



รายงานฉบับที่ วพ. 317

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง

REPORT NO. RD. 317 BUREAU OF ROAD RESEARCH AND DEVELOPMENT

การวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้าง

ถนนลาดยาง

Structural Performance Analysis and Evaluation of
Flexible Pavement

โดย

ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์

ธีรภัทร์ ศิริรัตนฉัตร

दनัยณัฐ ถาวร

สุรนนท์ เยื่อรงค์

และ

อรรถพล หายทุกข์

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

DEPARTMENT OF HIGHWAYS, MINISTRY OF TRANSPORT

RATCHATHEWI, BANGKOK 10400, THAILAND

การวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้าง

ถนนลาดยาง

Structural Performance Analysis and Evaluation of
Flexible Pavement

โดย

ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์

ธีรภัทร์ ศิริรัตนฉัตร

दनัยณัฐ ถาวร

สุรนนท์ เยื้องยงค์

และ

อรรถพล หายทุกข์

รายงานฉบับที่ วพ. 317

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง

กรมทางหลวง

กรกฎาคม 2566

ISSN 0125-8044

รายงานนี้เป็นแนวความคิดของผู้เขียนเท่านั้น กรมทางหลวงไม่มีส่วนผูกพันแต่อย่างใด

คำนำ

รายงานการวิจัยฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง โดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) บนทางหลวงสายหลักของประเทศไทย เพื่อพัฒนาดัชนีชี้วัดคุณภาพด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยางสำหรับกรมทางหลวง รวมถึงข้อมูลผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบสมัยใหม่ และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนนสำหรับการจัดทำแผนซ่อมบำรุงและบูรณะปรับปรุงทางหลวงในอนาคต

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานการวิจัยฉบับนี้จะนำไปต่อยอดและขยายผลในวงกว้าง เพื่อเป็นประโยชน์ต่อวงการวิศวกรรมงานทางโดยเฉพาะการวิเคราะห์สมรรถนะด้านความแข็งแรงและการพัฒนาแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพโครงสร้างถนนลาดยางของกรมทางหลวงอย่างมีประสิทธิภาพและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น สอดคล้องกับสภาพการใช้งานตามบริบทของประเทศไทย


(นายสรารัฐ ทรงศิริไล)

อธิบดีกรมทางหลวง

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญภาพ	ง
สารบัญตาราง	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 สมมติฐานที่ใช้ในการวิจัย	3
บทที่ 2 การศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สมรรถนะของโครงสร้างถนน	4
2.2 การประเมินสมรรถนะด้านโครงสร้างถนน	6
2.3 การวิเคราะห์หัตถ์ชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน	14
บทที่ 3 อุปกรณ์และแผนการศึกษา	22
3.1 อุปกรณ์	22
3.2 แผนการวิจัย	24
3.3 ขั้นตอนการวิจัย	25
3.4 รายละเอียดของแปลงทดสอบ	30
3.5 วิธีการวิเคราะห์	32
บทที่ 4 ผลการศึกษา	34
4.1 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของชั้นโครงสร้างทาง ที่ได้จากการทดสอบด้วย เครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน	48
4.3 ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) และ ค่าดัชนีความแข็งแรง (Structural Condition Index, SCI)	57
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุป	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก ก แบบรูปตัดชั้นโครงสร้างทาง	68
ภาคผนวก ข ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT)	85
ภาคผนวก ค ค่า Deflection ของชั้นโครงสร้างทางที่ได้จากการทดสอบด้วย เครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD	96

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1	กรอบแนวคิดของการวิจัย 3
ภาพที่ 2.1	วงจรชีวิตสมรรถนะของโครงสร้างถนน (Pavement Performance Life Cycle) 4
ภาพที่ 2.2	รูปตัดทั่วไปของโครงสร้างถนนลาดยาง 7
ภาพที่ 2.3	การแอ่นตัวของผิวทางภายใต้แรงกระทบจากเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) 9
ภาพที่ 2.4	แสดงการเสื่อมสภาพระดับการให้บริการและความแข็งแรงของโครงสร้าง ถนนตามปริมาณจราจรและการยืดอายุการใช้งาน 11
ภาพที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์โครงสร้างชั้นทาง (Condition Factor) กับร้อยละของอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ (Remaining Life) 12
ภาพที่ 2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง (Condition Factor) กับอายุการใช้งานคงเหลือ (Remaining Life) ตาม AASHTO (1993) 13
ภาพที่ 2.7	ค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD บนโครงสร้างถนน 20
ภาพที่ 3.1	เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) 23
ภาพที่ 3.2	เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) 24
ภาพที่ 3.3	ขั้นตอนการวิจัย 25
ภาพที่ 3.4	พื้นที่ศึกษา 26
ภาพที่ 3.5	การทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD 29
ภาพที่ 3.6	รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 1 30
ภาพที่ 3.7	รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 2 31
ภาพที่ 3.8	รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 3 31
ภาพที่ 3.9	รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 4 32
ภาพที่ 4.1	ค่าการแอ่นตัวของ ทล.323 ตอน 100 ชื่อย่อตอน หนองตะแคง - ลูกแก บริเวณ กม.4+900 - กม. 5+150 (บริเวณสถานีบ้านโป่ง) 35
ภาพที่ 4.2	ค่าการแอ่นตัวของ ทล.117 ตอน 100 ชื่อย่อตอน นครสวรรค์ - คลองพลังด่านใต้ บริเวณ กม. 24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีเก้าเลี้ยว) 35

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ 4.3	ค่าการแอ่นตัวของ ทล.2 ตอน 202	36
	ชื่อตอน บ่อทอง - มอจะบก บริเวณ กม. 94+950 - กม. 95+200 (บริเวณสถานีสี่คิ้ว)	
ภาพที่ 4.4	ค่าการแอ่นตัวของ ทล.35 ตอน 301	36
	ชื่อตอน นาโคก - แพรกหนามแดง บริเวณ กม.54+000 - กม. 54+250 (บริเวณ สถานีสมุทรสาคร)	
ภาพที่ 4.5	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคกลาง	38
ภาพที่ 4.6	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคกลาง	38
ภาพที่ 4.7	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบสถานีโพธาราม	39
ภาพที่ 4.8	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบสถานีโพธาราม	39
ภาพที่ 4.9	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก	40
ภาพที่ 4.10	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก	40
ภาพที่ 4.11	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบ ภาคเหนือตอนล่าง	41
ภาพที่ 4.12	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบ ภาคเหนือตอนล่าง	41
ภาพที่ 4.13	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	42
ภาพที่ 4.14	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	42
ภาพที่ 4.15	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคใต้	43
ภาพที่ 4.16	อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคใต้	43
ภาพที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 1	45
ภาพที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 2	45

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 3	46
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 4	46
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบทั้ง 4 ประเภท	47
ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{p,ES}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ และ FWD $E_{p,Back}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ ในแปลงทดสอบประเภทที่ 1	49
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{p,ES}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ และ FWD $E_{p,Back}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ ในแปลงทดสอบประเภทที่ 2	50
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{p,ES}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ และ FWD $E_{p,Back}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ ในแปลงทดสอบประเภทที่ 3	51
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{p,ES}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ และ FWD $E_{p,Back}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ ในแปลงทดสอบประเภทที่ 4	52
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{p,ES}$ กับ LWD $E_{p,Back}$ และ FWD $E_{p,ES}$ กับ LWD $E_{p,Back}$ ในแปลงทดสอบทั้ง 4 ประเภท	53
ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ ($E_{p,Eq}$) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{p, Back}$) แปลงทดสอบประเภทที่ 1	54
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ $E_{p,Eq}$ กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{p, Back}$) แปลงทดสอบประเภทที่ 2	55
ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ $E_{p,Eq}$ กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{p, Back}$) แปลงทดสอบประเภทที่ 4	55

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ 4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ $E_{P,Eq}$ กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{P, Back}$) แปลงทดสอบประเภทที่ 3	56
ภาพที่ 4.31	ค่า MR ของพื้นที่ศึกษาภาคกลาง	57
ภาพที่ 4.32	ค่า SCI ของพื้นที่ศึกษาภาคกลาง	58
ภาพที่ 4.33	ค่า MR ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออก	59
ภาพที่ 4.34	ค่า SCI ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออก	59
ภาพที่ 4.35	ค่า MR ของพื้นที่ศึกษาภาคเหนือตอนล่าง	60
ภาพที่ 4.36	ค่า SCI ของพื้นที่ศึกษาภาคเหนือตอนล่าง	60
ภาพที่ 4.37	ค่า MR ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	61
ภาพที่ 4.38	ค่า SCI ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	61
ภาพที่ 4.39	ค่า MR ของพื้นที่ศึกษาภาคใต้	62
ภาพที่ 4.40	ค่า SCI ของพื้นที่ศึกษาภาคใต้	62
ภาพที่ ก1	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.35 ตอน 301 ชื่อตอน นาโคก – แพรกหนามแดง บริเวณ กม.54+000 - กม. 54+250 (บริเวณสถานีสมุทรสาคร)	69
ภาพที่ ก2	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.3 ตอน 104 ชื่อตอน บางตำหรุ – คลองด่าน บริเวณ กม.54+250 - กม. 54+500 (บริเวณสถานีชลบุรี)	70
ภาพที่ ก3	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.36 ตอน 201 ชื่อตอน มะขามคู่ – มาบข่า บริเวณ กม.28+575 - กม. 28+825 (บริเวณสถานีระยอง)	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ ก4	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.331 ตอน 103 ชื่อตอน พันเสด็จนอก - หนองปรือ บริเวณ กม.47+050 - กม. 47+300 (บริเวณสถานีศรีราชา)	72
ภาพที่ ก5	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.117 ตอน 100 ชื่อตอน นครสวรรค์ - คลองพลังด้านใต้ บริเวณ กม.24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีเก้าเลี้ยว)	73
ภาพที่ ก6	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 801 ชื่อตอน หางน้ำหนองแถม - บ้านหว่า บริเวณ กม.308+300 - กม. 308+550 (บริเวณสถานีพยุหะคีรี)	74
ภาพที่ ก7	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 804 ชื่อตอน วังไผ่ - โนนปอแดง บริเวณ กม.379+950 - กม. 380+200 (บริเวณสถานีบรรพตพิสัย)	75
ภาพที่ ก8	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 902 ชื่อตอน ปากดง - นครชุม บริเวณ กม.440+750 - กม. 441+000 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร)	76
ภาพที่ ก9	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.2 ตอน 102 ชื่อตอน ตาลเดี่ยว - ชับบอน บริเวณ กม.17+750 - กม. 18+000 (บริเวณสถานีแก่งคอย)	77
ภาพที่ ก10	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.2 ตอน 301 ชื่อตอน นครราชสีมา - ดอนหวาย บริเวณ กม.168+750 - กม. 169+000 (บริเวณสถานีโนนสูง)	78
ภาพที่ ก11	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.2 ตอน 402 ชื่อตอน พล - บ้านไผ่ บริเวณ กม.268+100 - กม. 268+350 (บริเวณสถานีพล)	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ ก12	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.24 ตอน 302 ชื่อตอน หนองกี่ - นางรอง บริเวณ กม.98+750 - กม. 99+000 (บริเวณสถานีหนองกี่)	80
ภาพที่ ก13	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.4 ตอน 502 ชื่อตอน เขาวัง - สระพระ บริเวณ กม.170+750 - กม. 171+000 (บริเวณสถานีท่ายาง)	81
ภาพที่ ก14	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.323 ตอน 100 ชื่อตอน หนองตะแครง - ลูกแก บริเวณ กม.4+900 - กม. 5+150 (บริเวณสถานีบ้านโป่ง)	82
ภาพที่ ก15	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.4 ตอน 603 ชื่อตอน หนองหมู - ห้วยยาง บริเวณ กม.304+750 - กม. 305+000 (บริเวณสถานีประจวบคีรีขันธ์)	83
ภาพที่ ก16	แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.4 ตอน 703 ชื่อตอน วังครก - เสียบุญวัน บริเวณ กม.473+500 - กม. 473+750 (บริเวณสถานีท่าแซะ)	84
ภาพที่ ค1	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.32 ตอน 400 ชื่อตอน โพนางดำออก - ท่าฉนวน บริเวณ กม.119+800 - กม. 120+050 (บริเวณ สถานีสรรพยา)	97
ภาพที่ ค2	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 302 ชื่อตอน คลองอีจาง - หลุมดิน บริเวณ กม.88+570 - กม. 88+745 (บริเวณสถานีโพธาราม ล้อซ้าย)	97
ภาพที่ ค3	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 302 ชื่อตอน คลองอีจาง - หลุมดิน บริเวณ กม.88+570 - กม. 88+745 (บริเวณสถานีโพธาราม ล้อขวา)	98

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ ค4	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.35 ตอน 301 ชื่อตอน นาโคก – แพรกหนามแดง บริเวณ กม.54+000 - กม. 54+250 (บริเวณสถานีสมุทรสาคร)	98
ภาพที่ ค1	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.32 ตอน 400 ชื่อตอน โพนางดำออก – ท่าฉนวน บริเวณ กม.119+800 - กม. 120+050 (บริเวณ สถานีสรรพยา)	97
ภาพที่ ค2	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 302 ชื่อตอน คลองอีจาง - หลุมดิน บริเวณ กม.88+570 - กม. 88+745 (บริเวณสถานีโพธาราม ล้อซ้าย)	97
ภาพที่ ค3	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 302 ชื่อตอน คลองอีจาง - หลุมดิน บริเวณ กม.88+570 - กม. 88+745 (บริเวณสถานีโพธาราม ล้อขวา)	98
ภาพที่ ค4	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.35 ตอน 301 ชื่อตอน นาโคก – แพรกหนามแดง บริเวณ กม.54+000 - กม. 54+250 (บริเวณสถานีสมุทรสาคร)	98
ภาพที่ ค5	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.3 ตอน 104 ชื่อตอน บางตำหรุ – คลองด่าน บริเวณ กม.54+250 - กม. 54+500 (บริเวณสถานีชลบุรี)	99
ภาพที่ ค6	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.36 ตอน 201 ชื่อตอน มะขามคู่ – มาบข่า บริเวณ กม.28+575 - กม. 28+825 (บริเวณสถานีระยอง)	99
ภาพที่ ค7	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.331 ตอน 103 ชื่อตอน พันเสด็จนอก – หนองปรือ บริเวณ กม.47+050 - กม. 47+300 (บริเวณสถานีศรีราชา)	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ ค8	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.33 ตอน 701 ชื่อตอน พระปรัง - โนนจิก บริเวณ กม.267+000 - กม. 267+250 (บริเวณสถานีวัฒนานคร)	100
ภาพที่ ค9	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.117 ตอน 100 ชื่อตอน นครสวรรค์ - คลองพลังด้านใต้ บริเวณ กม.24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีเก้าเสี้ยว)	101
ภาพที่ ค10	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 801 ชื่อตอน ทางน้ำหนองแวม - บ้านหว่า บริเวณ กม.308+300 - กม. 308+550 (บริเวณสถานีพยุหะคีรี)	101
ภาพที่ ค11	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 804 ชื่อตอน วังไผ่ - โนนปอแดง บริเวณ กม.379+950 - กม. 380+200 (บริเวณสถานีบรรพตพิสัย)	102
ภาพที่ ค12	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 902 ชื่อตอน ปากดง - นครชุม บริเวณ กม.440+750 - กม. 441+000 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร ขาเข้า)	102
ภาพที่ ค13	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 902 ชื่อตอน ปากดง - นครชุม บริเวณ กม.440+000 - กม. 441+250 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร ขาออก)	103
ภาพที่ ค14	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 102 ชื่อตอน ตาลเดี่ยว - ชับบอน บริเวณ กม.17+750 - กม. 18+000 (บริเวณสถานีแก่งคอย)	103
ภาพที่ ค15	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 301 ชื่อตอน นครราชสีมา - ดอนหวาย บริเวณ กม.168+750 - กม. 169+000 (บริเวณ สถานีโนนสูง)	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ ค16	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 202 ชื่อตอน บ่อทอง – มอจะบก บริเวณ กม.94+950 - กม. 95+200 (บริเวณสถานีสีคิ้ว)	104
ภาพที่ ค17	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 402 ชื่อตอน พล – บ้านไผ่ บริเวณ กม.268+100 - กม. 268+350 (บริเวณสถานีพล)	105
ภาพที่ ค18	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.24 ตอน 302 ชื่อตอน หนองกี้ – นางรอง บริเวณ กม.98+750 - กม. 99+000 (บริเวณสถานีหนองกี้)	105
ภาพที่ ค19	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 502 ชื่อตอน เขาวัง – สระพระ บริเวณ กม.170+750 - กม. 171+000 (บริเวณสถานีท่ายาง)	106
ภาพที่ ค20	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.323 ตอน 100 ชื่อตอน หนองตะแครง – ลูกแก บริเวณ กม.4+900 - กม. 5+150 (บริเวณสถานีบ้านโป่ง)	106
ภาพที่ ค21	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 603 ชื่อตอน หนองหมู – ห้วยยาง บริเวณ กม.304+750 - กม. 305+000 (บริเวณสถานีประจวบคีรีขันธ์)	107
ภาพที่ ค22	ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 703 ชื่อตอน วังครก – เสียบญวน บริเวณ กม.473+500 - กม. 473+750 (บริเวณสถานีท่าแซะ)	107

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2.1	ค่า Regression Coefficient สำหรับคำนวณค่า SN_{eff} ตามวิธีของ Rohde (1994) 10
ตารางที่ 2.2	อัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง 14
ตารางที่ 2.3	ค่าโมดูลัสของชั้นโครงสร้างทางที่ใช้ในการออกแบบ 16
ตารางที่ 2.4	ค่าคงที่สมการ (Rohde 1994) 21
ตารางที่ 3.1	พื้นที่ศึกษาวิจัย 28
ตารางที่ ข1	ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคกลาง 86
ตารางที่ ข2	ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออก 87
ตารางที่ ข3	ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคเหนือตอนล่าง 89
ตารางที่ ข4	ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคอีสาน 91
ตารางที่ ข5	ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคใต้ 94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างถนนมีความสำคัญในงานก่อสร้างและบำรุงรักษาทางหลวง กรมทางหลวงมีสายทางในความดูแลรับผิดชอบทั่วประเทศมากกว่า 69,000 กิโลเมตร (ต่อ 2 ช่องจราจร) โดยมีภารกิจหลักด้านวางแผน ออกแบบ ก่อสร้างและบูรณะทางหลวงเพื่อให้บริการประชาชนผู้ใช้ทาง ได้รับความสะดวก รวดเร็ว และปลอดภัยในการเดินทางบนทางหลวง ในการบำรุงรักษาและบูรณะ ทางหลวงนั้น กรมทางหลวงกำหนดสภาพความราบเรียบในการขับขี่หรือค่าดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index, IRI) เฉลี่ยของถนนไม่เกิน 2.0 เมตรต่อกิโลเมตร สำหรับ ถนนลาดยาง และ 2.5 เมตรต่อกิโลเมตรสำหรับถนนคอนกรีต ซึ่งค่า IRI นั้นเป็นเพียงหนึ่งในสมรรถนะ ของโครงสร้างถนน ซึ่งโดยหลักการด้านวิศวกรรมงานทาง สมรรถนะของโครงสร้างถนนประกอบด้วย องค์ประกอบหลัก 4 ด้าน ดังนี้ (1) สมรรถนะด้านการรับน้ำหนัก (2) สมรรถนะด้านความราบเรียบ (3) สมรรถนะด้านสภาพความสมบูรณ์ และ (4) สมรรถนะด้านความผิด

ปัจจุบันแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพโครงสร้างถนนของกรมทางหลวง ประกอบด้วย ค่าความขรุขระผิวทาง ความเสียหายผิวทาง ปริมาณจราจร ความแข็งแรงโครงสร้างทาง สภาพแวดล้อม เป็นต้น เนื่องจากค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางที่กรมทางหลวงใช้อยู่ นั้น เป็นค่าที่ได้จากการ ทดสอบด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam และหรือค่าแนะนำตามช่วงปริมาณจราจร ตามแบบจำลอง ต้นแบบ HDM-4 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวค่อนข้างล้าสมัย ไม่เป็นไปตามสภาพข้อเท็จจริงของประเทศไทย และวิธีการทดสอบยังไม่เป็นปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องพัฒนาดัชนีชี้วัดความแข็งแรง ของโครงสร้างถนนจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ซึ่งเป็น วิธีการทดสอบสากลและเป็นปัจจุบัน เพื่อใช้พัฒนาเป็นเกณฑ์และแบบจำลองทำนายสมรรถนะ ทางหลวงต่อไป

คณะผู้วิจัยตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวและความเป็นไปได้ในการนำข้อมูลผลการทดสอบ FWD ที่ได้จากการสำรวจทางหลวงสายต่างๆ มาวิจัยต่อยอด รวมถึงพิจารณาแนวทางการบูรณาการ ข้อมูลดังกล่าว เพื่อใช้ประโยชน์ร่วมกับหน่วยงานอื่นในสังกัดของกรมทางหลวง อาทิ งานบูรณะและ บำรุงรักษาทางโดยสำนักบริหารบำรุงทาง งานเพิ่มประสิทธิภาพความปลอดภัยให้กับทางหลวงโดย สำนักอำนวยการความปลอดภัย งานวางแผนงบประมาณโดยสำนักแผนงาน เป็นต้น

รายงานการวิจัยฉบับนี้นำเสนอค่าการแอ่นตัวและค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนที่ทดสอบได้จากเครื่องมือ FWD และเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) มาใช้วิเคราะห์ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยางบนทางหลวงสายหลัก ณ ช่วงเวลาต่างๆ ได้แก่ ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio) ค่าดัชนีความแข็งแรง (Structural Condition Index, SCI) เป็นต้น โดยข้อมูลทั้งหมดจะเก็บรวบรวมไว้ในระบบสมรรถนะของโครงสร้างถนน ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง ผลการศึกษานี้จะนำไปสู่การพัฒนาดัชนีชี้วัดคุณภาพด้านความแข็งแรง และแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพของโครงสร้างถนนสำหรับกรมทางหลวงต่อไป

