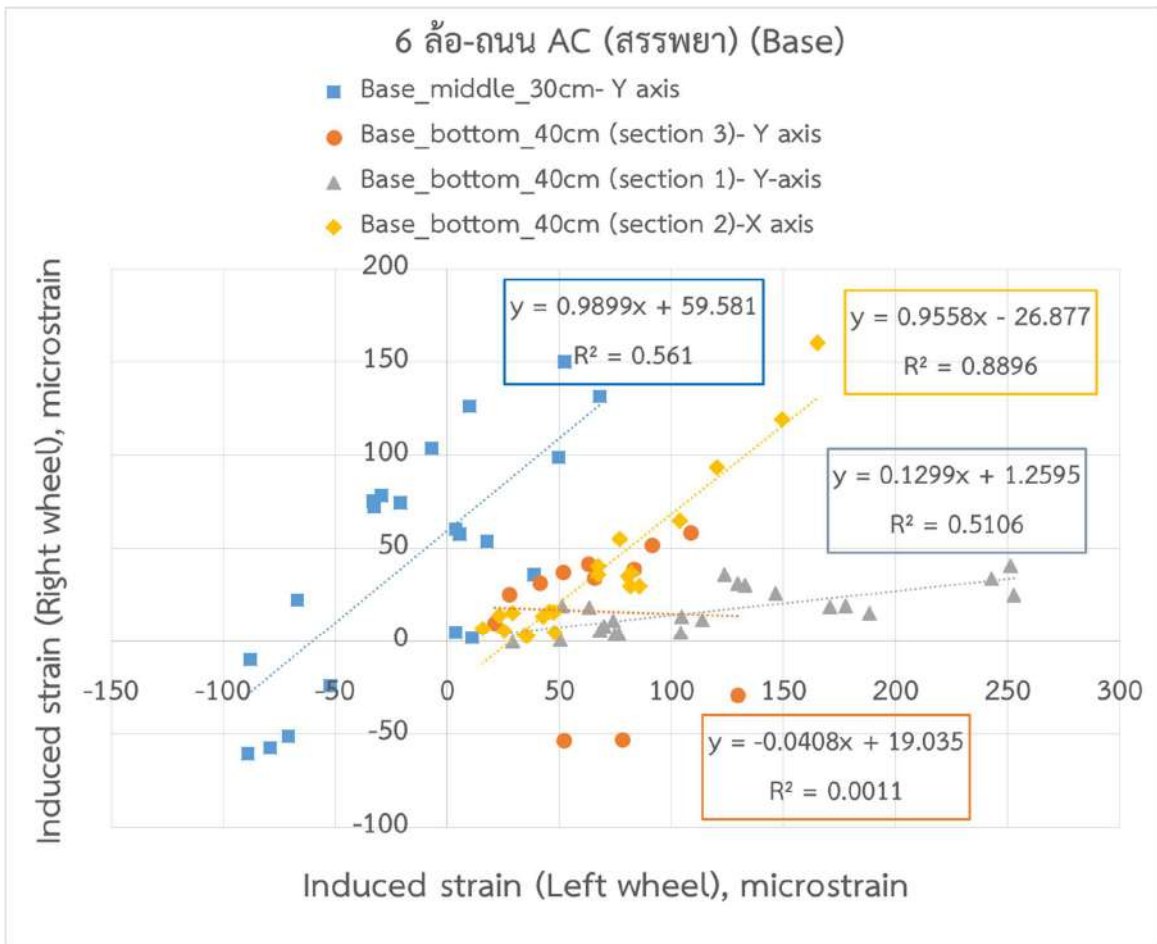
รูปที่ 10.11 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade ได้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 1 และ แถวที่ 3 ทิศทางตั้งฉากกับถนน Strain Y (Normal-to-lane axis)

รูปที่ 10.12 แสดง ค่าความเครียดบริเวณชั้น Subgrade ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 2 ทิศทางขนานกับถนน Strain X (Parallel-to-lane axis) พบว่าความเครียดมีความแปรปรวนน้อยกว่าบริเวณ แถวที่ 1 และ 3 ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับถนน และสามารถหาความสัมพันธ์ที่น่าเชื่อถือได้ ($R^2 = 0.6132$) โดยพบว่า ความเครียดใต้ล้อซ้ายมีแนวโน้มมากกว่าใต้ล้อขวา



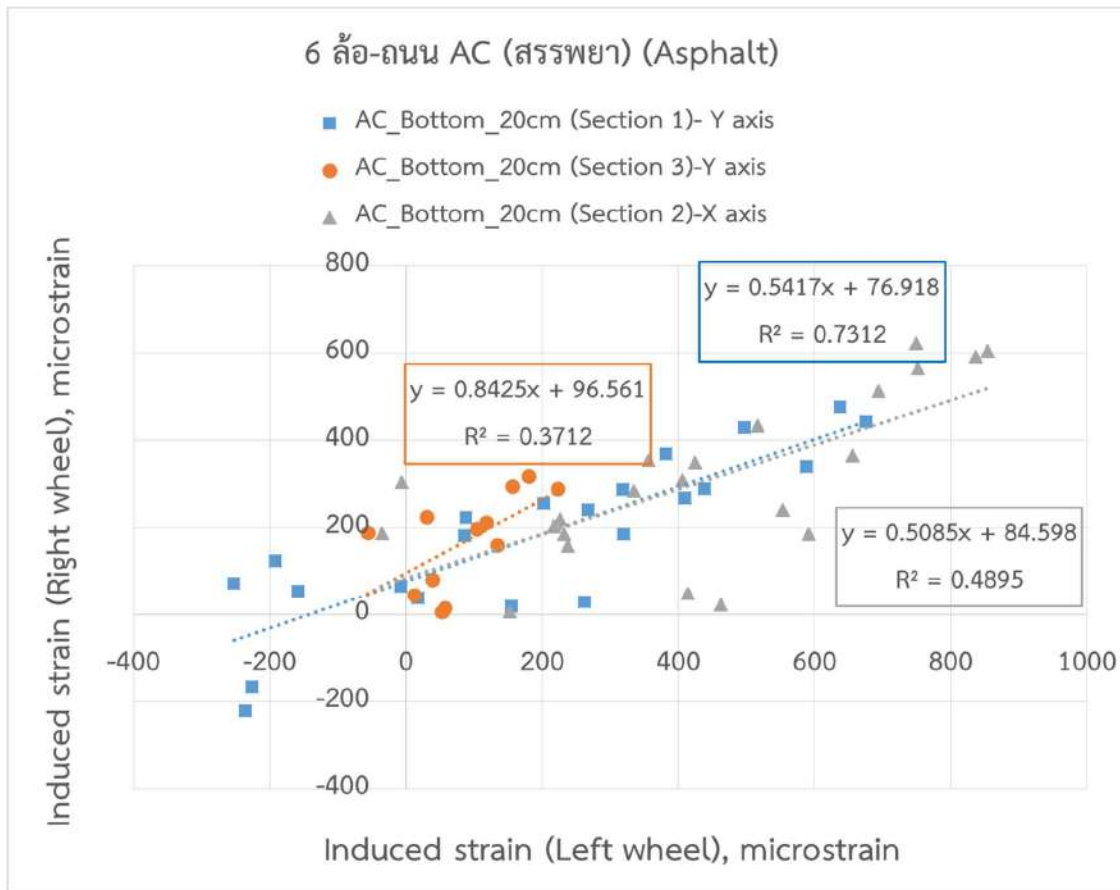
รูปที่ 10.12 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 2 ทิศทางขนานกับถนน Strain X (Parallel-to-lane axis)

รูปที่ 10.13 แสดงค่าความเครียดบริเวณชั้น Base ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดใต้ล้อซ้ายและล้อขวามีความน่าเชื่อถือมากที่สุด ($R^2 = 0.8896$) ในกรณีความเครียดขนานกับถนน Strain X (Parallel-to-lane axis) และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่ชั้น Base ที่ความลึก 30 ซม. ใต้ล้อขวาและล้อซ้าย มีความแปรปรวนน้อยกว่าและมีความน่าเชื่อถือมากกว่าความเครียดที่ชั้น Base ที่ความ ลึก 40 ซม. และพบว่าที่ความลึก 40 ซม. ความเครียดใต้ล้อซ้ายมีแนวโน้มมีความสูงกว่าความเครียดใต้ล้อขวา



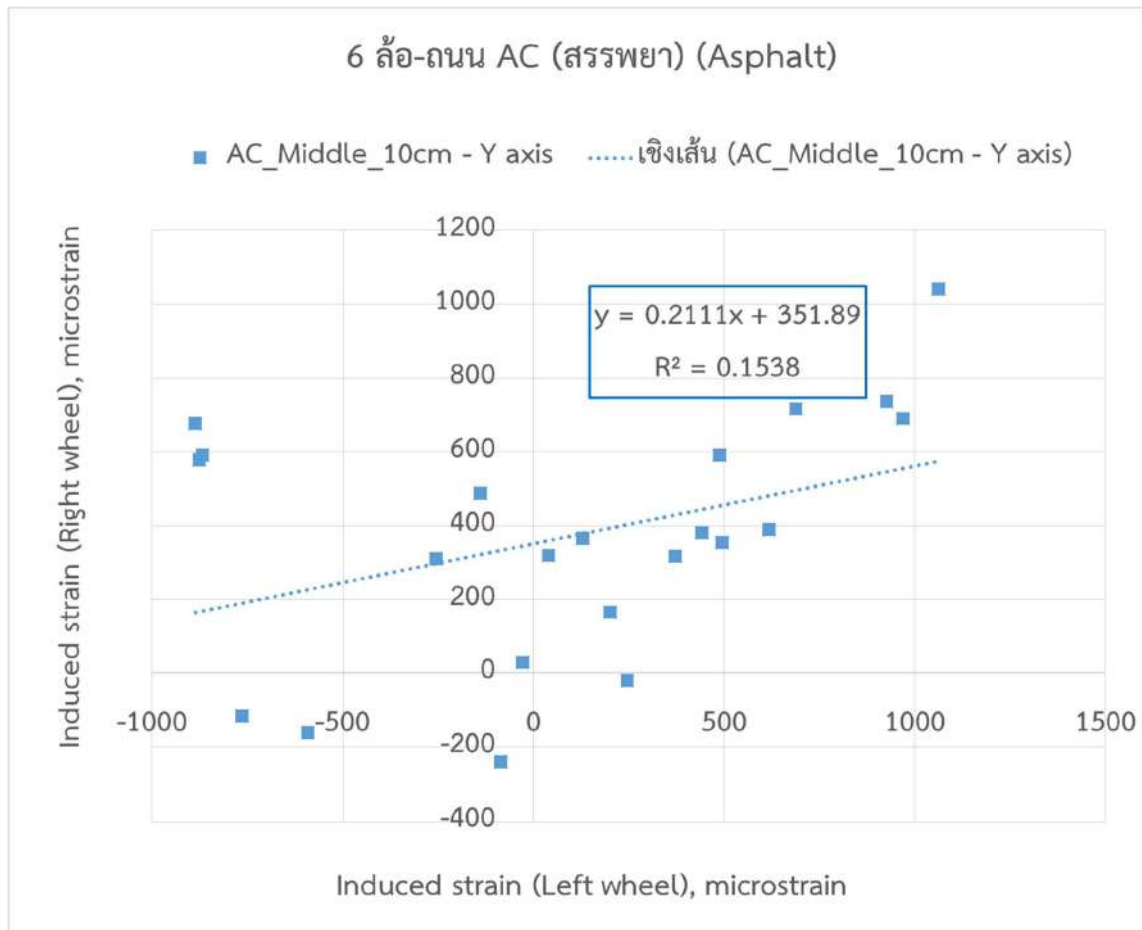
รูปที่ 10.13 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Base ได้ ล้อซ้าย และล้อขวา

รูปที่ 10.14 แสดงค่าความเครียดบริเวณชั้น AC ได้ ล้อซ้าย และล้อขวา พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดใต้ล้อซ้ายและล้อขวามีความน่าเชื่อถือมากที่สุด ($R^2 = 0.7312$) ในกรณีความเครียดขนานกับถนน Strain X (Parallel-to-lane axis) และพบว่า ความเครียดใต้ล้อซ้ายมีแนวโน้มมีความสูงกว่าความเครียดใต้ล้อขวา



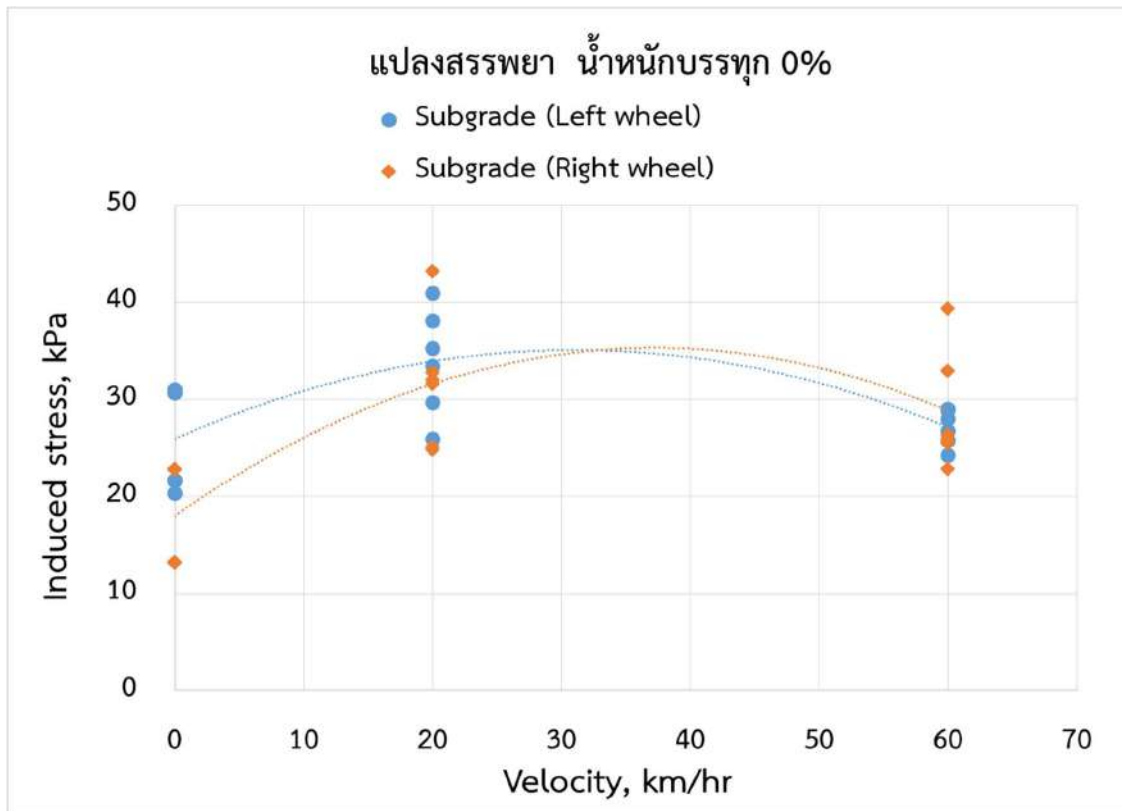
รูปที่ 10.14 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณด้านล่างชั้น AC (Bottom) ได้ ล้อซ้าย และล้อขวา

รูปที่ 10.15 แสดงค่าความเครียดบริเวณกึ่งกลางชั้น AC ได้ ล้อซ้าย และล้อขวา พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดใต้ล้อซ้ายและล้อขวามีความแปรปรวนและมีความน่าเชื่อถือน้อยกว่ากรณีความเครียดใต้ชั้น AC ทั้งนี้อาจเกิดตำแหน่งที่ล้อรถกระทำไม่ตรงกับตำแหน่งของ Strain Gage โดยจะส่งผลต่อความแปรปรวนของการตรวจวัดได้มากเมื่อติดตั้ง Strain Gage ใกล้เคียงผิวทาง

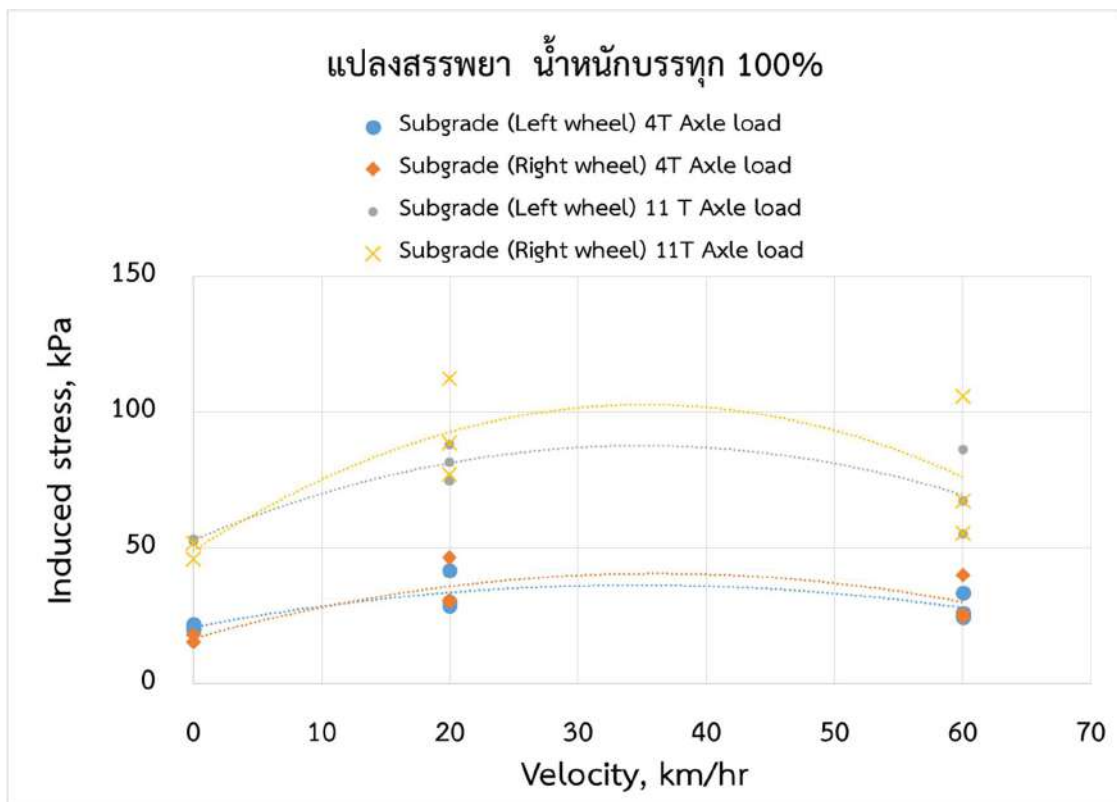


รูปที่ 10.15 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณกึ่งกลาง AC (Bottom) ใต้ ล้อซ้าย และล้อขวา

รูปที่ 10.16 และ รูปที่ 10.17 แสดงค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณี น้ำหนักบรรทุก 0% และ 100 % ทั้งสองกรณีพบแนวโน้มคล้ายคลึงกันคือ ค่าความเค้นมีมีเพิ่มขึ้นตามความเร็วจนถึงความเร็วประมาณ 20-30 กม.ต่อชั่วโมง แล้วจึงมีค่าลดลงเล็กน้อย พฤติกรรมดังกล่าวมีความแตกต่างจากที่พบในแปลงโพธาราม และในการศึกษาในอดีต ในขณะนั้นยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่ชัด แต่คาดว่าอาจเกิดจากลักษณะการชะลอตัวของรถบรรทุกขณะวิ่งเข้าสู่แปลงทดสอบ ซึ่งทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้น

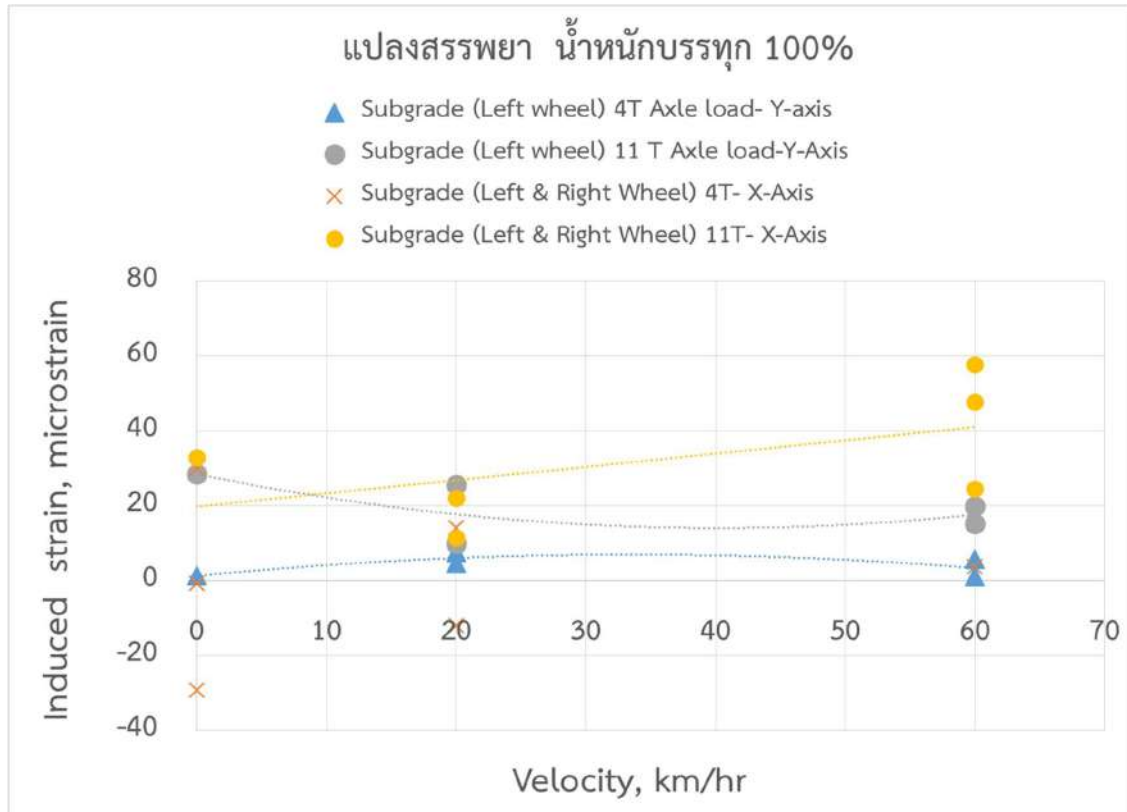


รูปที่ 10.16 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 0 % น้ำหนักเพลลา 4.1 ตัน



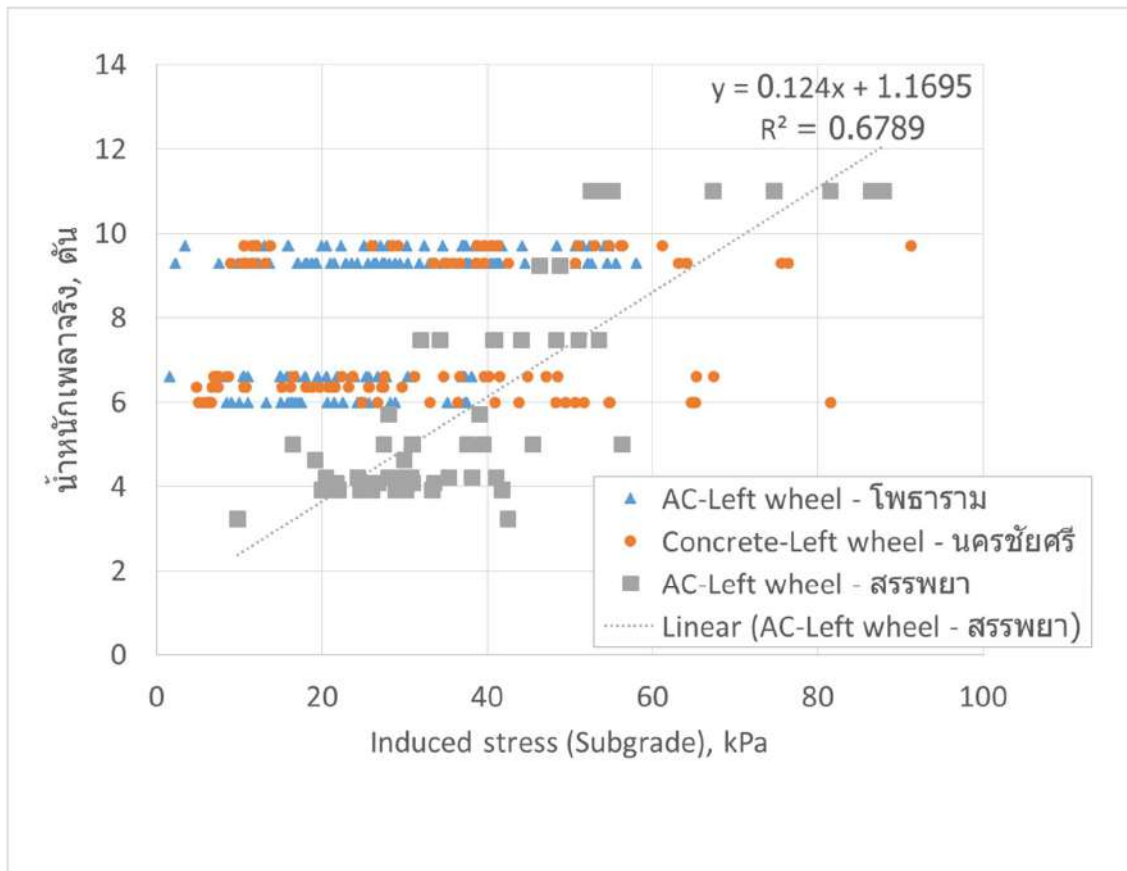
รูปที่ 10.17 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 100% น้ำหนักเพลลา 4 ตัน และ 11 ตัน

รูปที่ 10.18 แสดงค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ เทียบกรณีความเครียดวัดในแนวตั้งฉากทิศจราจร (Y-Axis) และทิศขนานจราจร (X-Axis) พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจน มีการกระจายตัวค่อนข้างมาก ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากความไม่แม่นยำที่ล้อรถบรรทุกจะเหยียบตรงตำแหน่งอุปกรณ์ Strain Gage เมื่อรถวิ่งด้วยความเร็วสูง



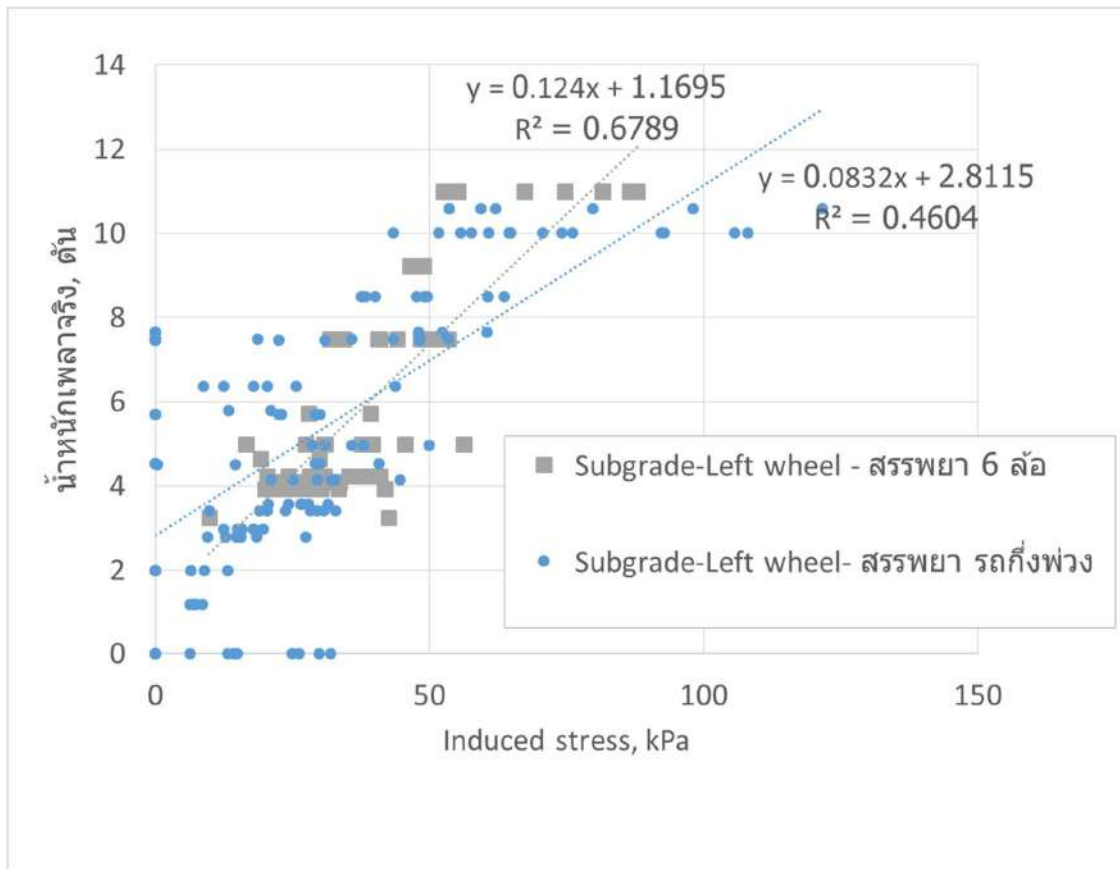
รูปที่ 10.18 ค่าความเครียด (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 100% น้ำหนักเพลา 4 ตัน และ 11 ตัน

รูปที่ 10.19 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



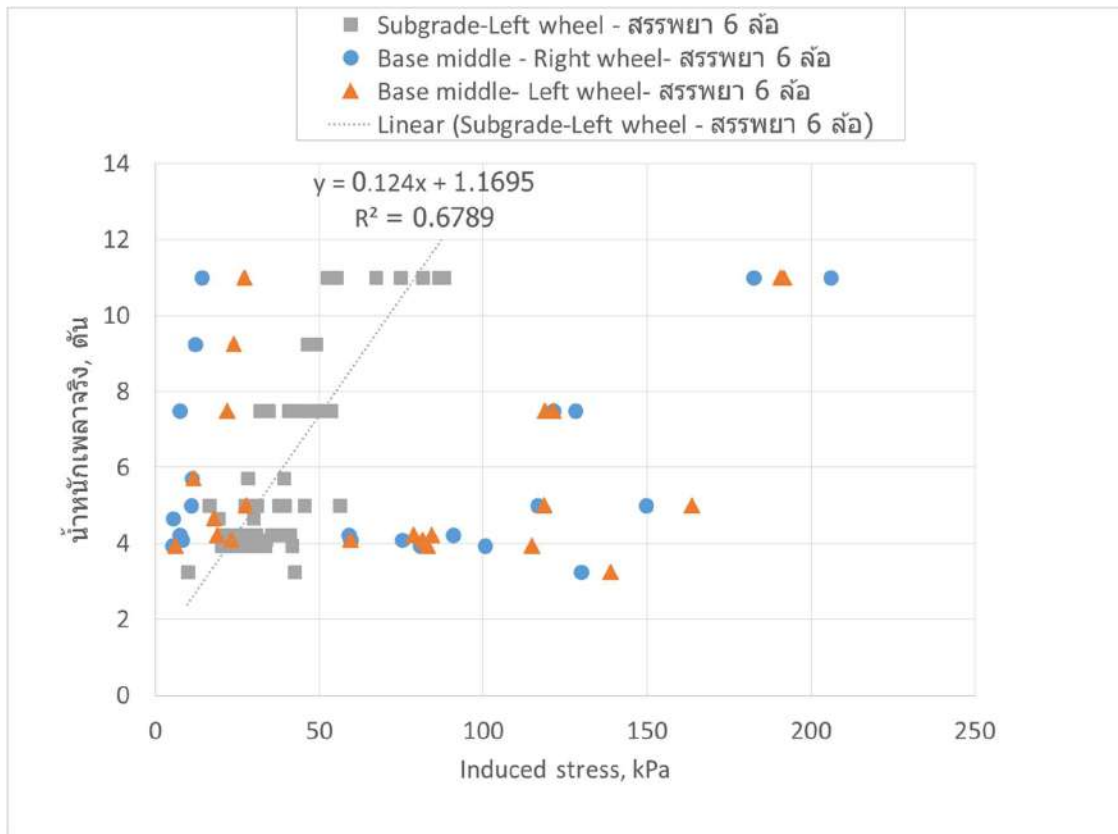
รูปที่ 10.19 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่น้ำหนักเพลาดังกล่าว เปรียบเทียบแปลงทดสอบ 3 แปลง AC (with selected mat)-โพธาราม, Concrete- นครชัยศรี และ AC (without selected mat)-สรรพยา

รูปที่ 10.20 เปรียบเทียบ ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ และรถกึ่งพ่วงแปลงทดสอบที่น้ำหนักเพลาดังกล่าว จาก แปลง AC (ไม่มีชั้นวัสดุคัดเลือก)-สรรพยา จากความสัมพันธ์เห็นได้ว่า ลักษณะของรถบรรทุกไม่มีผลกระทบต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและน้ำหนักเพลามากนัก และข้อมูลของรถบรรทุกทั้งสองชนิดมีแนวโน้มอยู่ในระดับที่น่าพอใจ



รูปที่ 10.20 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่น้ำหนักเพลาดังกล่าว เปรียบเทียบกรณีรถบรรทุก 6 ล้อ และรถกึ่งพ่วงแปลงทดสอบ AC (without selected mat)-สรรพยา

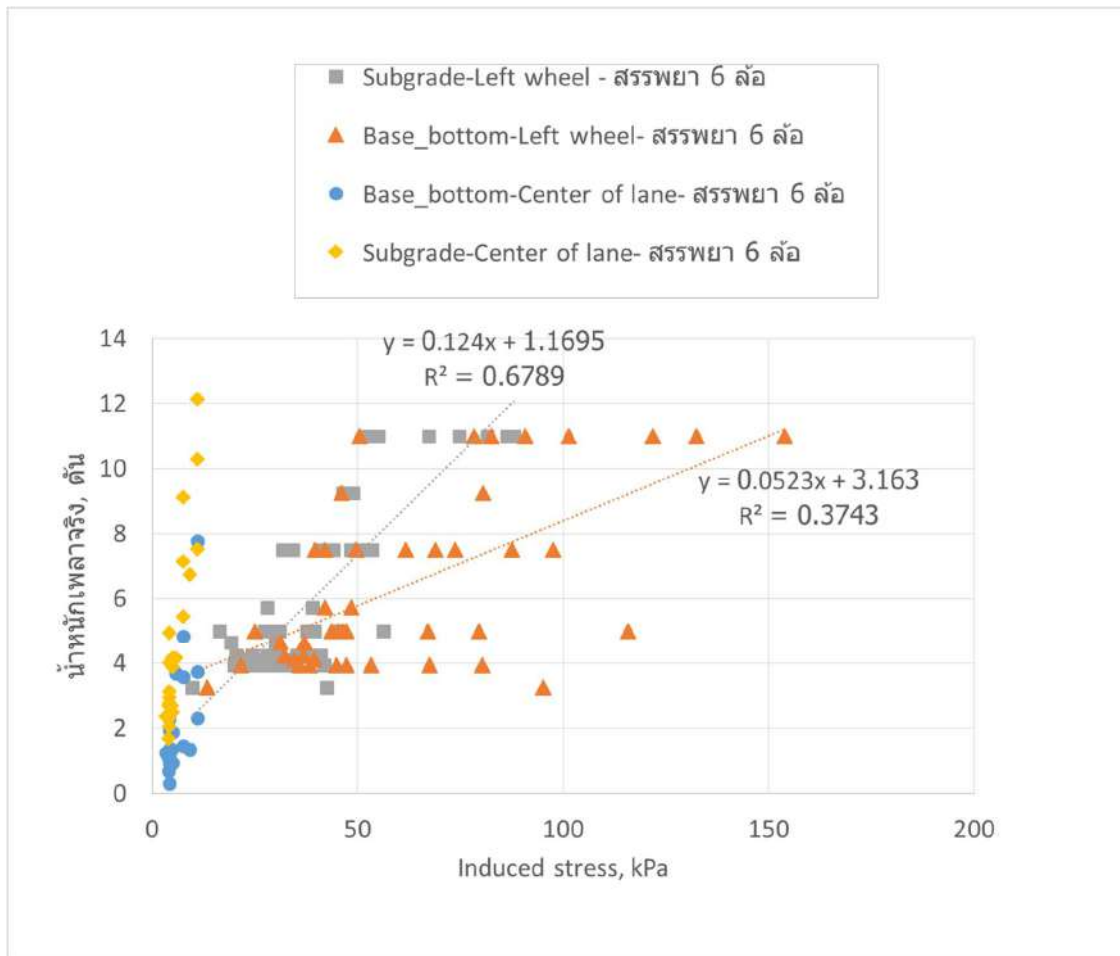
รูปที่ 10.21 เปรียบเทียบ ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-middle ที่น้ำหนักเพลาดังกล่าว กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ จาก แปลงสรรพยา เห็นได้ว่า ความเค้นที่ชั้น Base-middle ไม่มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักบรรทุกลงเพลาดังกล่าวเท่ากับค่าความเค้นที่ชั้น Subgrade ทั้งกรณีได้ล้อซ้ายและได้ล้อขวา ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากในชั้น Base-middle อยู่ใกล้กับผิวทางมากกว่า โอกาสที่ล้อรถบรรทุกจะเหยียบไม่ตรงกับตำแหน่งอุปกรณ์วัดแล้วส่งผลให้แรงกระทำมีความแปรปรวนมากกว่ากรณีหน่วยแรงที่อยู่ลึกลงไปชั้น Subgrade



รูปที่ 10.21 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-middle ที่น้ำหนักเพลาลังต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ

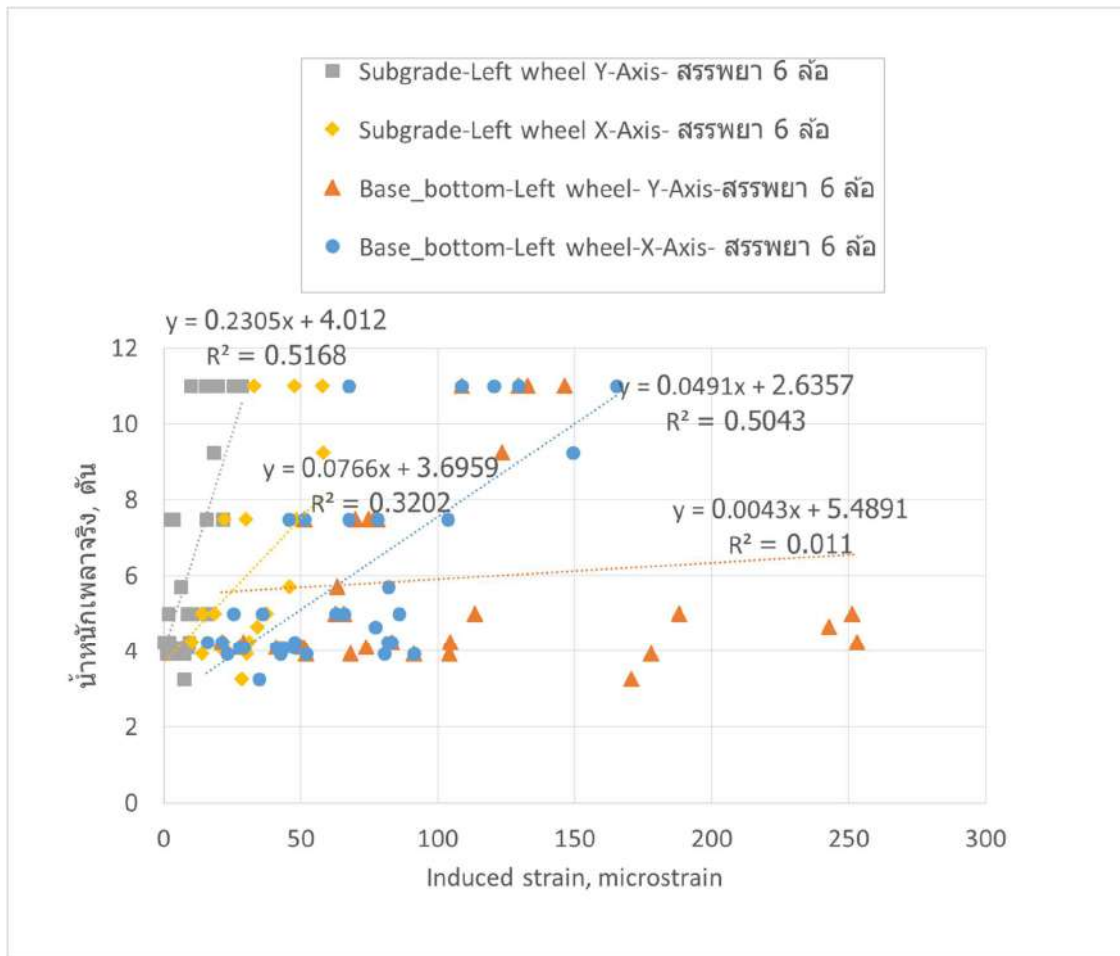
รูปที่ 10.22 เปรียบเทียบ ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ได้ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาลังต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ จาก แปลงสรรพยา เห็นได้ว่า ความเค้นที่ชั้น Base-bottom มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักบรรทุกลงเพลาดีกว่ากรณีชั้น Base-middle เล็กน้อย (รูปที่ 21) และมีการกระจายตัวของข้อมูลมากกว่าความเค้นที่ชั้น Subgrade ทั้งนี้เนื่องจากในชั้น Base-bottom อยู่ห่างจากผิวทางมากกว่าชั้น Base-middle แต่อยู่ใกล้ผิวทางมากกว่าชั้น Subgrade จึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลความเค้นแปรผกผันกับความลึกจากผิวทาง

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



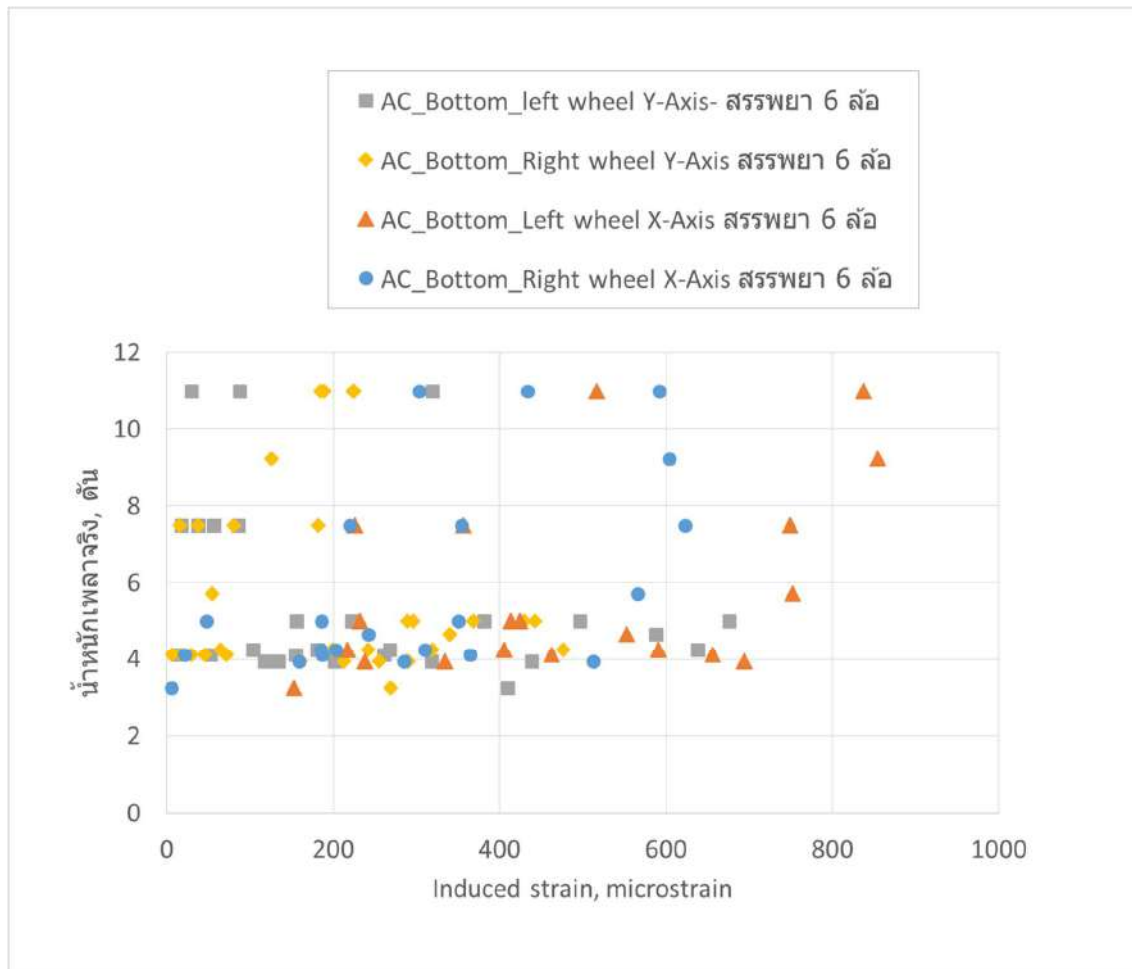
รูปที่ 10.22 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ใต้ล้อซ้ายและกึ่งกลางของจราจร ที่น้ำหนักเพลาลังต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ

รูปที่ 10.23 เปรียบเทียบ ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ใต้ล้อซ้ายในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาลังต่างๆ 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



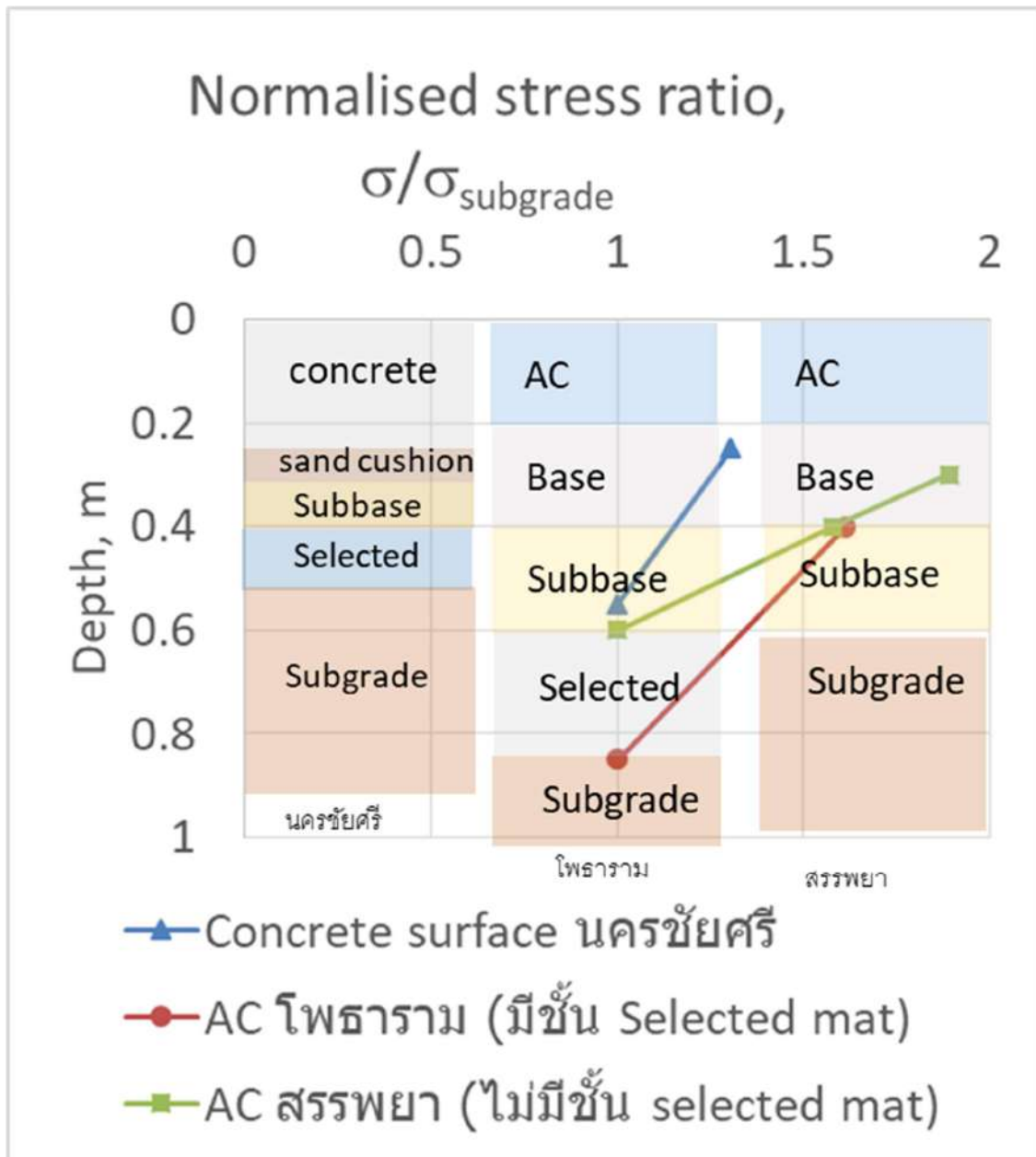
รูปที่ 10.23 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ได้ล้อซ้าย ในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลารองต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ

รูปที่ 10.24 เปรียบเทียบ ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น AC ได้ล้อซ้ายและล้อขวา ในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลารองต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเพลารองและความเครียดในชั้น AC มีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาตำแหน่งของล้อรถบรรทุกไม่ตรงกับตำแหน่งอุปกรณ์วัดที่ตั้งได้กล่าวมา และยังสามารถเกิดจากพฤติกรรมหนืด (Viscosity) ของวัสดุ AC อีกด้วย



รูปที่ 10.24 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น AC ได้ล้อซ้ายและล้อขวา ในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาลต่าง ๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ

รูปที่ 10.25 แสดงค่าความอัตราส่วนความเค้นเปรียบเทียบกับความเค้นที่เหนือชั้น Subgrade ตามความลึก ทั้งสามแปลงทดสอบ ซึ่งมีลักษณะชั้นทางแตกต่างกัน ได้แก่ แปลงสรรพยา (ผิวทาง AC ไม่มีชั้นวัสดุคัดเลือก) แปลงโพธาราม (ผิวทาง AC มีวัสดุคัดเลือก) และแปลงนครชัยศรี (ผิวทางคอนกรีต) พบว่าความชันหรืออัตราการลดทอนความเค้นในชั้นทางแต่ละแบบมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้พบว่าอัตราการลดลงของหน่วยแรงมีค่ามากที่สุดในการณ์แปลงสรรพยา ซึ่งบ่งชี้ว่าวัสดุชั้นทางในแปลงสรรพยามีความแข็งแรงมากกว่า 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 10.25 ค่าความอัตราส่วนความเค้นเปรียบเทียบกับความเค้นที่เหนือชั้น Subgrade เทียบตามความลึก แปลงสรรพยา (ผิวทาง AC ไม่มีชั้นวัสดุคัดเลือก) แปลงโพนาราม (ผิวทาง AC มีวัสดุคัดเลือก) และแปลงนครชัยศรี (ผิวทางคอนกรีต)

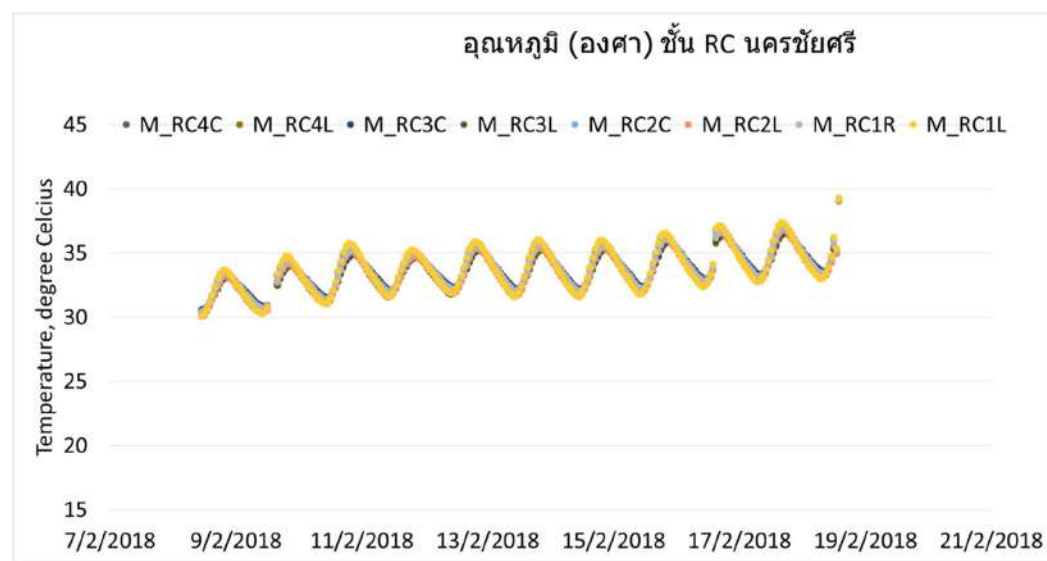
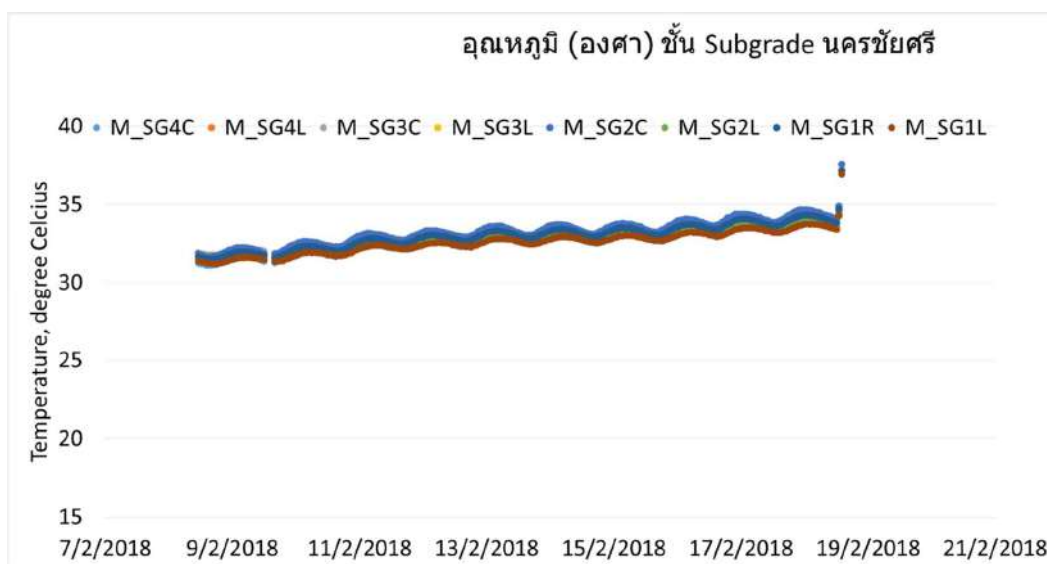
10.3 ความชื้นและอุณหภูมิ

รูปที่ 10.26 ถึง รูปที่ 10.31 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิในวัสดุชั้นทางต่างๆ จากทั้งสามแปลงทดสอบ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีความคล้ายคลึงกัน นั่นคืออุณหภูมิในชั้นทรายใต้แผ่นพื้นคอนกรีต (รูปที่ 10.26ข) มีความแปรปรวนในช่วง 30-39 องศาเซลเซียสมากกว่า อุณหภูมิบริเวณ Subgrade ซึ่งอยู่ในช่วง 31-34 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไปตามหลักการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

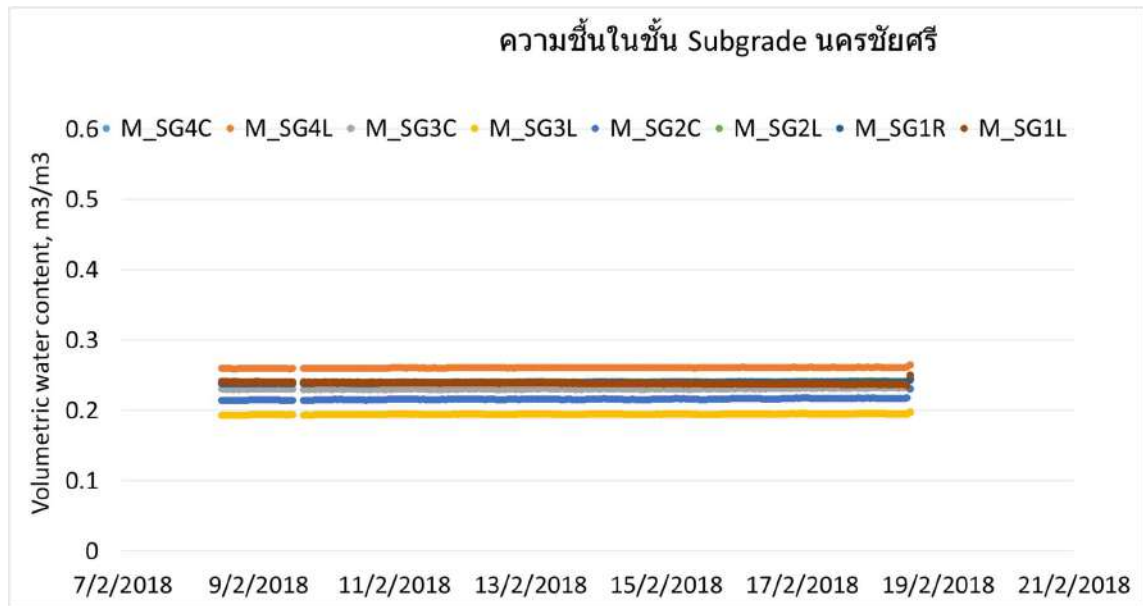
รูปที่ 10.28 แสดงอุณหภูมิในชั้น Subgrade ในถนนลาดยาง (โพนาราม) มีค่าในช่วง 30-38 องศา โดยมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนเมษายน สำหรับอุณหภูมิที่กลางชั้น Base มีค่าในช่วง 25-42 องศา ซึ่งแสดงถึงความ

แปรปรวนที่มากกว่าตามหลักการถ่ายเทความร้อนเช่นกัน รูปที่ 10.30 แสดงอุณหภูมิในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base ในถนนลาดยาง (สรรพยา) ซึ่งชั้น Subgrade อยู่ใกล้ผิวทางมากกว่า (เนื่องจากแปลงสรรพยาไม่มีชั้นวัสดุคั่นเลือก) ซึ่งส่งผลให้ค่าอุณหภูมิในชั้น Subgrade มีค่าสูงกว่าในช่วง 36 ถึง 44 องศา ส่วนอุณหภูมิในชั้น Base มีค่าในช่วง 35 ถึง 46 องศาซึ่งสูงกว่าแปลงโพธารามเช่นกัน