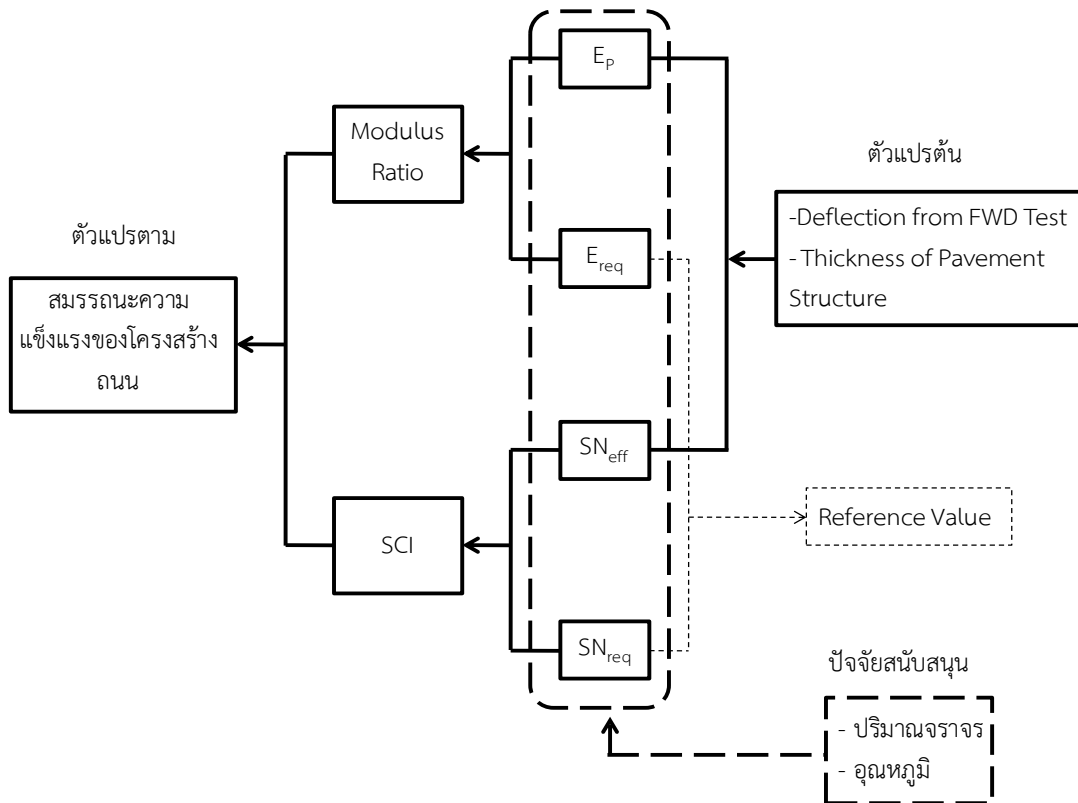
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสำรวจและเก็บข้อมูลสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัว (Deflection) และค่าโมดูลัส (Modulus) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง ณ ช่วงเวลาต่างๆ
- 1.2.4 เพื่อพัฒนาดัชนีชี้วัดคุณภาพด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนนสำหรับกรมทางหลวง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 การทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนน โดยวิธีการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD
- 1.3.2 การประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนนทุก 5 เดือน เป็นอย่างน้อยต่อ 1 พื้นที่คัดเลือก
- 1.3.3 คัดเลือกแปลงทดสอบบนทางหลวงบริเวณใกล้ด่านชั่งน้ำหนัก จำนวน 20 แปลงทดสอบ ซึ่งเป็นเส้นทางหลวงสายหลัก และเป็นโครงข่ายทางหลวงหรือเส้นทางคมนาคมขนส่งสำคัญในพื้นที่ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก ภาคกลาง และภาคใต้
- 1.3.4 วิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบ และค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนนแปลงทดสอบ

1.4 สมมติฐานที่ใช้ในการวิจัย



ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดของการวิจัย

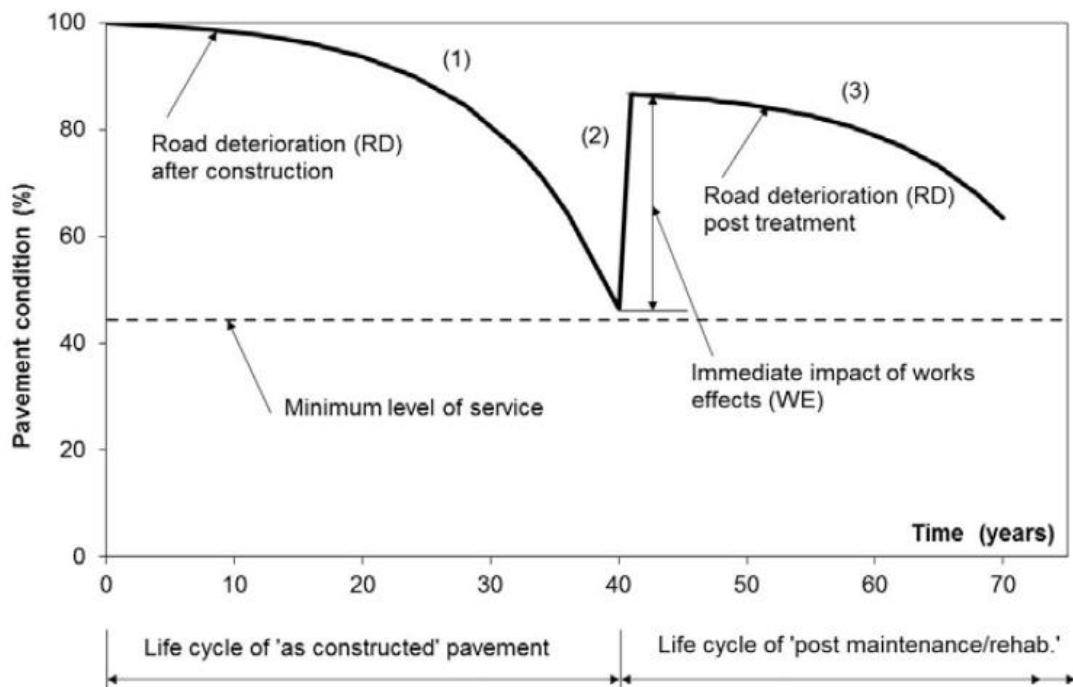
หนึ่งในปัจจัยการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างถนนที่มีความสำคัญต่องานบริหารบำรุงทาง ได้แก่ ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Number Condition) เนื่องจากแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพโครงสร้างถนนที่กรมทางหลวงใช้อยู่ในปัจจุบันค่อนข้างล้าสมัยและไม่ตรงกับสภาพข้อเท็จจริงของประเทศไทย จึงต้องมีการปรับปรุงดัชนีชี้วัดคุณภาพด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนนโดยใช้เครื่องมือ FWD โดยเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน ณ ช่วงเวลาต่างๆ (Existing Index) กับค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ใช้ในการออกแบบ (Design Index)

บทที่ 2

การศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมรรถนะของโครงสร้างถนน

ARR (2018) อธิบายวงจรชีวิตสมรรถนะของโครงสร้างถนน (Pavement Performance Life Cycle) โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา ดังภาพที่ 2.1 ช่วงที่ 1 แสดงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างถนนหลังการก่อสร้างเนื่องจากการใช้งานตามปกติ สมรรถนะของโครงสร้างถนนลดลงตามระยะเวลาการใช้งาน ช่วงที่ 2 แสดงการซ่อมบำรุงปกติ เมื่อโครงสร้างถนนเกิดการเสื่อมสภาพและสมรรถนะของโครงสร้างถนนลดลงจนถึงระดับการให้บริการที่ผู้ใช้ทางจะยอมรับได้ วิธีการซ่อมบำรุงปกตินี้เป็นเพียงการแก้ไขความเสียหายเฉพาะจุด เช่น การปะซ่อมพื้นผิวเพื่อแก้ปัญหาหลุมบ่อ หรือความชำรุดเสียหายบนผิวทาง เป็นต้น ไม่มีการก่อสร้างใหม่ ภายหลังจากซ่อมบำรุง สมรรถนะของโครงสร้างถนนจะดีขึ้นแต่สภาพโครงสร้างถนนอาจไม่เต็มร้อยเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับสภาพโครงสร้างถนนหลังก่อสร้างแล้วเสร็จใหม่ๆ และช่วงที่ 3 แสดงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างถนนตามระยะเวลาการใช้งาน คล้ายกับช่วงที่ 1 แต่อัตราการเสื่อมสภาพ อาจเกิดสูงช่วงแรก



ภาพที่ 2.1 วงจรชีวิตสมรรถนะของโครงสร้างถนน (Pavement Performance Life Cycle)

ในการประเมินทางหลวงสายใดสายหนึ่งว่ามีสมรรถนะของโครงสร้างถนนเพียงพอต่อการรองรับปริมาณจราจร และสภาพแวดล้อมในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง รวมถึงการทำนายการเสื่อมสภาพของโครงสร้างถนนที่จะเกิดขึ้นในอนาคต จำเป็นต้องทำการสำรวจ ประเมิน และตรวจวัดสภาพถนนอย่างต่อเนื่อง โดยพิจารณาตามองค์ประกอบของสมรรถนะของโครงสร้างถนน ดังนี้

2.1.1 สมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

สมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนน คือความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และต้านทานการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนภายใต้สภาพการจราจร โดย AASHO (1962) ได้กำหนดค่า Structural Number (SN) สำหรับการพิจารณากำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างถนน ซึ่งค่า SN แสดงถึงพฤติกรรมในภาพรวมของโครงสร้างถนนอันประกอบด้วยชั้นทางที่มีคุณสมบัติเฉพาะแตกต่างกัน ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนลาดยาง (Flexible Pavement) ขึ้นอยู่กับความสามารถของส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนของโครงสร้างชั้นทาง (Pavement Structure) และส่วนของดินเดิม (Subgrade) หากดินเดิมมีสภาพแข็งแรง ก็สามารถเลือกใช้โครงสร้างชั้นทางที่บางลงได้ ในทางกลับกันหากดินเดิมมีสภาพอ่อนแอ ก็ต้องเลือกใช้โครงสร้างชั้นทางที่มีคุณภาพสูงขึ้น หรือหนาขึ้น

2.1.2 สมรรถนะด้านความราบเรียบในการขับขี่

สมรรถนะด้านความราบเรียบในการขับขี่ คือสภาพความขรุขระของผิวทางที่ผู้ใช้ทางสามารถขับขี่ได้อย่างสะดวกสบาย โดยความขรุขระของผิวทาง (Roughness) หมายถึง ความเปลี่ยนแปลงของผิวทางจากระนาบจริง ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพการขับขี่ (Riding Quality) และคุณภาพการระบายน้ำบนผิวทาง (Pavement Drainage) (ASTM E867-87) เป็นคุณลักษณะสำคัญประการหนึ่งในงานบำรุงรักษาทาง ผิวทางจะต้องมีลักษณะราบเรียบเพื่อให้ผู้ใช้ทางมีความสะดวกสบายในการขับขี่ ลดการเสื่อมสภาพของยานพาหนะ ประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงในการเดินทางและขนส่งสินค้า อีกทั้งยังช่วยลดแรงไดนามิก (Dynamic) จากการจราจรที่กระทำต่อโครงสร้างถนน ทำให้ผิวทางสามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น ลดภาระค่าใช้จ่ายด้านการบำรุงรักษาทาง ทั้งนี้การประเมินคุณลักษณะด้านความขรุขระของผิวทางนิยมใช้ค่าดัชนีความขรุขระสากล หรือ ค่า IRI

2.1.3 สมรรถนะด้านสภาพผิวทาง

สมรรถนะด้านสภาพผิวทาง คือสภาพความเสียหายของผิวทาง โดยการจำแนกรูปแบบประเภทความเสียหาย เพื่อหาสาเหตุของความเสียหาย ระดับความรุนแรงและปริมาณความเสียหาย

โดยสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ ร่วมกับ สำนักบริหารบำรุงทาง กรมทางหลวง ได้จำแนกระดับความรุนแรงของความเสียหายตามคุณภาพการขับขี่ (Riding Quality) ขนาดและปริมาณความเสียหายของผิวทาง เช่น ความกว้าง ความยาวของรอยแตก เป็นต้น ลักษณะการเสื่อมสภาพของผิวทาง เช่น การหลุดล่อนของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ผิวมวลรวมถูกขัดสีเป็นมันของผิวทางถนนแอสฟัลต์คอนกรีต เป็นต้น ระดับความเสียหายแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ เล็กน้อย ปานกลาง และมาก เพื่อจัดลำดับความสำคัญ และวิธีการในการซ่อมบำรุง แก้ไขให้ผิวทางมีคุณภาพที่ดีขึ้นและเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง (กรมทางหลวง, 2550)

2.1.4 สมรรถนะด้านความฝืดของผิวทาง

สมรรถนะด้านความฝืดของผิวทาง หมายถึง ความสามารถของผิวทางในการต้านทานไม่ให้รถที่แล่นผ่านเกิดการเสียหลักลื่นไถลจากเส้นทาง ความฝืดของผิวทางโดยทั่วไปแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน (Coefficient of Friction, CoF) หรือค่าความฝืด (Skid Resistance Value, SRV) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นตัวแปรที่สำคัญในการห้ามล้อ กล่าวคือ ผิวทางที่มีค่าความเสียดทานสูง ผู้ขับขี่จะสามารถควบคุมยานพาหนะได้ง่ายกว่าผิวทางที่มีค่าความเสียดทานต่ำ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความเสียดทานระหว่างล้อยางและผิวทาง ได้แก่ สภาพแห้ง เปียก ลักษณะของยางรถยนต์ ลักษณะเนื้อผิวทาง (Texture) และอื่นๆ เมื่อฝนตกจะเกิดฟิล์มน้ำเคลือบหรือปกคลุมผิวทางทำให้ถนนมีสภาพลื่นกว่าสภาพแห้งปกติ ค่าเสียดทานจะลดลง ล้อยางรถยนต์จึงมีการออกแบบดอกยาง เพื่อรีดน้ำที่อยู่ระหว่างผิวทางกับผิวล้อยางให้ออกทางด้านข้าง ทำให้ล้อยางสัมผัสกับผิวทางมากขึ้น เพิ่มพื้นที่การยึดเกาะถนน หากดอกยางมีการสึกหรอมาก ความสามารถในการยึดเกาะผิวทางจะลดลงและอาจเป็นอันตรายได้ นอกจากนี้ผิวทางที่มีลักษณะหยาบก็มีส่วนสำคัญที่ช่วยให้ผิวทางมีความฝืดมากขึ้นช่วยต้านทานการลื่นไถลของล้อได้

2.2 การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างถนน

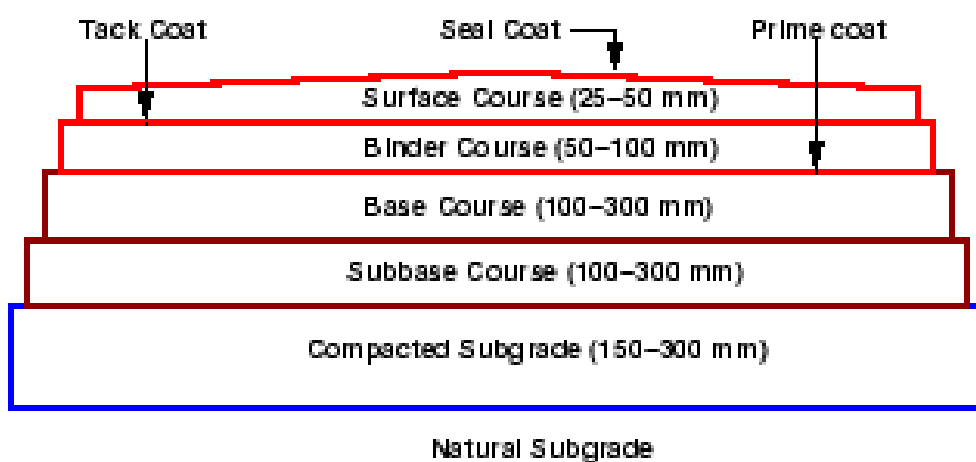
2.2.1 การประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

AASHTO (1993) ได้เสนอวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยาง (ดังรูปที่ 2.2) เชิงประจักษ์ (Empirical Design Method) โดยใช้สมการที่อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง โมดูลัสยืดหยุ่นของดินเดิม จำนวนเที่ยวของเพลาดเยี่ยมมาตรฐาน (18 kips) ระดับการให้บริการ และระดับความเชื่อมั่น ดังนี้

$$\log(W_{18}) = Z_R S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log[\Delta PSI / (4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094 / (SN + 1)^{5.19}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07 \quad (1)$$

เมื่อ

- W_{18} = จำนวนเที่ยวของเพลาดียวมาตรฐาน (Equivalent Single Axle Load, ESAL) ในระยะเวลาออกแบบที่กำหนดไว้ เช่น AASHTO กำหนดระยะเวลาออกแบบไว้ที่ 20 ปี (AASHTO) กรมทางหลวง กำหนดระยะเวลาออกแบบไว้ที่ 15 ปี เป็นต้น
- Z_R = ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Normal Deviation) กำหนดโดยระดับความเชื่อมั่น (Reliability) เช่น ถ้าระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะใช้ค่า $Z_R = -1.645$ หรือถ้าระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 50 จะใช้ค่า $Z_R = 0.0$
- S_0 = ความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ปริมาณจราจรและทำนายการเสื่อมสภาพโครงสร้างถนน (Standard Error) โดยทั่วไปใช้ $S_0 = 0.5$
- ΔPSI = ความสูญเสียระดับการให้บริการ (Design Serviceability Loss) คำนวณได้จากค่า PSI เริ่มเปิดใช้งาน (โดยทั่วไปเท่ากับ 4.2) ถึงค่า PSI สิ้นสุดอายุใช้งาน (ประมาณ 2.7)
- SN = ความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง (Structural Number)
- M_R = โมดูลัสยืดหยุ่นของดินเดิม (หน่วย psi) อาจประมาณโดยใช้ความสัมพันธ์ $M_R = 1500CBR (\%)$



ภาพที่ 2.2 รูปตัดทั่วไปของโครงสร้างถนนลาดยาง

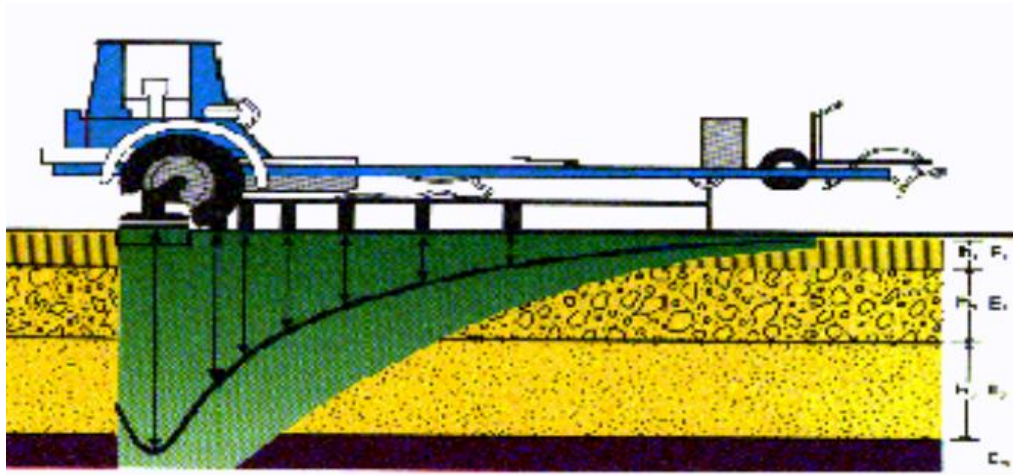
จากสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่าความสามารถในการรับน้ำหนักจราจรของโครงสร้างถนนขึ้นอยู่กับค่า SN ของโครงสร้างชั้นทางแต่ละชั้นและค่า M_R ของดินเดิม เมื่อถนนเปิดใช้งาน แรงกระทำจากน้ำหนักของยานพาหนะ แสงแดด การไหลซึมของน้ำฝน และปัจจัยอื่นๆ อาจส่งผลให้ผิวทางเสื่อมสภาพ เกิดรอยแตก น้ำซึมผ่านเข้าสู่โครงสร้างถนน โครงสร้างชั้นทางอ่อนแอ ความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ออกแบบไว้ก็จะลดลงตามระยะเวลา เนื่องจากค่า SN เป็นตัวแปรที่แปรผันตามความแข็งแรงของโครงสร้างถนน จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นตัวชี้ความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index) เพื่อประเมินว่าโครงสร้างถนนอ่อนแอลงเพียงใดหรือจำเป็นต้องปรับปรุงให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหรือไม่ ตามสมการดังนี้

$$SCI = \frac{SN_{eff}}{SN_{req}} \quad (2)$$

เมื่อ

SCI	=	ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index)
SN_{eff}	=	ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบัน (Effective Structural Number)
SN_{req}	=	ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ต้องการ (Required Structural Number) ตามปริมาณจราจร ESALs ภายในระยะเวลาออกแบบที่กำหนดไว้ เช่น AASHTO 20 ปี กรมทางหลวง 15 ปี เป็นต้น

การประเมินค่า SN_{eff} ของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบันนิยมใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ซึ่งให้ค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งค่าการแอ่นตัวนี้มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของโครงสร้างถนน จึงทำให้นักวิจัยหลายท่านได้เสนอวิธีการประเมินค่า SN_{eff} จากผลการทดสอบ FWD



ภาพที่ 2.3 การอ่อนตัวของผิวทางภายใต้แรงกระแทกจากเครื่องมือ
Falling Weight Deflectometer (FWD)