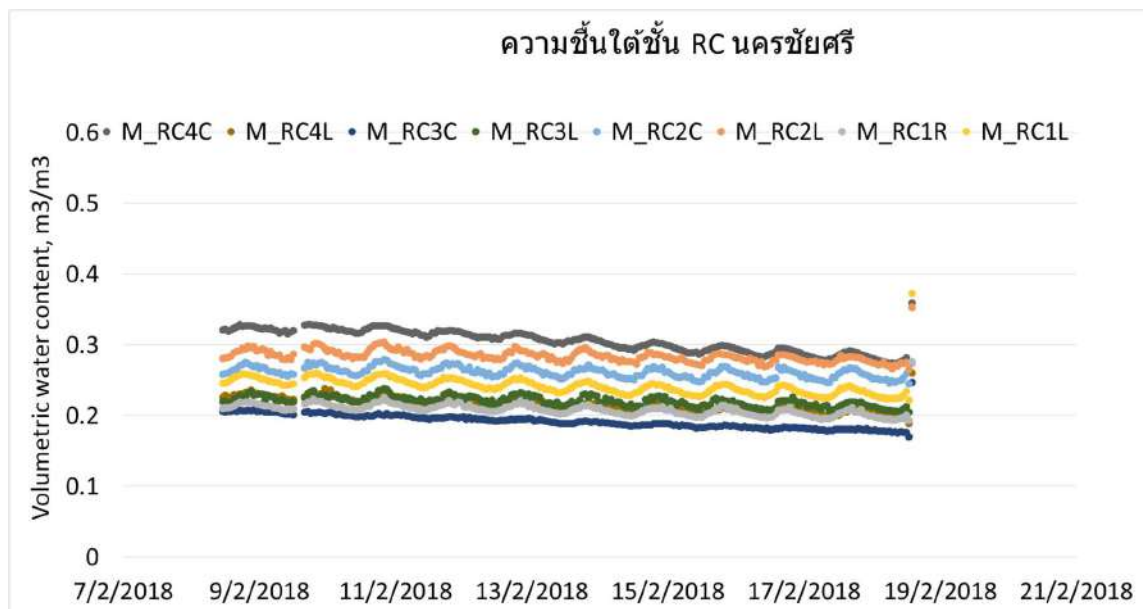
ลักษณะความชื้นในแปลงทดสอบทั้ง 3 แปลงมีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่าง ถนนลาดยางและถนนคอนกรีต สำหรับถนนคอนกรีตใน รูปที่ 10.27 ความชื้นในชั้นทรายใต้แผ่นพื้นคอนกรีตมีความแปรปรวนมากกว่า ความชื้นบริเวณ Subgrade ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต Sargand et al. (2006) แต่สำหรับกรณีถนนลาดยาง ในรูปที่ 10.29 และ รูปที่ 10.31 พบว่าความชื้นบริเวณ Subgrade มีความแปรปรวนและตอบสนองต่อภูมิอากาศมากกว่าความชื้นในชั้น Base เนื่องจากผิวทางแบบ AC มีความทึบน้ำสูง ความชื้นจึงเปลี่ยนแปลงในลักษณะล่างขึ้นบน



รูปที่ 10.26 อุณหภูมิในชั้น Subgrade และใต้ชั้น RC แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)

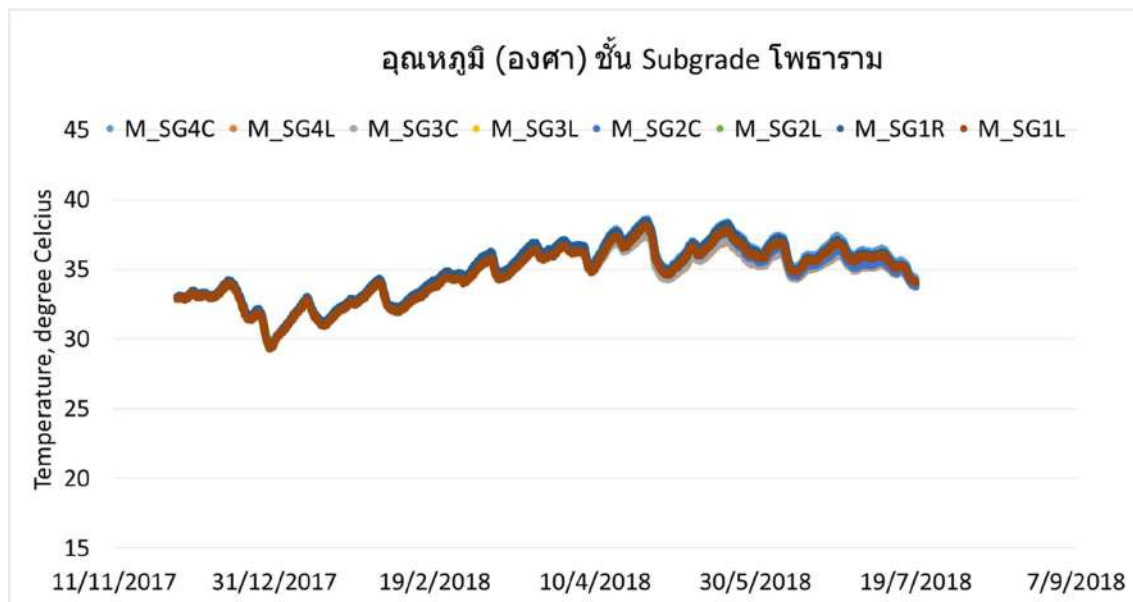


ก

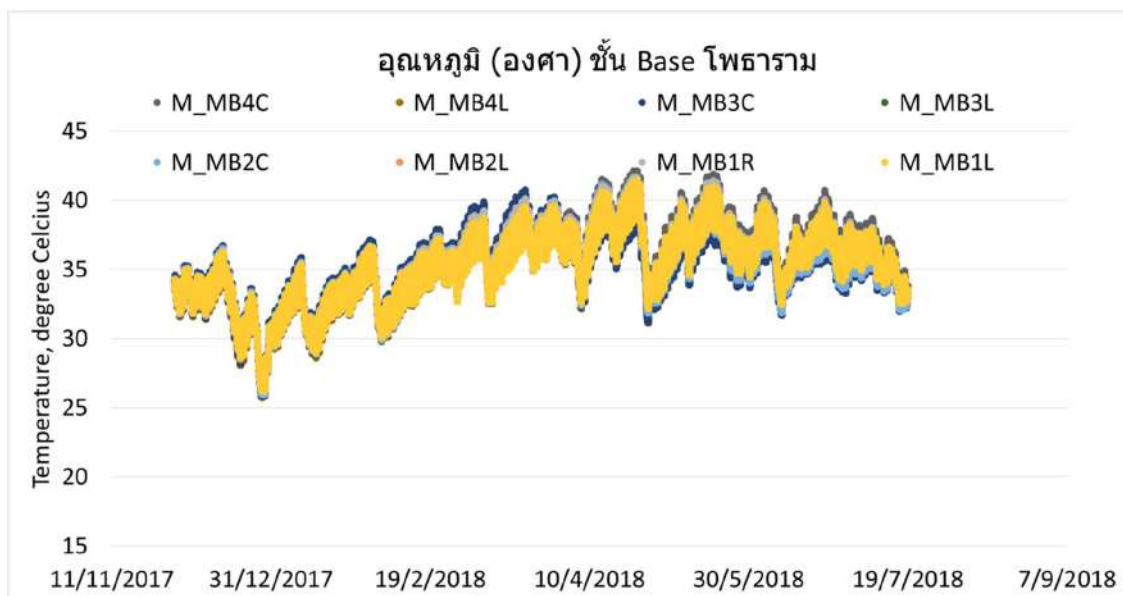


ข

รูปที่ 10.27 ความชื้นในชั้น Subgrade และใต้ชั้น RC แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)

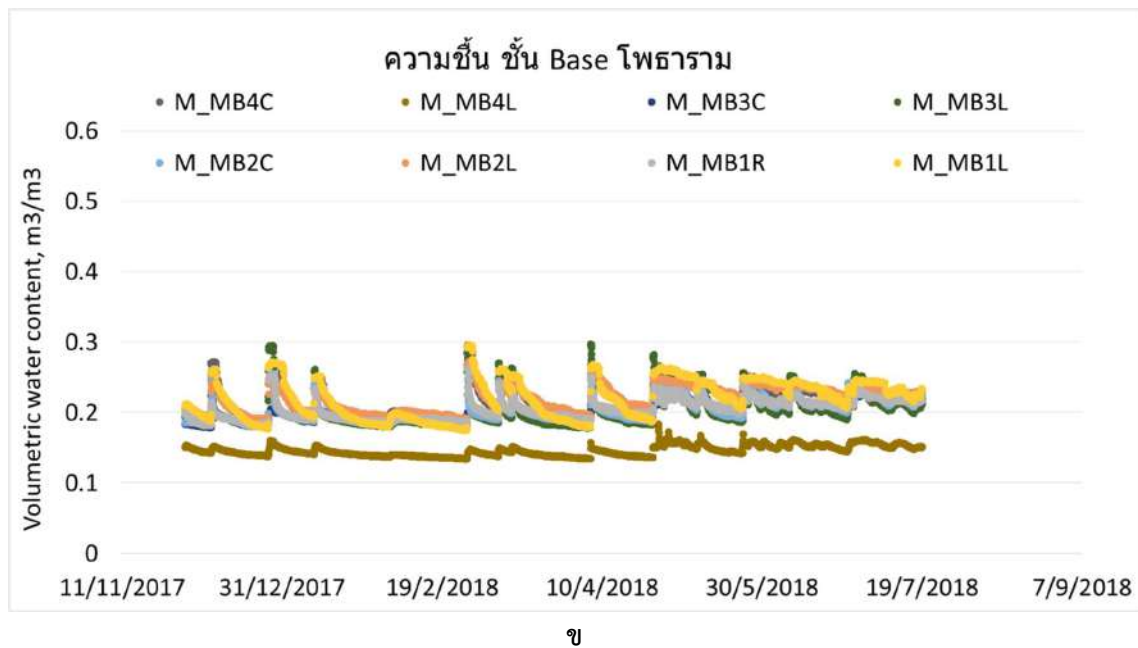
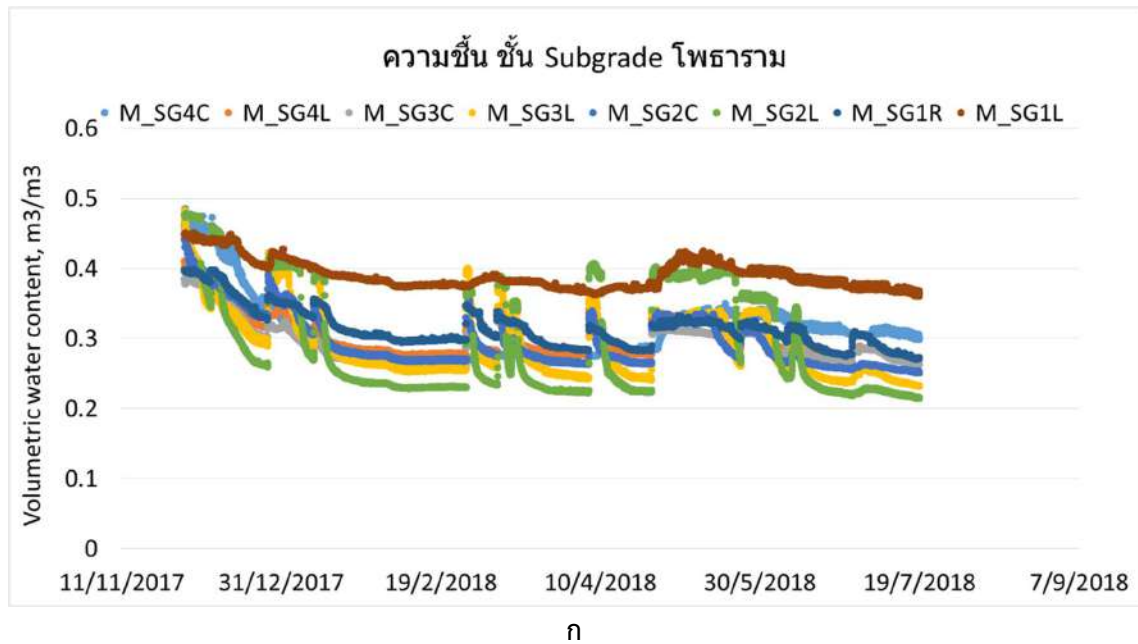


ก

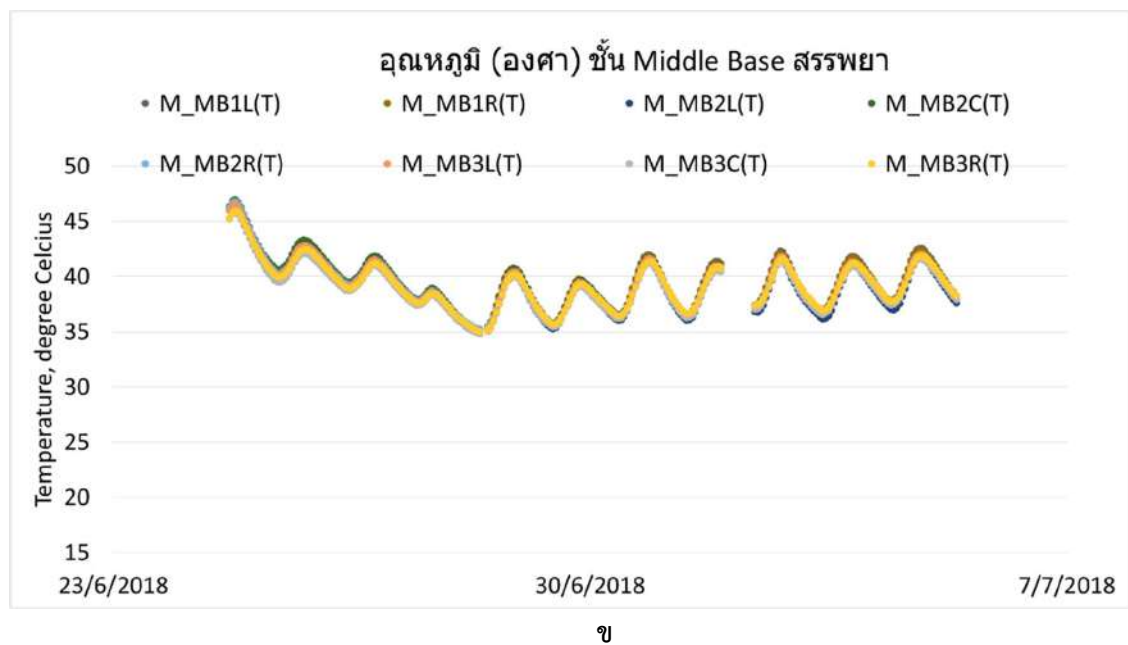
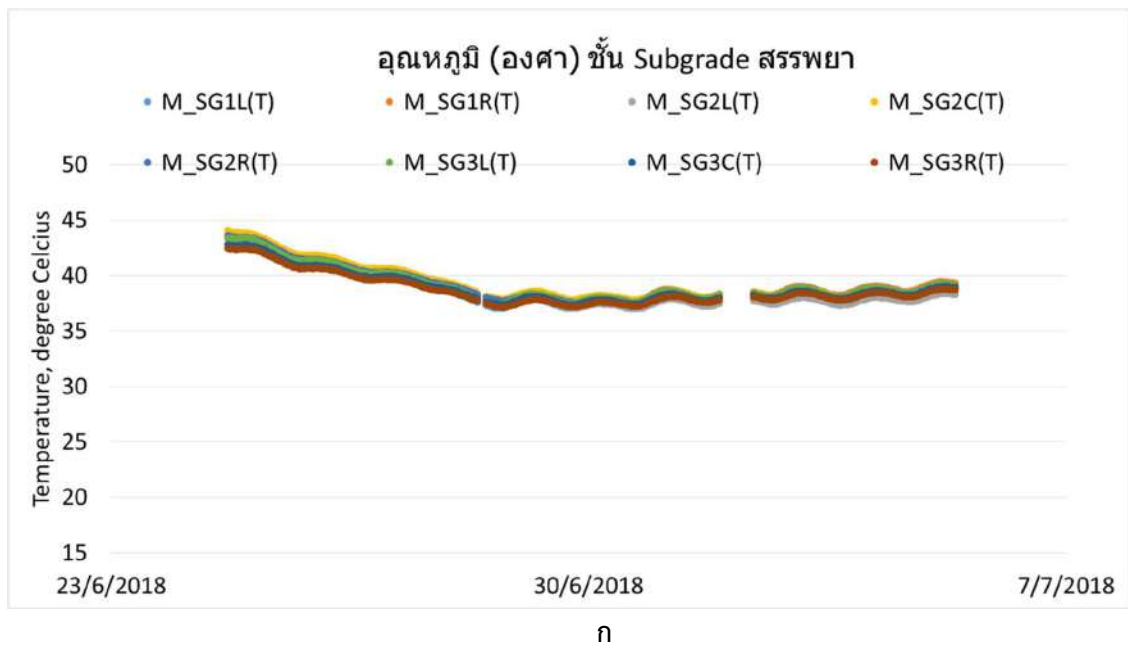


ข

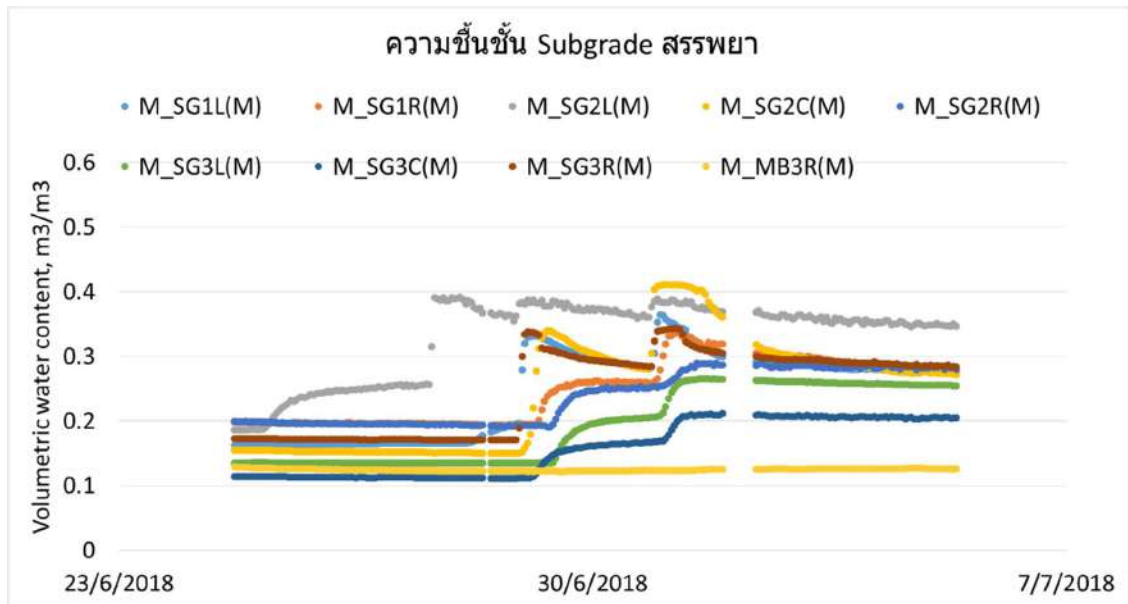
รูปที่ 10.28 อุณหภูมิในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (โพธาราม)



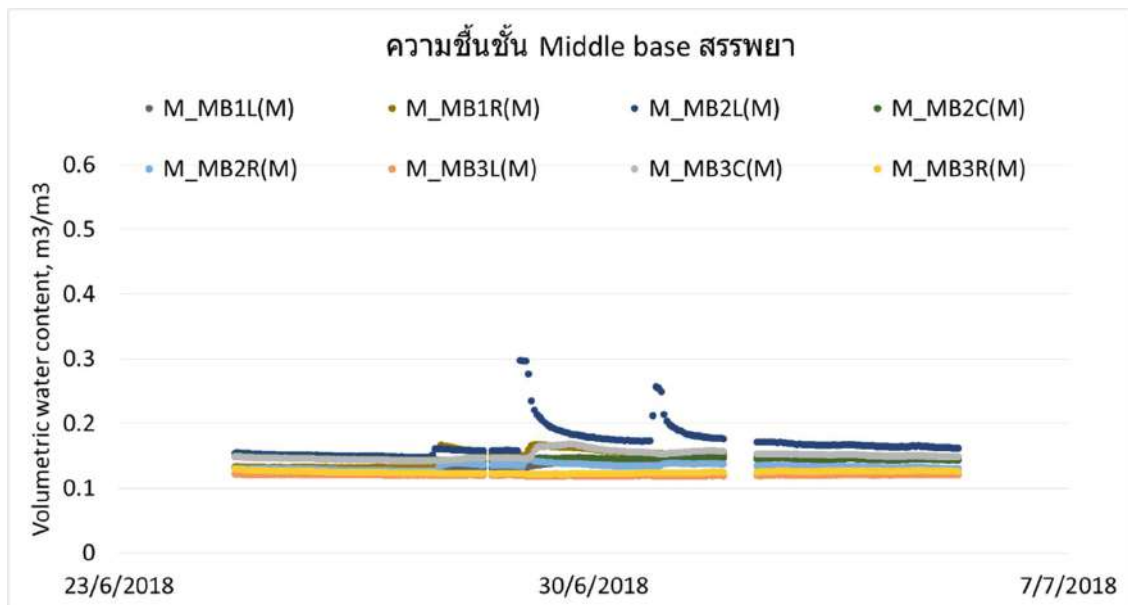
รูปที่ 10.29 ความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แผลงถนน AC (โพธาราม)



รูปที่ 10.30 อุดหนุนในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (สรรพยา)

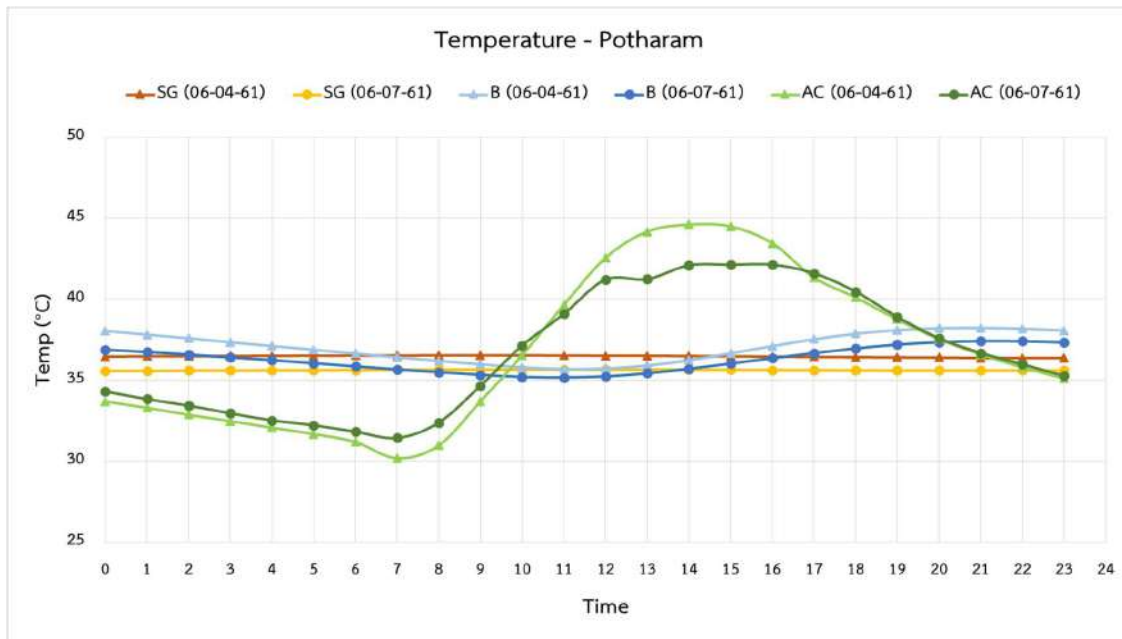


ก

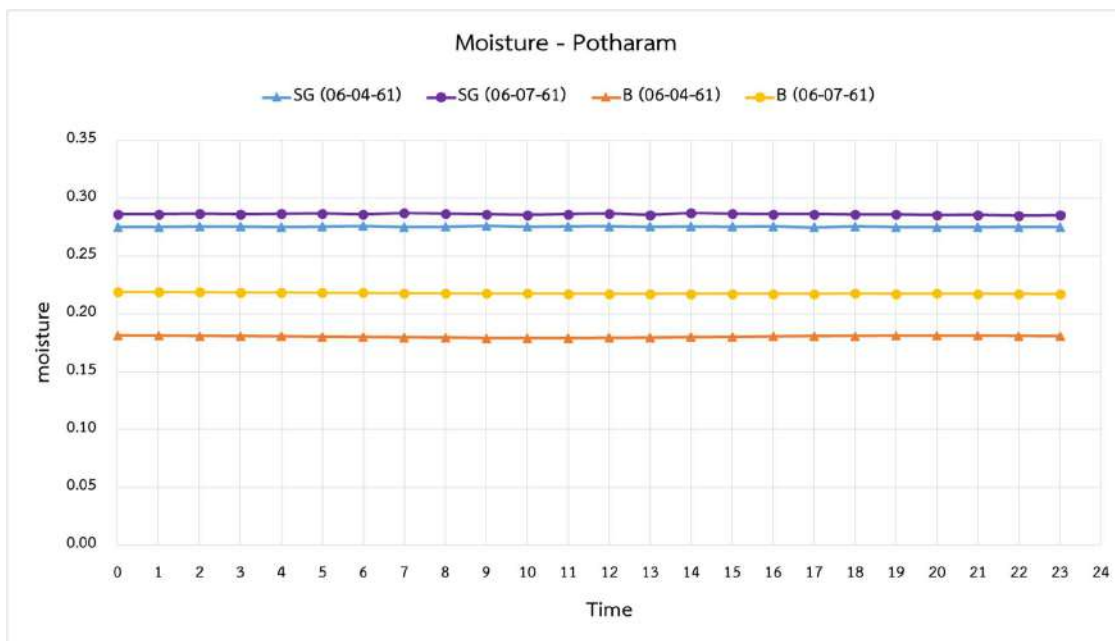


ข

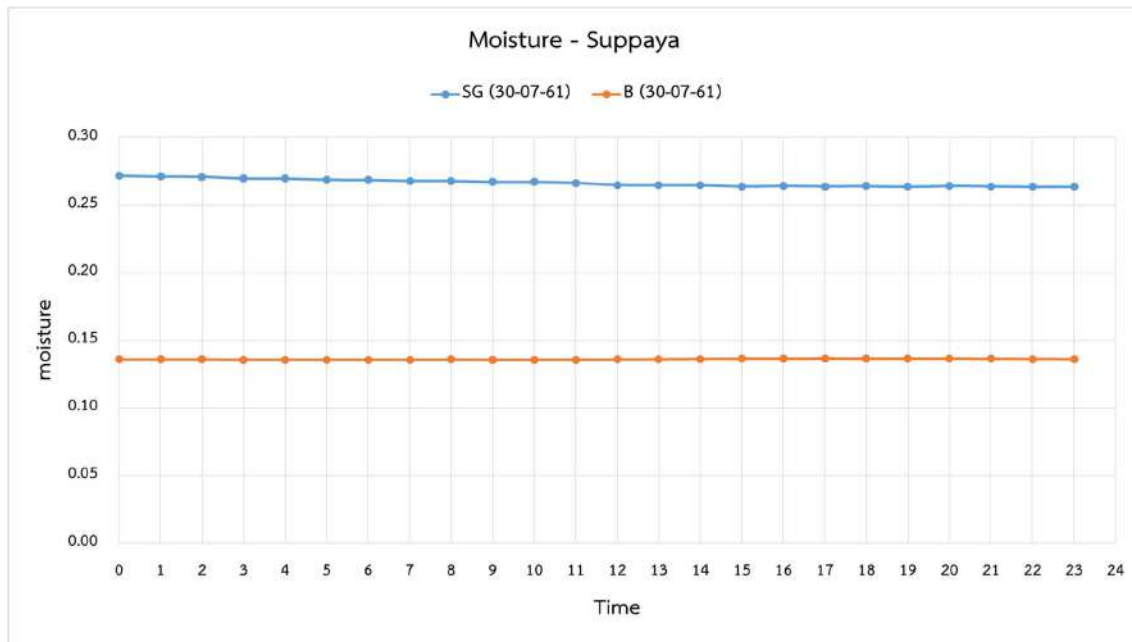
รูปที่ 10.31 ความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (สรรพยา)



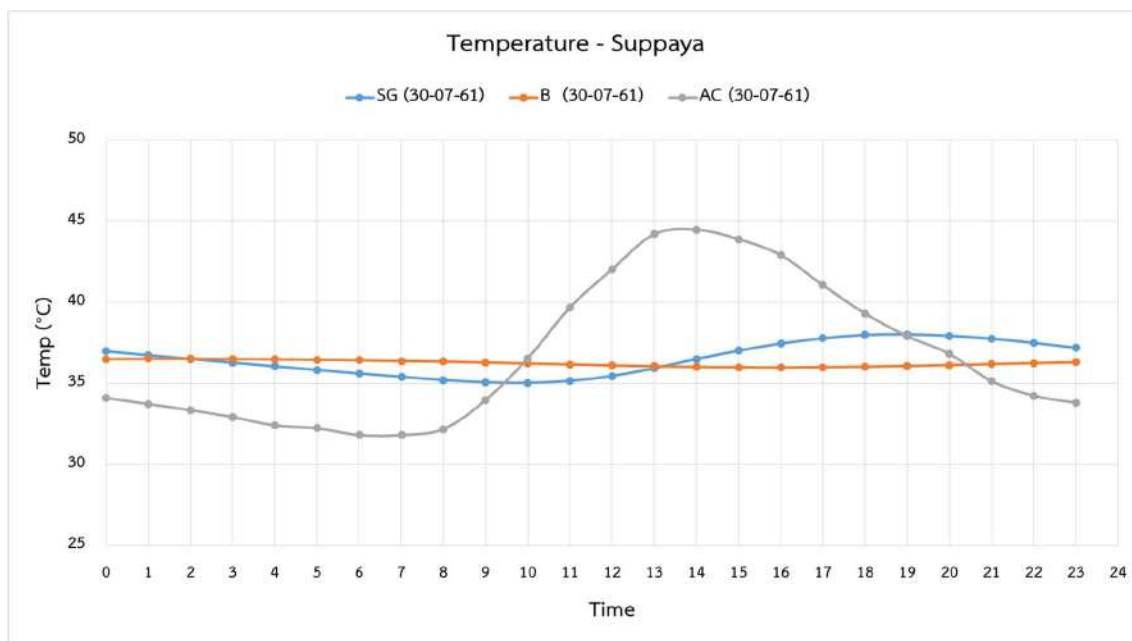
รูปที่ 10.32 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (โพธาราม)