วิธีประเมินค่า SN_{eff} ที่เสนอโดย AASHTO (1993) เป็นดังนี้

$$SN_{eff} = 0.0045 * D * E_p^{0.333} \quad (3)$$

$$d_0 = 1.5 * P * a * \left(\frac{1}{E_{SG} * \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^3 * \frac{E_p}{E_{SG}}}} + \frac{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right)}{E_p} \right) \quad (4)$$

$$E_{SG} = 0.24 * P / (d_7 * 72) \quad (5)$$

เมื่อ

- E_p = ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนทั้งหมดเหนือดินเดิม Subgrade หน่วยเป็น psi
- E_{SG} = ค่าโมดูลัสของดินเดิม Subgrade หน่วยเป็น psi
- D = ความหนารวมของโครงสร้างถนน (Total Pavement Thickness) หน่วยเป็น นิ้ว
- a = รัศมีของแผ่นงานโลหะทดสอบ FWD หน่วยเป็น นิ้ว
- d_0, d_7 = ค่าการอ่อนตัวของ Sensor ตัวที่ 1 (ตำแหน่งที่น้ำหนักตกกระทบบน) และค่าการอ่อนตัวของ Sensor ตัวที่ 7 (ห่างจาก Sensor ตัวที่ 1 เป็นระยะทาง 72 นิ้ว) ตามลำดับ หน่วยเป็น นิ้ว
- P = น้ำหนักตกกระทบบน (Applied Load) หน่วยเป็นปอนด์

หรืออาจใช้วิธีประเมินค่า SN_{eff} ที่เสนอโดย Rohde (1994) ดังนี้

$$SN_{eff} = k_1 SIP^{k_2} H_p^{k_3} \quad (6)$$

$$SIP = d_0 - d_{1.5H_p} \quad (7)$$

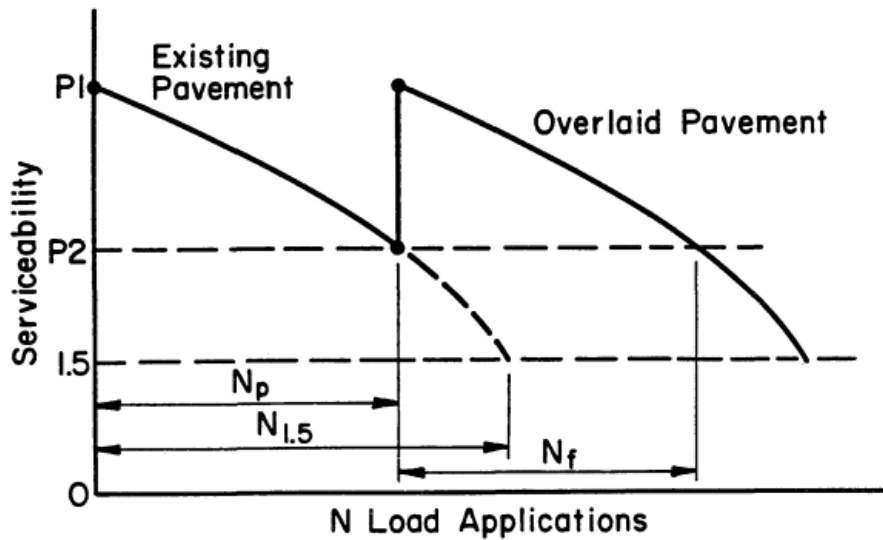
เมื่อ

- k_1, k_2, k_3 = ค่าสัมประสิทธิ์ (Regression Coefficient) ของแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งมีค่าแสดงในตารางที่ 2.1
- SIP = ค่าดัชนีการอ่อนตัวของโครงสร้างถนน หน่วยเป็น ไมโครเมตร
- d_0 = ค่าการอ่อนตัวสูงสุดภายใต้น้ำหนักตกระแทกมาตรฐาน (9,000 lbs) หน่วยเป็น ไมโครเมตร
- $d_{1.5H_p}$ = ค่าการอ่อนตัวที่ตำแหน่งห่างจากตำแหน่งน้ำหนักตกระแทกมาตรฐานเป็นระยะทาง 1.5 เท่าของ H_p หน่วยเป็น ไมโครเมตร
- H_p = ความหนารวมของโครงสร้างถนน (Total Pavement Thickness) หน่วยเป็น มิลลิเมตร

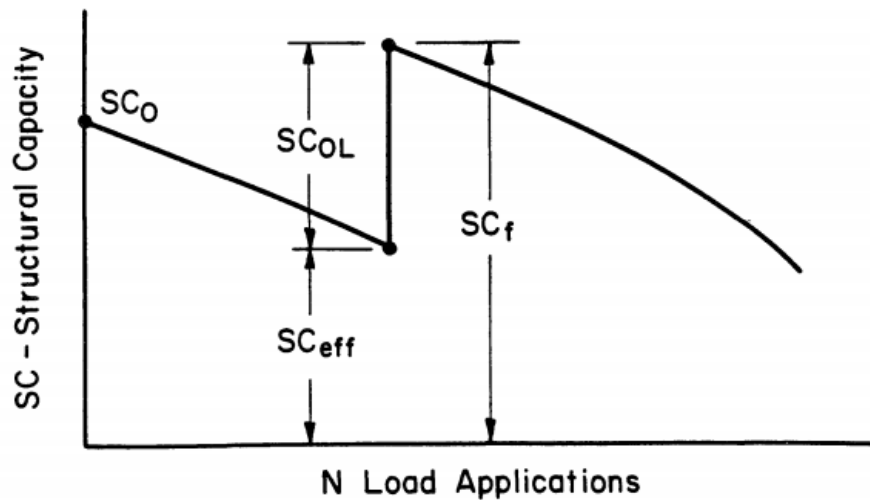
ตารางที่ 2.1 ค่า Regression Coefficient สำหรับคำนวณค่า SN_{eff} ตามวิธีของ Rohde (1994)

ประเภทของผิวทาง	k_1	k_2	k_3	R^2	จำนวนข้อมูล
ฉาบผิว	0.1165	-0.3248	0.8241	0.984	1,944
แอสฟัลต์คอนกรีต	0.4728	-0.4810	0.7581	0.957	5,832

ปัจจุบัน ยังไม่มีงานวิจัยแนะนำการใช้ค่า SCI ในการกำหนดวิธีการซ่อมบำรุงโครงสร้างถนน แต่สามารถประมาณค่าที่เหมาะสมได้จากข้อมูลการเสื่อมสภาพของโครงสร้างถนนและการเสริมผิวทาง (Overlay) เพื่อยืดอายุการใช้งานตามวิธี AASHTO (1993) ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเปิดการใช้งานในช่วงแรก ถนนจะมีระดับการให้บริการที่ดีมาก และเมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง ถนนจะเกิดการเสื่อมสภาพและระดับการให้บริการจะลดลงจนกระทั่งค่า PSI เหลือประมาณ 1.5 ซึ่งเป็นระดับที่โครงสร้างถนนหมดสภาพการใช้งาน ทั้งนี้ก่อนที่ถนนจะหมดสภาพการใช้งาน อาจทำการเสริมผิวทาง (Overlay) เพื่อให้โครงสร้างถนนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ระดับการให้บริการดีขึ้น และยืดอายุการใช้งานของถนน



(ก) การเสื่อมระดับการให้บริการและการเสริมผิวทางเพื่อยืดอายุการใช้งาน



(ข) การเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนและการเสริมผิวทางเพื่อยืดอายุการใช้งาน
 ภาพที่ 2.4 แสดงการเสื่อมสภาพระดับการให้บริการและความแข็งแรงของโครงสร้างถนนตาม
 ปริมาณจราจรและการยืดอายุการใช้งาน

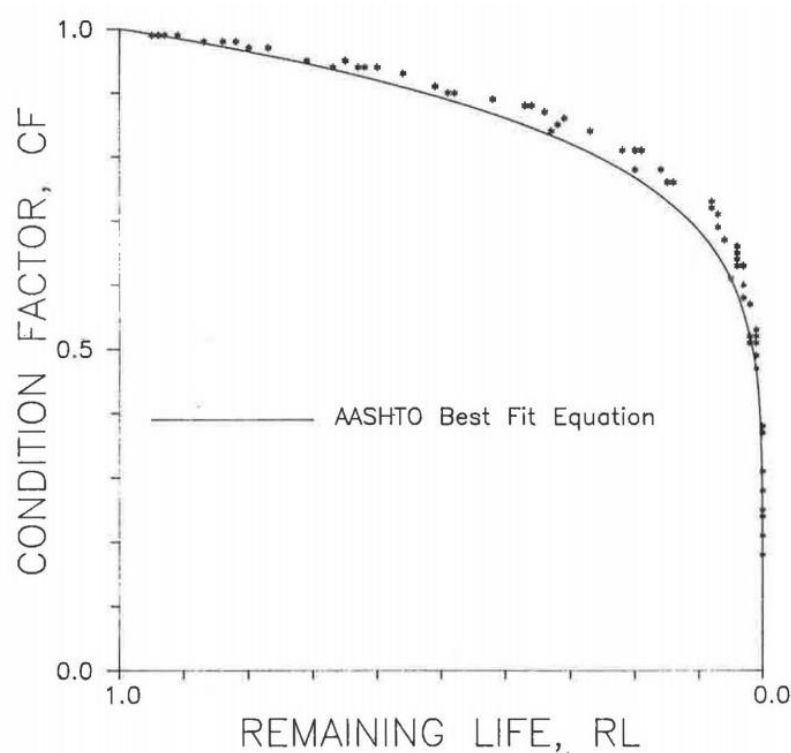
จากพฤติกรรมการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนและระดับการให้บริการสามารถสรุปได้ว่า หากต้องการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างถนน ควรทำการเสริมผิวทางก่อนที่โครงสร้างถนนจะเสื่อมสภาพไปมาก ทั้งนี้เพื่อลดความหนาที่มากเกินไปจนความจำเป็นและช่วยประหยัดงบประมาณในการซ่อมบำรุงรักษา ภาพที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Condition Factor) กับอายุการใช้งานคงเหลือ (Remaining Life) ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบสมการอย่างง่ายได้ ดังนี้

$$CF = \frac{SC_{eff}}{SC_o} \quad (8)$$

$$RL = 100 \left(1 - \frac{N_p}{N_{1.5}} \right) \quad (9)$$

เมื่อ

- CF = แฟกเตอร์สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Condition Factor)
- SC_{eff} = สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนประสิทธิผล (Effective Structural Capacity) เมื่อจำนวนเที่ยว ESALs เท่ากับ N_p
- SC_o = สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนหลังก่อสร้างเสร็จใหม่
- RL = ร้อยละของอายุการใช้งานคงเหลือ (%)
- N_p = จำนวนเที่ยว ESALs ที่กระทำต่อโครงสร้างถนนตั้งแต่เริ่มเปิดใช้งานจนถึงปัจจุบัน
- N_{1.5} = จำนวนเที่ยว ESALs ที่ทำให้โครงสร้างถนนมีค่า PSI ลดลงเหลือเท่ากับ 1.5



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Condition Factor) กับร้อยละของอายุการใช้งานคงเหลือ (Remaining Life) (Elliott 1989)

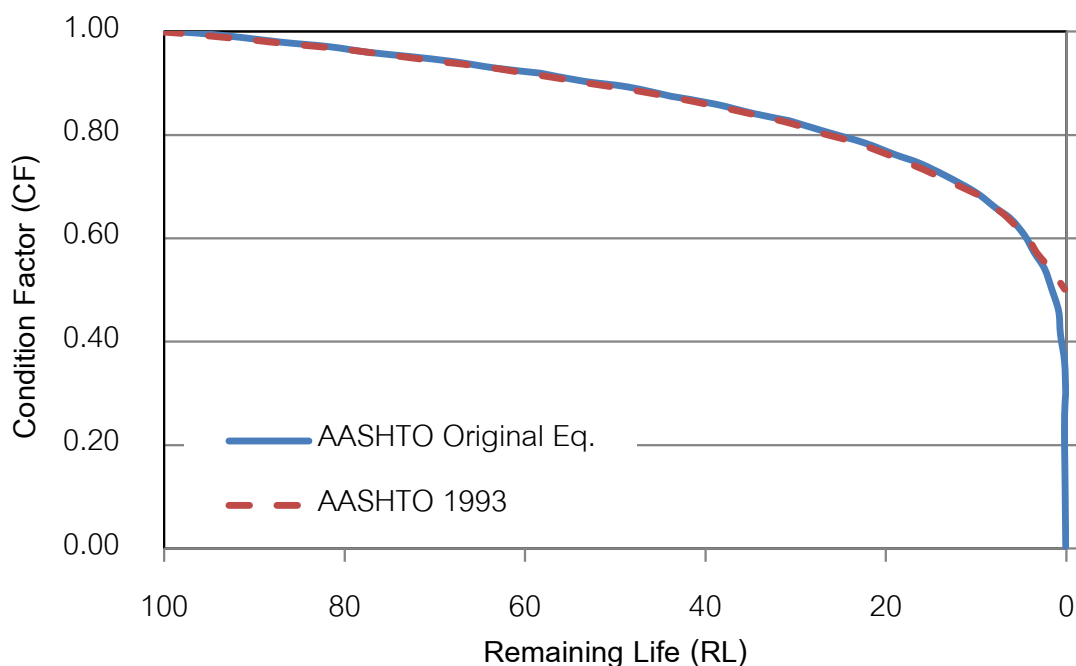
ในกรณีโครงสร้างถนนลาดยาง สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนประสิทธิภาพ (Effective Structural Capacity, SC_{eff}) สามารถใช้ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบัน (SN_{eff}) แทนได้ในขณะที่สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนหลังก่อสร้างเสร็จใหม่ (SC_0) แทนด้วยค่า SN_{req} ดังนั้นค่า SCI สามารถแทนด้วยค่า CF ดังนี้

$$CF = \frac{SC_{eff}}{SC_0} = \frac{SN_{eff}}{SN_{req}} = SCI \quad (10)$$

จากภาพที่ 2.5 สามารถถดถอยเชิงเส้นที่สอดคล้องกับข้อมูล (AASHTO Best Fit Equation) เป็นดังนี้

$$CF = RL^{0.165} \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) พบว่า เมื่อโครงสร้างถนนหมดอายุการใช้งาน ($RL=0$) ค่า CF จะเท่ากับ 0 ซึ่งไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงที่โครงสร้างถนนยังคงสามารถใช้งานได้อยู่ ดังนั้น AASHTO (1993) จึงได้ปรับแก้กราฟในช่วงสุดท้ายโดยกำหนดให้ค่า CF เท่ากับ 0.5 เมื่ออายุการใช้งาน ($RL = 0$) ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Condition Factor) กับอายุการใช้งานคงเหลือ (Remaining Life) ตาม AASHTO (1993)

จากตารางที่ 2.2 การกำหนดค่า SCI เป็นเกณฑ์ในงานซ่อมบำรุงทางอาจพิจารณาจากอัตราการเสื่อมสภาพ ซึ่งจะเกิดอย่างช้าๆ ในระยะแรก แล้วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะกราฟเอ็กโปเนนเชียล หากพิจารณาที่อายุการใช้งานคงเหลือเท่ากับ 19 เปอร์เซ็นต์ ค่า SCI เท่ากับ 0.76 และอัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงเท่ากับ 0.66 จะเห็นได้ว่าอัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงเกิดเร็วขึ้นถึง 4 เท่าในระยะแรก หากปล่อยทิ้งไว้โดยไม่ทำการเสริมผิวทาง โครงสร้างถนนจะอ่อนแอลงอย่างรวดเร็วซึ่งจะต้องใช้ความหนาในการเสริมผิวทางมาก ดังนั้นเกณฑ์ค่า SCI อาจพิจารณา 2 ระดับ ที่ 0.75 (จำเป็นต้องเสริมกำลัง) และ 0.50 (หมดอายุการใช้งาน)

ตารางที่ 2.2 อัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง

ร้อยละของอายุการใช้งานคงเหลือที่เหลืออยู่ (RL)	แฟคเตอร์สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (CF=SCI)	อัตราการเสื่อมสภาพ dCF/dRL	อัตราการเสื่อมสภาพเทียบกับช่วงเริ่มต้น
100	1.00	0.165	1.0
43	0.87	0.334	2.0
19	0.76	0.660	4.0
8.3	0.66	1.318	8.0
0.0	0.50	N/A	N/A

เนื่องจากค่า SN_{eff} สามารถคำนวณได้จากสมการเชิงประจักษ์ เสนอโดยนักวิจัยต่าง ๆ ซึ่งสมการของนักวิจัยแต่ละท่านอาจให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน การวิจัยครั้งนี้จะคำนวณค่า SN_{eff} ตามวิธีที่เสนอโดย Wimsatt (1999) เพื่อให้ค่าที่คำนวณได้สอดคล้องกับวิธีการคำนวณ SN_{req} และเกณฑ์ค่า SCI ตามมาตรฐาน AASHTO (1993)

2.3 การวิเคราะห์ตัวชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

การวิจัยนี้จะวิเคราะห์ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนนจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD โดยพิจารณาจากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนทดสอบในสนาม ณ ช่วงเวลาต่างๆ (Existing Index) กับค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ใช้ในการออกแบบ (Design Index) การวิเคราะห์แบ่งได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการหาค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR)

และวิธีการหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Structural Condition Index, SCI) ดังสมการที่ (12) และสมการที่ (13) ตามลำดับ

$$E_{ratio} = E_p / E_{design} \quad (12)$$

เมื่อ

E_{ratio}	=	ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio)
E_p	=	ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนทดสอบในสนาม ณ ช่วงเวลาต่างๆ (Existing Pavement Modulus)
E_{design}	=	ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนที่ใช้ในการออกแบบ (Design Modulus)
	=	$(E_{AC}H_{AC} + E_{BS}H_{BS} + E_{SB}H_{SB} + E_{SL}H_{SL}) / H_{Total}$ (ดูตารางที่ 2.)
H_{AC}	=	ความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)
H_{BS}	=	ความหนาของพื้นทาง (Base)
H_{SB}	=	ความหนาของรองพื้นทาง (Subbase)
H_{SL}	=	ความหนาของวัสดุคัดเลือก (Selected)
H_{Total}	=	ความหนารวมของโครงสร้างถนน = $H_{AC} + H_{BS} + H_{SB} + H_{SL}$

และ

$$SCI = SN_{eff} / SN_{req} \quad (13)$$

เมื่อ

SCI	=	ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index)
SN_{eff}	=	ค่าความแข็งแรง (Structural Number) ของโครงสร้างถนนทดสอบในสนาม ณ ช่วงเวลาใดๆ
SN_{req}	=	ค่าความแข็งแรง (Structural Number) ของโครงสร้างถนนออกแบบตาม AASHTO (1993) ดังสมการที่ (14)

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_0 + 9.36 \log_{10}(SN_{req} + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{2.7} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN_{req} + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07 \quad (14)$$

เมื่อ

W_{18}	=	จำนวนเที่ยวของเพลาดูแลมาตรฐาน 18,000 ปอนด์ตลอดอายุการออกแบบ
	=	$ADT \times T \times T_F \times G \times Y \times D \times L \times 365$

ADT	=	ปริมาณจราจรเฉลี่ยรายวัน
T	=	เปอร์เซ็นต์รถบรรทุกทุกหน้ก
T _F	=	แฟกเตอร์รถบรรทุกทุกมาตรฐาน (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.0)
G	=	แฟกเตอร์การเติบโตของปริมาณจราจร
	=	$\frac{(1+r)^Y - 1}{r}$
Y	=	อายุการออกแบบ (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 20 ปี)
D	=	แฟกเตอร์ทิศทางจราจร (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.5)
L	=	แฟกเตอร์ช่องจราจรในแต่ละทิศทาง (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.9)
r	=	อัตราการเติบโตของปริมาณจราจรเฉลี่ยรายปี
Z _R	=	ค่าเบี่ยงเบนที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ (เท่ากับ -1.282)
S ₀	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.45)
Δ PSI	=	ผลต่างระหว่างค่าดัชนีสมรรถนะการให้บริการของถนน ตั้งแต่เริ่มเปิดใช้งานจนถึงสิ้นสุดการใช้งาน $(p_i - p_t = 4.2 - 2.5 = 1.7)$
M _R	=	ค่าโมดูลัสของดินเดิม (psi) = 1500 × CBR (%) หรือ = $0.24 \times P / (d_{72} \times 72)$ (AASHTO 1993)
P	=	น้ำหนักตกกระแทกจากการทดสอบ FWD (ปอนด์)
d ₇₂	=	ค่าการแอนตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ 72 นิ้ว

ตารางที่ 2.3 ค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางที่ใช้ออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางของกรมทางหลวง

ชนิดของวัสดุชั้นทาง	Elastic Modulus (MPa)
PMA	4,500
AC 60/70	2,500
พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์	850
พื้นทางหินคลุก	350
รองพื้นทาง	150
วัสดุคัดเลือก	100
ดินคันทาง	10 × CBR

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการรองรับปริมาณจราจรของโครงสร้างถนนขึ้นอยู่กับค่า SN ของชั้นโครงสร้างทางและค่า M_R ของดินเดิม เมื่อโครงสร้างถนนเปิดให้บริการ แรงกระทำจากน้ำหนักจราจร แสงแดด การซึมผ่านของน้ำฝน และอื่นๆ ทำให้ผิวทางเสื่อมสภาพ เกิดรอยแตก น้ำซึมผ่านโครงสร้างได้ ทำให้วัสดุชั้นล่างอ่อนแอลง โครงสร้างถนนที่ออกแบบไว้มีอายุการใช้งานสั้นลง และเนื่องจากค่า SN เป็นตัวแปรอ่อนไหว (Sensitive) ขึ้นกับค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนน จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นดัชนีชี้วัดสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนสำหรับงานบำรุงรักษาทาง ดังนั้นจึงมีการศึกษาพัฒนาดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index) เพื่อใช้ประเมินโครงสร้างถนนว่ามีความจำเป็นต้องปรับปรุงให้โครงสร้างถนนแข็งแรงเพิ่มขึ้นหรือไม่ ทั้งนี้ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Existing Index) สามารถประเมินได้จากการทดสอบ FWD และ LWD ซึ่งมีสมมติว่า ค่าการแอ่นตัวที่ตรวจวัดได้สัมพันธ์โดยตรงกับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน วิธีการคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนสรุปได้ดังนี้

2.3.1 การคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดย Elastic Solution

ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนสามารถคำนวณได้โดย Elastic Solution (ES) ซึ่งมีสมมุติฐานว่า ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างถนน ตรวจวัดได้จากการทดสอบ FWD และ LWD แปรผกผันกับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน (Pavement Modulus, E_p) ดังนี้

$$E_{p, ES} = 2(1-\nu^2)\sigma_0 a^2/d_0 \quad (15)$$

เมื่อ

$E_{p, ES}$	=	ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณโดย Elastic Solution (MPa)
σ_0	=	หน่วยแรงกระทำ (754 kPa สำหรับการทดสอบ FWD และ 181 kPa สำหรับการทดสอบ LWD)
ν	=	อัตราส่วนของปัวซองส์ (Poisson's Ratio)
a	=	รัศมีของแผ่นจานโลหะ (เท่ากับ 150 มม. สำหรับการทดสอบ FWD และ 100 มม. สำหรับการทดสอบ LWD)
d_0	=	ค่าการแอ่นตัว ณ ตำแหน่งแรงกระทำหรือที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร (ไมครอน)

2.3.2 การคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยสมการความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (Empirical Equation)

Wimsatt (1999) ได้เสนอสมการที่ (16) สำหรับวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน (Pavement Modulus) กับค่าโมดูลัสของดินเดิม (Subgrade Modulus) โดยพิจารณาการแอนตัวจากการทดสอบ FWD ณ ตำแหน่งของแรงกระทำ หรือที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร (d_0) แทนดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน ในขณะที่ค่าการแอนตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ 1,800 มิลลิเมตร (d_{1800}) แทนดัชนีความแข็งแรงของดินเดิม (Subgrade) ค่าโมดูลัสของดินเดิม (Subgrade Modulus, E_{SG}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (17) ส่วนค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน (Pavement Modulus, $E_{P,Eq}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (18)

$$E_{P,Eq} / E_{SG} = 331.37(d_{1800}/d_0)^{5/2} - 158.63(d_{1800}/d_0)^2 + 100.05(d_{1800}/d_0)^{3/2} + 18.39(d_{1800}/d_0) + 0.53(d_{1800}/d_0)^{1/2} \quad (16)$$

$$E_{SG} = 0.24P / (d_{1800} * 1800) \quad (17)$$

$$E_{P,Eq} = (E_{P,Eq} / E_{SG}) * E_{SG} \quad (18)$$

เมื่อ

$E_{P,Eq}$	=	ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (MPa)
E_{SG}	=	ค่าโมดูลัสของดินเดิม (MPa)
P	=	น้ำหนักตกกระทบบนจากการทดสอบ FWD (สำหรับการวิจัยนี้ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50 kN)
d_0	=	ค่าการแอนตัว ณ ตำแหน่งแรงกระทำหรือที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร (ไมครอน)
d_{1800}	=	ค่าการแอนตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ 1,800 มิลลิเมตร (ไมครอน)

2.3.3 การคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation)

ในการคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation) ขั้นตอนแรกจะสมมติค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชั้น โดยสมมติว่าค่าอัตราส่วน

ปัวซองส์ของวัสดุทุกชั้นเท่ากันแล้วนำค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ วิเคราะห์ได้ตามทฤษฎี มาเปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ FWD ชั้นตอนที่สอง จะเฉลี่ยค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางที่คำนวณได้จากชั้นตอนแรกกับค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางที่ตรวจวัด ได้จากเครื่องมือ FWD แล้ววิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ ทำการคำนวณเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ วิเคราะห์ได้ตามทฤษฎีกับค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ FWD ใกล้เคียงกันมากที่สุด ก็จะได้ค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชั้น (แสงชัยและคณะ 2534) ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณได้จากการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) ของค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชั้นตามสมการที่ (19)

$$E_{p,Back} = \sum_i^n E_i h_i / H_T \quad (19)$$

เมื่อ

- $E_{p,Back}$ = ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (MPa)
- E_i = ค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชั้น (MPa)
- h_i = ความหนาของวัสดุแต่ละชั้น (เมตร)
- H_T = ความหนารวมของโครงสร้างถนน (เมตร)

2.3.4 วิธีการหาค่า Structural Number จากค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน

AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993) อธิบายการคำนวณค่า Structural Number (SN) ทดสอบในสนาม โดยหาจากความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (Empirical Relationship) ระหว่างค่า SN กับความหนารวมและค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน (E_p) ตามสมการที่ (20) (AASHTO 1993)

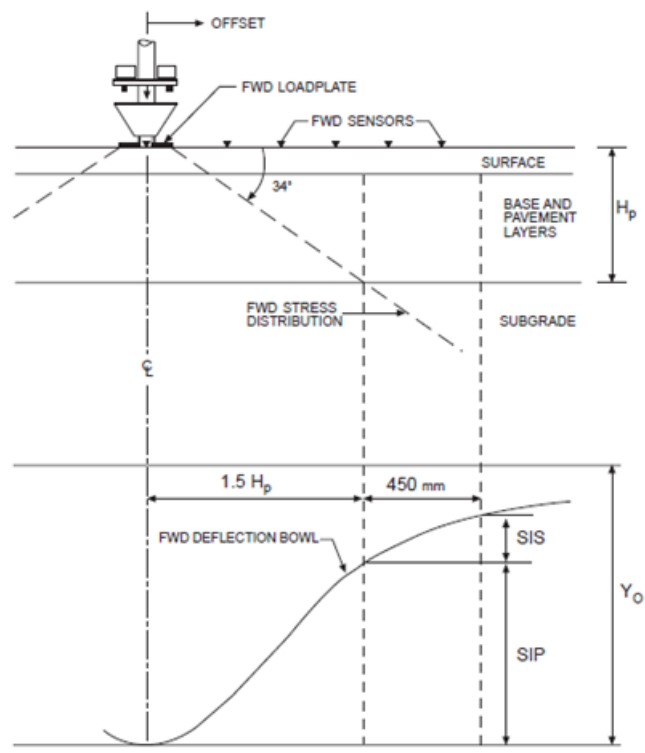
$$SN_{eff} = 0.0045 D E_{p, Eq}^{0.333} \quad (20)$$

เมื่อ

- SN_{eff} = ค่า Structural Number ทดสอบในสนาม
- D = ความหนารวมของโครงสร้างถนน (นิ้ว)
- $E_{p, Eq}$ = ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (psi)

2.3.5 วิธีการหาค่า Structural Number จากข้อมูลการทดสอบ FWD

ค่าการแอ่นตัวสูงสุด (Deflection, d_o) ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD ได้จากผลรวมของค่าการแอ่นตัวในดินเดิม Subgrade และโครงสร้างถนน Irwin (1983) พบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูกระจายทำมุม 34 องศาจากระดับผิวดิน ในขณะที่ Rohde (1994) ได้เสนอวิธีการประมาณค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD บนโครงสร้างถนน โดยแนะนำว่าค่าการแอ่นตัวในโครงสร้างถนนสามารถประมาณได้จากผลต่างระหว่างค่าการแอ่นตัวสูงสุด (d_o) กับค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ $1.5H_p$ ($d_{1.5H_p}$) ซึ่งเป็นค่าการแอ่นตัวของดินเดิม Subgrade แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD บนโครงสร้างถนน

(Zhang et al. 2003)

นอกจากนี้ Rohde (1994) ยังเสนอว่าค่า Structural Number (SN) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (21)

$$SN_{\text{eff}} = k_1 SIP^{k_2} H_p^{k_3} \quad (21)$$

เมื่อ

SN_{eff}	=	ค่า Structural Number (SN) ทดสอบในสนาม
k_1, k_2, k_3	=	ค่าคงที่สมการ (ดูตารางที่ 2.)
SIP	=	ดัชนีการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน (ไมครอน)
	=	$d_0 - d_{1.5H_p}$
d_0	=	ค่าการแอ่นตัวสูงสุดภายใต้น้ำหนักตกกระทบบนมาตรฐาน 9,000 ปอนด์หรือประมาณ 4,000 กิโลกรัม (ไมครอน)
$d_{1.5H_p}$	=	ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ $1.5H_p$ (ไมครอน)
H_p	=	ความหนารวมของโครงสร้างถนน (มิลลิเมตร)

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่สมการที่ (28) (Rohde 1994)

ประเภทของผิวทาง	k_1	k_2	k_3	R^2	จำนวนข้อมูล
ฉาบผิว	0.1165	-0.3248	0.8241	0.984	1,944
แอสฟัลต์คอนกรีต	0.4728	-0.4810	0.7581	0.957	5,832

บทที่ 3

อุปกรณ์และแผนการศึกษา

3.1 อุปกรณ์

3.1.1 เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer

เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างถนน ซึ่งได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับในวงการวิศวกรรมงานทางระดับสากล เนื่องจากมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ รวดเร็ว และเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive Testing) กรมทางหลวงได้นำเครื่องมือ FWD มาใช้ประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนและหาความหนาของการเสริมผิวทาง (Overlay) เป็นระยะเวลากว่าสองทศวรรษเพื่อกำหนดวิธีการบูรณะปรับปรุงและซ่อมบำรุงทางหลวงที่เหมาะสม

ปัจจุบัน สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง มีเครื่องมือ FWD รุ่น 8000 จำนวน 1 ชุด ผลิตโดยบริษัท DYNATEST ประเทศเดนมาร์ก แสดงดังภาพที่ 3.1 ส่วนของรถพ่วงเป็นส่วนที่ให้แรงกระทำบนถนนโดยอาศัยการปล่อยตุ้มน้ำหนักตกกระทบบนผิวถนน ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นจากการตกกระทบบนผิวถนนจะถ่ายลงสู่แผ่นจานโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร ผ่านลูกยางชนิดพิเศษเพื่อให้น้ำหนักที่เกิดขึ้นใต้แผ่นจานโลหะมีการแผ่กระจายสม่ำเสมอ แผ่นถ่วงน้ำหนักดังกล่าวสามารถใช้ได้กับพื้นผิวลาดเอียงได้ถึง 6 องศา ขนาดของน้ำหนักกระทำสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามระดับความสูงของการยกตุ้มน้ำหนักแล้วปล่อยตกลงมา ซึ่งมีขนาดช่วงน้ำหนักตั้งแต่ 7 ถึง 120 kN ช่วงเวลาของน้ำหนักกระทำประมาณ 25 ถึง 30 มิลลิวินาที จากการศึกษาในประเทศเดนมาร์กพบว่า ความเค้น ความเครียด และการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทดสอบด้วย FWD มีลักษณะใกล้เคียงกับแรงกระทำของยานพาหนะขณะแล่นผ่าน (อัศวพัฒน์และธนภุต 2555)

เครื่องมือ FWD ประกอบด้วย มาตรวัดความเร็ว (Geophone) จำนวน 9 ตัว ติดตั้งบนคานที่สามารถยกขึ้นลงได้ มีความยาวประมาณ 3,000 มิลลิเมตร โดยค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่สามารถวัดได้ประมาณ 2 มิลลิเมตร มาตรวัดการแอ่นตัวสามารถติดตั้งไว้กับคานดังกล่าวที่ระยะต่างๆ ซึ่งมีช่วงการใช้งานประมาณ 2,250 มิลลิเมตร และมาตรวัดแรง ชนิด Strain Gauge Type ใช้ตรวจวัดขนาดน้ำหนักที่กระทำบนแผ่นจานโลหะ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแล้วเสร็จจะถูกเก็บบันทึก

ไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ และประมวลผลต่อไป (อัคคพัฒนและธนภต 2555)



ภาพที่ 3.1 เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)

3.1.2 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer

เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) แสดงดังภาพที่ 3.2 เป็นอุปกรณ์ทดสอบเพื่อหาค่าการอ่อนตัวของโครงสร้างถนนแบบพกพาได้ โดยใช้ผู้ทดสอบเพียงคนเดียว ประกอบด้วยตุ้มน้ำหนักขนาดตั้งแต่ 5 กิโลกรัม ถึง 15 กิโลกรัม แขนนำร่อง (Guide Rod) ความยาวประมาณ 90 เซนติเมตร มาตรการวัดแรง (Load Cell) Geophone หรือ Accelerometer แผ่นจานโลหะ (Load Plate) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 100 มิลลิเมตร ถึง 300 มิลลิเมตร และชุดรับส่งสัญญาณข้อมูลแบบไร้สาย (Bluetooth) เครื่องคอมพิวเตอร์พกพานำติดตัวได้ (Personal Digital Assistant, PDA) สำหรับรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย (Wireless Data Collection) ซึ่งขอบเขตของกรวัด (Zone of Influence) หรือความลึกประสิทธิภาพ (Effective Depth) ของเครื่องมือ LWD เฉลี่ยในช่วง 1-2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานโลหะ ในกรณีทดสอบบนชั้นวัสดุชนิดเดียวกัน (Homogenous Layer) ทั้งนี้รายละเอียดขั้นตอนการทดสอบ เงื่อนไขการทดสอบ มาตรฐาน และข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องสรุปไว้ในรายงานขั้นสุดท้ายของโครงการศึกษาใช้เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ในการควบคุมคุณภาพวัสดุสร้างทาง (กรมทางหลวง 2559)

ปัจจุบัน สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวงมีเครื่องมือ LWD จำนวน 2 ชุด ผลิตโดยบริษัท Sweco โมเดล PRIMA 100 ข้อดีของเครื่องมือ LWD คือ มีน้ำหนักเบา ทำการทดสอบได้รวดเร็ว ทราบผลลัพธ์ได้ทันที และไม่ทำลายชั้นโครงสร้าง ทำให้เจ้าหน้าที่สามารถทดสอบได้ครอบคลุมพื้นที่ก่อสร้างช่วยการตรวจสอบคุณภาพงานบดอัดวัสดุเป็นไปอย่างทั่วถึง และยังประหยัดกว่าการทดสอบ FWD

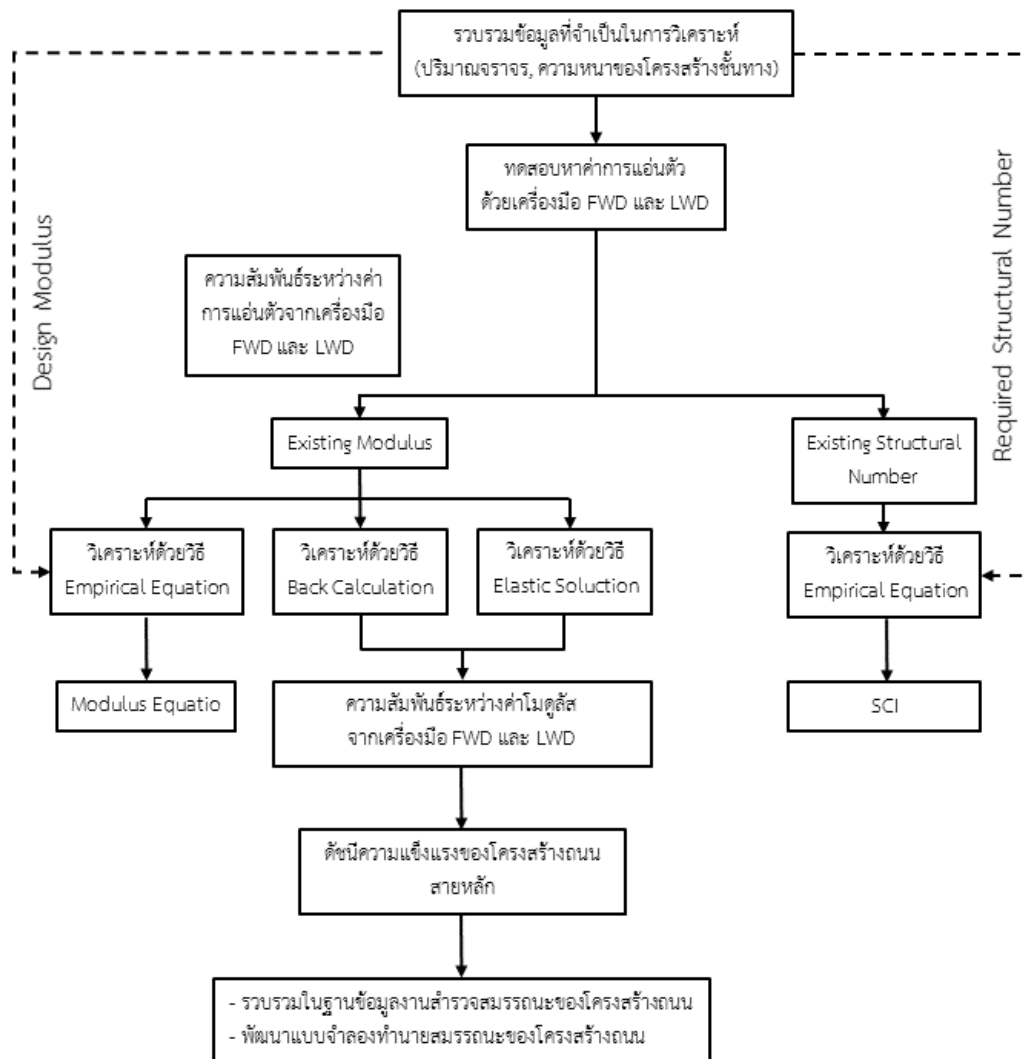


ภาพที่ 3.2 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD)

3.2 แผนการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยแสดงในภาพที่ 3.3 การศึกษาวิจัยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล และ (2) ขั้นตอนการทดสอบหาค่าการแอ่นตัว การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้เป็นการวิจัยนี้ ประกอบด้วย รูปตัดแปลงทดสอบ ปริมาณการจราจร และปริมาณรถบรรทุกทุกหนักจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ส่วนการทดสอบหาค่าการแอ่นตัวประกอบด้วย การทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD เมื่อได้ข้อมูลดังกล่าวครบถ้วนแล้วจะนำไปวิเคราะห์เพื่อ (1) หาคความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากเครื่องมือ FWD กับ LWD (2) หาคความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสที่ได้จากเครื่องมือ FWD และ LWD ซึ่งได้จากการคำนวณโดยวิธีการคำนวณตามทฤษฎี (Elastic Solution) วิธีการคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ (Empirical Equation) และวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation) (3) หาค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio) และค่าดัชนีความแข็งแรง

(Structural Condition Index, SCI) เพื่อรวบรวมเป็นฐานข้อมูลดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของถนนเพื่อนำไปใช้พัฒนาแบบจำลองทำนายสมรรถนะของโครงสร้างถนนต่อไป รายละเอียดแผนการวิจัยมีดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 รวบรวมข้อมูลที่เป็นข้อมูลที่เป็นสำหรับวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนที่ใช้ในการออกแบบ (Design Modulus) และค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ใช้ออกแบบ (Required Structural Number) ได้แก่ ความหนาของโครงสร้างถนนแต่ละชั้น (Layer Thickness)

ปริมาณจราจรรายวัน (Average Daily Traffic) เปอร์เซ็นต์รถบรรทุกหนัก (Percent of Heavy Truck) และอัตราการเติบโตของปริมาณจราจร (Growth Rate) โดยรายละเอียดของข้อมูลมีดังนี้

- แบบรูปตัด (Cross-Section) ของโครงสร้างถนน

การวิเคราะห์ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนนจำเป็นต้องทราบข้อมูลลักษณะของชั้นโครงสร้างทาง ได้แก่ ความหนาและชนิดของวัสดุที่นำมาก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง ข้อมูลแบบรูปตัด (Cross-Section) ของทางหลวงรวบรวมไว้ในภาคผนวก ก.

ในกรณีที่ทางหลวงมีประวัติการซ่อมบำรุง คณะผู้วิจัยจะนำผลทดสอบด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) พร้อมข้อมูลเจาะเก็บก่อนตัวอย่างเพื่อตรวจสอบความหนาของชั้นโครงสร้างทางประกอบการพิจารณาด้วย

- ปริมาณจราจรรายวัน (Average Daily Traffic)

ในการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะของโครงสร้างถนน คณะผู้วิจัยจำเป็นต้องทราบข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (Average Daily Traffic) ของสายทางที่คัดเลือก เพื่อใช้คำนวณจำนวนเที่ยวของเพลาดียวมาตรฐาน 18,000 ปอนด์ตลอดอายุการออกแบบ (W_{18}) ข้อมูลปริมาณจราจรรายวันของสายทางในงานวิจัยนี้ สรุปลงไว้ในภาคผนวก ข.