รูปที่ 10.33 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (โพธาราม)



รูปที่ 10.34 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (สรพพยา)



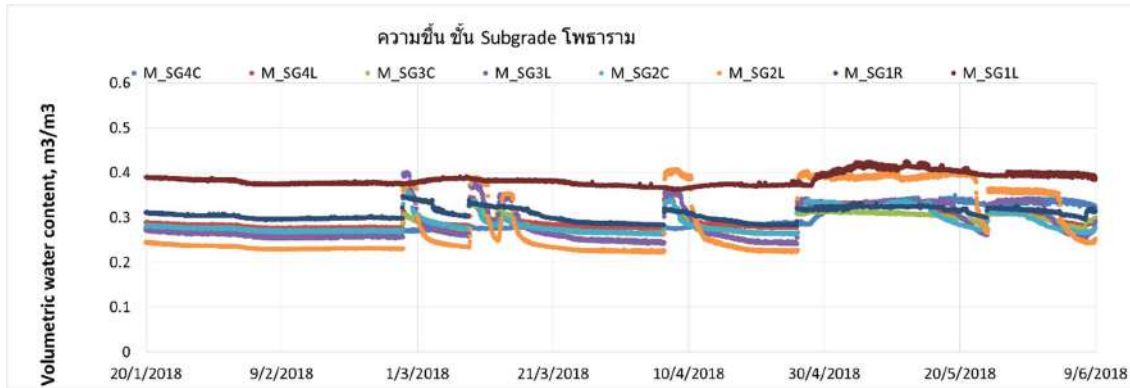
รูปที่ 10.35 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (สรพพยา)

10.4 ความชื้นและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของถนน

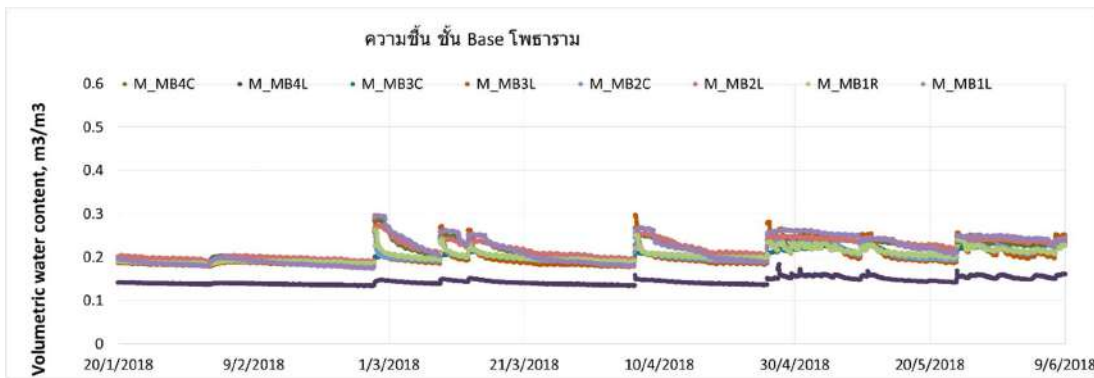
จากข้อมูลความชื้นที่วัดได้ในวัสดุชั้นทาง แปลงโพธาราม ดังแสดงในรูปที่ 10.33 สามารถนำมาเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการรับน้ำหนักของรถบรรทุก หรือค่า ความชื้นระหว่าง ESAL/Strain ดังแสดงในรูปที่ 10.36ก โดยเมื่อ ค่า ESAL/Strain มีค่าต่ำ จะบ่งชี้ว่าวัสดุชั้นทางเริ่มมีการเสื่อมสภาพ เพราะ ESAL เปรียบเสมือนน้ำหนักกระทำ ดังนั้น ESAL/Strain ก็เปรียบได้กับค่า Modulus ของวัสดุนั้นเอง จากรูปที่ 10.36ก จะเห็นได้ว่าวัสดุชั้น AC และ Base มีแนวโน้มค่า ESAL/Strain ขึ้นลงแต่ก็มีค่าค่อนข้างคงที่ แต่วัสดุ

ชั้น Subbase และ Selected material พบว่ามีแนวโน้มค่า ESAL/Strain ลดลงตามเวลา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นก็จะพบว่าความชื้นในวัสดุ Subgrade และ ชั้น Base ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยอัตราการลดลงของค่า ESAL/Strain จะมีค่าลดลงมากในหลังเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มมีฝนตกชุกนั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุ Subbase และ Selected material จะมีวัสดุขนาดเม็ดละเอียดมากกว่าจะมีความอ่อนไหวต่อความชื้นมากกว่าวัสดุเม็ดหยาบ ในชั้น Base และวัสดุผิวทาง AC

ก



ข



ค

รูปที่ 10.36 อัตราส่วน ESAL/Strain และความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base ที่ช่วงเวลาต่างๆ แปลงถนน AC (โพธาราม)

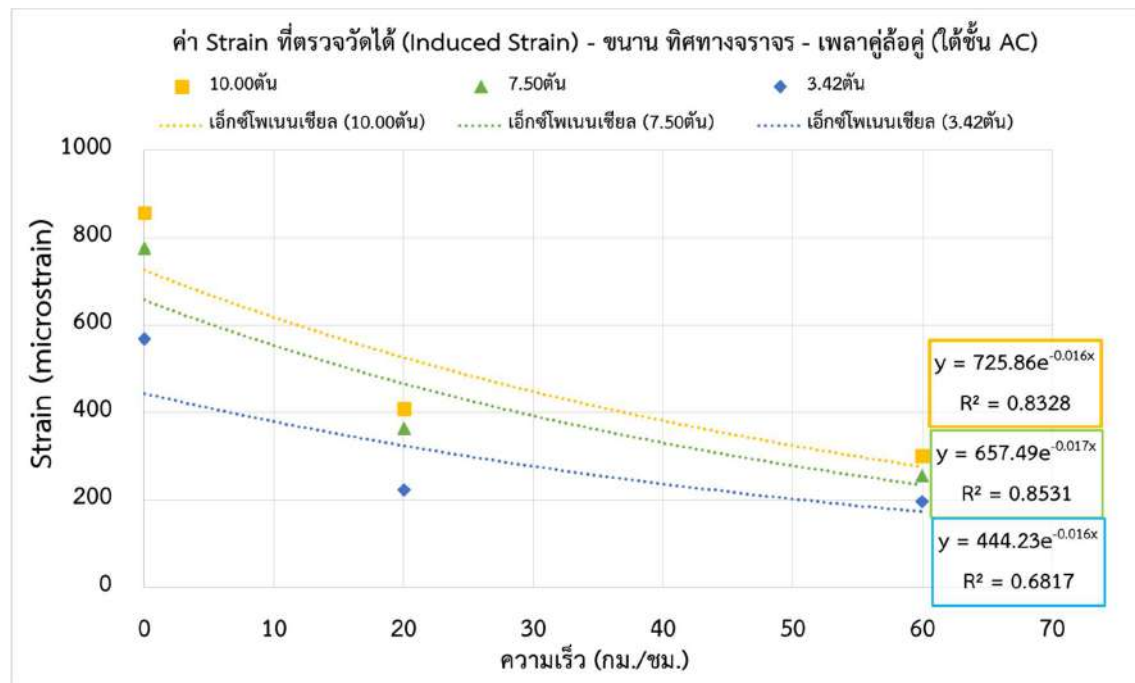
จากผลการวิเคราะห์ผลการทดสอบในเบื้องต้นพบว่า แนวโน้มการตอบสนองของวัสดุทางในด้านความเค้นและความเครียด มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ผ่านมาในแปลงโพธาราม แต่อย่างไรก็ดีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในตำแหน่งต่างๆ และความสัมพันธ์กับความเร็วรถบรรทุกมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง เนื่องจากลักษณะชั้นทางที่มีความแตกต่างกัน และยังพบว่ามีปัญหาเรื่องความแม่นยำในตำแหน่งของลอธรถบรรทุกและอุปกรณ์ Strain Gage ซึ่งมีขนาดเล็ก โดยเฉพาะในกรณีที่รบกวนด้วยความเร็วสูงอาจทำให้การวัดคลาดเคลื่อน และลักษณะการเกิด Strain เมื่อตำแหน่งอุปกรณ์อยู่ระหว่างสองเพลลา ซึ่งมีลักษณะซับซ้อนทำให้ค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น (Induced strain) ที่วัดได้มีการกระจายตัวมากกว่าค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้น (Induced stress) อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์นั้นแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ทุกตัวที่ได้ติดตั้งสามารถ

วัดได้อย่างถูกต้อง 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

10.5 ความเร็วและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของถนน

จากผลการทดสอบรถบรรทุกทั้งพุ่งโดยเปลี่ยนแปลงความเร็ว 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 10.37 ทำให้อำนาจการทำลายสูงขึ้น ดังนั้นในพื้นที่ที่รถบรรทุกหนักต้องจอดหรือวิ่งช้า เช่น บริเวณทางแยกจะทำให้ถนนเสียหายเร็วขึ้น จึงไม่ควรออกแบบเป็นผิวทาง AC



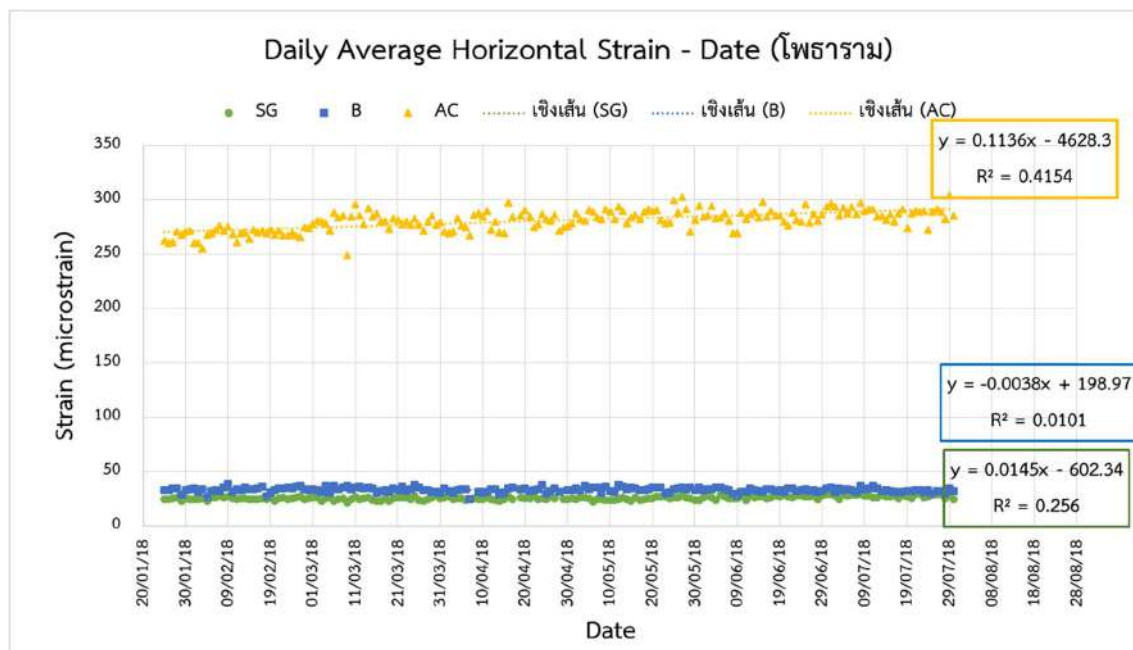
รูปที่ 10.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถบรรทุกกับ Strain แนวราบ ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

10.6 แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

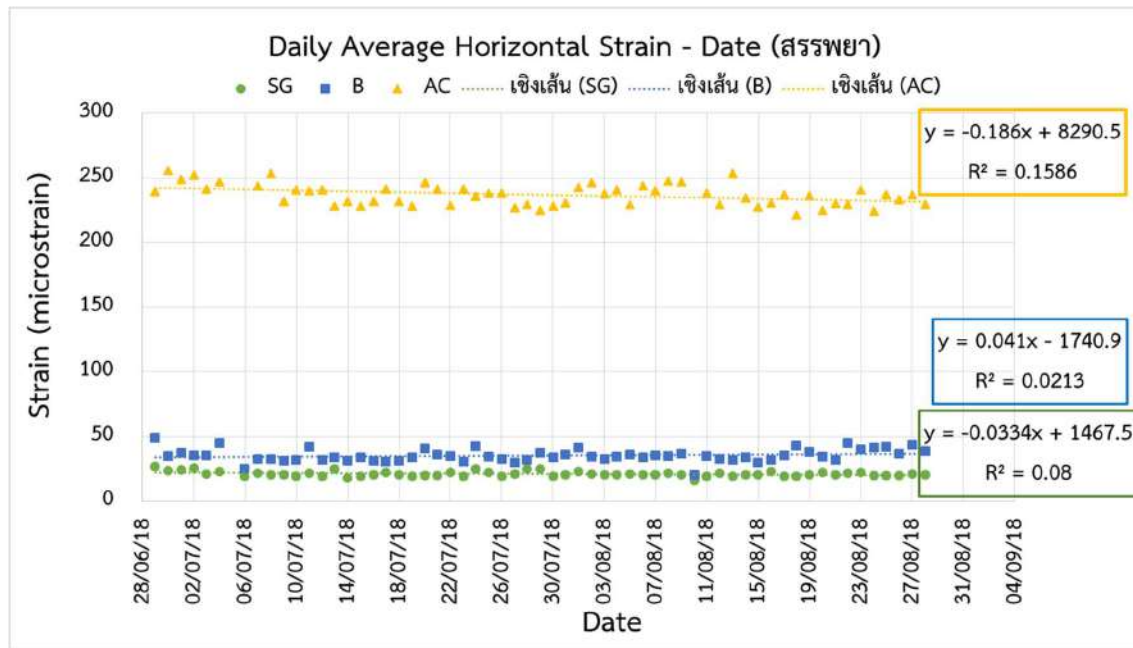
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับปรุงแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี ซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จในระยะที่หนึ่ง และ อ.สรรพยา จ.ชัยนาท ที่ได้ติดตั้งเพิ่มเติมอีก 1 แปลงในระยะที่สอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Strain) กับระยะเวลาและปริมาณจราจรสะสม

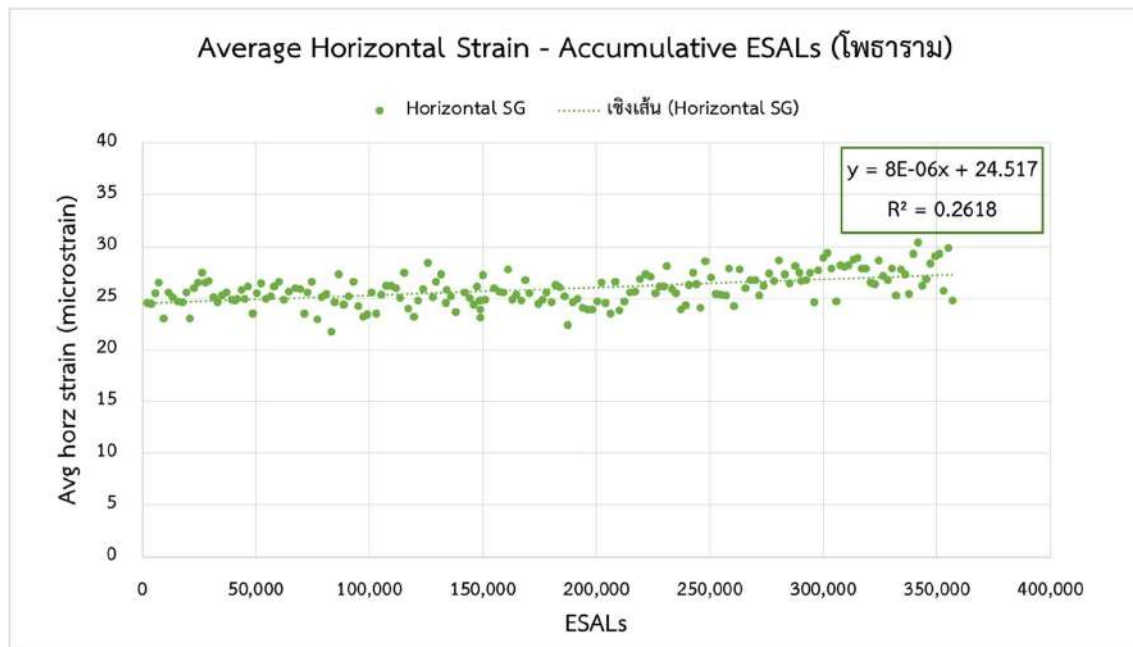
คณะผู้วิจัยได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Strain) กับระยะเวลาและปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ในชั้นโครงสร้างต่างๆของถนนลาดยางดังแสดงใน รูปที่ 10.38 ถึง รูปที่ 10.47



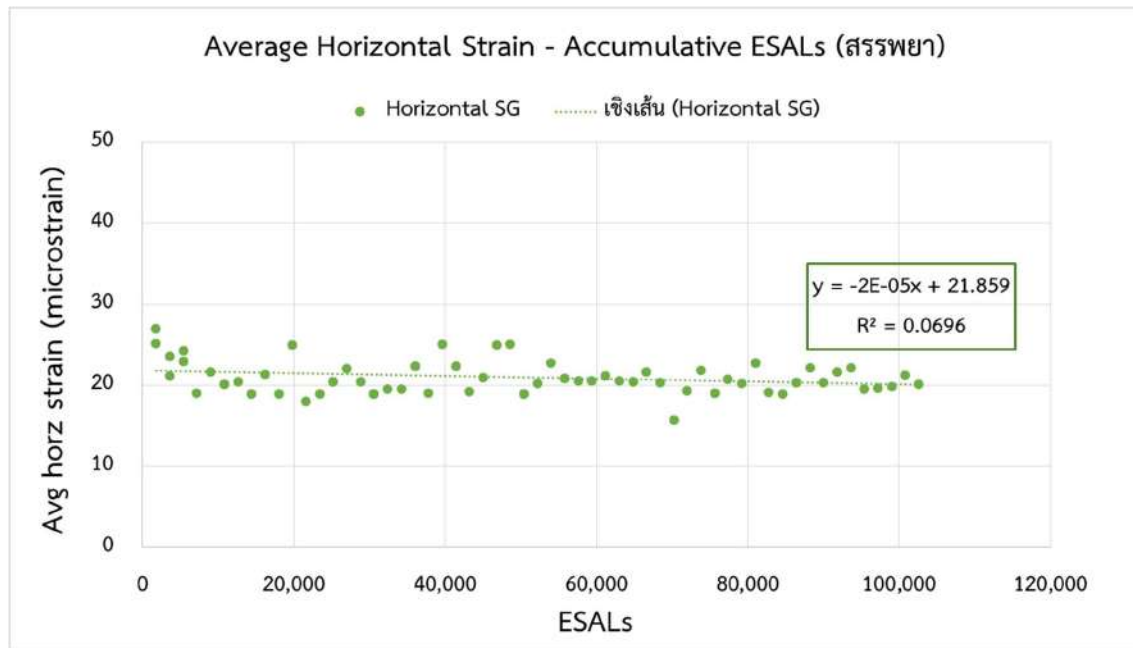
รูปที่ 10.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับระยะเวลาของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



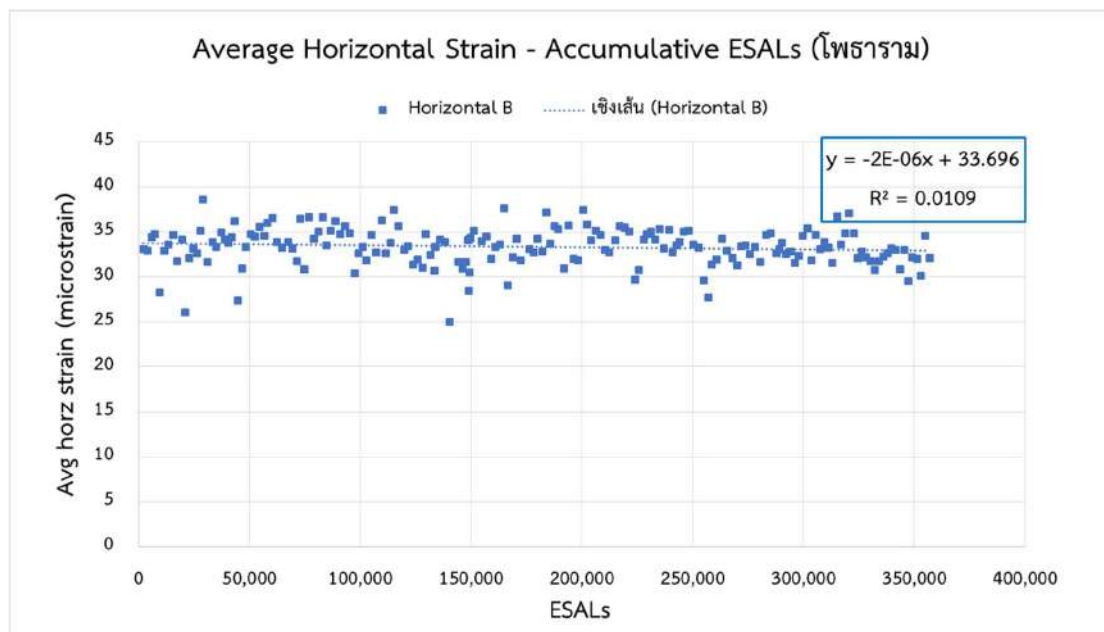
รูปที่ 10.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ได้ผิวทาง AC, Base และ
 เหนือชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



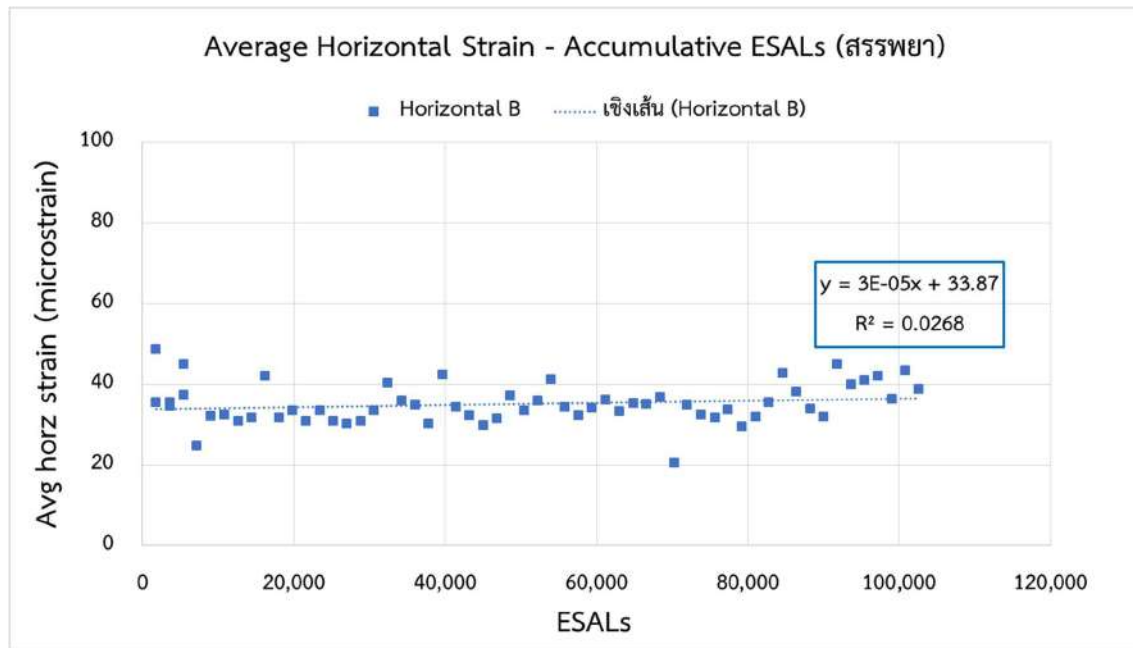
รูปที่ 10.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น
 Subgrade ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



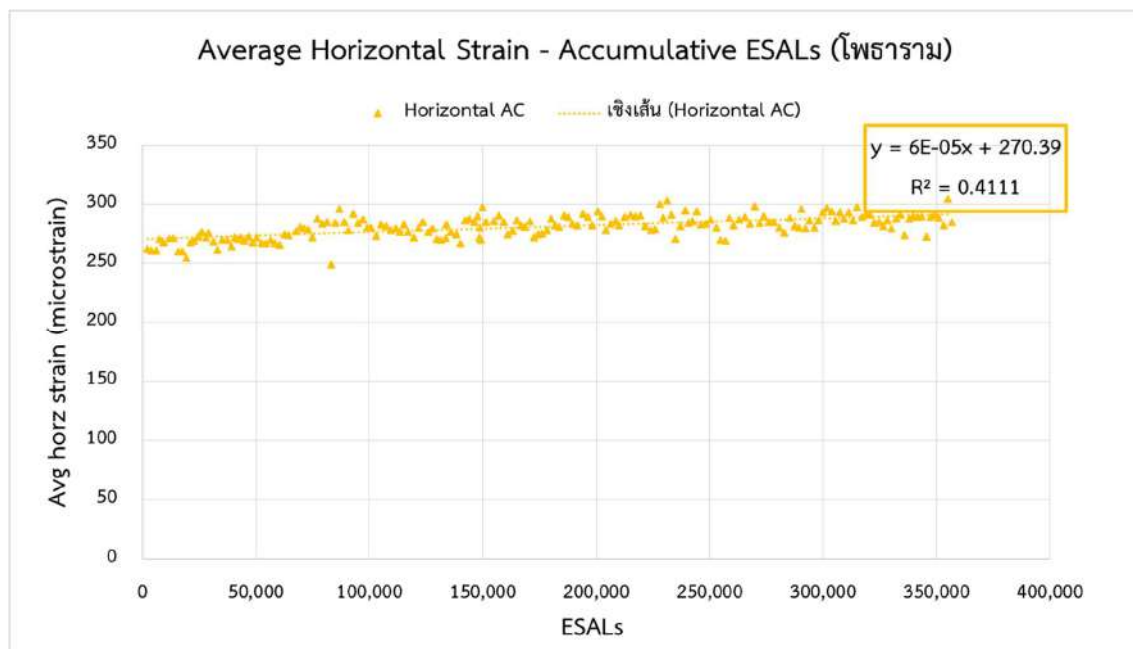
รูปที่ 10.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น
Subgrade ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท



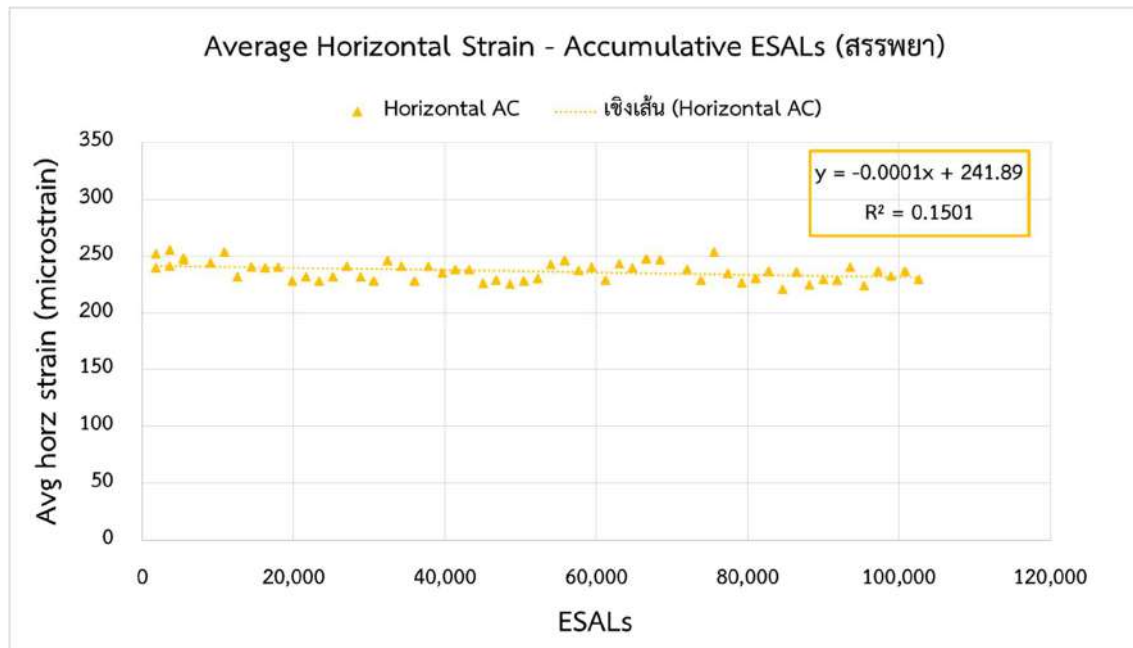
รูปที่ 10.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Base ของถนนลาดยาง อ.
โพธาราม จ.ราชบุรี



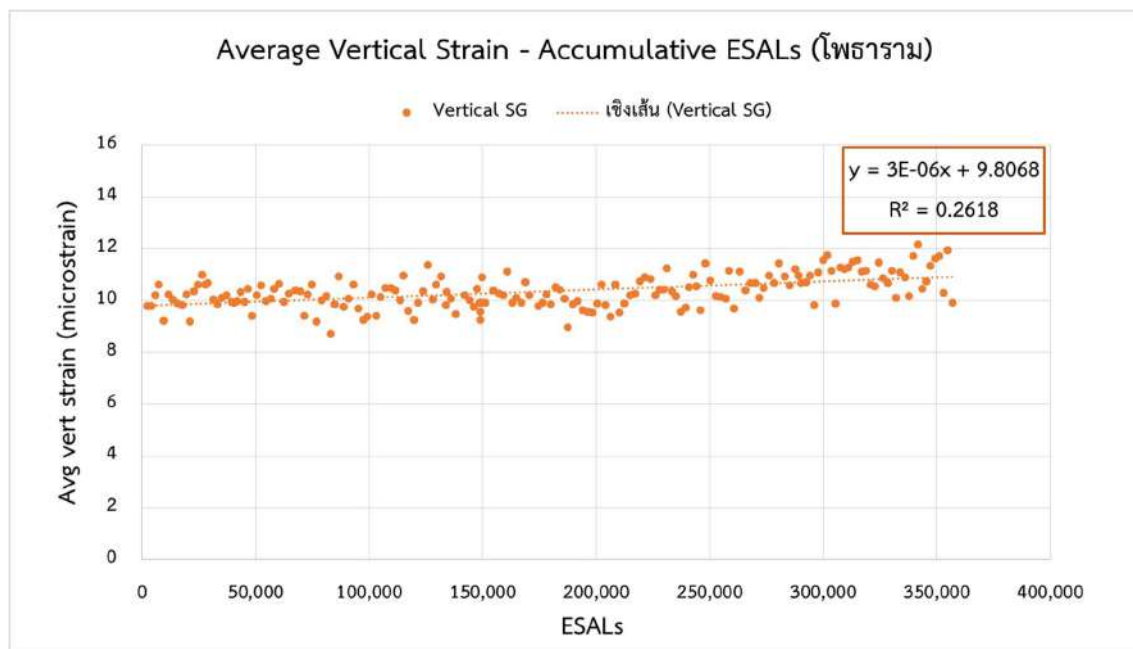
รูปที่ 10.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Base ของถนนลาดยาง อ. สรรพยา จ.ชัยนาท



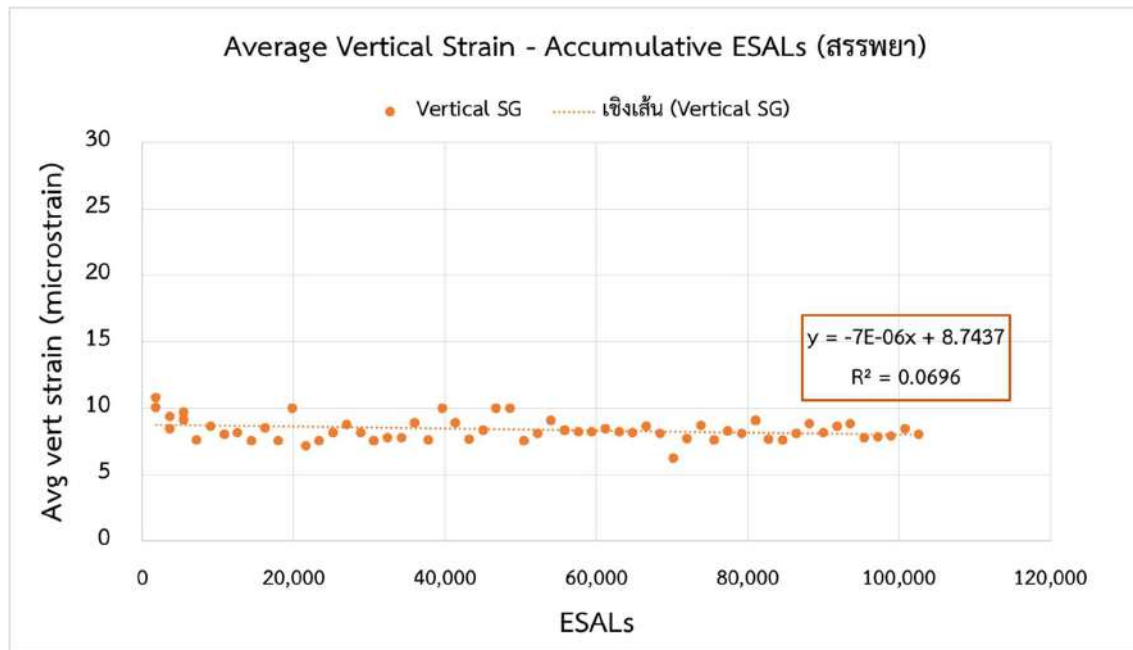
รูปที่ 10.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



รูปที่ 10.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น AC ของถนนลาดยาง
อ.สรรพยา จ.ชัยนาท



รูปที่ 10.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวตั้ง กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของ
ถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



รูปที่ 10.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวตั้ง กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.สรพพยา จ.ชัยนาท

- แบบจำลองความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้า (Fatigue Failure Model)

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

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

เมื่อ N_f คือ จำนวนรอบของแรงกระทำต่อโครงสร้างที่ยอมให้ก่อนจะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue Cracking)

ε_t คือ Horizontal Tensile Strain ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

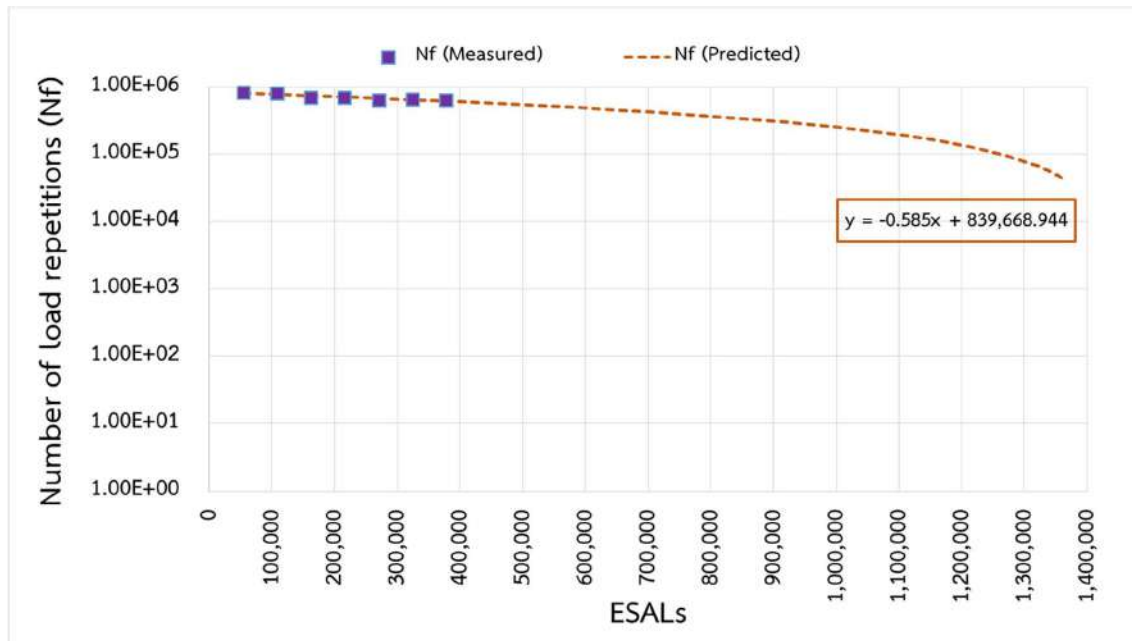
E_1 คือ ค่าโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

f_1, f_2, f_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการความสัมพันธ์

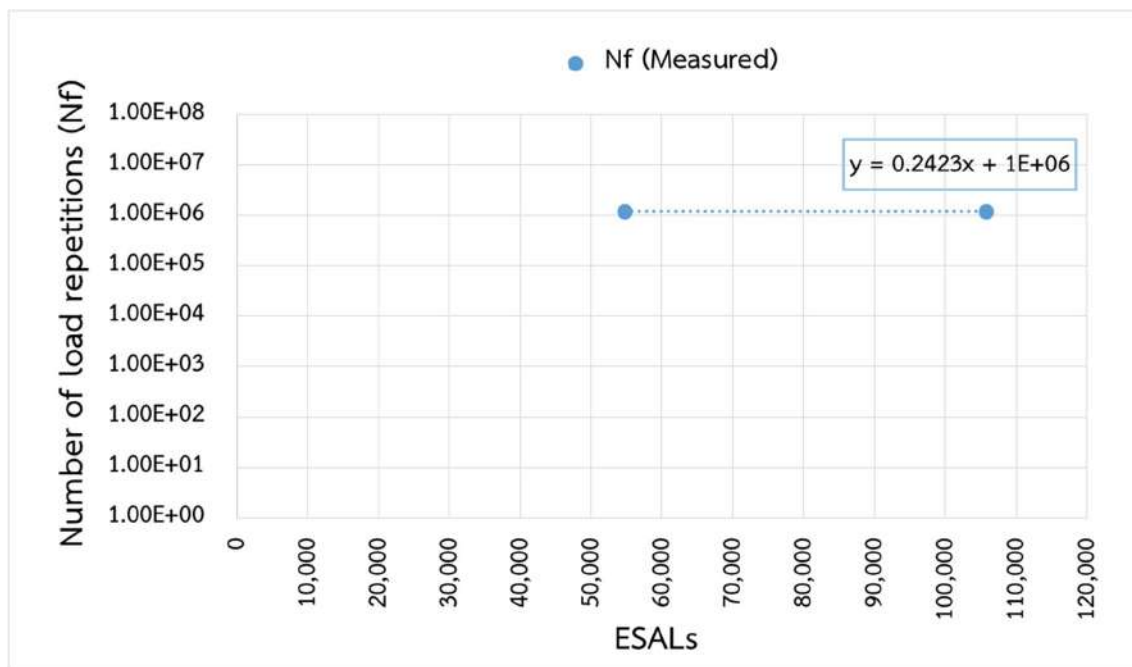
โดยสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป AI ได้กำหนดให้ใช้สมการดังต่อไปนี้

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

โดยค่า N_f จะลดลงเมื่อค่า Tensile Strain ที่เกิดขึ้นซ้ำๆ ใต้ผิวทางลาดยางสูงขึ้น ซึ่งสามารถใช้ค่าเฉลี่ยรายเดือนของ Tensile Strain ที่ได้จากการตรวจวัดใต้ผิวทางลาดยางมาใช้ในการทำนายอายุบริการคงเหลือของถนนลาดยาง โดยค่า N_f ยิ่งน้อย หมายถึงอายุบริการ (หรือจำนวนเที่ยวของน้ำหนักระทำการที่รับได้) ของถนนลาดยางยิ่งเหลือน้อยลง โดยถนนลาดยางจะชำรุดเสียหายเนื่องจากความล้าเมื่อค่า N_f ใกล้ศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 10.48 และ รูปที่ 10.49



รูปที่ 10.48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_f กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

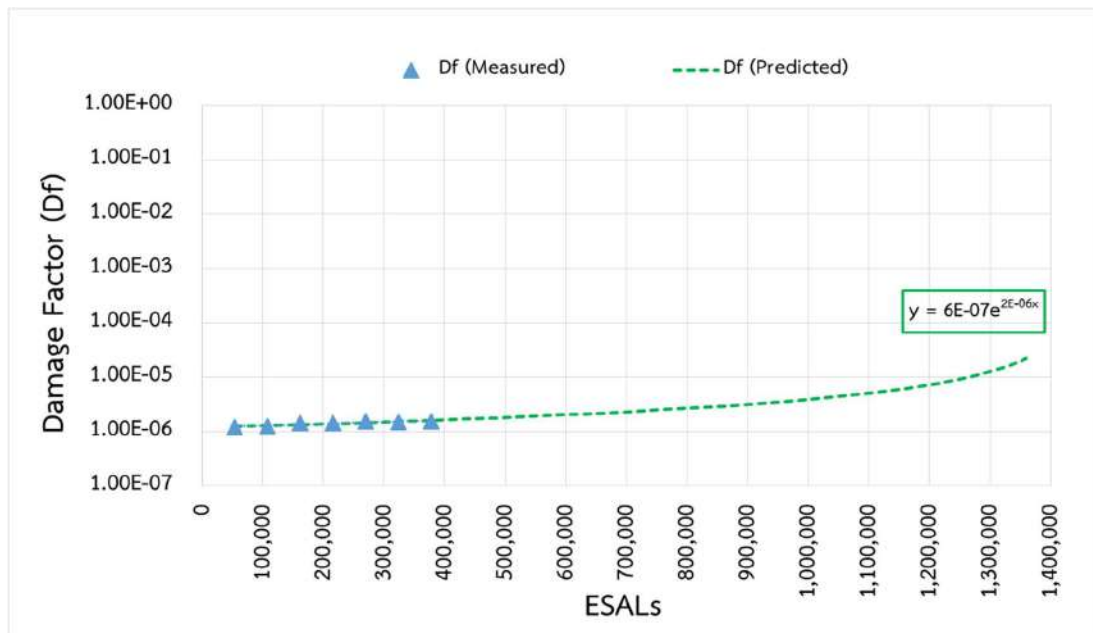


รูปที่ 10.49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_f กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

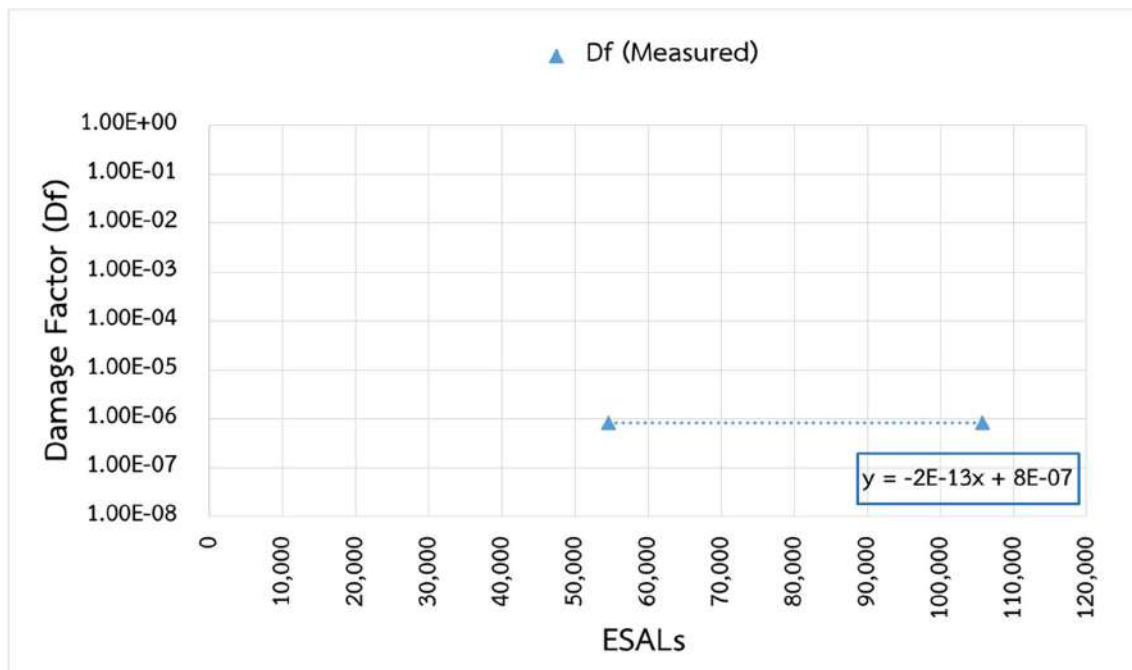
ค่า N_f สามารถนำไปหาค่าความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้า (D_f) ได้ดังสมการ

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

ความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้า (D_f) ในแต่ละเดือน จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ในแต่ละเดือนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถนนลาดยางจะหมดอายุบริการเนื่องจากความล้า (Fatigue Failure) เมื่อค่า $D_f = 1$ ดังแสดงในรูปที่ 10.50 และรูปที่ 10.51



รูปที่ 10.50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง D_f กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



รูปที่ 10.51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง D_f กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

- แบบจำลองความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดร่องล้อ (Rutting Failure Model)

สถาบัน Asphalt Institute (AI) และ Shell ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายจำนวนรอบของน้ำหนักที่กระทำสูงสุดที่ยอมให้จนเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดร่องล้อโดยพิจารณาได้จากสมการดังต่อไปนี้

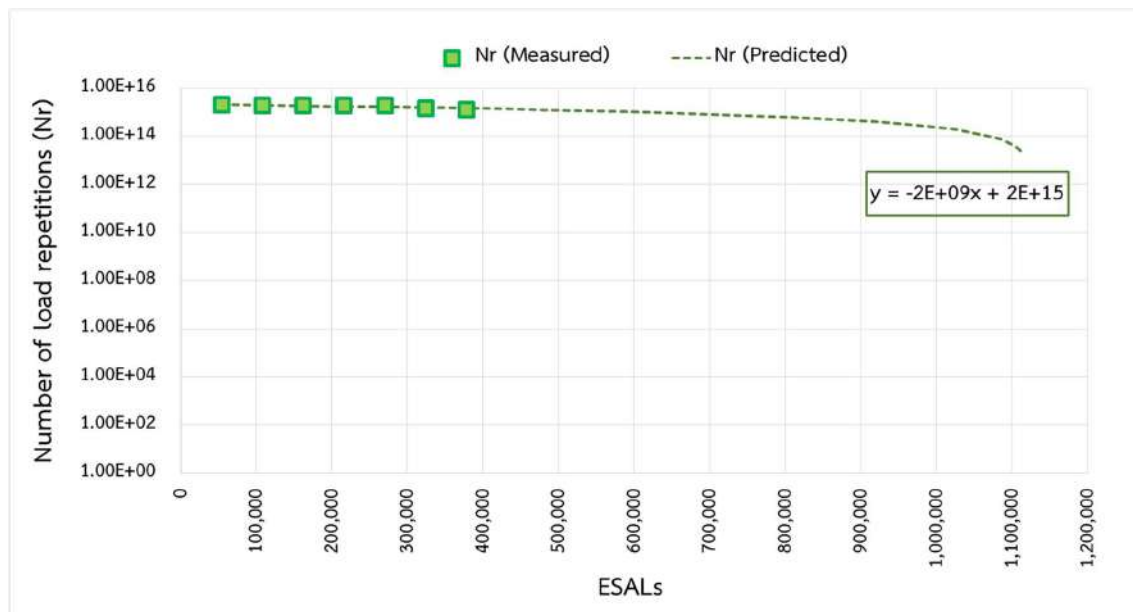
$$N_r = 1.365 \times 10^{-9} (\epsilon_v^{-4.477}) \quad (41)$$

เมื่อ

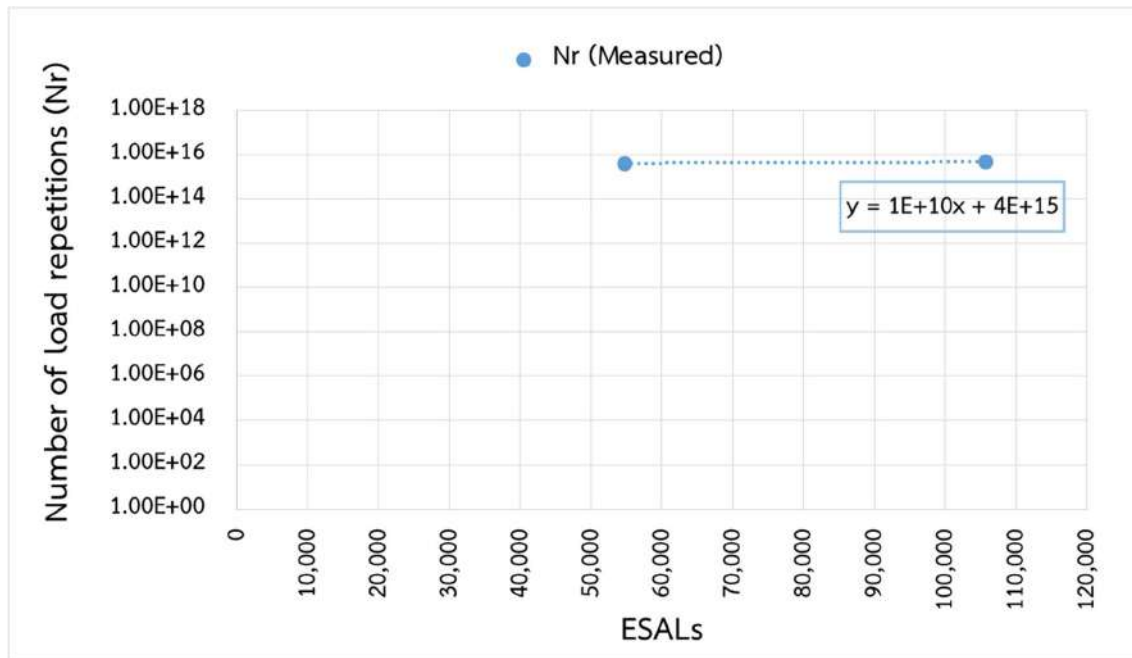
N_r = จำนวนรอบของน้ำหนักบรรทุกที่จะกระทำให้นถนนลาดยางพังเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดร่องล้อ

ϵ_v = ค่า Vertical Strain ที่เกิดขึ้นซ้ำๆ บนชั้นดินเดิม (Subgrade)

ในการทำนายอายุบริการของถนนลาดยางจากค่า N_r จะใช้ค่าความเครียดแนวตั้ง (Vertical Strain) ที่เกิดขึ้นซ้ำๆ บนชั้นดินเดิม (Subgrade) แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดแนวตั้ง (Vertical Strain) คณะผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องแปลงค่าผลการตรวจวัดความเครียดแนวราบ (Horizontal Strain) บนชั้นดินเดิม (Subgrade) เป็นค่าความเครียดแนวตั้ง (Vertical Strain) โดยใช้ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) เพื่อทำนายอายุบริการของถนนลาดยางจากการเกิดร่องล้อ โดยผิวทางลาดยางจะหมดอายุบริการอันเนื่องมาจากการเกิดร่องล้อเมื่อค่า N_r ใกล้ศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 10.52 และรูปที่ 10.53



รูปที่ 10.52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_r กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

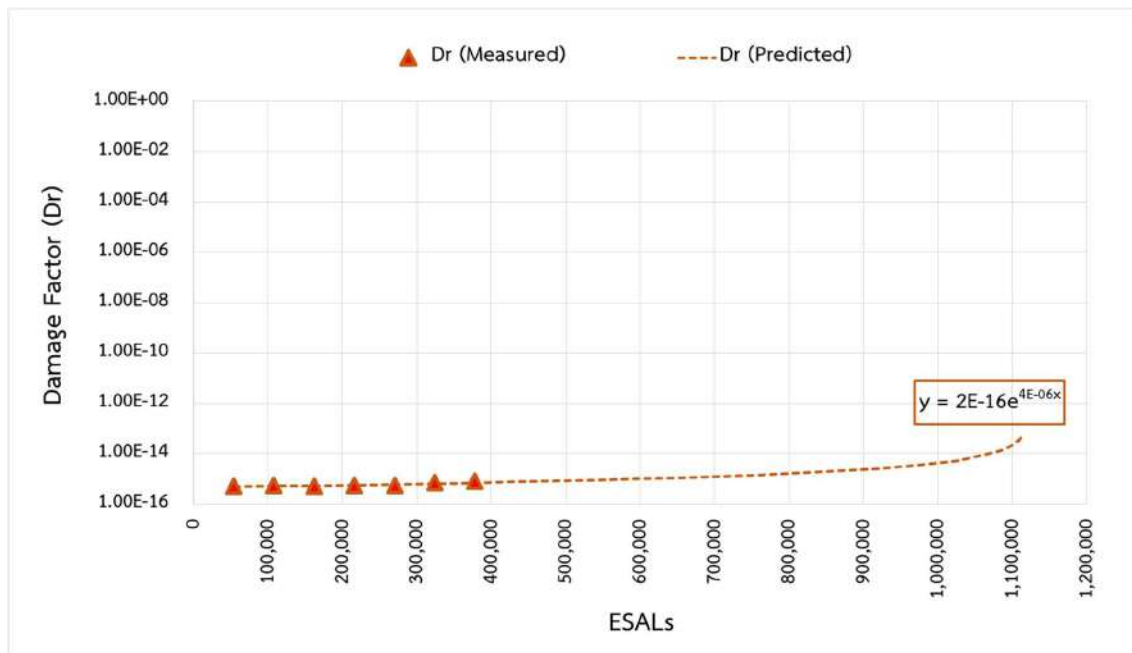


รูปที่ 10.53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_r กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

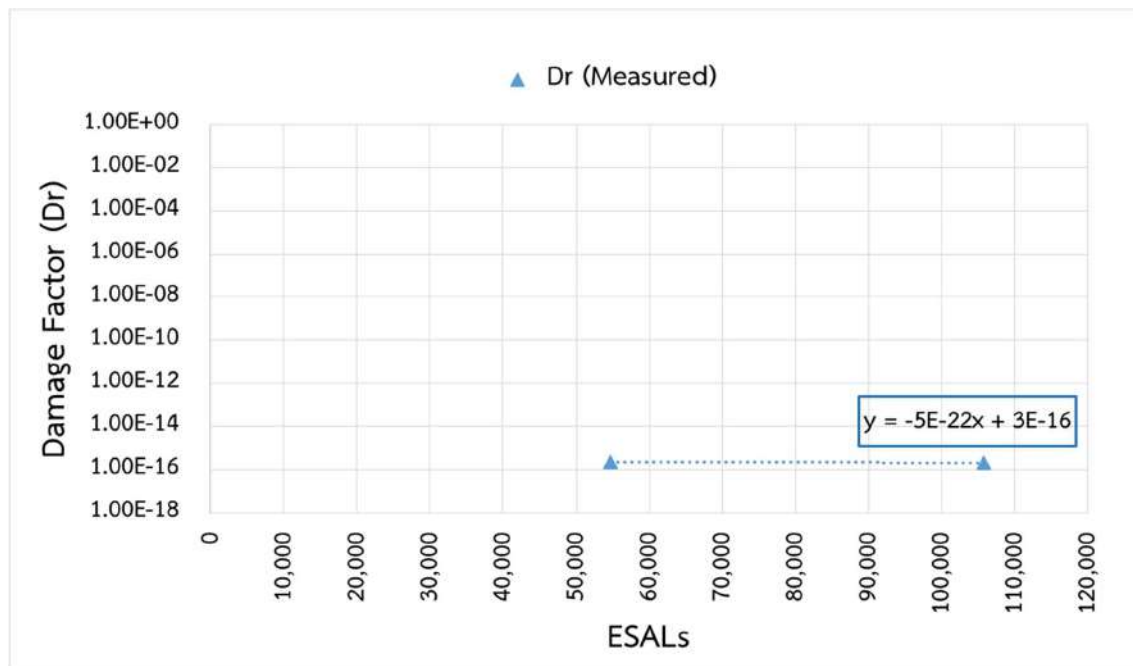
ค่า N_r สามารถนำไปหาค่าความเสียหายสะสมเนื่องจากร่องล้อ (D_r) ได้ดังสมการ

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

ความเสียหายสะสมเนื่องจากร่องล้อ (D_r) ในแต่ละเดือน จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ในแต่ละเดือนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถนนลาดยางจะหมดอายุบริการเนื่องจากร่องล้อ (Rutting Failure) เมื่อค่า $D_r = 1$ ดังแสดงในรูปที่ 10.54 และรูปที่ 10.55



รูปที่ 10.54 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง D_r กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

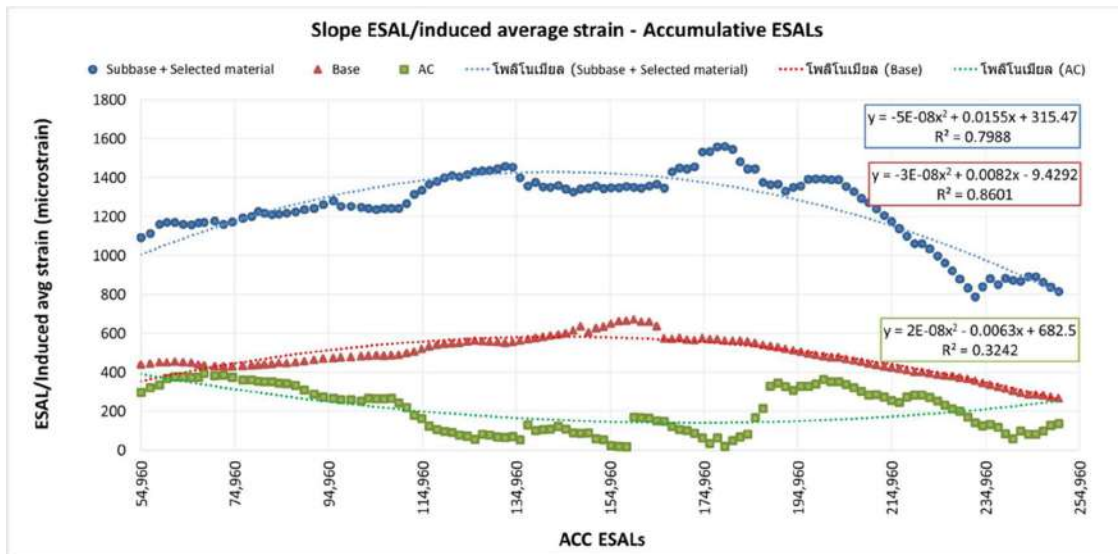


รูปที่ 10.55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง D_r กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