อนึ่ง คณะผู้วิจัยได้คัดเลือกพื้นที่ศึกษาจำนวนทั้งสิ้น 20 แปลงทดสอบบนทางหลวงสายหลัก 12 สายทางทั่วประเทศ สรุปลงในตารางที่ 3.1 และภาพที่ 3.4 โดยแปลงทดสอบที่คัดเลือกไว้นั้นต้องอยู่ใกล้กับสถานีตรวจสอบน้ำหนัก สำนักควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ กรมทางหลวง



ภาพที่ 3.4 พื้นที่ศึกษา

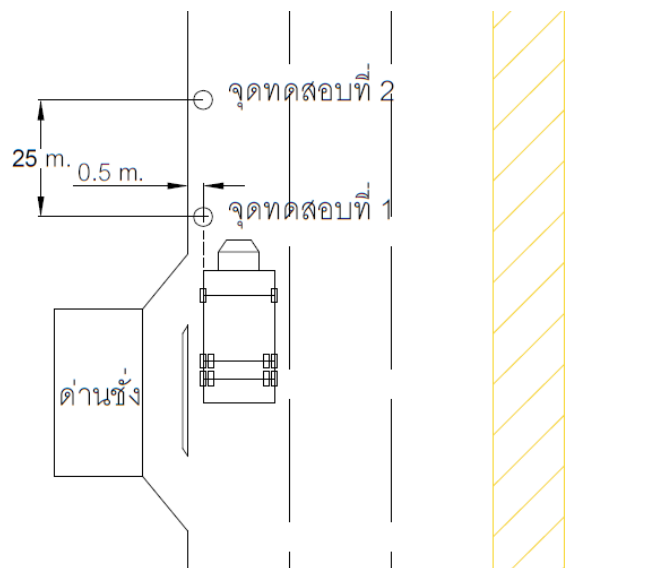
ตารางที่ 3.1 พื้นที่ศึกษา

ภาค	สทล	แขวง	ทล.	ตอน	ชื่อตอน	ทิศทาง	กม. - กม.	บริเวณสถานี
แถบ	สำนักงานทางหลวงที่ 12	แขวงทางหลวงชัยนาท	32	400	โพนางด้าออก - ท่าฉนวน	ขาเข้า	119+800 - 120+050	สรรพยา
	สำนักงานทางหลวงที่ 15	แขวงทางหลวงราชบุรี	4	302	คลองอีจาง - หลุมดิน	ขาเข้า	88+570 - 88+745	โพธาราม
	สำนักงานทางหลวงที่ 15	แขวงทางหลวงสมุทรสงคราม	35	301	นาโคก - แพรกหนามแดง	ขาเข้า	54+000 - 54+250	สมุทรสาคร
บ่อห้วย	สำนักงานทางหลวงที่ 13	แขวงทางหลวงสมุทรปราการ	3	104	บางตำหรุ - คลองด่าน	ขาเข้า	54+250 - 54+500	ชลบุรี
	สำนักงานทางหลวงที่ 14	แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 2	331	103	พันเสด็จนอก - หนองปรือ	ขาเข้า	47+050 - 47+300	ศรีราชา
	สำนักงานทางหลวงที่ 14	แขวงทางหลวงระยอง	36	201	มะขามคู่ - มาบข่า	ขาออก	28+575 - 28+825	ระยอง
	สำนักงานทางหลวงที่ 10	แขวงทางหลวงสระแก้ว (วัฒนานคร)	33	701	พระปรัง - โนนจิก	ขาเข้า	267+000 - 267+250	วัฒนานคร
งาเยนเดอเน	สำนักงานทางหลวงที่ 11	แขวงทางหลวงนครสวรรค์ที่ 1	1	801	หางน้ำหนองแขม - บ้านห้วย	ขาเข้า	308+300 - 308+550	พยุหะคีรี
	สำนักงานทางหลวงที่ 11	แขวงทางหลวงนครสวรรค์ที่ 1	1	804	วังไม้ - โนนปอแดง	ขาเข้า	379+950 - 380+200	บรรพตพิสัย
	สำนักงานทางหลวงที่ 11	แขวงทางหลวงนครสวรรค์ที่ 1	117	100	นครสวรรค์ - คลองปลั่งด้านใต้	ขาเข้า	24+750 - 25+000	เก้าเหลียว
	สำนักงานทางหลวงที่ 4	แขวงทางหลวงกำแพงเพชร	1	902	ปากดง - นครชุม	ขาเข้า	440+750 - 441+000	กำแพงเพชร
นบฮือ	สำนักงานทางหลวงที่ 11	แขวงทางหลวงสระบุรี	2	102	ตาลเดี่ยว - ชับบอน	ขาเข้า	17+750 - 18+000	แก่งคอย
	สำนักงานทางหลวงที่ 10	แขวงทางหลวงนครราชสีมาที่ 2	2	202	บ่อทอง - มอจะบก	ขาเข้า	94+950 - 95+200	สีคิ้ว
	สำนักงานทางหลวงที่ 7	แขวงทางหลวงขอนแก่นที่ 3 (บ้านไผ่)	2	402	พล - บ้านไผ่	ขาออก	268+100 - 268+350	พล
	สำนักงานทางหลวงที่ 10	แขวงทางหลวงนครราชสีมาที่ 1	2	301	นครราชสีมา - ดอนหวาย	ขาออก	168+750 - 169+000	โนนสูง
	สำนักงานทางหลวงที่ 10	แขวงทางหลวงบุรีรัมย์	24	302	หนองกี่ - นางรอง	ขาเข้า	98+750 - 99+000	หนองกี่
ใต้	สำนักงานทางหลวงที่ 15	แขวงทางหลวงราชบุรี	323	100	หนองตะเครง - ลูกแก	ขาเข้า	4+900 - 5+150	บ้านโป่ง
	สำนักงานทางหลวงที่ 15	แขวงทางหลวงเพชรบุรี	4	502	เขาวัง - สระพระ	ขาออก	170+750 - 171+000	ท่ายาง
	สำนักงานทางหลวงที่ 15	แขวงทางหลวงประจวบคีรีขันธ์ (หัวหิน)	4	603	หนองหมู - ห้วยยาง	ขาเข้า	304+750 - 305+000	ประจวบคีรีขันธ์
	สำนักงานทางหลวงที่ 15	แขวงทางหลวงชุมพร	4	703	วังครก - เสียบุญฉวน	ขาออก	473+500 - 473+750	ท่าแซะ

3.3.2 วิธีการทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) และเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD)

ในการทดสอบค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) และเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) บนแปลงทดสอบที่ได้ทำการคัดเลือกไว้ จำนวนทั้งสิ้น 20 แปลงทดสอบ โดยจะดำเนินการทดสอบทุกๆ ระยะ 25 เมตร ระยะทางรวม 250 เมตรต่อพื้นที่ศึกษา ในช่องจราจรซ้ายสุดซึ่งเป็นช่องจราจรของรถบรรทุกหนัก ดังภาพที่ 3.5 การทดสอบเริ่มต้นโดยการอ่านค่าอุณหภูมิของผิวทางจากมาตรวัดอุณหภูมิ (Thermometer) ที่ฝังในผิวทางลึกประมาณ 10 เซนติเมตร จากนั้นทำการทดสอบ FWD โดยปล่อยตุ้มน้ำหนักของเครื่องมือ FWD เพื่อตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น เมื่อรถลากเครื่องมือ FWD ไปยังตำแหน่งถัดไป จึงเริ่มทำการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือ LWD โดยการปล่อยตุ้มน้ำหนักจำนวน 6 ครั้ง และใช้ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยที่ทดสอบได้ 3 ครั้งสุดท้ายเป็นค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน ณ ตำแหน่งทดสอบ

ในการศึกษาของโครงการนี้ คณะผู้วิจัยได้กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานโลหะ (Loading Plate) ของเครื่องมือ FWD และ LWD เท่ากับ 300 และ 200 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งหน่วยแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือ FWD และ LWD จะมีค่าเฉลี่ย 754 kPa และ 181 kPa ตามลำดับ



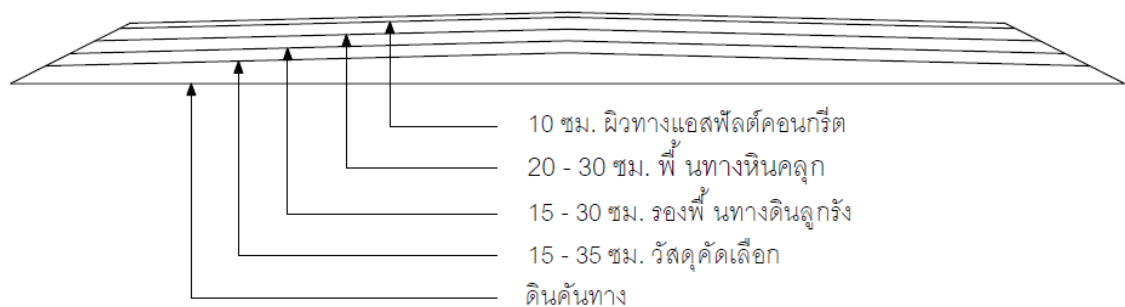
ภาพที่ 3.5 การทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD

3.4 รายละเอียดของแปลงทดสอบ

แปลงทดสอบที่คัดเลือกในโครงการนี้แบ่งเป็น 4 ประเภท ตามชนิดของวัสดุก่อสร้างชั้นทาง เพื่อจำแนกและจัดกลุ่มรูปแบบโครงสร้างถนนที่มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน แปลงทดสอบมีรายละเอียด ดังนี้

3.4.1 แปลงทดสอบประเภทที่ 1

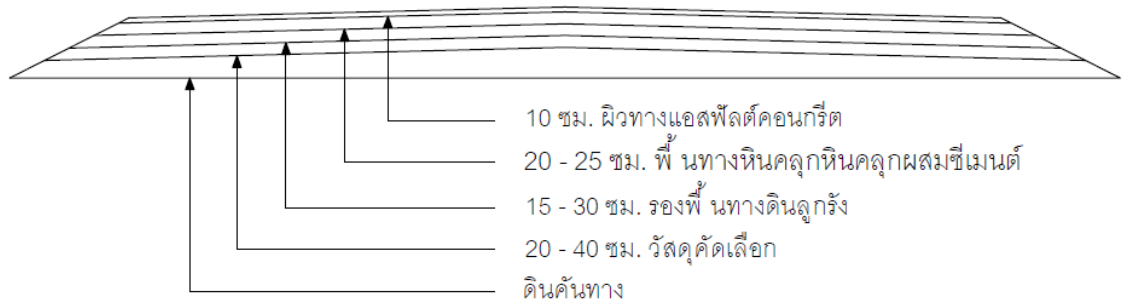
แปลงทดสอบประเภทที่ 1 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC 60-70 พื้นทางหินคลุก และรองพื้นทางดินลูกรัง (ภาพที่ 3.6) โดยแปลงทดสอบประเภทที่ 1 ตั้งอยู่ใกล้ด้านซ่งน้ำหนักสถานีสรรพยา ด้านซ่งน้ำหนักสถานีโพธาราม ด้านซ่งน้ำหนักสถานีชลบุรี ด้านซ่งน้ำหนักสถานีศรีราชา ด้านซ่งน้ำหนักสถานีระยอง ด้านซ่งน้ำหนักสถานีวัฒนานคร ด้านซ่งน้ำหนักสถานีพล ด้านซ่งน้ำหนักสถานีบ้านโป่ง ด้านซ่งน้ำหนักสถานีท่ายาง และด้านซ่งน้ำหนักสถานีประจวบคีรีขันธ์



ภาพที่ 3.6 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 1

3.4.2 แปลงทดสอบประเภทที่ 2

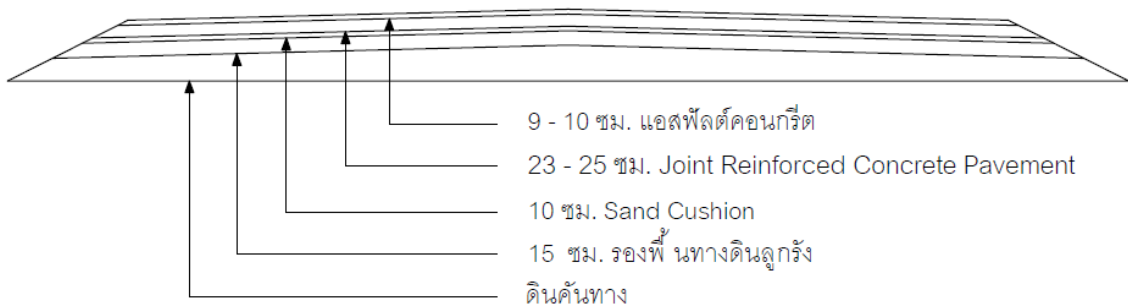
แปลงทดสอบประเภทที่ 2 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC 60-70 พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และรองพื้นทางดินลูกรัง (ภาพที่ 3.7) โดยแปลงทดสอบประเภทที่ 2 ตั้งอยู่ใกล้ด้านซ่งน้ำหนักสถานีพยุหะคีรี ด้านซ่งน้ำหนักสถานีบรรพตพิสัย ด้านซ่งน้ำหนักสถานีแก้งเลี้ยว และด้านซ่งน้ำหนักสถานีหนองกี่



ภาพที่ 3.7 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 2

3.4.2 แปลงทดสอบประเภทที่ 3

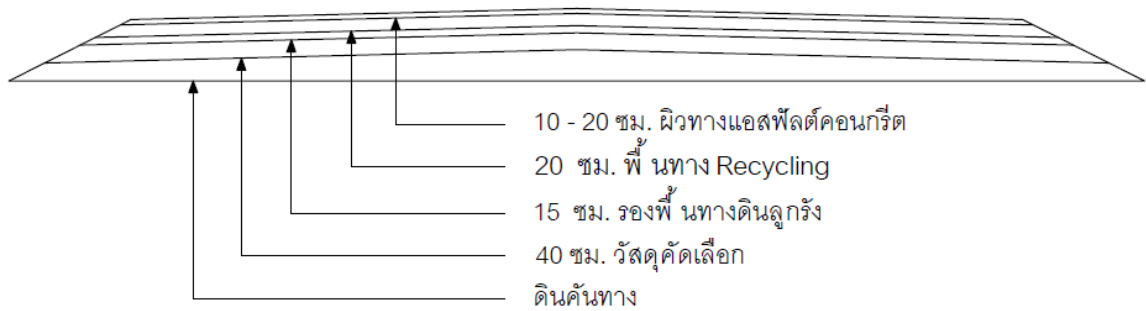
แปลงทดสอบประเภทที่ 3 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC 60-70 ปูทับพื้นทางคอนกรีตเสริมเหล็ก (Joint Reinforced Concrete Pavement, JRCP) (ภาพที่ 3.8) โดยแปลงทดสอบประเภทที่ 3 ตั้งอยู่ใกล้ด่านชั่งน้ำหนักสถานีแก่งคอย ด่านชั่งน้ำหนักสถานีสีคิ้ว และด่านชั่งน้ำหนักสถานีโนนสูง



ภาพที่ 3.8 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 3

3.4.4 แปลงทดสอบประเภทที่ 4

แปลงทดสอบประเภทที่ 4 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC 60-70 และพื้นทาง Pavement Recycling (ภาพที่ 3.9) โดยแปลงทดสอบประเภทที่ 4 ตั้งอยู่ใกล้ด่านชั่งน้ำหนักสถานีสมุทรสาคร และด่านชั่งน้ำหนักสถานีกำแพงเพชร



ภาพที่ 3.9 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 4

3.5 วิธีการวิเคราะห์

ข้อมูลที่รวบรวมได้ อาทิ ข้อมูลความหนาของโครงสร้างชั้นทาง (Layer Thickness) ปริมาณจราจร (Average Daily Traffic) เปอร์เซ็นต์รถบรรทุกหนัก (Percent of Heavy Truck) อัตราการเติบโตของปริมาณจราจร (Growth Rate) และค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD บนแปลงทดสอบจำนวนทั้งสิ้น 20 แปลงจะนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ดังนี้

3.5.1 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัว (Deflection Ratio)

อัตราส่วนค่าการแอ่นตัว เป็นดัชนีแสดงค่าการแอ่นตัวที่เปลี่ยนไปของโครงสร้างชั้นทางตามสภาพการใช้งาน โดยคำนวณได้จากการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบครั้งแรกกับค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบ ณ ช่วงเวลาต่างๆ หากมีการติดตามอัตราส่วนดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง ซ้ำจุดทดสอบเดิม บนแปลงทดสอบเดิม และไม่มีการบูรณะปรับปรุงสายทางเลย อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวน่าจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลา

3.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัว (Deflection) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) กับเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD)

เมื่อข้อมูลค่าการแอ่นตัวมีปริมาณเพียงพอจะสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับ LWD โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากเครื่องมือทั้งสองน่าจะมีแนวโน้มชัดเจนขึ้นตามระยะเวลา ข้อมูลดังกล่าวอาจช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถตรวจวัดติดตามค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ LWD แทนเครื่องมือ FWD ได้

เนื่องจากเครื่องมือ LWD มีขนาดเล็ก พกพาสะดวก และยังสามารถนำไปใช้งานในพื้นที่ซึ่งเครื่องมือ FWD ไม่สามารถเข้าถึงได้

3.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัส ทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับค่าโมดูลัสทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD

ในการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ค่าโมดูลัสทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD วิเคราะห์จากทฤษฎี Elastic Solution ($E_{P,ES}$) ตามสมการที่ (22) และวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{P,Back}$) ตามสมการที่ (26)

3.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัส ทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD วิเคราะห์จากสมการเชิงประจักษ์กับค่าโมดูลัสทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD วิเคราะห์จากวิธีการคำนวณย้อนกลับ

ในการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD โดยวิเคราะห์ได้จากสมการเชิงประจักษ์ (Empirical Equation, $E_{P,EQ}$) ตามสมการที่ (23)-(25) กับค่าโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD โดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{P,Back}$) ตามสมการที่ (26)

3.5.4 ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio) และค่าดัชนีความแข็งแรง (Structural Condition Index)

ในการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจะวิเคราะห์ค่าโมดูลัส และค่าความแข็งแรง Structural Number ของโครงสร้างถนนที่ได้จากการคำนวณโดยสมการเชิงประจักษ์ (Empirical Equation, $E_{P,EQ}$) เพื่อหาค่า Modulus Ratio (MR) ตามสมการที่ (19) และค่า Structural Condition Index (SCI) ตามสมการที่ (20) สำหรับประเมินสมรรถนะของโครงสร้างถนนในแต่ละแปลงทดสอบ

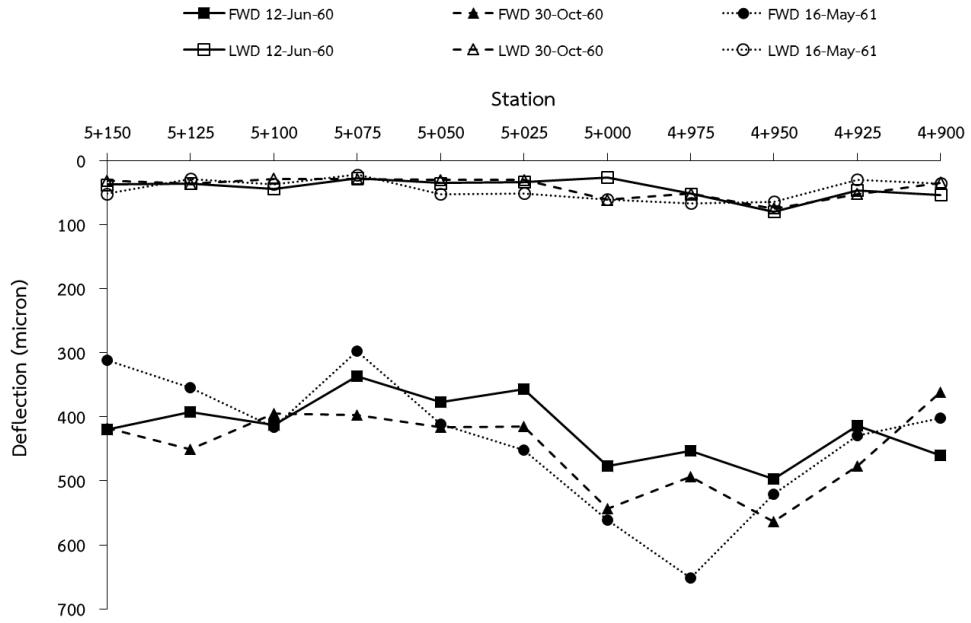
บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD

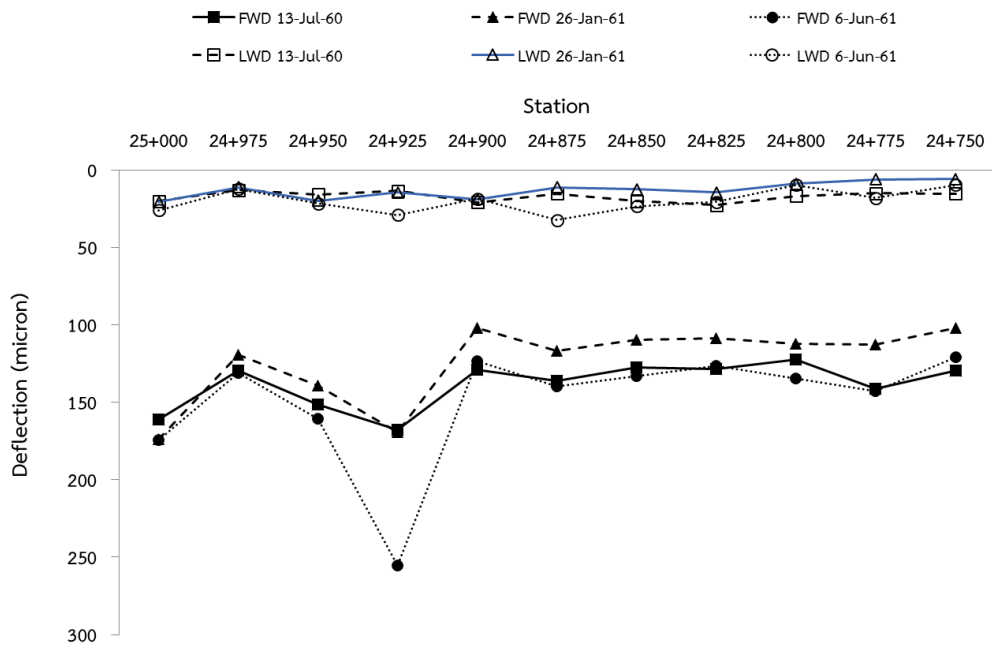
4.1.1 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของโครงสร้างถนน

จากผลการทดสอบค่าการแอ่นตัว (Deflection) ด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD จำนวน 20 แปลงทดสอบ บนทางหลวง 12 สายทาง พบว่าค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เครื่องมือ LWD ให้ค่าการแอ่นตัวน้อยกว่า เนื่องจากเครื่องมือ FWD และ LWD ใช้ตุ้มน้ำหนัก (Drop Weight) ระยะยก (Drop Height) และขนาดแผ่นจานโลหะ (Loading Plate) ต่างกัน ผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวจากแปลงทดสอบสถานีตรวจน้ำหนักบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี (แปลงทดสอบประเภทที่ 1) ผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวจากแปลงทดสอบสถานีตรวจสอบ น้ำหนักแก้วเหลียว จังหวัดนครสวรรค์ (แปลงทดสอบประเภทที่ 2) ผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวจากแปลงทดสอบสถานีตรวจสอบน้ำหนักสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา (แปลงทดสอบประเภทที่ 3) ผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวจากแปลงทดสอบสถานีตรวจสอบน้ำหนักสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร (แปลงทดสอบประเภทที่ 4) แสดงดังภาพที่ 4.1 ถึงภาพที่ 4.4 ตามลำดับ ผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวทั้งหมดแยกตามภูมิภาคของประเทศไทยแสดงในภาคผนวก ค.