- แบบจำลองทำนายความลึกของการเกิดร่องล้อ (Rutting Depth Model)

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทำนายความลึกของการเกิดร่องล้อสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยมีขั้นตอนในพัฒนาแบบจำลองดังนี้

- 1) คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจราจร (ESAL) กับค่า Induced strain เฉลี่ยย้อนหลัง 1 เดือน ของแต่ละชั้นทาง โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ดังแสดงในรูปที่ 10.56



รูปที่ 10.56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ESALs /Induced Average Strain กับ ESALs ของ
ถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

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

$$\text{Strain แนวราบเฉลี่ย} = \text{ESALs} / (\text{Slope ของ ESAL/Induced strain เฉลี่ยย้อนหลัง 1 เดือน}) \quad (43)$$

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

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

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

- 4) คำนวณค่าความลึกร่องล้อที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นทางโดยนำค่า strain แนวตั้งเฉลี่ยของแต่ละชั้นทางที่ได้จากข้อ 3 คูณด้วยความหนาของชั้นทาง ดังสมการ

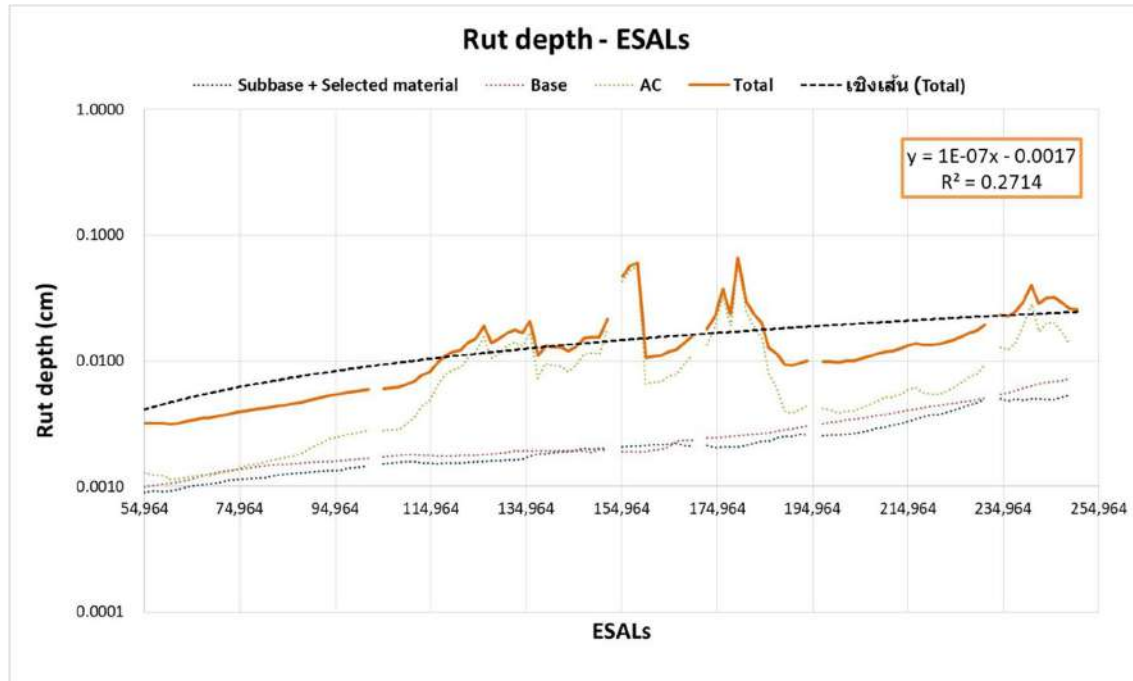
$$\text{Rutting Depth ในชั้นทาง} = \text{Strain แนวตั้งเฉลี่ย} \times \text{ความหนาของชั้นทาง} \quad (45)$$

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

- 5) คำนวณค่าความลึกร่องล้อที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากผลรวมของความลึกร่องล้อในแต่ละชั้นทางที่ได้จากข้อ 4 ดังสมการ

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

ค่าความสึกหรองจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ในแต่ละเดือนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 10.57 ซึ่งสามารถทำนายการเกิดร่องล้อของถนนลาดยางได้ เพื่อวางแผนการบำรุงรักษาตามระดับความรุนแรงของร่องล้อที่เกิดขึ้นตามเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 10.1



รูปที่ 10.57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rut Depth กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

ตารางที่ 10.1 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 ขุดไสและเสริมผิว	ปะซ่อม ขุดซ่อม ขุดไสและเสริมผิว

10.7 แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต อ. นครชัยศรี จ. นครปฐม

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

$$\log(N_f) = 17.61 - 17.61(\sigma/MOR) \quad (47)$$

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

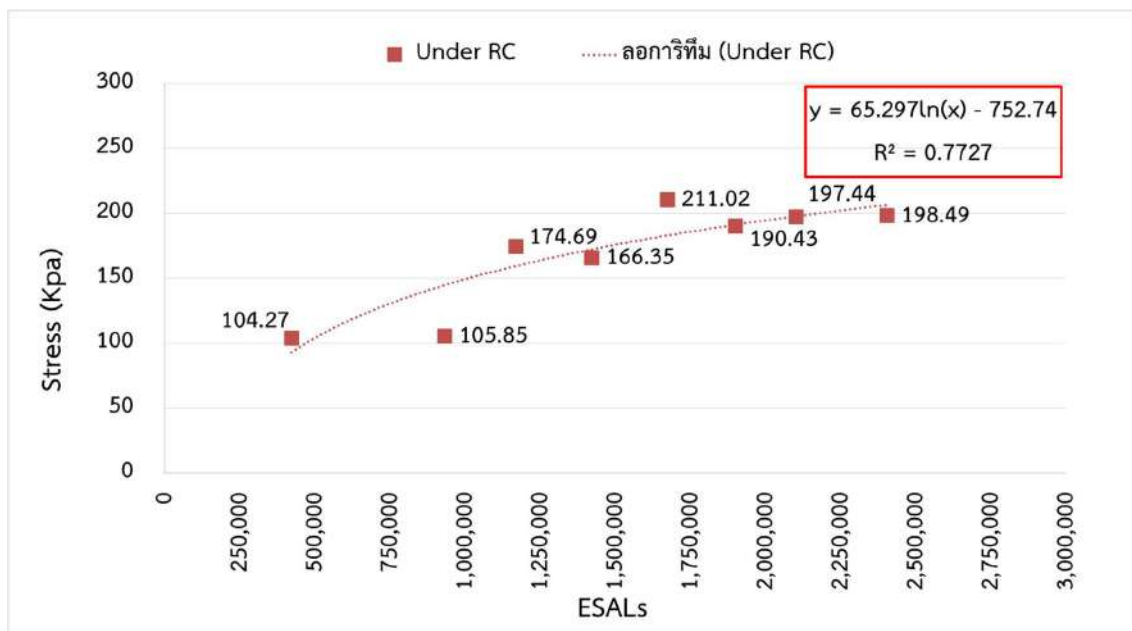
เมื่อ N_f คือ จำนวนรอบของแรงกระทำต่อโครงสร้างที่ยอมให้ก่อนจะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue Cracking) ในแผ่นคอนกรีต

σ คือ ค่า Stress สูงสุดที่กระทำต่อแผ่นคอนกรีต (psi)

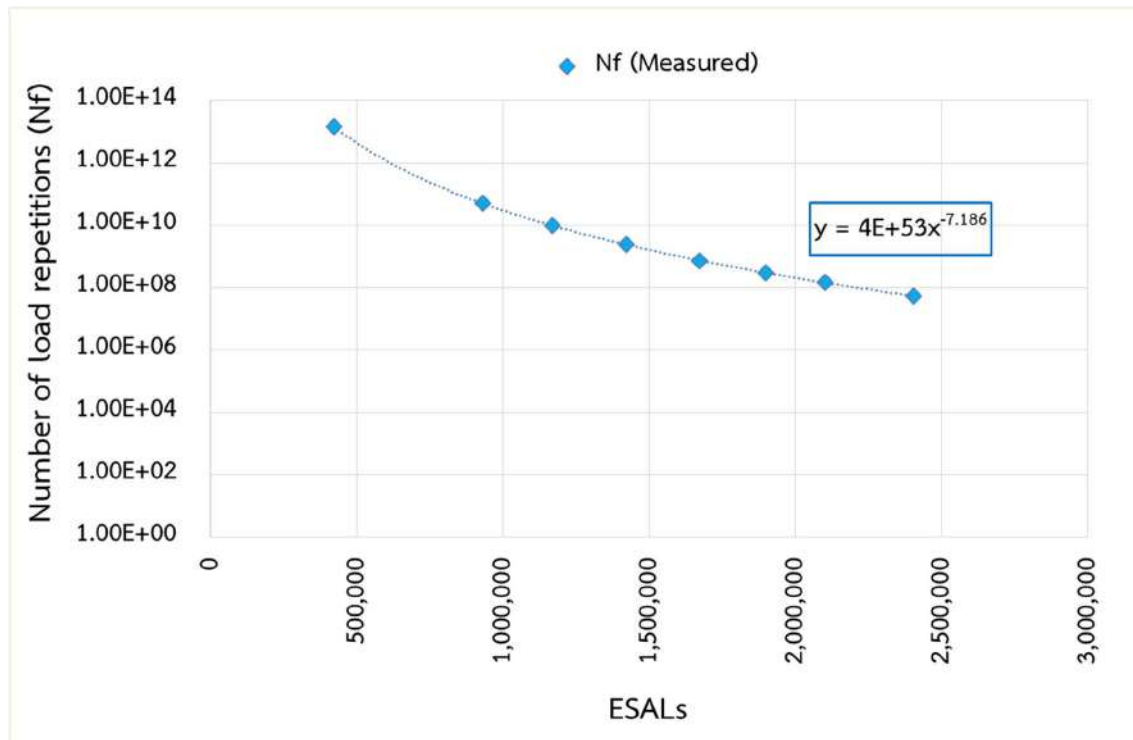
MOR คือ ค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) ของคอนกรีต (psi)

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

การทำนายอายุบริการของถนนคอนกรีตสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าความเค้น (Stress) สูงสุดที่กระทำต่อแผ่นพื้นคอนกรีต โดยคณะผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นสูงสุดในแต่ละวัน (Daily Maximum Stress) ที่ใต้ชั้นผิวทางคอนกรีตเพื่อหาค่าเฉลี่ยของความเค้นสูงสุดรายเดือน (Monthly Average Maximum Stress) สำหรับวิเคราะห์อายุบริการของถนนคอนกรีตโดยใช้แบบจำลองความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้า (Fatigue Failure Model) ดังแสดงใน รูปที่ 10.58 จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แบบจำลอง Roesler (1998) พบว่าจำนวนเที่ยวของน้ำหนักรถทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตชำรุดเสียหายเนื่องจากความล้า (N_f) ดังแสดงใน รูปที่ 10.59



รูปที่ 10.58 ค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) ใต้ผิวทางคอนกรีต อ. นครชัยศรี จ. นครปฐม



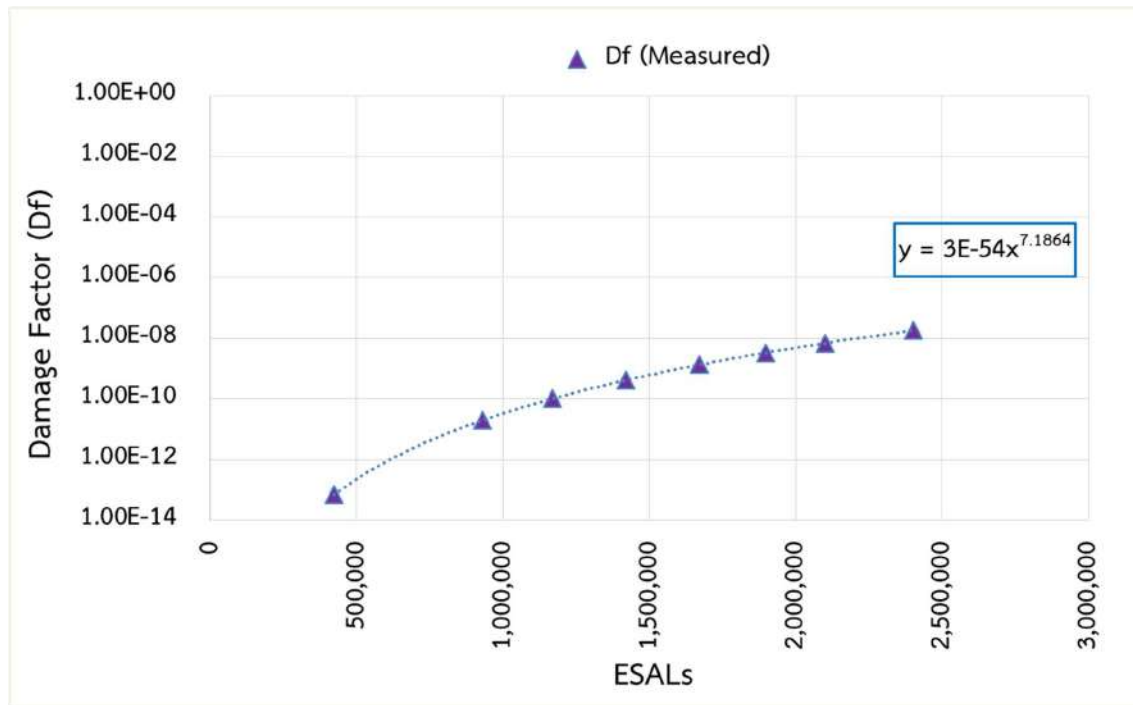
รูปที่ 10.59 จำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตชำรุดเสียหายเนื่องจากความล้า (Nf)

อ. นครชัยศรี จ. นครปฐม

ค่า N_f สามารถนำไปหาค่าความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้า (D_f) ได้ดังสมการ

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

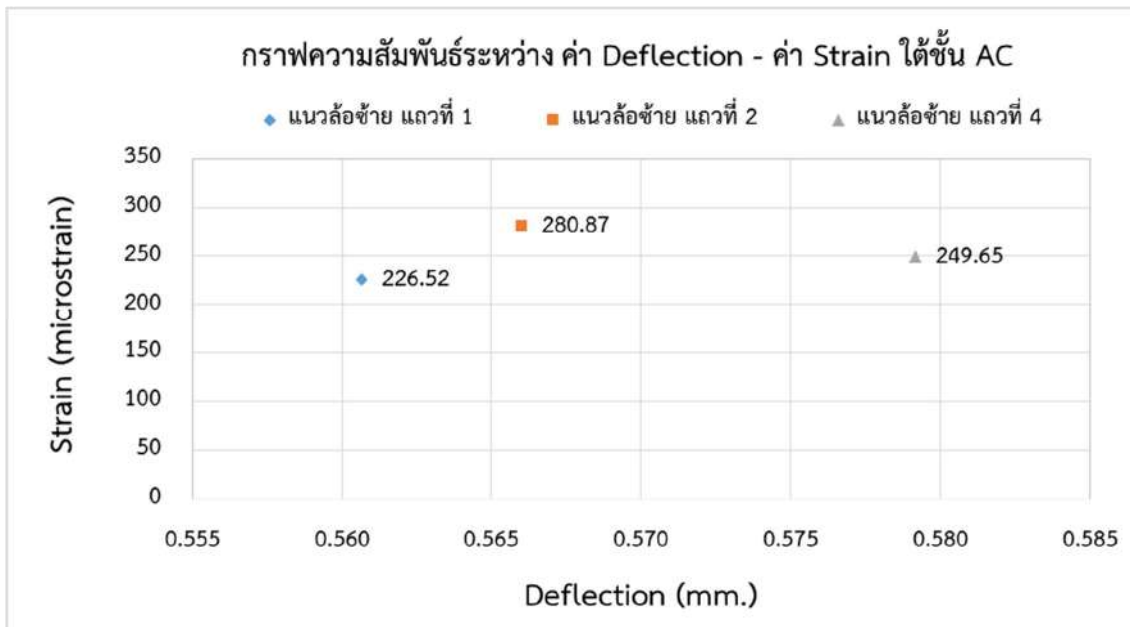
ความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้า (D_f) ในแต่ละเดือน จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณจราจรสะสม (Cumulative ESALs) ในแต่ละเดือนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถนนคอนกรีตจะหมดอายุบริการเนื่องจากความล้า (Fatigue Failure) เมื่อค่า $D_f = 1$ ดังแสดงในรูปที่ 10.60



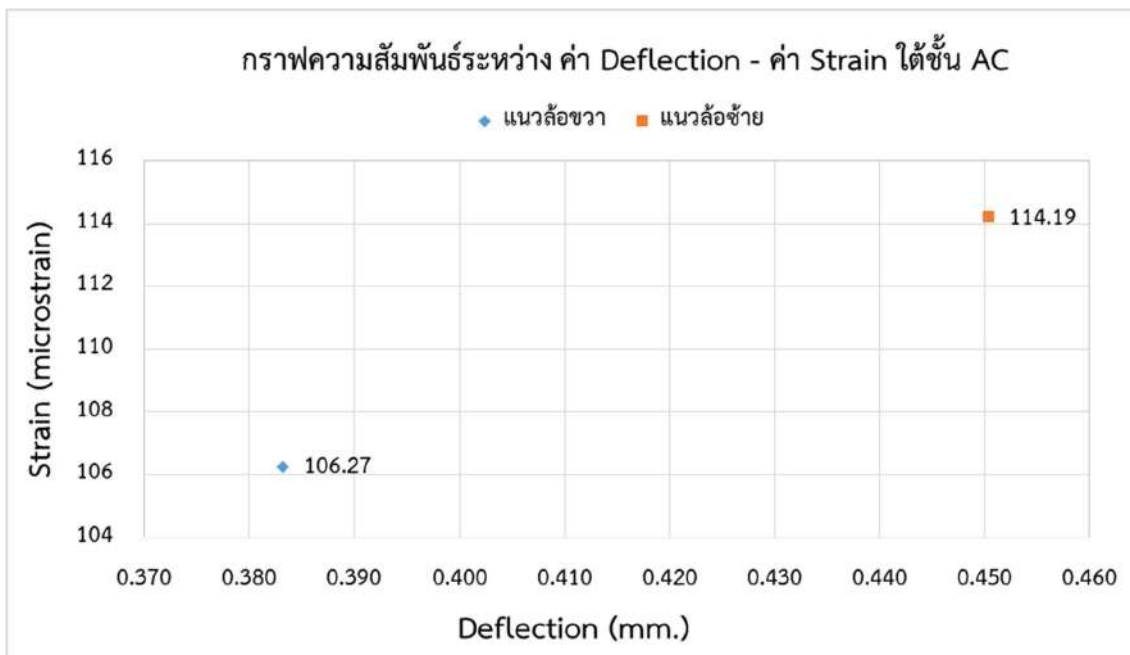
รูปที่ 10.60 ค่าความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้าของถนนคอนกรีตอ. นครชัยศรี จ. นครปฐม

10.8 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Simplified Model และ Mechanistic (Analytical) Model

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Simplified Model สำหรับงานปฏิบัติการ ที่ได้จากการตรวจวัดค่า Deflection จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ที่แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง และ Mechanistic (Analytical) Model สำหรับงานวิจัยวิชาการ ที่ได้จากการตรวจวัดค่าความเครียด (Strain) ในตำแหน่งและช่วงเวลาเดียวกับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ซึ่งสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี ดังแสดงในรูปที่ 10.61 และที่ อ.สรรพยา จ.ชัยนาท ดังแสดงในรูปที่ 10.62

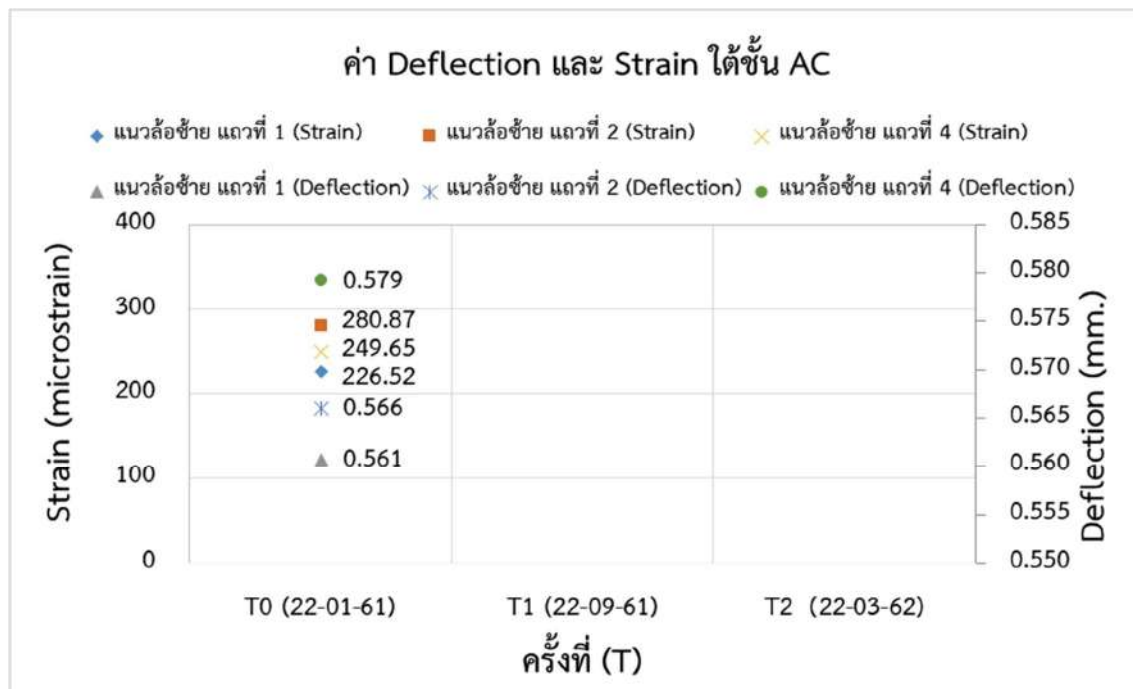


รูปที่ 10.61 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง
อ.โพธาราม จ.ราชบุรี

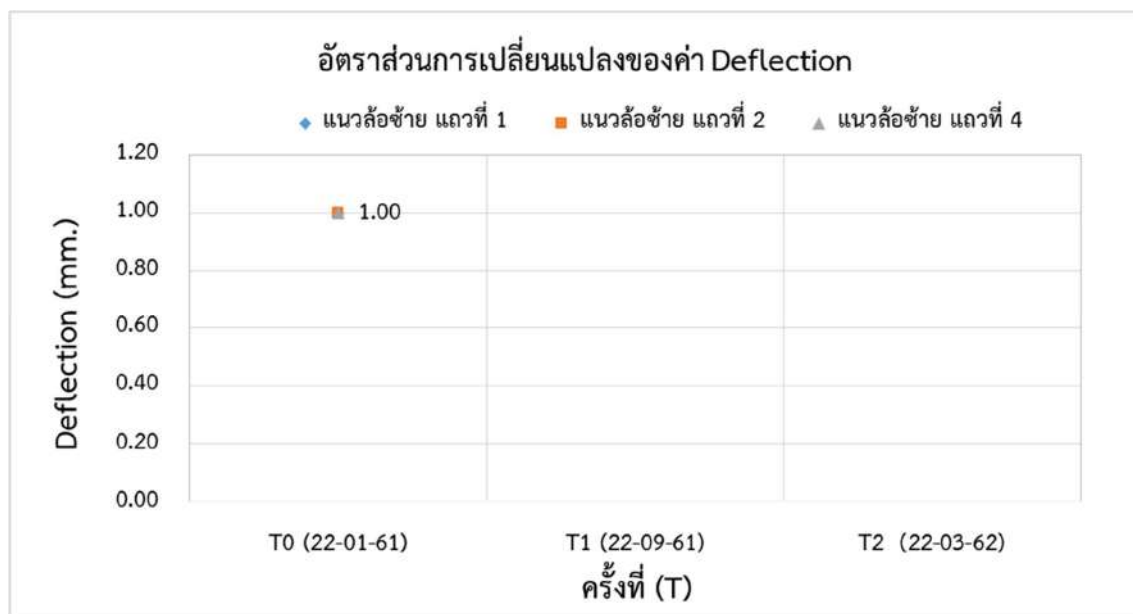


รูปที่ 10.62 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง
อ.สรรพยา จ. ชัยนาท

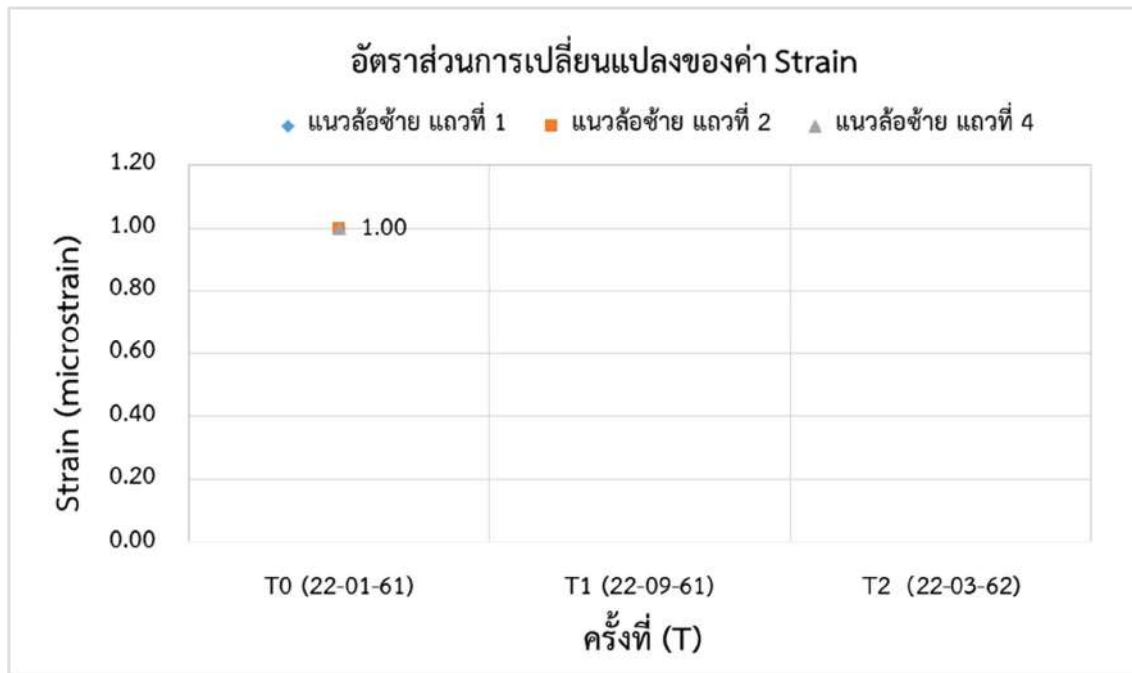
ทั้งนี้คณะผู้วิจัยจะดำเนินการเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง ทั้งของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี และ อ.สรรพยา จ.ชัยนาท ทุกๆ 6 เดือน เพื่อให้เห็นแนวโน้มของสัดส่วนของ Deflection (FWD) และ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูป รูปที่ 10.63 ถึง รูปที่ 10.68



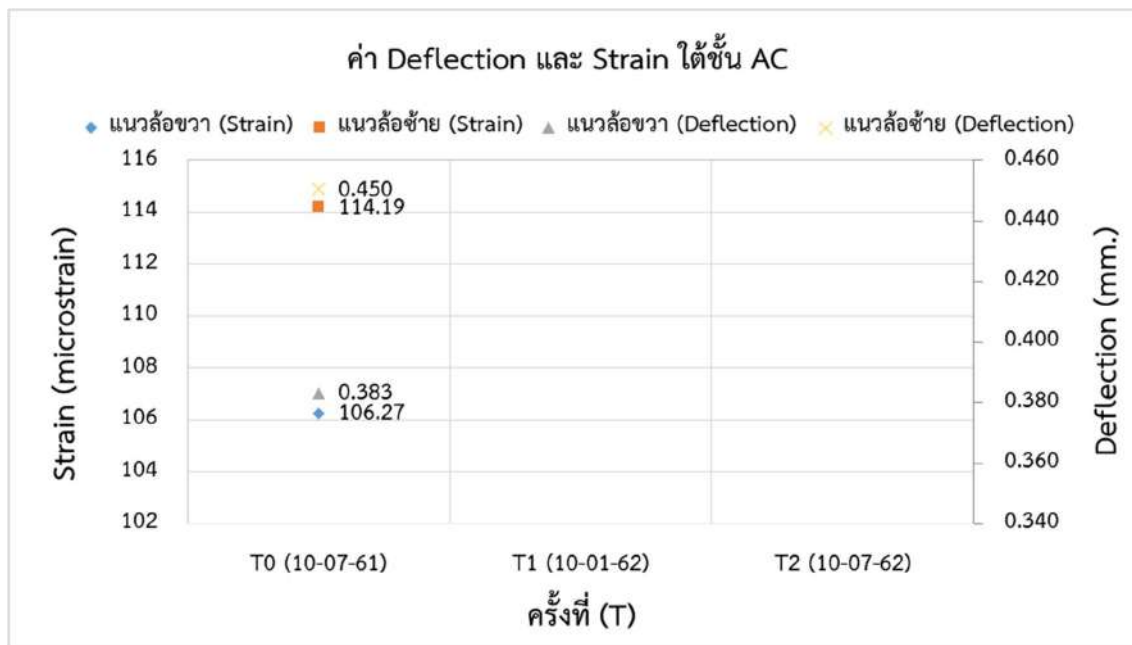
รูปที่ 10.63 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