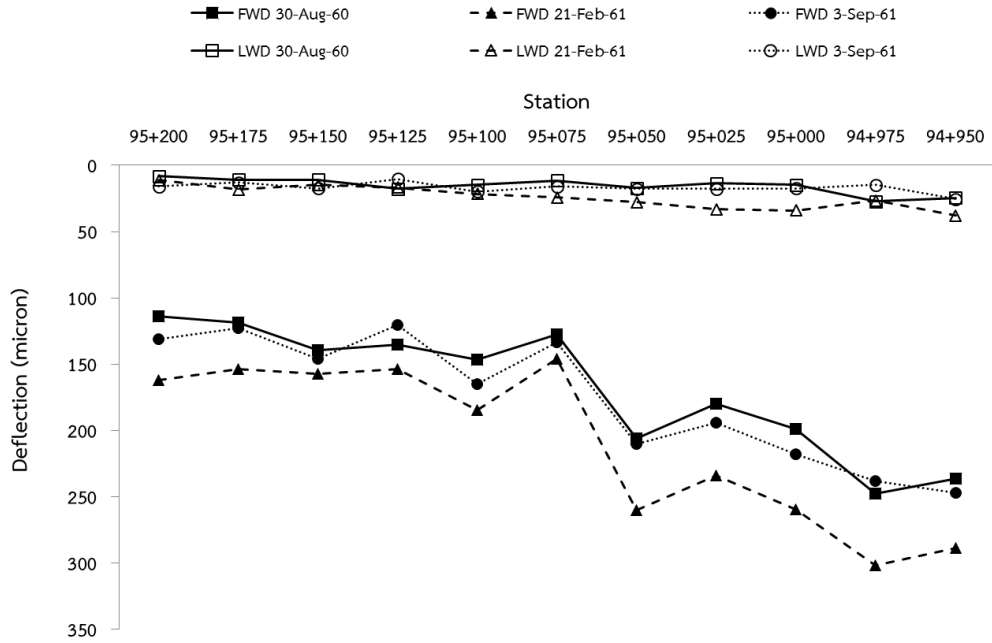


ภาพที่ 4.1 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.323 ตอน 100

ชื่อตอน หนองตะแครง - ลูกแก บริเวณ กม.4+900 - กม. 5+150 (บริเวณสถานีบ้านโป่ง)

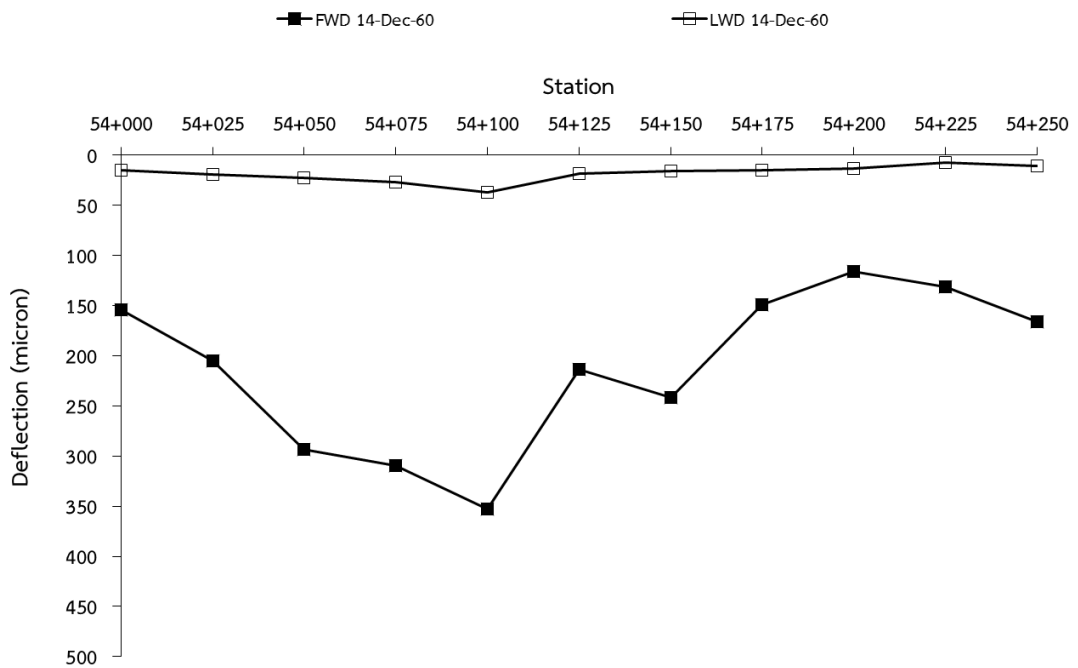


ภาพที่ 4.2 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.117 ตอน 100 ชื่อตอน นครสวรรค์ - คลองพลังด้านใต้ บริเวณ กม. 24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีแก้วเขียว)



ภาพที่ 4.3 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.2 ตอน 202

ข้อตอน บ่อทอง - มอจะบก บริเวณ กม. 94+950 - กม. 95+200 (บริเวณสถานีสี่คิ้ว)



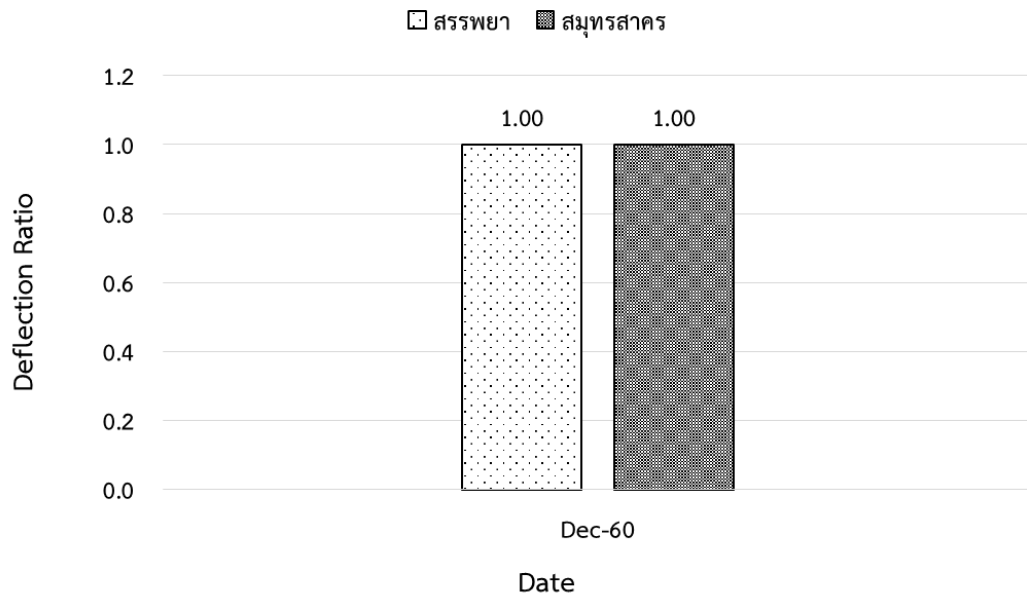
ภาพที่ 4.4 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.35 ตอน 301

ข้อตอน นาโคก - แพรกหนามแดง บริเวณ กม.54+000 - กม. 54+250 (บริเวณสถานีสมุทรสาคร)

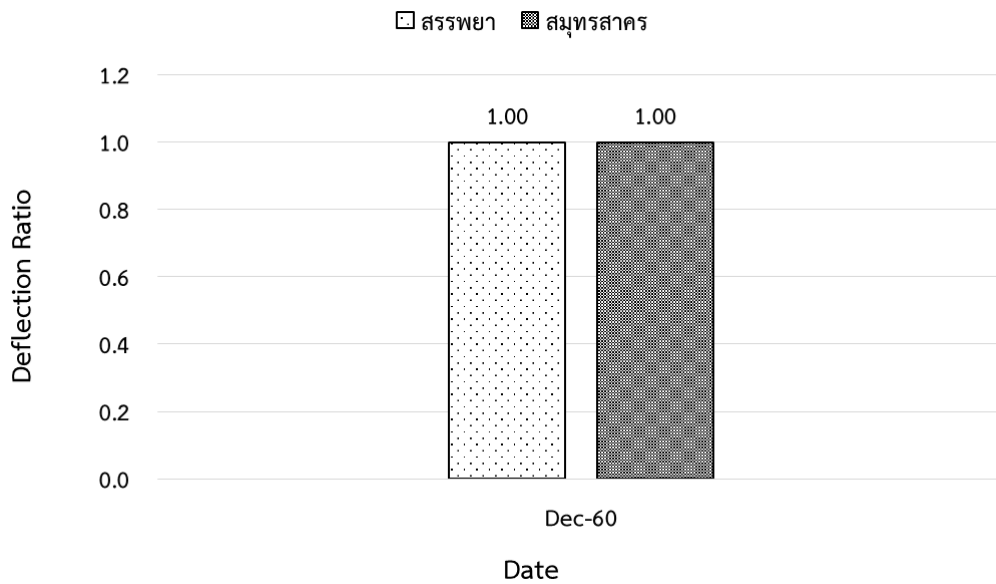
4.1.2 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัว (Deflection Ratio) ของโครงสร้างถนน

จากผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวโดยเครื่องมือ FWD และ LWD ทุก 3 – 4 เดือน นำไปคำนวณหาอัตราส่วนการแอ่นตัว (Deflection Ratio) ของโครงสร้างถนนจากค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในครั้งแรกเทียบกับค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในครั้งถัดไป อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวในพื้นที่ทดสอบภาคกลางแสดงดังภาพที่ 4.5 ถึงภาพที่ 4.8 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือแสดงดังภาพที่ 4.9 และภาพที่ 4.10 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวในพื้นที่ทดสอบภาคเหนือตอนล่างแสดงดังภาพที่ 4.11 และ ภาพที่ 4.12 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือแสดงดังภาพที่ 4.13 และภาพที่ 4.14 และอัตราส่วนค่าการแอ่นตัวในพื้นที่ทดสอบภาคใต้แสดงดังภาพที่ 4.15 และภาพที่ 4.16

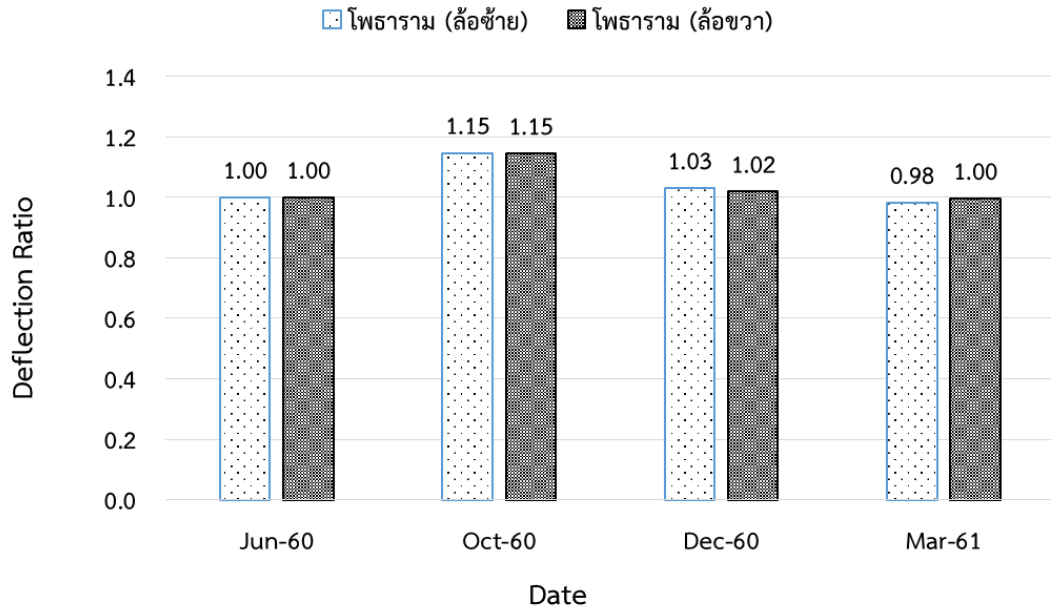
อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของโครงสร้างถนนแต่อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวดัง ภาพที่ 4.5 ถึงภาพที่ 4.15 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลง สาเหตุอาจเกิดจากจำนวนข้อมูลและระยะเวลาที่เก็บข้อมูลค่อนข้างจำกัด (ประมาณ 1 ปี) รวมถึงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งจุดทดสอบ อาจไม่ตรงกับจุดทดสอบเดิมทุกครั้ง ทั้งนี้อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวดังกล่าว ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นหากมีการศึกษาเพิ่มเติมในระยะยาวเป็นเวลาอย่างน้อย 3 ปี น่าจะเห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนค่าการแอ่นตัวที่ชัดเจนยิ่งขึ้น



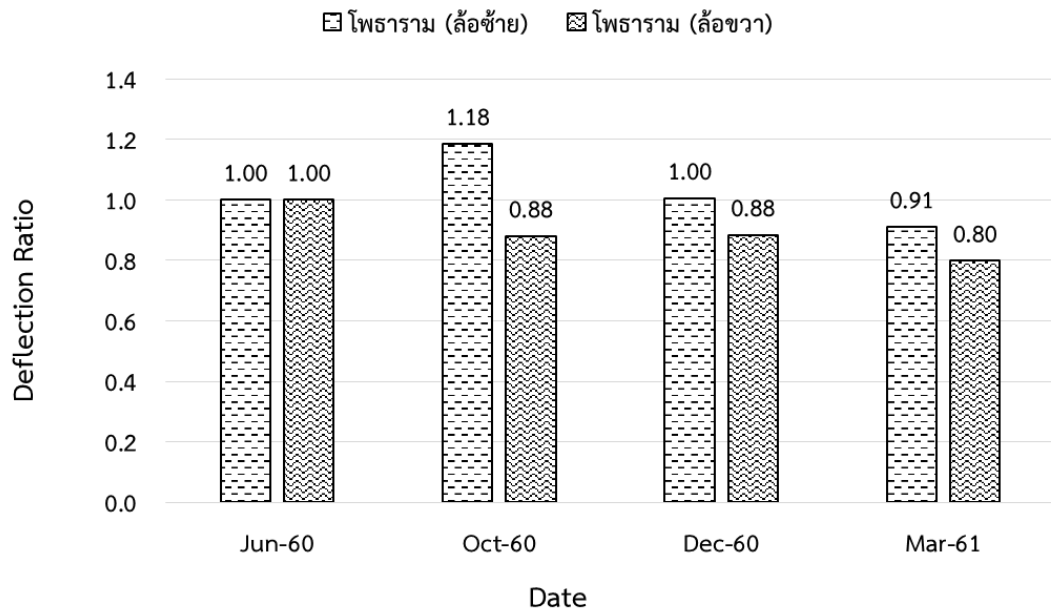
ภาพที่ 4.5 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคกลาง



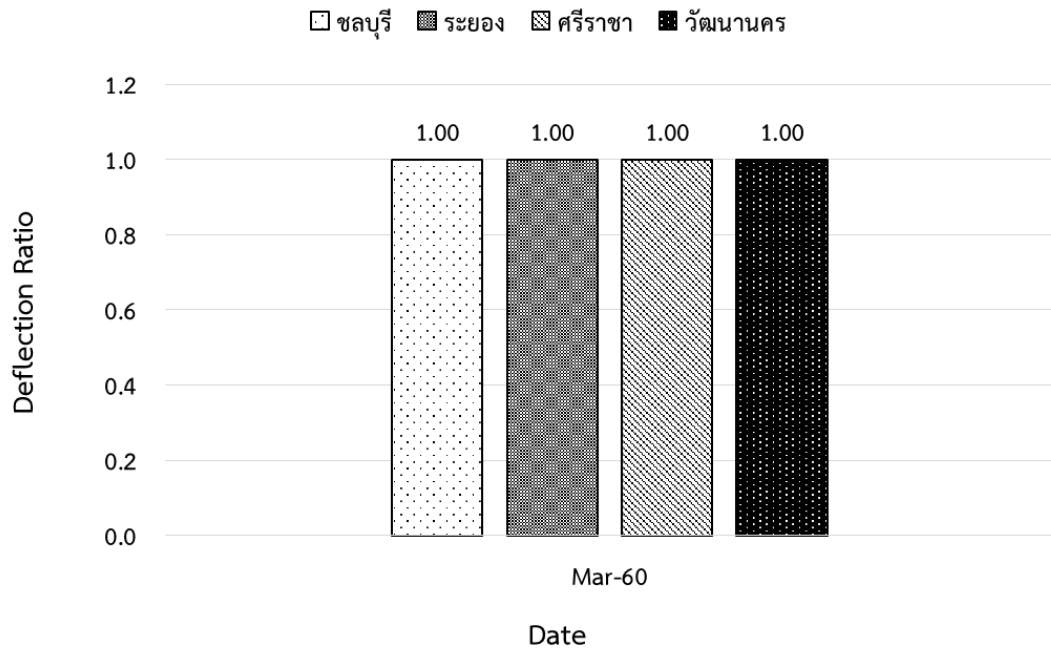
ภาพที่ 4.6 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคกลาง



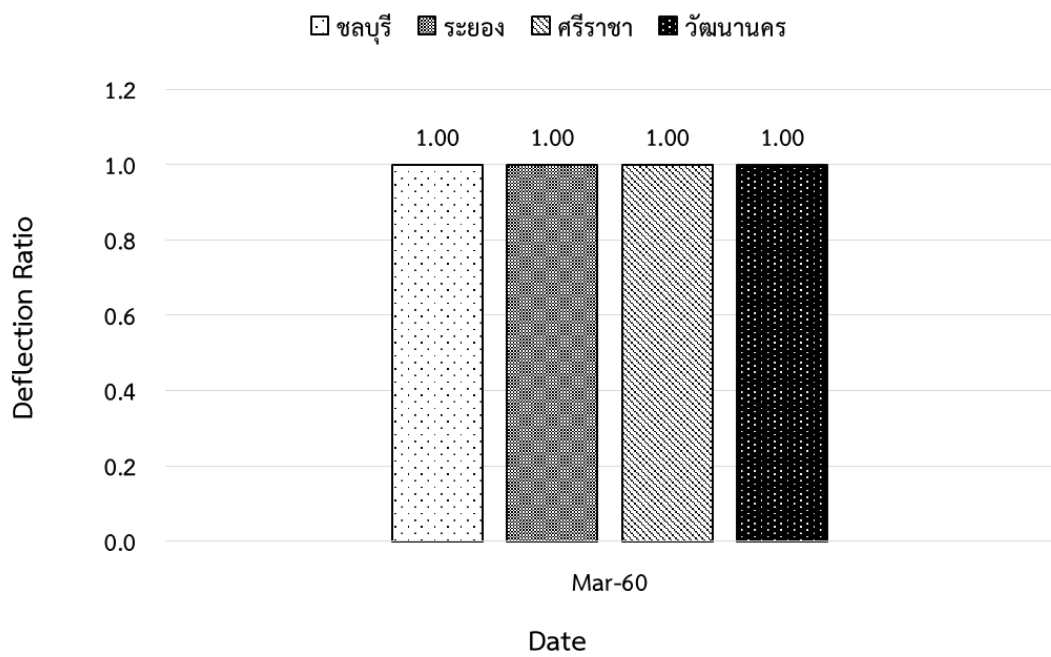
ภาพที่ 4.7 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบสถานีโพธาราม



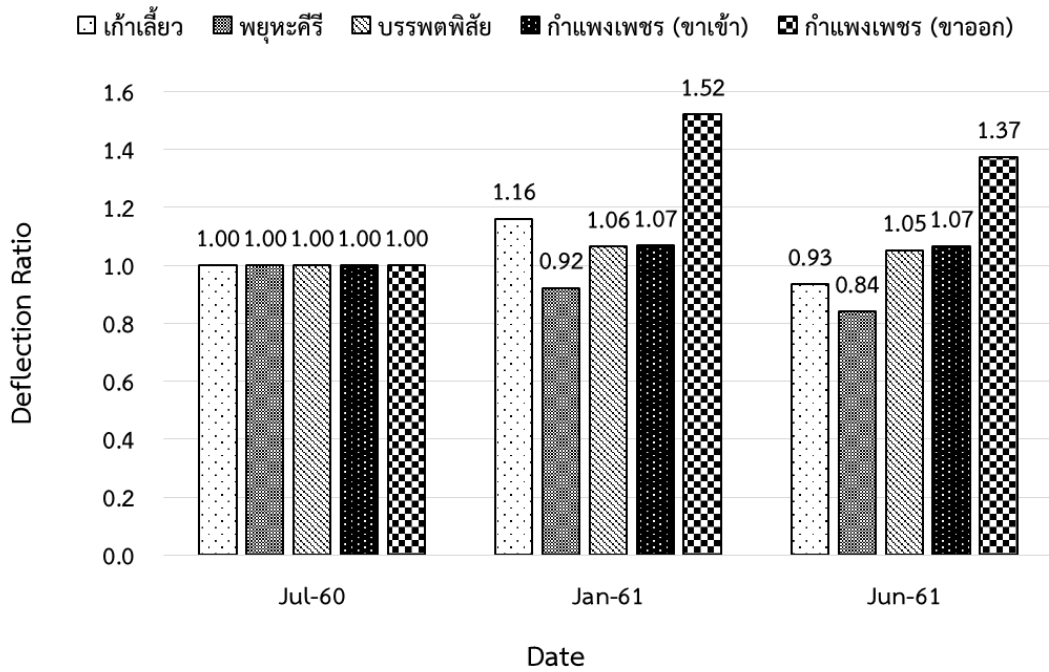
ภาพที่ 4.8 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบสถานีโพธาราม



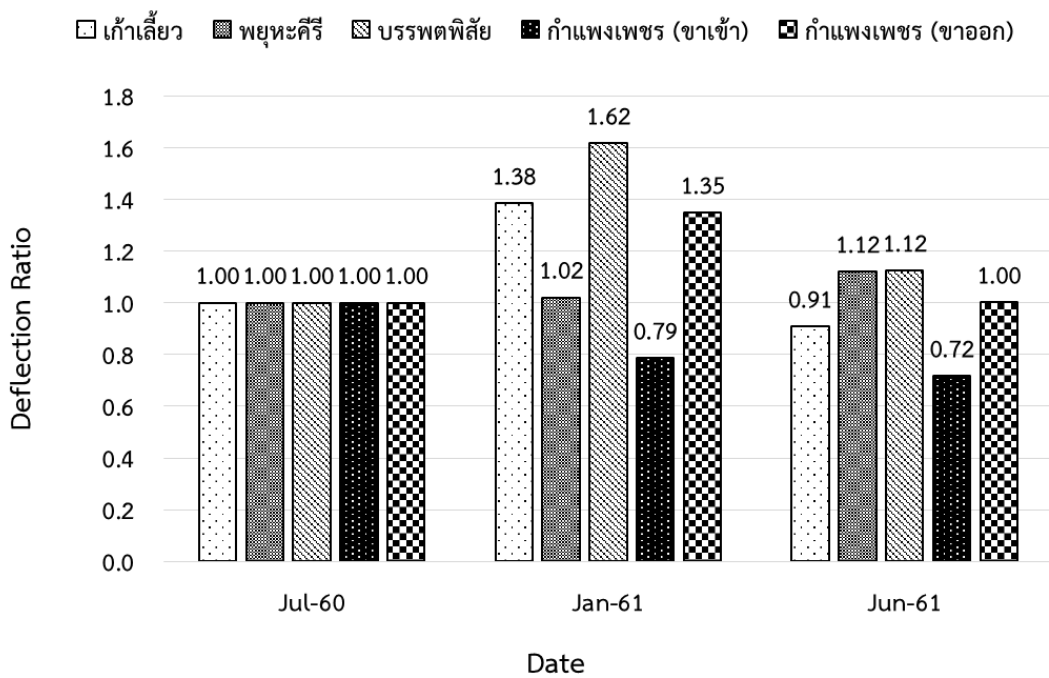
ภาพที่ 4.9 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก



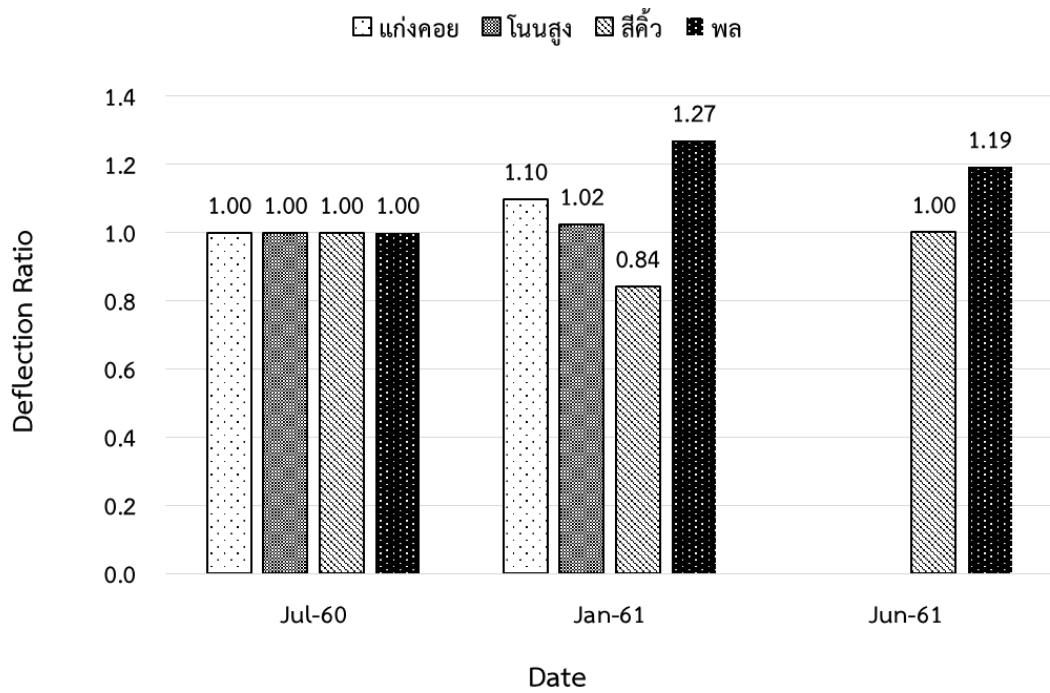
ภาพที่ 4.10 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก



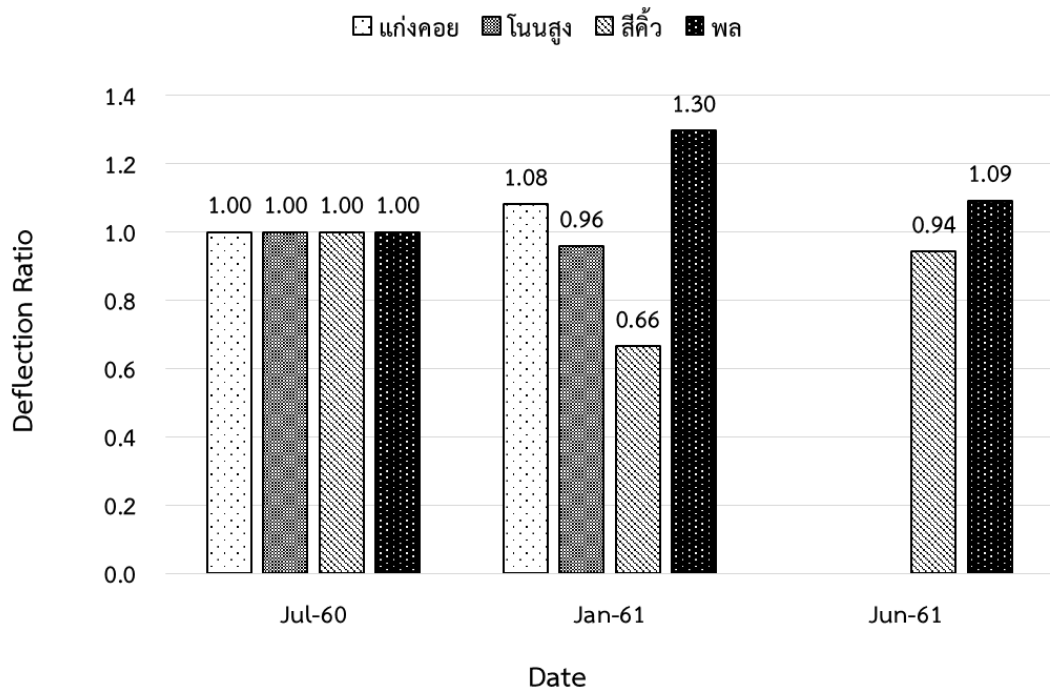
ภาพที่ 4.11 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคเหนือตอนล่าง



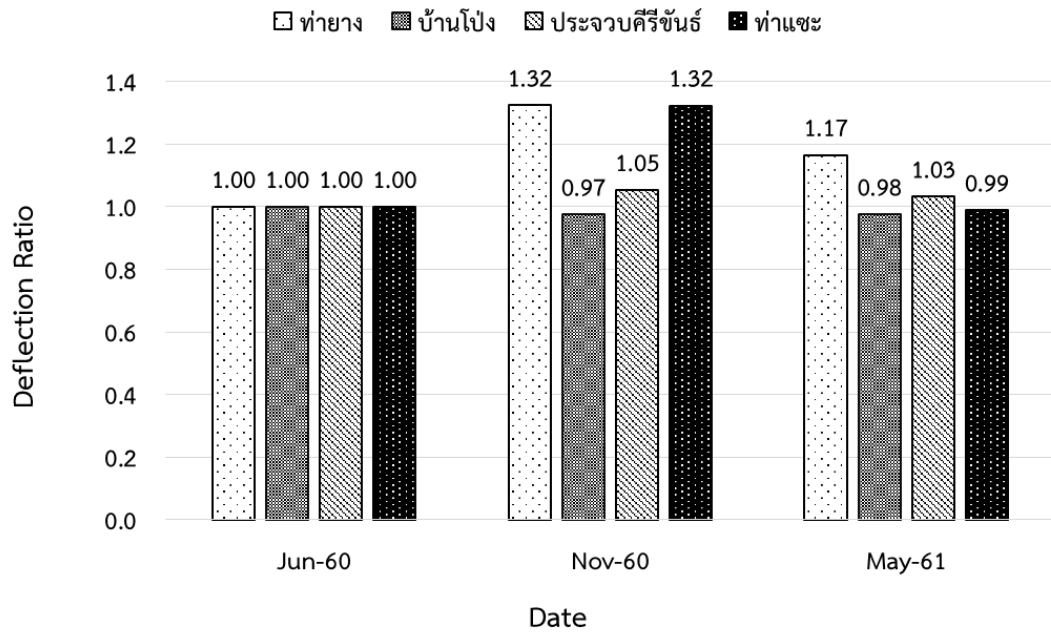
ภาพที่ 4.12 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคเหนือตอนล่าง



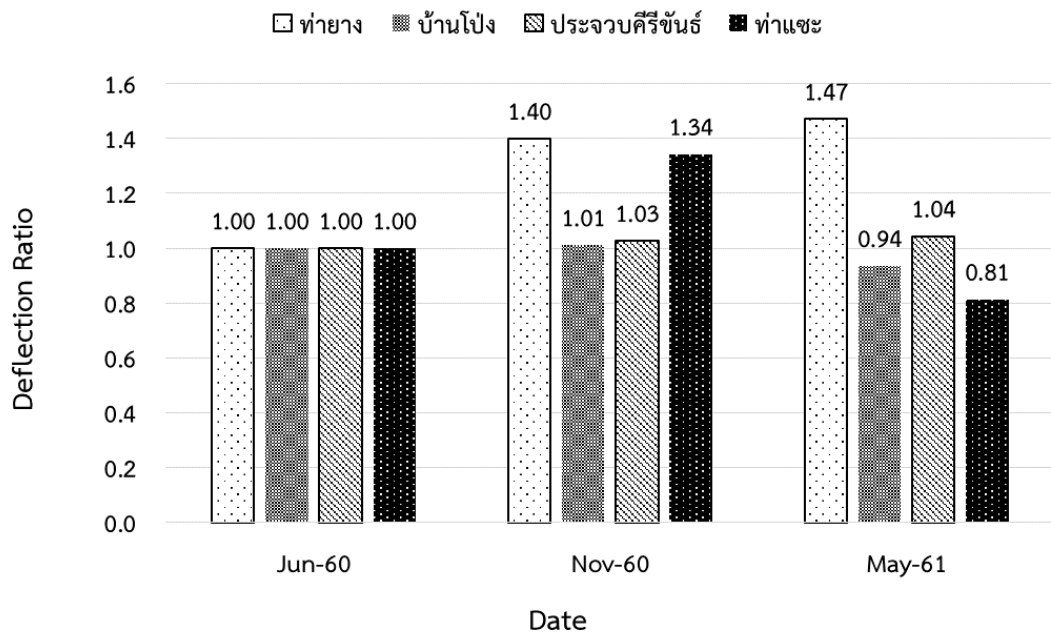
ภาพที่ 4.13 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



ภาพที่ 4.14 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



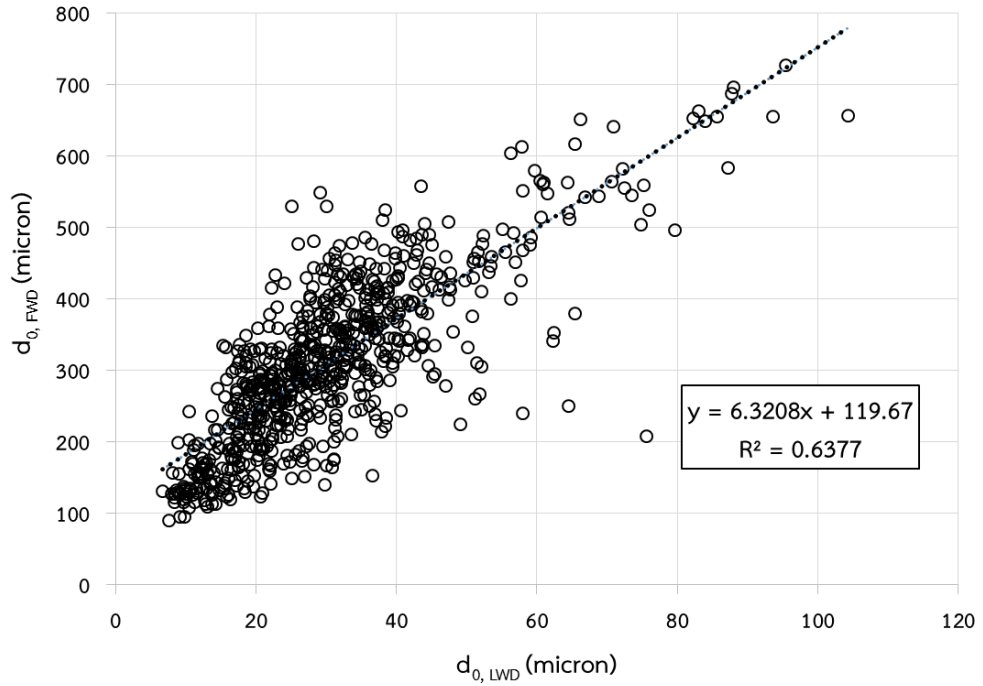
ภาพที่ 4.15 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคใต้



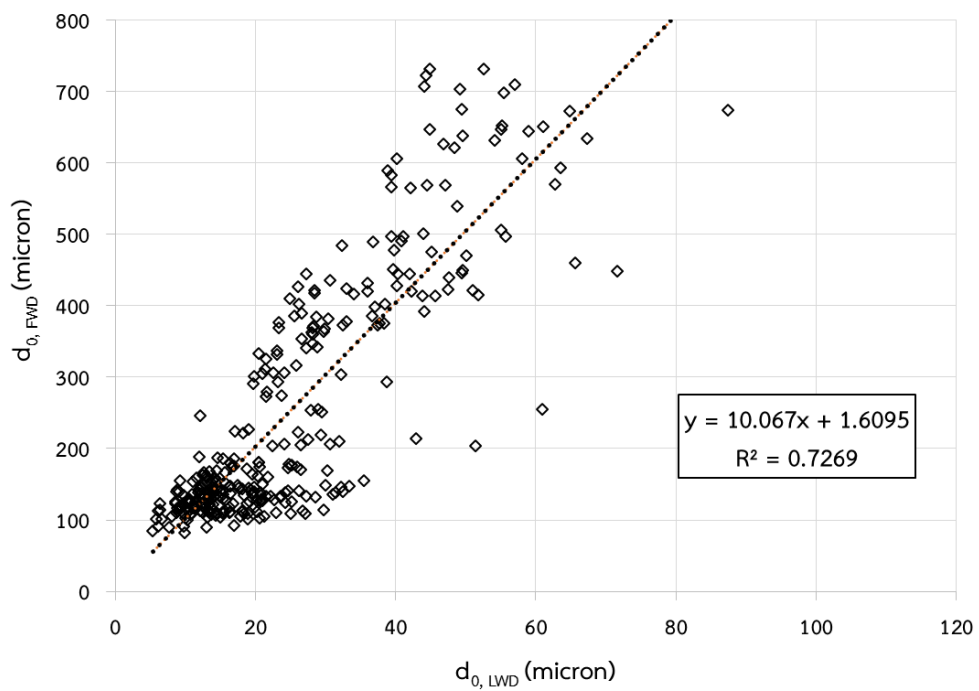
ภาพที่ 4.16 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคใต้

4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD

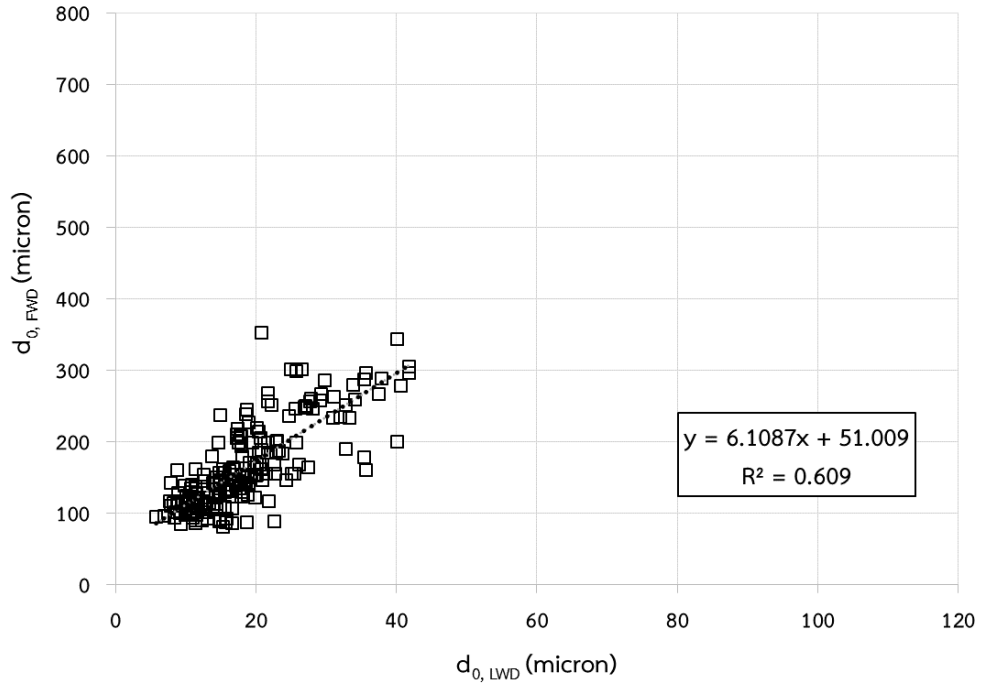
เมื่อนำผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนจากแปลงทดสอบจำนวนทั้งสิ้น 20 แปลง มาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ทดสอบได้จากเครื่องมือ FWD กับค่าการแอ่นตัวที่ทดสอบได้จากเครื่องมือ LWD โดยแบ่งพิจารณาตามประเภทของแปลงทดสอบ ได้แก่ แปลงทดสอบประเภทที่ 1 (ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต พื้นทางหินคลุก และรองพื้นทางดินลูกรัง) แปลงทดสอบประเภทที่ 2 (ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ และรองพื้นทางดินลูกรัง) แปลงทดสอบประเภทที่ 3 (ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ปูทับพื้นทางคอนกรีตเสริมเหล็ก) และแปลงทดสอบประเภทที่ 4 (ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและพื้นทาง Pavement Recycling) แสดงดังภาพที่ 4.17 ถึงภาพที่ 4.20 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง (Linear) การกระจายตัวค่อนข้างน้อย ค่า R^2 ประมาณ 0.6 - 0.8 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรมในกรณีงานทดสอบภาคสนาม และเมื่อนำผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กัน พบว่าค่า R^2 ประมาณ 0.74 ดังภาพที่ 4.21 (ก) นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้ทำการปรับเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูล (Trend Line) ให้มีจุดตัดแกนอยู่ที่ X,Y เท่ากับ 0,0 ดังภาพที่ 4.21 (ข) โดยพบว่าค่า R^2 ประมาณ 0.71 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD มีค่าสูงกว่าค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ประมาณ 9.6 เท่า



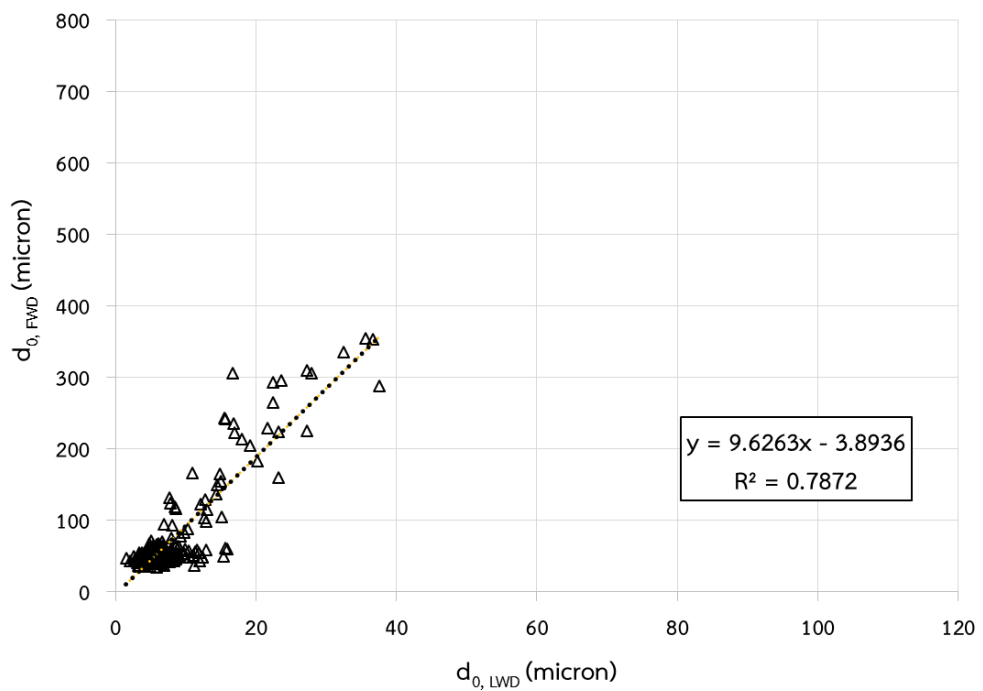
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 1