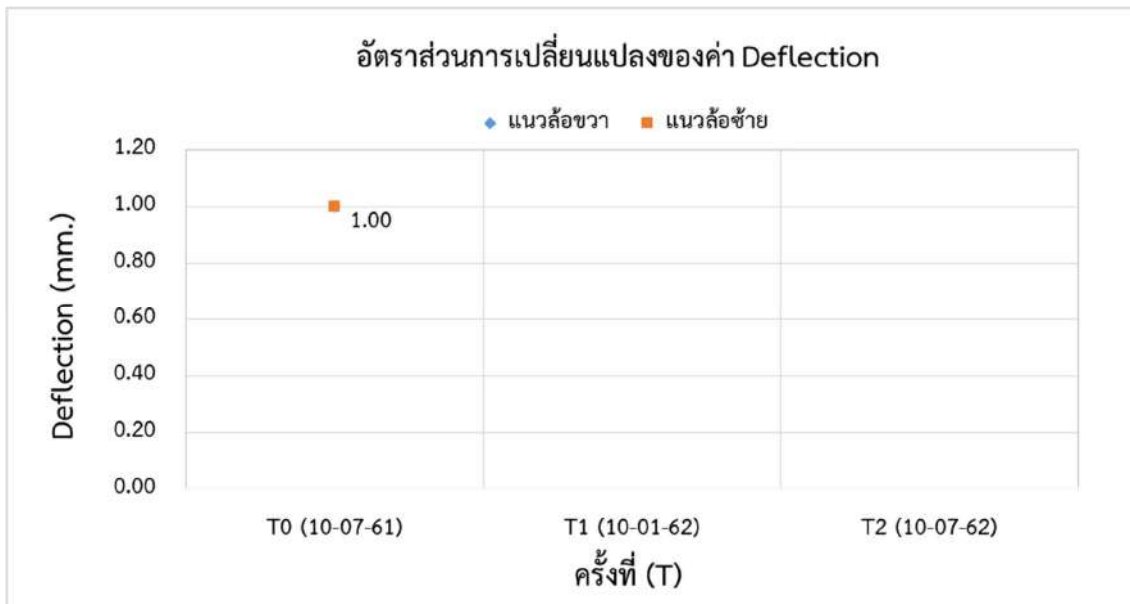
รูปที่ 10.64 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Deflection (FWD) ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



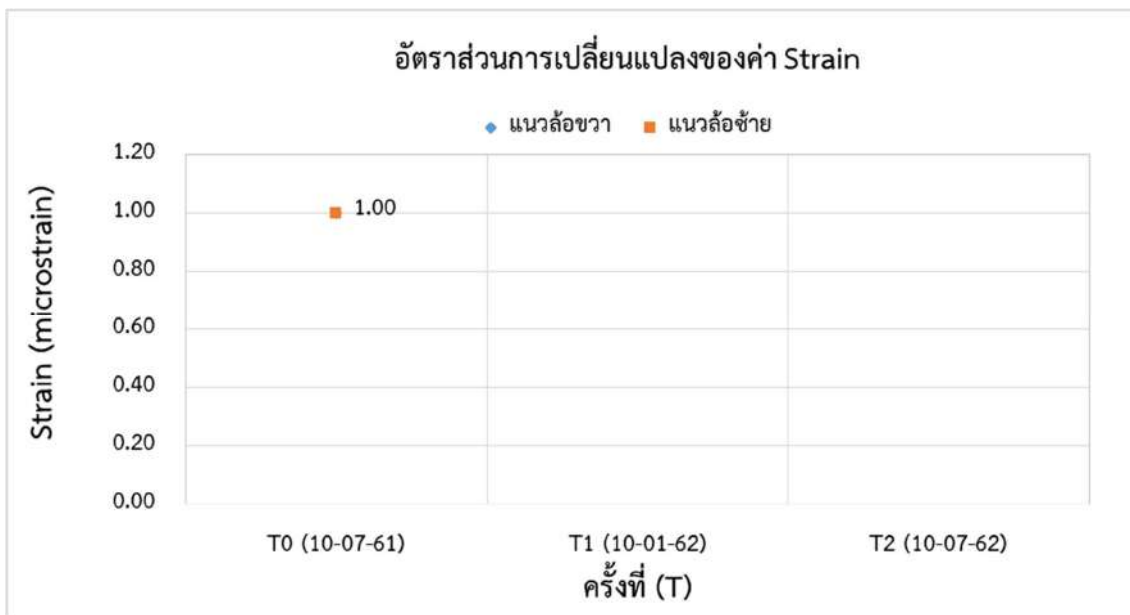
รูปที่ 10.65 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Strain ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี



รูปที่ 10.66 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท



รูปที่ 10.67 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Deflection (FWD) ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของ
ถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท



รูปที่ 10.68 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Strain ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง
อ.สรรพยา จ. ชัยนาท

11. บทสรุป

การศึกษาตรวจวัดอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง เป็นการศึกษาวิจัยพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนภายใต้สภาพการใช้งานเงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย โดยการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดเหนือดินฐานราก ได้พื้นทาง และได้ผิวทาง และระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามเพื่อติดตามตรวจวัดความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) อุณหภูมิ (Temperature) และปริมาณความชื้น (Moisture) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางอย่างต่อเนื่อง และพัฒนาแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง รวมถึงเป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ ประกอบการวิเคราะห์อำนาจการทำลายของรถบรรทุกทุกประเทศไทย การศึกษาตรวจวัดอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง ในปี 2561 เป็นการดำเนินงานต่อเนื่องในระยะที่ 2 ดังแสดงตามรูปที่ 11.1



รูปที่ 11.1 ภาพรวมการดำเนินการศึกษา

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

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบในสภาวะควบคุมโดยใช้รถบรรทุก 6 ล้อ (พิกัด 15 ตัน) และรถกึ่งพ่วง (พิกัด 50.5 ตัน) เพื่อตรวจวัดค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ในกรณีรถเปล่าและกรณีที่มี น้ำหนักบรรทุก 25%, 50% และ 100% ของพิกัดน้ำหนัก โดยมีการทดสอบ 3 ระดับความเร็วคือกรณีรถจอด หยุดนิ่งและกรณีวิ่งด้วยความเร็ว 20 กม./ชม. และ 60 กม./ชม. โดยแบ่งการทดสอบเป็นกรณีเพลาล้อเดี่ยว ล้อคู่ และสามเพลาล้อคู่ วัตถุประสงค์ในการทดสอบในสภาวะควบคุมเพื่อ 1) ตรวจสอบความน่าเชื่อถือในการตรวจวัดโดยการเปรียบเทียบกับหลักทฤษฎี 2) ศึกษาผลกระทบของความเร็ว รถต่อความเค้นและความเครียดในโครงสร้างชั้นทางและ 3) ศึกษาวิเคราะห์อำนาจการทำลายของรถบรรทุก ประเทศไทย โดยคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบผลการทดสอบในสภาวะควบคุมกับผลการ วิเคราะห์ตามหลักทฤษฎีดังต่อไปนี้

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

เนื่องจากการดำเนินงานในระยะที่ 1 พบข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง FEA 2 มิติ ดังนั้น การดำเนินงานในระยะที่ 2 จึงได้ปรับเปลี่ยนมาใช้แบบจำลอง FEA 3 มิติเพื่อให้มีความละเอียดถูกต้องในการ วิเคราะห์มากขึ้น นอกจากนั้นการดำเนินงานในระยะที่ 1 พบข้อจำกัดในการทดสอบกรณีล้อคู่ซึ่งค่า ความเครียดบริเวณพื้นที่ใต้ล้อและพื้นที่ช่องว่างระหว่างล้ออาจแตกต่างกัน ดังนั้นการดำเนินงานในระยะที่ 2 จึงเพิ่มเติมกระบวนการทดสอบเพื่อให้มีความละเอียดมากขึ้นโดยคณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบทั้งในกรณีล้อ นอกและล้อในของล้อคู่ทับ Strain Gage พอติและทดสอบในกรณีที่ Strain Gage อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลาง ระหว่างล้อนอกและล้อในเพื่อศึกษาความแตกต่างของค่าความเครียดที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัด จากการทดสอบในสภาวะควบคุมกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีสามารถสรุปโดยย่อได้ดังต่อไปนี้

- 1) ค่าความเค้นที่คำนวณจากทุกทฤษฎีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกับผลการ ตรวจวัดในสนาม โดยค่าความเค้นมีค่าลดลงเมื่อระดับความลึกมากขึ้น
- 2) ค่าความเครียดที่คำนวณจากทุกทฤษฎีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ยกเว้นเพียงแต่ทฤษฎีของ Burmister ที่แสดงค่าความเครียดในชั้นพื้นทางสูงกว่าค่าความเครียดในชั้นผิวทาง โดยพบว่าค่า ความเครียดที่ตรวจวัดได้จาก Strain Gage ที่ติดตั้งใต้ชั้นผิวทางในทิศทางตั้งฉากกับทิศทาง จราจรมีความแปรปรวนค่อนข้างสูงเนื่องจากอิทธิพลของตำแหน่งล้อที่กดทับลงบน Strain Gage ดังอธิบายไว้ในข้อถัดไป อย่างไรก็ตามค่าความแปรปรวนมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความลึกมากขึ้น

- 3) ตำแหน่งล้อยึดกดทับบน Strain Gage ที่ติดตั้งใต้ชั้นผิวทางในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางจราจร ส่งผลอย่างมากต่อผลการตรวจวัดความเครียดใต้ชั้นผิวทาง 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 อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อด้านในและล้อด้านนอก (กรณีล้อคู่) เป็นความเครียดดึง (Tensile Strain) ทั้งหมดทำให้ไม่เกิดความแปรปรวนอันเนื่องมาจากการกดทับของล้อลงบน Strain Gage
- 5) ค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้จาก Strain Gage ที่ติดตั้งใต้ผิวทางในทิศทางขนานกับทิศทางจราจร มีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎี 2.5-3 เท่า สาเหตุส่วนหนึ่งอาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ที่ตรวจวัดได้จริงมีค่าต่ำกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการออกแบบถึงแม้ว่าในการก่อสร้างแปลงทดสอบจะผ่านมาตรฐานการทดสอบวัสดุและมาตรฐานการก่อสร้างของกรมทางหลวงทุกประการ นอกจากนั้นการวิเคราะห์ทางทฤษฎีนั้นมักใช้ทฤษฎีความเป็นอีลาสติกของวัสดุเป็นสมมติฐานหลัก อย่างไรก็ตามวัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างชั้นทางนั้นไม่ได้มีความเป็นอีลาสติกอย่างสมบูรณ์ ความเครียดในชั้นวัสดุ AC มีลักษณะหนืด (Viscous) และขึ้นกับเวลา (Time dependent) จึงอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของผลการตรวจวัดกับผลที่วิเคราะห์ได้จากทางทฤษฎีเช่นกัน
- 6) จากการตรวจวัดค่าความเค้นและความเครียดของรถบรรทุกคันเดียวกันที่มีน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน แต่มีความเร็วต่างกันพบว่าค่าความเค้นและความเครียดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเร็วของรถบรรทุกลดลง โดยรถที่มีความเร็ว 20 กม./ชม. ทำให้เกิดความเครียดสูงกว่ารถที่มีความเร็ว 60 กม./ชม. ประมาณ 1.5-2 เท่า ในขณะที่รถจอดหยุดนิ่งมีความเครียดสูงกว่ารถที่มีความเร็ว 60 กม./ชม. ประมาณ 2.5-3 เท่า
- 7) เมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นบนแปลงทดสอบอำเภอสรพยา จังหวัดชัยนาท กับแปลงทดสอบอำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างทางใกล้เคียงกัน พบว่าทั้งสองแปลงทดสอบนั้นมีพฤติกรรมเหมือนกันไม่ว่าจะเป็นค่าความเค้น ความเครียด รวมไปถึงความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นโครงสร้างทางนั้นนับว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างมาก

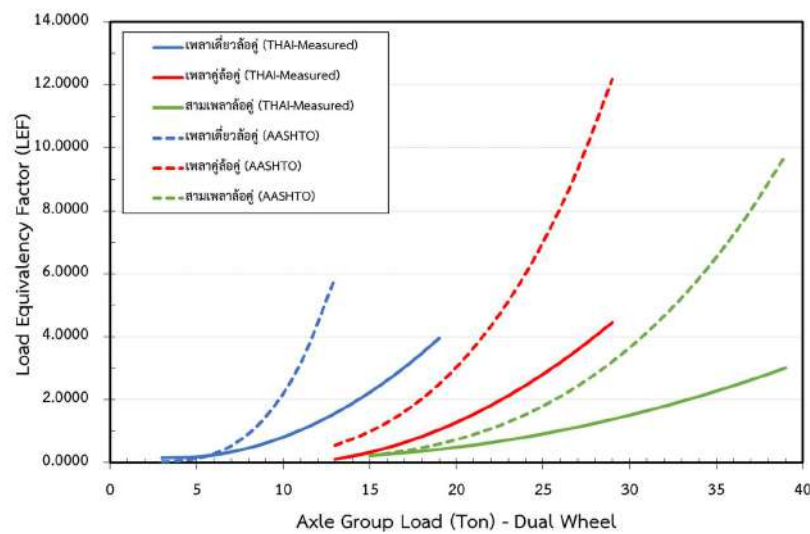
คณะผู้วิจัยใช้ผลการทดสอบในสภาวะควบคุมจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (สรพยา) โดยการหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของค่าความเครียดใต้ชั้นผิวทางและบนชั้นคันทาง (Subgrade) เพื่อวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลาย (LEF) ของรถบรรทุกทุกประเภทไทย ทั้งในกรณีเพลาล้อเดี่ยวเพลาล้อคู่ เพลาคู่ล้อคู่ และสามเพลาล้อคู่ พร้อมดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic

Approach) ของการศึกษานี้กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) ซึ่งเสนอโดย AASHTO (1986) ที่น้ำหนักกลุ่มเพลเดียวกัน

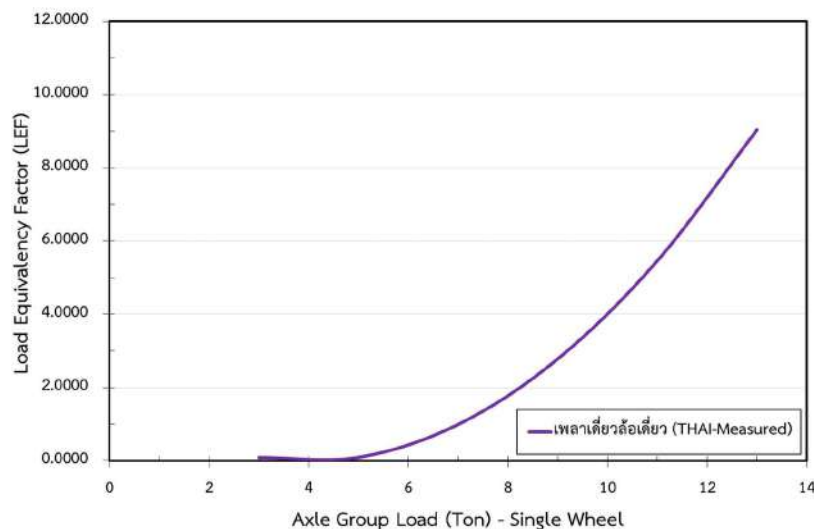
จากผลการศึกษาดูว่าอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายสำหรับกรมทางหลวงดังต่อไปนี้

➤ ข้อเสนอแนะในการออกแบบโครงสร้างทางโดยใช้ค่า LEF ของรถบรรทุกประเทศไทยจากการตรวจวัด

กรมทางหลวงควรนำค่าอำนาจการทำลาย (LEF) เทียบกับน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานประเทศไทยตามที่สรุปในตารางที่ 9.4 และ ตารางที่ 9.5 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากข้อมูลผลการตรวจวัดของการศึกษา มาใช้ในการออกแบบโครงสร้างถนนเพื่อให้สอดคล้องกับพิกัดน้ำหนักบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวง ค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัดของการศึกษานี้ (Mechanistic Approach) กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) ซึ่งเสนอโดย AASHTO (1986) ที่น้ำหนักกลุ่มเพลเดียวกันแสดงดังรูปที่ 11.2 และ รูปที่ 11.3



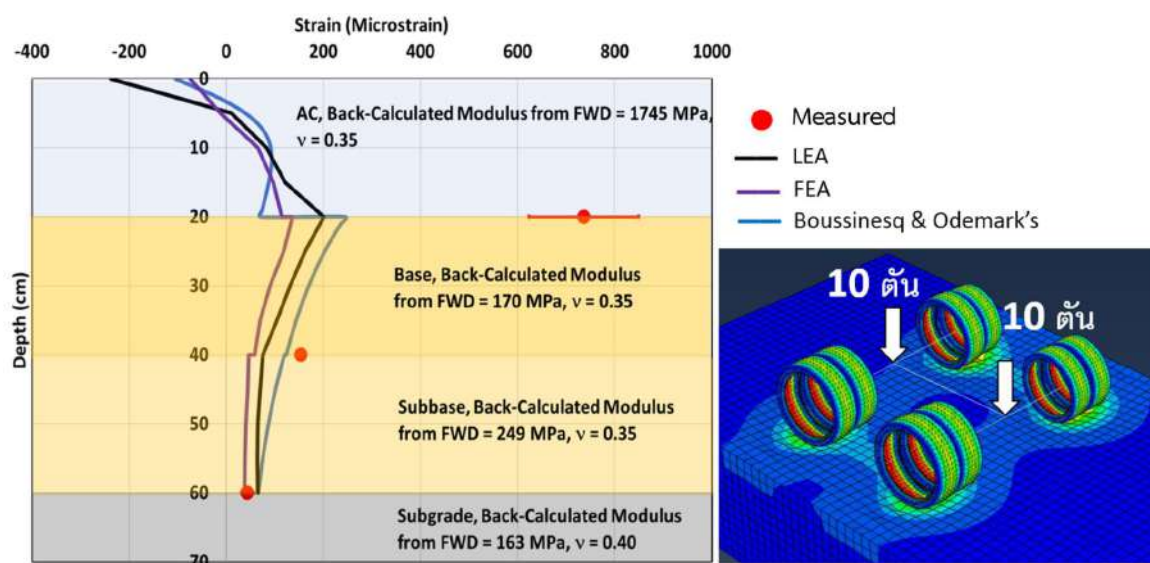
รูปที่ 11.2 อำนาจการทำลายของน้ำหนักกลุ่มเพลารถบรรทุกประเทศไทยกรณีล้อคู่



รูปที่ 11.3 อำนาจการทำลายของน้ำหนักกลุ่มเพลารถบรรทุกประเทศไทยกรณีล้อเดี่ยว

➤ ข้อเสนอแนะในการควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้างโดยการตรวจสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

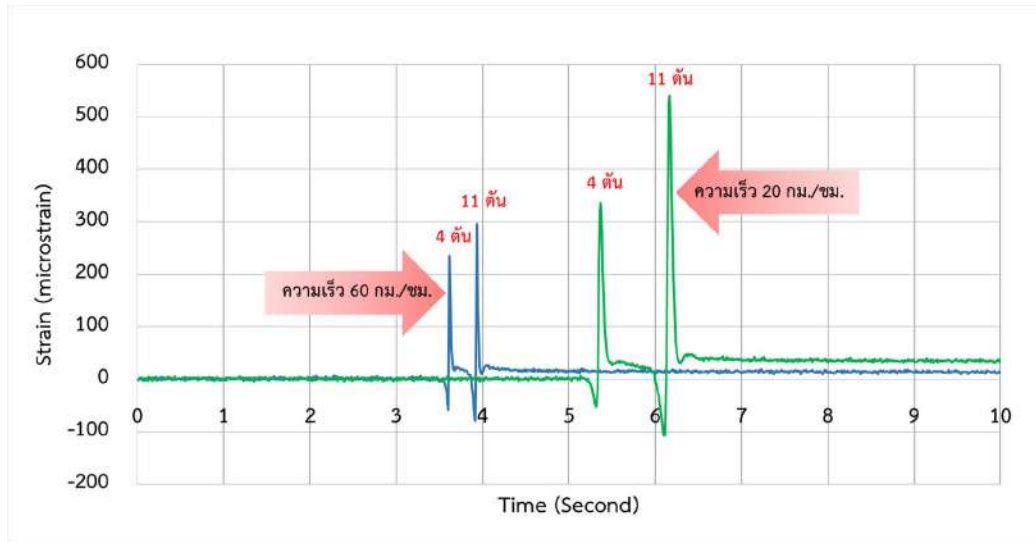
ค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้จาก Strain Gage ได้ผิวทางทิศทางขนานกับทิศทางจราจรมีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎีประมาณ 2.5-3 เท่า (ดังรูปที่ 11.4) สาเหตุส่วนหนึ่งอาจเกิดจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะสมมติว่าวัสดุเป็นอีลาสติกแต่วัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างผิวทางนั้นมีพฤติกรรม Viscoelastic สาเหตุอีกส่วนหนึ่งอาจเป็นผลสืบเนื่องจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการออกแบบถึงแม้ว่าการก่อสร้างแปลงตรวจวัดเป็นไปตามมาตรฐานและข้อกำหนดของกรมทางหลวง ดังนั้นจึงเสนอให้มีการทดสอบค่าโมดูลัสในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพวัสดุระหว่างก่อสร้างและตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้างถนนโดยเครื่องมือ FWD ภายหลังการก่อสร้างเสร็จเพื่อให้โครงสร้างถนนมีสมรรถนะและอายุใช้งานตามข้อกำหนดการออกแบบ



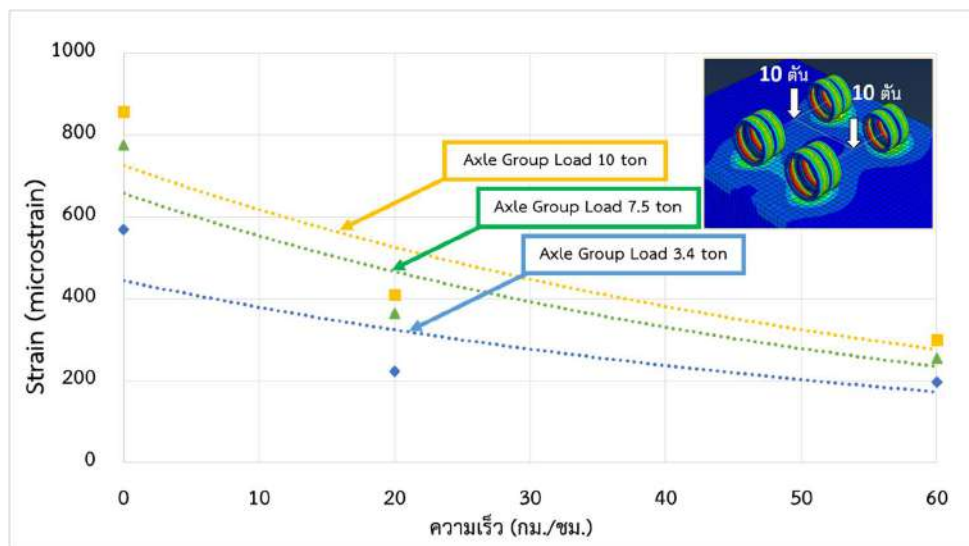
รูปที่ 11.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการคำนวณทางทฤษฎี

➤ 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

อิทธิพลของความเร็วรถต่ออำนาจการทำลายถนน

ปรับปรุงโครงสร้างถนนช่วงที่มีการชะลอความเร็วให้มีความทนทานเป็นพิเศษ



รูปที่ 11.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถบรรทุกกับอำนาจการทำลาย

➤ ข้อเสนอแนะในการควบคุมน้ำหนักและการกำหนดค่าธรรมเนียมรถบรรทุกเกินพิกัด

กรมทางหลวงควรนำค่า LEF ของรถบรรทุกประเทศไทยที่ได้จากการข้อมูลผลการตรวจวัดของการศึกษามาใช้ในการวิเคราะห์อำนาจการทำลายของรถบรรทุกเกินพิกัดดังตัวอย่างรูปที่ 11.8 ซึ่งวิเคราะห์จากค่า LEF เทียบกับน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานของประเทศไทย โดยกรมทางหลวงสามารถพิจารณาค่าธรรมเนียมการใช้ทางของรถบรรทุกต่างประเทศและการคิดค่าธรรมเนียมของรถบรรทุกเกินพิกัดน้ำหนักจากการเสื่อมอายุของถนนตัวอย่างดังรูปที่ 11.9 และรูปที่ 11.10

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

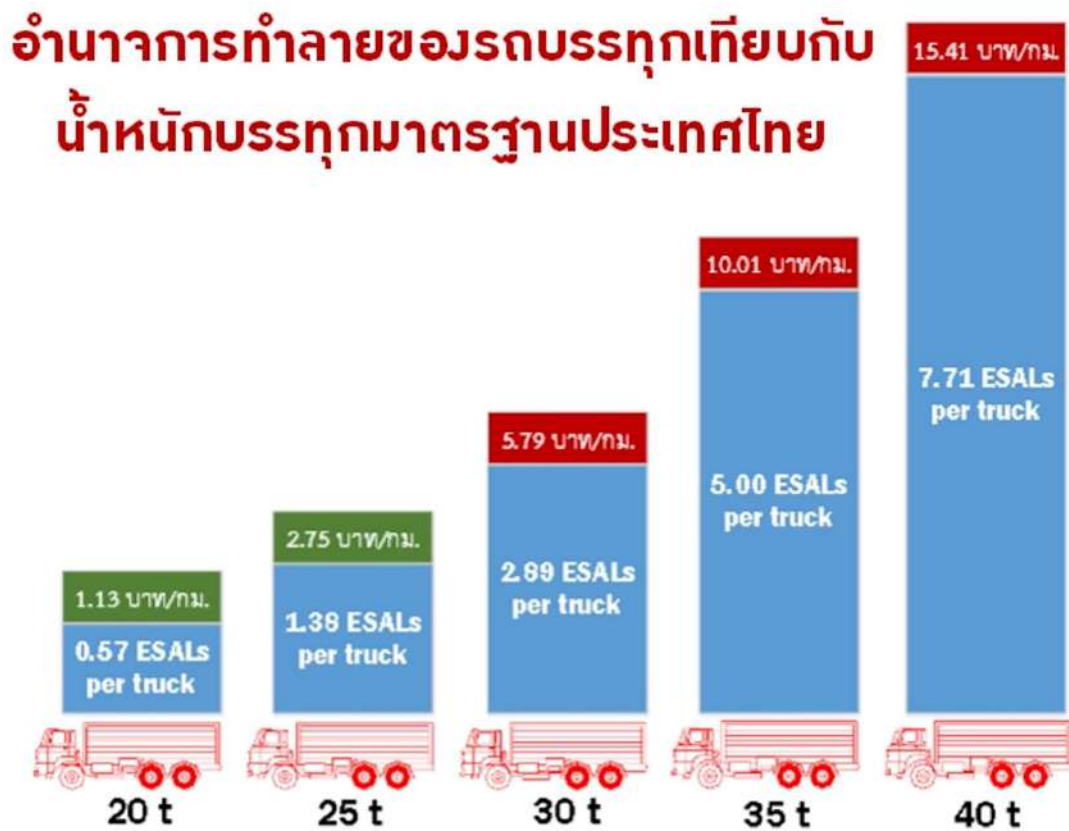
$$\text{ค่าเสื่อมของทางหลวงเนื่องจากรถบรรทุก} = \frac{\text{งบประมาณก่อสร้างทางหลวงต่อกิโลเมตร} \times \text{อำนาจการทำลาย}}{\text{ค่า ESALs ที่ใช้ในการออกแบบทางหลวง}} \quad \dots(50)$$

ยกตัวอย่างเช่น รถบรรทุกสิบล้อพิกัดน้ำหนัก 25 ตัน มีอำนาจการทำลาย (LEF) เทียบกับน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานประเทศไทย ประมาณ 1.38 ESALs ดังนั้นในการวิ่งผ่าน 1 เทียว ทำให้ทางหลวงเสื่อมสภาพคิดเป็นค่าเสื่อม ประมาณ 2.76 บาทต่อกิโลเมตร (20 ล้านบาทต่อกิโลเมตร $\times$ 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

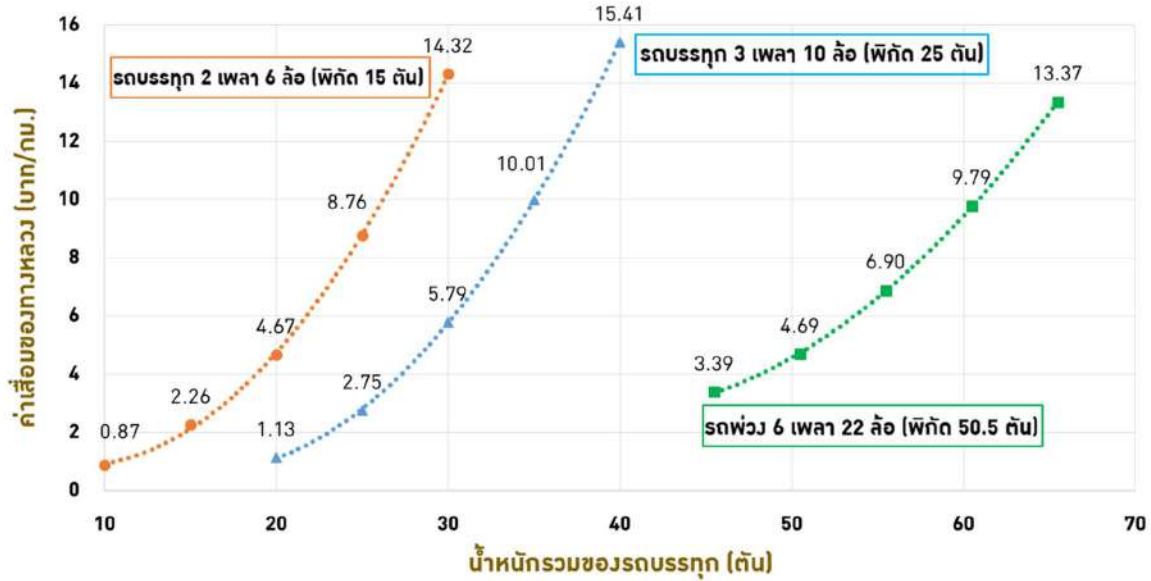
$$\text{ค่าเสื่อมของทางหลวงต่อการขนส่งสินค้าน้ำหนัก 1 ตัน} = \frac{\text{ค่าเสื่อมของทางหลวงต่อกิโลเมตร}}{\text{น้ำหนักบรรทุกทั้งหมด} - \text{น้ำหนักรถเปล่า}} \quad \dots(51)$$

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))



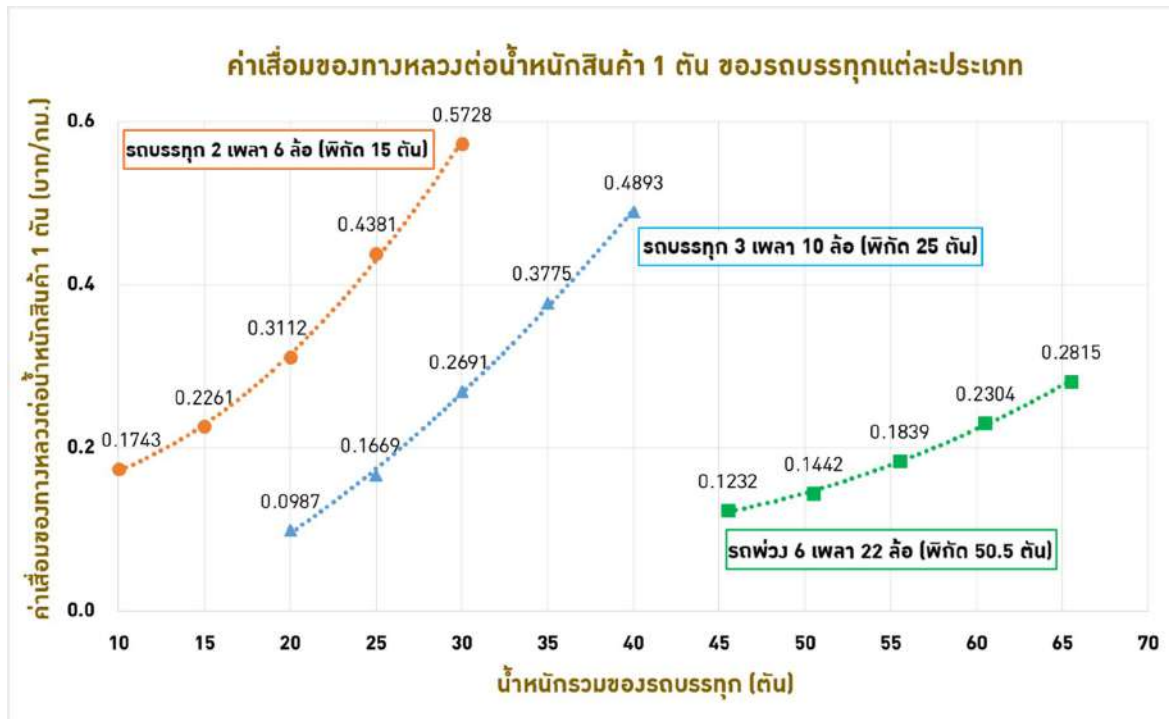
รูปที่ 11.8 อำนาจการทำลายของรถบรรทุกสิบล้อเกินพิกัดน้ำหนัก

ค่าเสื่อมของทางหลวงจากการทำลายของรถบรรทุกแต่ละประเภท



*รวมประมาณก่อสร้าง 20 ล้านบาท ต่อ กม. ออกแบบรับน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานของประเทศไทย 10 ล้าน ESALs

รูปที่ 11.9 ค่าเสื่อมของทางหลวงเนื่องจากรถบรรทุกแต่ละประเภทเกินพิกัดน้ำหนัก



รูปที่ 11.10 ค่าเสื่อมของทางหลวงต่อการขนส่งสินค้าน้ำหนัก 1 ตันโดยรถบรรทุกแต่ละประเภท

➤ ข้อเสนอแนะด้านสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง

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

$$\epsilon_{ac} = 3.7358 \cdot 10^{-5} \text{ESAL} + 220.6855 M_{\text{base}} + 0.9925 T_{\text{ac}} + 188.2023 \quad \dots(52)$$

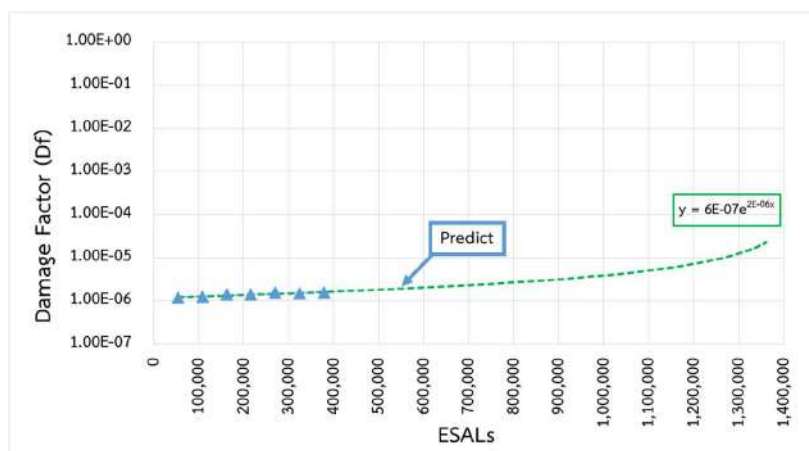
เมื่อ

ϵ_{ac} = ความเครียดแนวราบใต้ชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Microstrain)

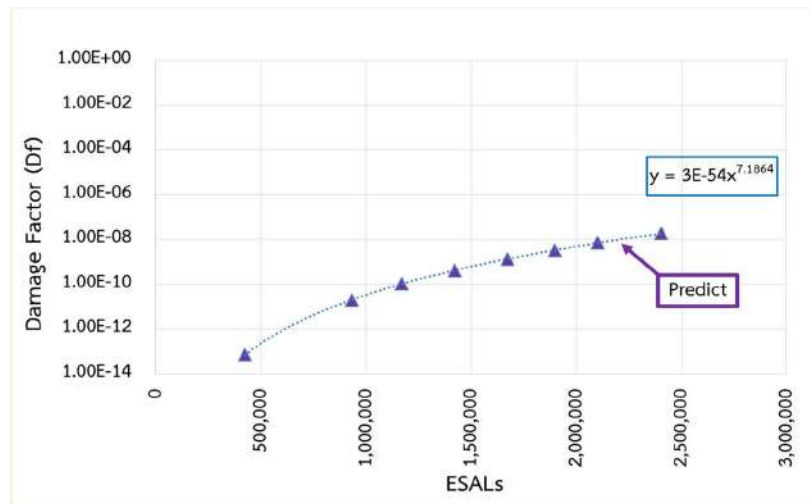
ESAL = จำนวนเพลามาตรฐานสะสม

M_{base} = ปริมาณความชื้นของพื้นทาง

T_{ac} = อุณหภูมิของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (°C)



รูปที่ 11.11 แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 11.12 แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

➤ ข้อเสนอแนะในการเก็บข้อมูลในระยะยาว

การตรวจวัดติดตามพฤติกรรมของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางจำนวน 2 แปลงและถนนคอนกรีตจำนวน 1 แปลงของการศึกษาควรดำเนินการควบคู่ไปกับการทดสอบด้วยเครื่องมือ 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 และผลกระทบของการศึกษา

การศึกษาตรวจวัดอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง มีผลผลิต (Output) ผลลัพธ์ (Outcome) และผลกระทบ (Impact) ที่เป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง (Stake Holders) ทั้งในส่วนของหน่วยงานในสังกัดของกรมทางหลวง และหน่วยงานภายนอกประกอบด้วยกรมทางหลวงชนบท กรมโยธาธิการและผังเมือง กรมการขนส่งทางบก สถาบันการศึกษา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย รวมถึงหน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้องด้านวิศวกรรมงานทางและการกำหนดนโยบายด้านคมนาคมขนส่ง โดยผลการศึกษาสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาปรับปรุงการออกแบบโครงสร้างทาง การวิเคราะห์อำนาจการทำลายของรถบรรทุกทุกประเทศไทย การวิเคราะห์ค่าเสื่อมของทางหลวงและโทษปรับของรถบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัด การวิเคราะห์ค่าธรรมเนียมการใช้ทางพิเศษและค่าธรรมเนียมการใช้ทางของรถบรรทุกจากต่างประเทศ การยกระดับการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างทาง และการทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงเพื่อใช้สนับสนุนการตัดสินใจในการวางแผนซ่อมบำรุงทางให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีรายละเอียดดังแสดงตามรูปที่ 12.1

ผลผลิตของการศึกษา (Output)

การศึกษาตรวจวัดอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง มีผลผลิต (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) ก.ม. 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) การทดสอบด้วยรถบรรทุกในสถานะควบคุม

โดยการทดสอบด้วยรถบรรทุกจริงที่ทราบค่าน้ำหนักบรรทุกที่แน่นอนของเพลาล้อเดี่ยว เพลาล้อคู่ ล้อคู่ เพลาล้อคู่ และสามเพลาล้อคู่ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์อำนาจการทำลายของรถบรรทุกทุกประเทศไทยและศึกษาผลกระทบของความเร็วรถบรรทุกต่อความเค้นและความเครียดในโครงสร้างชั้นทาง

3) การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎี

โดยการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดจริงกับผลการวิเคราะห์โดยตามหลักทฤษฎีที่กรมทางหลวงใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างทางประกอบด้วย Boussinesq's Theory, Odemark's Method of Equivalent Thickness, Burmister's Multi-layer (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

ผลลัพธ์ของการศึกษา (Outcome)

การศึกษาตรวจวัดอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง มีผลลัพธ์ (Outcome) ที่เกิดจากการสังเคราะห์ข้อมูลผลผลิตดังต่อไปนี้

1) อำนาจการทำลาย (LEF) ของรถบรรทุกทุกประเทศไทยจากผลการตรวจวัด

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

2) ผลกระทบของความเร็วยานรถบรรทุกต่ออำนาจการทำลายโครงสร้างถนน

จากผลการทดสอบด้วยรถบรรทุกในสภาวะควบคุมของเพลาเดี่ยวล้อเดี่ยว เพลาเดี่ยวล้อคู่ เพลาคู่ล้อคู่ และสามเพลาล้อคู่ พบว่าค่าความเค้นและความเครียดในชั้นโครงสร้างทางมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเร็วของรถบรรทุกลดลง โดยมีค่าความเค้นและความเครียดสูงสุดเมื่อรถจอดหยุดนิ่ง ดังนั้นรถบรรทุกจะมีอำนาจการทำลายสูงในช่วงที่รถต้องชะลอความเร็วหรือจอดหยุดนิ่ง

3) ผลการตรวจวัดความเครียดใต้ผิวทางสูงกว่าผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎี

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยรถบรรทุกในสภาวะควบคุมกับผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎีพบว่าค่าความเค้นและความเครียดจากการตรวจวัดจริงสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎี ยกเว้นเฉพาะค่าความเครียดใต้ผิวทางที่ตรวจวัดได้จริงจะมีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ตามหลักทฤษฎีประมาณ 2.5 เท่า สาเหตุส่วนหนึ่งเนื่องจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีมักสมมติว่าวัสดุเป็นอีลาสติกแต่วัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างผิวทางนั้นมีลักษณะหนืด นอกจากนั้นผลการทดสอบค่าโมดูลัสจริงยังต่ำกว่าค่าโมดูลัสที่ใช้ในการออกแบบ

4) แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง

คณะผู้วิจัยใช้ค่าความเครียดใต้ชั้นผิวทางจากการตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์ค่า Number of Load Repetition to Fatigue Failure (Nf) และความเครียดเหนือดินฐานราก Subgrade เพื่อวิเคราะห์ Number of Load Repetition to Rutting Failure (Nr) รวมถึงการวิเคราะห์ Damage Factor ของถนนลาดยางในระยะยาวอย่างต่อเนื่องเพื่อพัฒนาแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการของถนนลาดยาง ในส่วนของของถนนคอนกรีตคณะผู้วิจัยใช้ค่าความเค้นใต้ชั้นผิวทางในการวิเคราะห์ค่า Number of Load Repetition to Fatigue Failure (Nf) และ Damage Factor ในการทำนายสมรรถนะและอายุบริการของถนนคอนกรีต

ผลกระทบของการศึกษา (Impact)

การศึกษาตรวจวัดอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง มีผลกระทบ (Impact) ที่หน่วยงานสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างถนน การวิเคราะห์ค่าเสื่อมและค่าธรรมเนียมการใช้ทาง และการกำหนดนโยบายด้านคมนาคมขนส่งทางถนนดังต่อไปนี้

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ

- นำค่าอำนาจการทำลาย (LEF) ของรถบรรทุกทุกประเทศไทยไปใช้ปรับมูลค่า Truck Factor ในการออกแบบโครงสร้างทางและนำผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นไปใช้ปรับปรุงแนวทางการออกแบบโครงสร้างทาง
- ปรับปรุงค่าโมดูลัสที่ใช้ในการออกแบบให้สอดคล้องตามคุณภาพวัสดุในปัจจุบัน

สำนักงานควบคุมน้ำหนักและยานพาหนะ

- นำค่าอำนาจการทำลาย (LEF) ของรถบรรทุกทุกประเทศไทยไปใช้ในการวิเคราะห์โทษปรับของรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกินพิกัด
- ปรับปรุงโครงสร้างถนนช่วงทางเข้าสถานีตรวจสอบน้ำหนักให้มีความแข็งแรงทนทานเป็นพิเศษ

สำนักแผนงาน

- วิเคราะห์ค่าเสื่อมของทางหลวงเพื่อประเมินค่าธรรมเนียมการใช้ทางหลวงพิเศษและค่าใช้ทางของรถบรรทุกจากต่างประเทศ

กองทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง

- วิเคราะห์ค่าเสื่อมของทางหลวงเพื่อประเมินค่าธรรมเนียมการใช้ทางหลวงพิเศษ
- ปรับปรุงโครงสร้างถนนช่วงหน้าด่านเก็บค่าธรรมเนียมให้มีความแข็งแรงทนทานเป็นพิเศษ

สำนักสำรวจและออกแบบ

- ออกแบบโครงสร้างถนนช่วงที่รถบรรทุกชะลอความเร็วให้มีความแข็งแรงทนทานเป็นพิเศษ

สำนักบริหารบำรุงทาง

- ปรับปรุงโครงสร้างถนนช่วงที่รถบรรทุกชะลอความเร็ว เช่น ช่วงทางแยก ทางลาดชัน ให้มีความแข็งแรงทนทานเป็นพิเศษ
- นำแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงไปใช้ในการพัฒนาปรับปรุงงานบำรุงทาง

สำนักมาตรฐานและประเมินผล

- เพิ่มรายการทดสอบค่าโมดูลัสเพื่อควบคุมคุณภาพระหว่างการก่อสร้างทางหลวงและเมืองงานก่อสร้างแล้วเสร็จ

สำนักก่อสร้างทางที่ 1 และ 2

- ดำเนินการทดสอบค่าโมดูลัสเพื่อควบคุมคุณภาพระหว่างการก่อสร้างทางหลวง

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง

- ศึกษาวิจัยเพื่อทบทวนค่าโมดูลัสที่ใช้ในการออกแบบให้สอดคล้องตามคุณภาพวัสดุในปัจจุบัน

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

กรมทางหลวงชนบท

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

กรมโยธาธิการและผังเมือง

- นำผลการศึกษาไปใช้ปรับปรุงการออกแบบโครงสร้างถนนท้องถิ่น

กรมการขนส่งทางบก

- นำผลการศึกษาไปใช้ในการกำหนดนโยบายความร่วมมือและอัตราค่าธรรมเนียมในการขนส่งทางถนนระหว่างประเทศ

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร

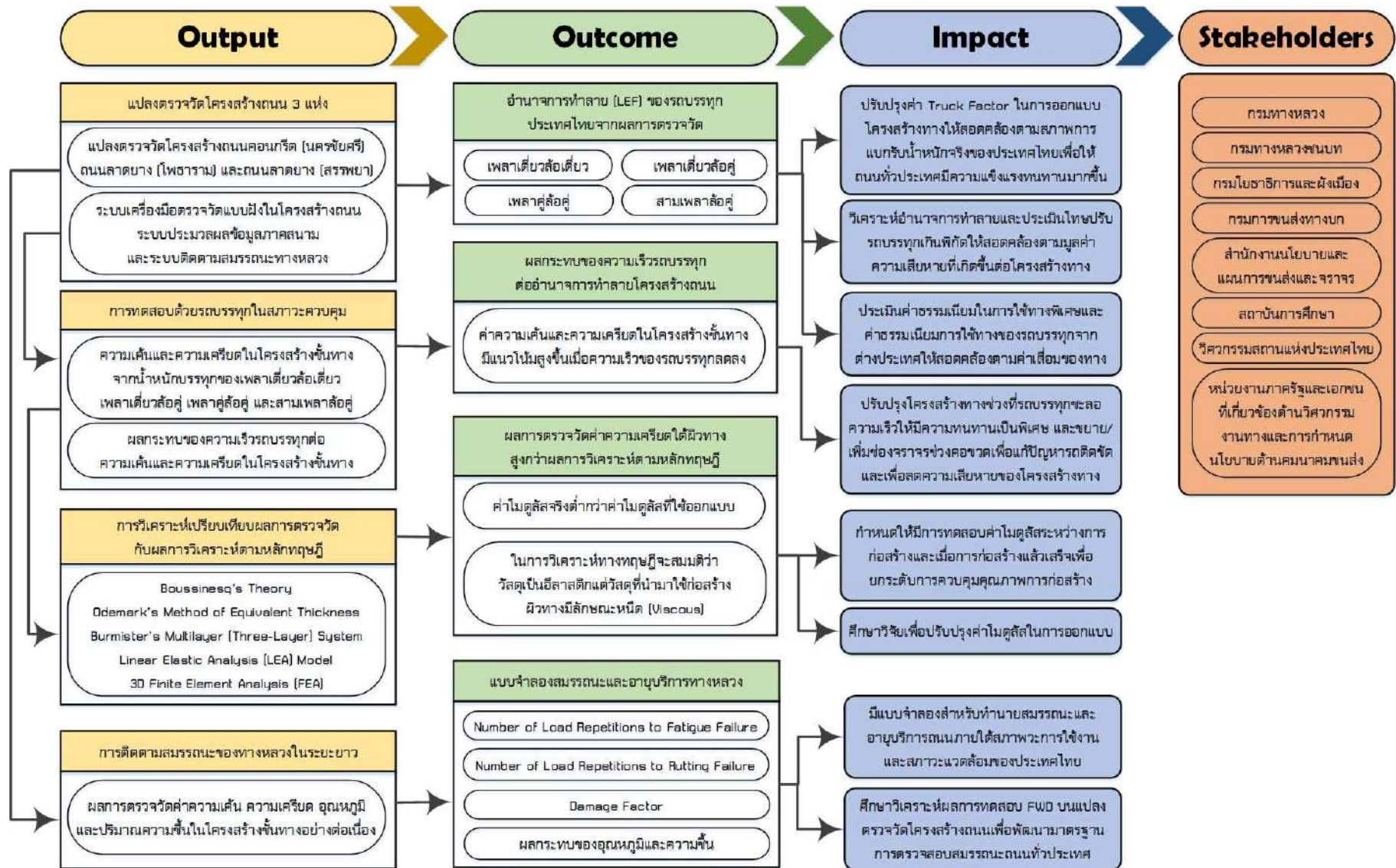
- นำผลการศึกษาไปใช้ในการกำหนดนโยบายการลงทุนด้านการคมนาคมขนส่งทางถนนและการกำหนดกรอบค่าธรรมเนียมการใช้ทางของประเทศไทย

สถาบันการศึกษา

- นำผลการศึกษาไปใช้ในการศึกษาวิจัยต่อยอดเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมงานทางของประเทศไทย

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

- นำผลการศึกษาไปใช้ในการกำหนดมาตรฐานและการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างถนน



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

13. เอกสารอ้างอิง

- 1) อัครพัฒน์ สว่างสุรีย์ และ ธนภฤต เพือกทอง (2555), แนวทางการประเมินความแข็งแรงและอายุการใช้งานของโครงสร้างชั้นทางภายหลังการก่อสร้างหรือบูรณะทางหลวง, วารสารทางหลวง ปีที่ 49 ฉบับที่ 6.
- 2) AASHTO (1986), The AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D.C.
- 3) AASHTO (1993), The AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D.C.
- 4) Al-Qadi, I., Loulizi, A., Elseifi, M., and Lahouar, S. (2004), The Virginia smart road: the impact of pavement instrumentation on understanding pavement performance. Asphalt Paving Technology, Association of Asphalt Paving Technologists, 73, 427-465.
- 5) Alavi, A. H., Hasni, H., Lajnef, N., Chatti, K. (2016), Continuous health monitoring of pavement systems using smart sensing technology, Construction and Building Materials, 114, 719-736.
- 6) Asphalt Institute (1981), Thickness Design-Asphalt Pavement for Highways & Streets, Manual Series No.1.
- 7) Bao, Y., Tang, F., Chen, Y., Meng, W., Huang, Y., Chen, G. (2016), Concrete pavement monitoring with PPP-BOTDA distributed strain and crack sensors, Smart structures and systems, 18 (3), 405-423.
- 8) Barksdale, R. (1971), Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing, Highway Research Record, 34, 32-44.
- 9) Barrett, W. and Timm, D. (2005), Theoretical vs measured pavement responses under dynamic loading, 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Trondheim, Norway.
- 10) Bayat, A., Knight, M., and Soleymani, H. (2012), Field monitoring and comparison of thermal- and load-induced strains in asphalt pavement, International Journal of Pavement Engineering, 13 (6), 508-514.
- 11) Bayomy, F. and Salem, H. (2005), Monitoring and modeling subgrade soil moisture for pavement design and rehabilitation in Idaho phase III: data collection and analysis prepared for Idaho transportation department, NIATT project no. KLK 459 (ITD Project No. SPR-0010(27), 124.
- 12) Brown, S. F. (1996). Soil mechanics in pavement engineering, Geotechnique 46, No. 3, 383-426
- 13) Brown, R., Borst, M., and O'Connor, T. (2012), Analysis of instrumentation selection and placement to monitor the hydrologic performance of permeable pavement systems and bio-infiltration areas at the Edison Environmental Center in New Jersey, World Environmental and

Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries, Proceedings of the 2012 Congress, 223-234.

- 14) Chen, D.-H., Bilyeu, J., and Hugo, F. (1999), Monitoring pavement response and performance using in situ instrumentation, ASTM Special Technical Publication, 1358, 121-134.
- 15) Chen, D.-H. and Murphy, M. (1996), Analysis of pavement structural responses using in-situ instrumentation, Proceedings of Engineering Mechanics, 2, 705-708.
- 16) Cygas, D., Laurinavičius, A., Vaitkus, A., and Perveneckas, Z. (2014), Long term monitoring of performance characteristics of the pavement test track, Advanced Materials Research, 853, 229-234.
- 17) Diefenderfer, B., Al-Qadi, I., and Loulizi, A. (2000), Laboratory calibration and in situ measurements of moisture by using time-domain reflectometry probes, Transportation Research Record, 1699, 142-150.
- 18) Elseifi, M., Mohammad, L., King Jr., W., and Zhang, Z. (2012), Assessment of stress and strain instrumentation in accelerated-pavement testing, International Journal of Pavement Research and Technology, 5(2), 121-127.
- 19) Erlingsson, S., Ahmed, A.W. (2013) Fast layered elastic response program for the analysis of flexible pavement structures, Road Materials and Pavement Design, 14 (1), pp. 196-210.
- 20) Goulias, D., Kim, H., and Schwartz, C. (2011), Evaluation of in situ pavement material properties and behavior through field instrumentation and load testing, Journal of Transportation Engineering, 137 (7), 466-473.
- 21) Guide for mechanistic-empirical pavement design of new and rehabilitated pavement structures (2004), Final Report NCHRP 1-37A
- 22) Han, Z., Vanapalli, S. K. (2016) Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils, Engineering Geology, 211, pp. 85-97.
- 23) Holmquist, D., (1998), Development of pavement design concepts prepared for metropolitan government pavement engineers council, Job no. 24, 442.
- 24) Huang, Y. H. (2004), Pavement Analysis and Design Second Edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- 25) Islam, R. and Tarefder, R. (2013), Measuring thermal effect in the structural response of flexible pavement based on field instrumentation, International Journal of Pavement Research and Technology, 6 (4), 274-279.

- 26) Leandri, P., Bacci, R., Di Natale, A., Rocchio, P., and Losa, M. (2013), Appropriate and reliable use of pavement instrumentation on in-service roads, *Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements*, Proceedings of the 2013 Airfield and Highway Pavement Conference, 1424-1433.
- 27) Leiva-Villacorta, F. and Timm, D. (2011), Effects of asphalt pavement instrumentation on in situ density, *T and DI Congress 2011: Integrated Transportation and Development for a Better Tomorrow*, Proceedings of the First Congress of the Transportation and Development Institute, ASCE, 607-616.
- 28) Loulizi, A., Al-Qadi, I., Lahouar, S., and Freeman, T. (2002), Measurement of vertical compressive stress pulse in flexible pavements: representation for dynamic loading tests, *Transportation Research Record*, 1816, 125-136.
- 29) Maadani, O., Abd El Halim, A.O., and Mostafa, N. (2015), Instrumentation for monitoring pavement performance in cold regions, *Journal of Cold Regions Engineering*, 29 (4).
- 30) Okamoto, P. and Tayabji, S. (1995), Instrumentation and evaluation of prestressed pavement section in Pennsylvania, *Transportation Research Record*, 1505, 103-111.
- 31) Rada, Gonzalo R., Lopez Jr., Aramis, Elkins, Gary E., Richter, Cheryl A., Henderson, Brandt (1994), Long-term pavement performance seasonal monitoring program: instrumentation selection and installation, *Transportation Research Record*, 1432, 32-43.
- 32) Rilett, L. and Hutchinson, B. (1988), LEF estimation from CANROAD pavement load-deflection data.
- 33) Rollings, R. and Pittman, D. (1992), Field Instrumentation and Performance Monitoring of Rigid Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 118(3), 361–370.
- 34) Rys, D., Judycki, J., and Jaskula, P. (2016), Determination of vehicles load equivalency factors for polish catalogue of typical flexible and semi-rigid pavement structures, *Transportation Research Procedia*, 14, 2382–2391.
- 35) Saevarsdottir, T., Erlingsson, S. (2016) Deformation Modelling of Instrumented Flexible Pavement Structure, *Procedia Engineering*, 143, pp. 937-944.
- 36) Sargand, S. (1994), Development of an instrumentation plan for the Ohio SPS test pavement. Final Report.
- 37) Sargand, S., Khoury, I., Morrison, J. (2012), Monitoring and modeling of pavement response and performance: Task B, Volume 1, I-490, RT-9a, and I-86 AC pavement, New York.

- 38) Sebaaly, P. and Tabatabaee, N. (1992), Effect of tire parameters on pavement damage and load equivalency factors, *Journal of Transportation Engineering*.
- 39) Tabatabaee, N., Al-Qadi, I.L., Sebaaly, P.E. (1992), Field evaluation of pavement instrumentation methods, *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM, 20 (2), 144-151.
- 40) Timm, D., Priest, A., and Mcewen, T. (2004), Design and instrumentation of the structural pavement experiment at the NCAT test track. NCAT report 04-01, Alabama, USA
- 41) Timm, D, Priest, A. (2007) Utilization of embedded pavement instrumentation to validate material characterization in backcalculation, *Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials - Proceedings of the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials*, 1, 833-841.
- 42) Uzarowski, L., Moore, G., and Henderson, V. (2012), Instrumentation in Red Hill Valley parkway providing data for long term pavement management, *TAC Conference and Exhibition-Transportation: Innovations and Opportunities*, TAC/ATC.
- 43) Vanapalli, S.K., Han, Z. (2014) Application of the unsaturated soil mechanics in the design of pavements, *Unsaturated Soils: Research and Applications - Proceedings of the 6th International Conference on Unsaturated Soils*, UNSAT 2014, 2, 1799-1805.
- 44) Yin, H. (2013), The impact of strain gage instrumentation on localized strain responses in asphalt concrete pavements, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(3), 225-234.
- 45) Zhao, H., Wu, C., Wang, X., and Zheng, Y. (2014), Pavement condition monitoring system at Shanghai Pudong international airport, *Geotechnical Special Publication*, 239, 283-295.