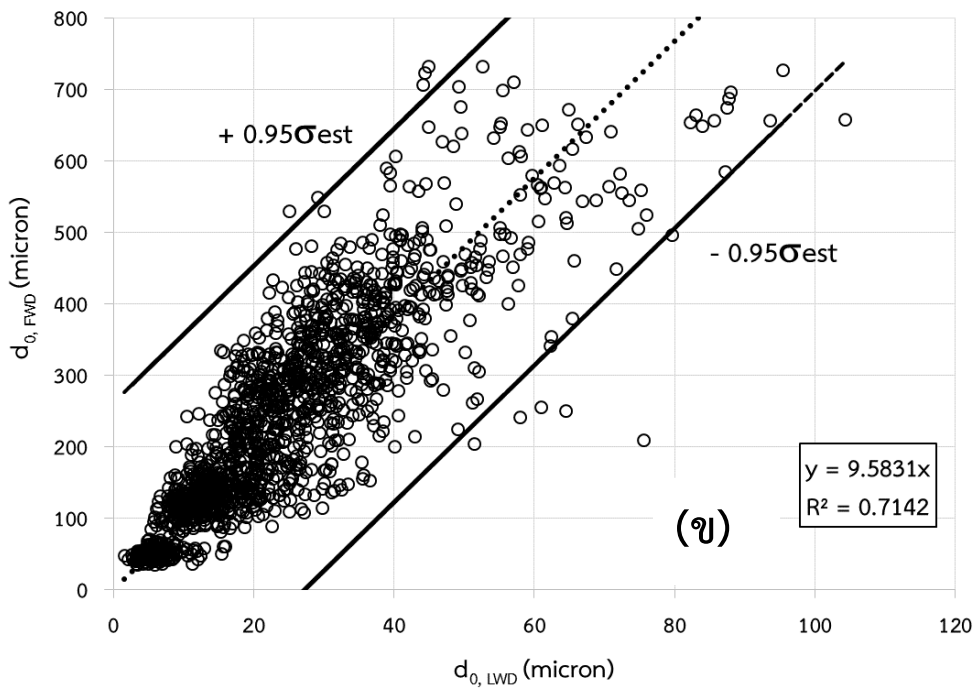
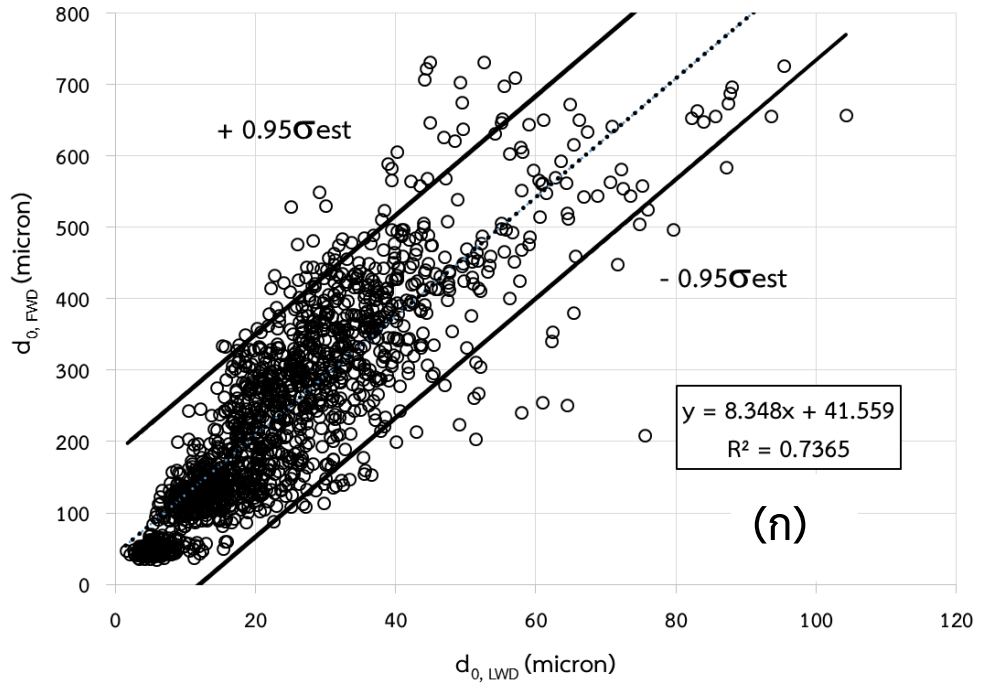
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 2



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 3



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 4



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบทั้ง 4 ประเภท

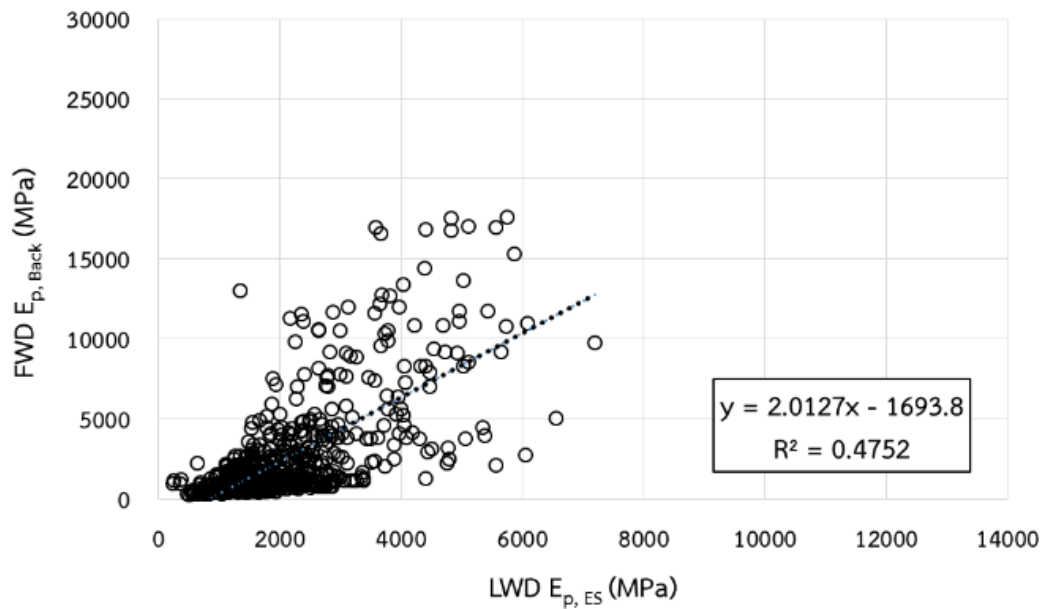
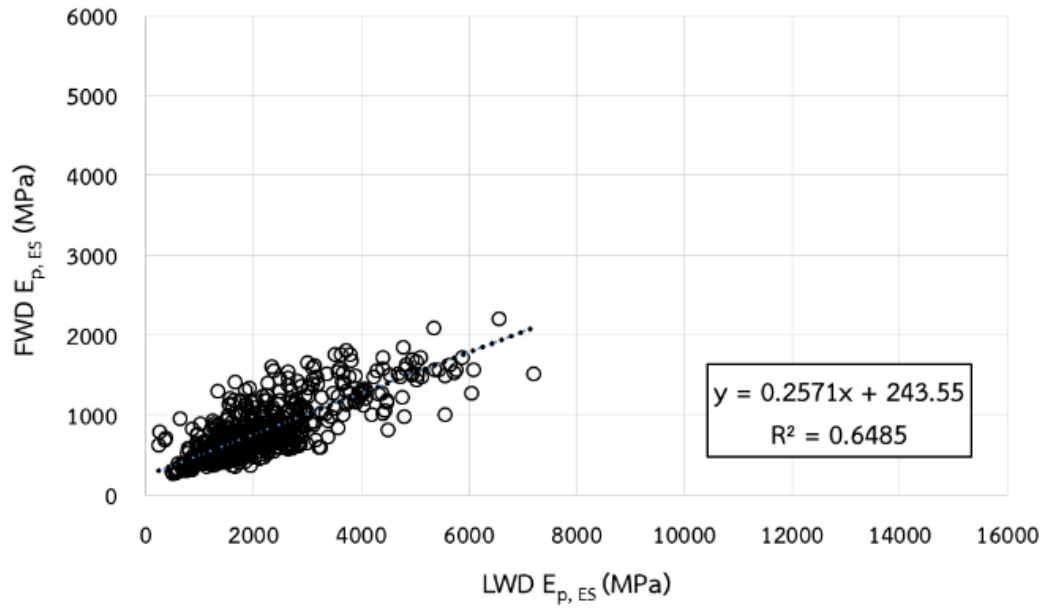
4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของชั้นโครงสร้างถนน

ในการวิจัยนี้ ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD สามารถวิเคราะห์ได้หลายแนวทางดังที่อธิบายไว้ในข้างต้น ยกตัวอย่างเช่น การคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนตามทฤษฎี Elastic Solution การคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยใช้สมการเชิงประจักษ์ และการคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation) ในขณะที่ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD สามารถวิเคราะห์ตามทฤษฎี Elastic Solution ได้เพียงวิธีเดียว

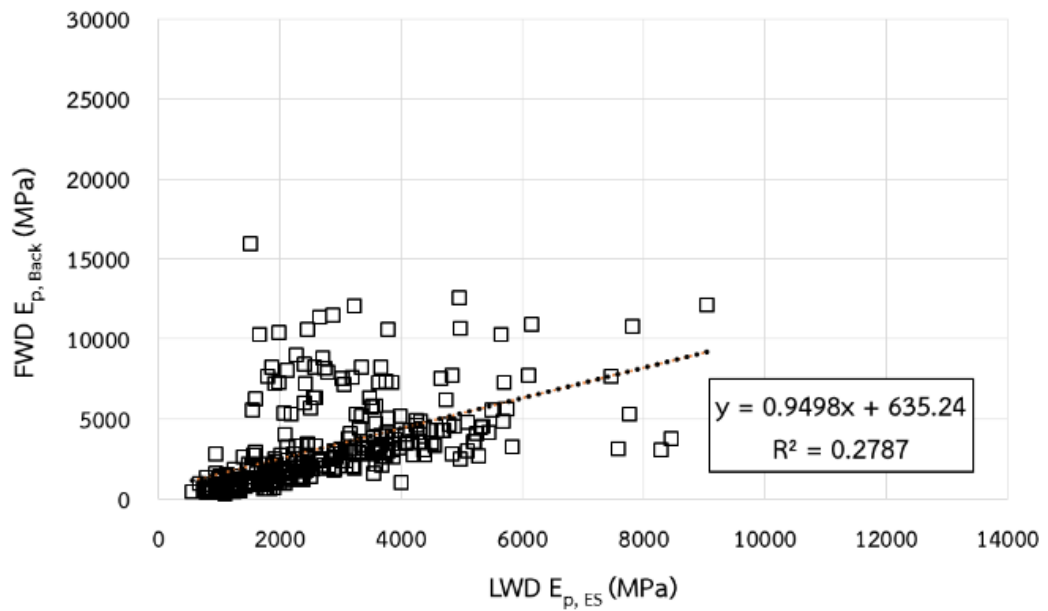
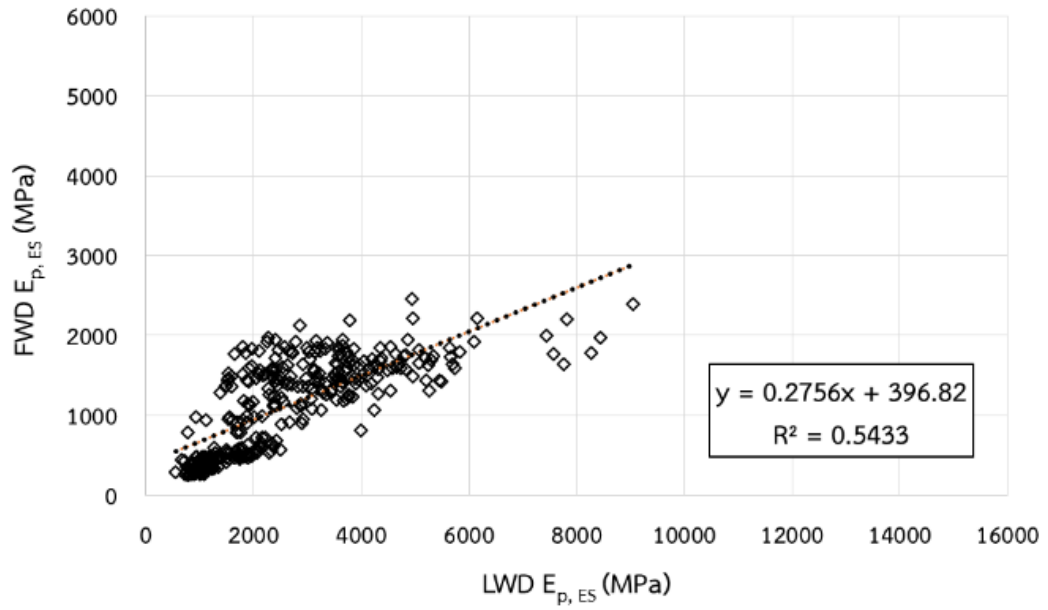
4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนตามทฤษฎี Elastic Solution (E_p, E_s) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (E_p, E_{back})

ค่าการอ่อนตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD คำนวณเป็นค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนตามทฤษฎี Elastic Solution (สมการที่ (22)) นำไปพล็อตกราฟระหว่างกันโดยแบ่งตามประเภทของแปลงทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.22 ถึง ภาพที่ 4.25 จากผลการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสที่คำนวณตามทฤษฎีนี้มีค่า R^2 ประมาณ 0.38 - 0.65 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแปลงทดสอบทั้งหมดดังภาพที่ 4.26 ค่า R^2 ประมาณ 0.73 นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าแปลงทดสอบประเภทที่ 4 (ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและพื้นทาง Pavement Recycling) มีค่า R^2 ต่ำที่สุด จึงเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนที่มีสูง หรือค่าการอ่อนตัวของโครงสร้างถนนต่ำ ส่งผลให้ค่า R^2 ต่ำ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสตามทฤษฎี Elastic Solution จึงมีความเหมาะสมในกรณีโครงสร้างถนนลาดยางเป็นโครงสร้างชั้นทางแบบปกติ (Conventional Flexible Pavement)

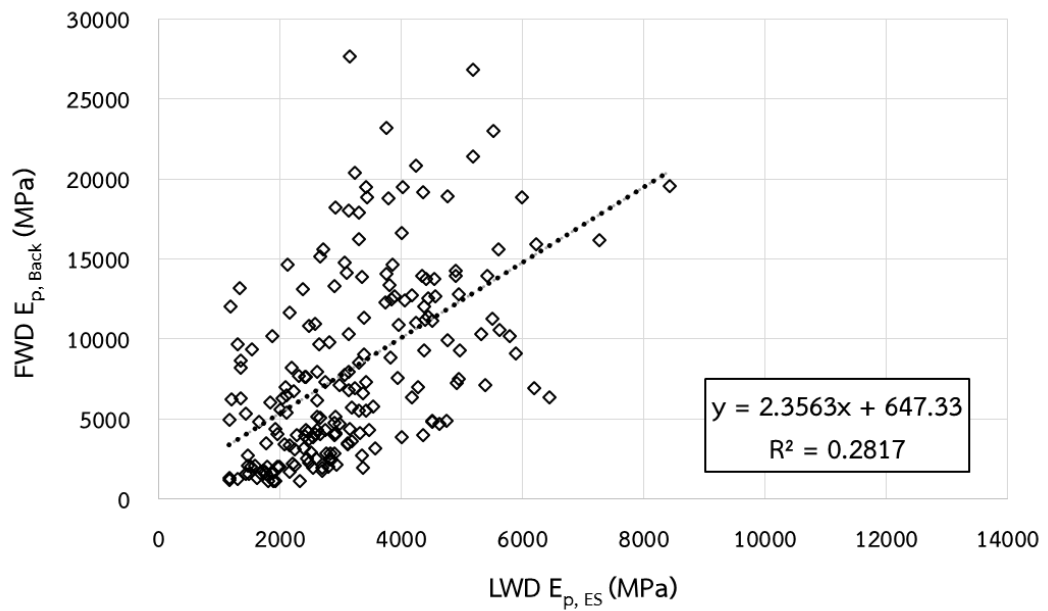
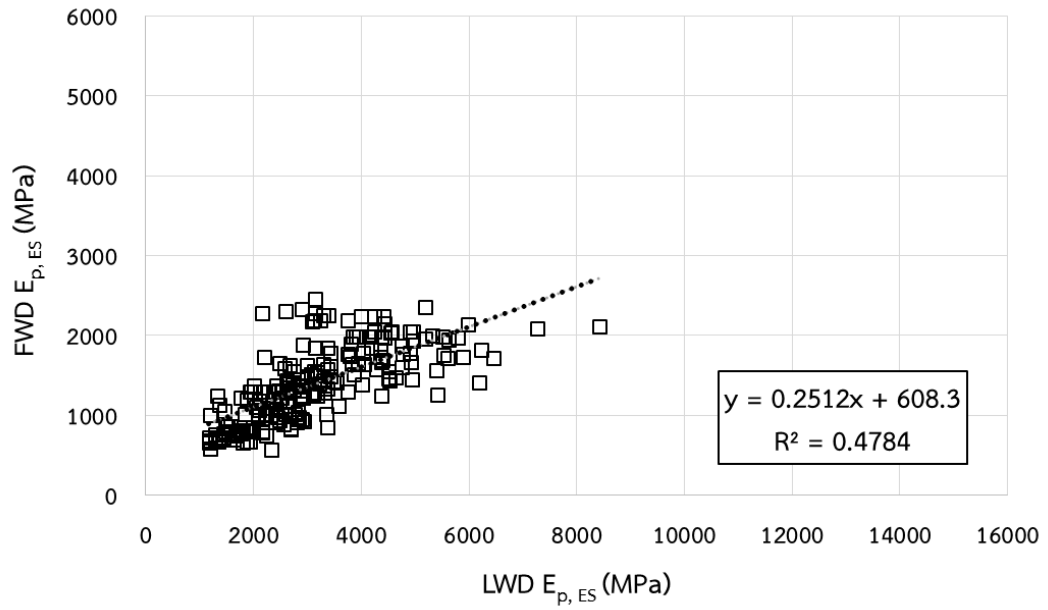
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนตามทฤษฎี Elastic Solution กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับของแต่ละแปลงทดสอบ (ภาพที่ 4.21 ถึง ภาพที่ 4.25) พบว่าค่า R^2 ค่อนข้างต่ำสำหรับแปลงทดสอบแต่ละประเภท ค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.02 ถึง 0.48 และค่า R^2 สำหรับแปลงทดสอบทั้ง 4 แปลง ประมาณ 0.39 ทั้งนี้สาเหตุของค่า R^2 ต่ำนั้นอาจเป็นเพราะการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลายตัว เช่น ค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทาง ความหนาของชั้นทางแต่ละชั้น เป็นต้น ในขณะที่การคำนวณค่าโมดูลัสตามทฤษฎี Elastic Solution ไม่ได้พิจารณาค่าโมดูลัส และความหนาของวัสดุชั้นทางแต่ละชั้น



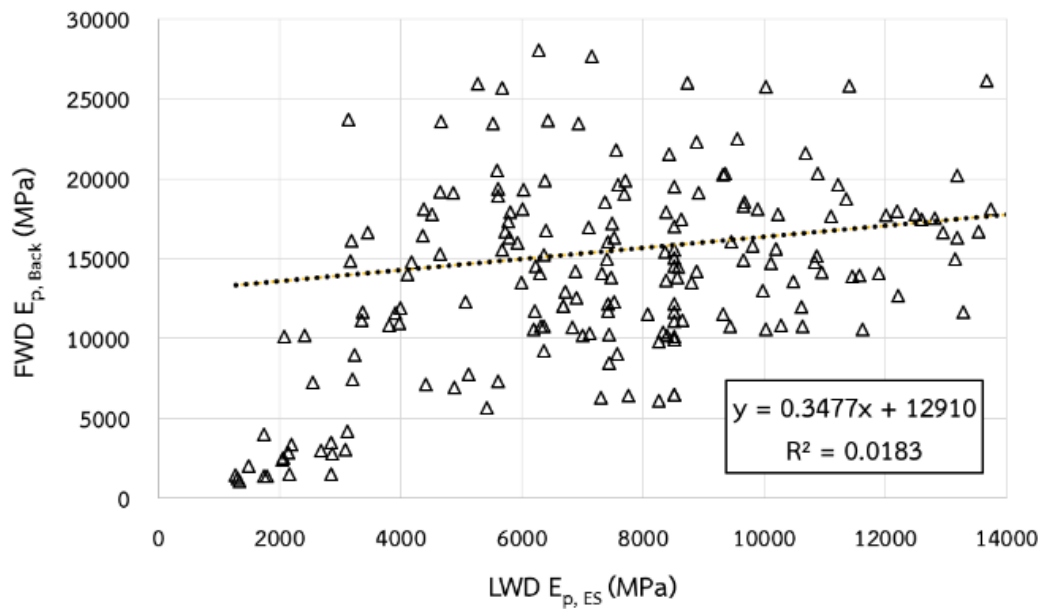
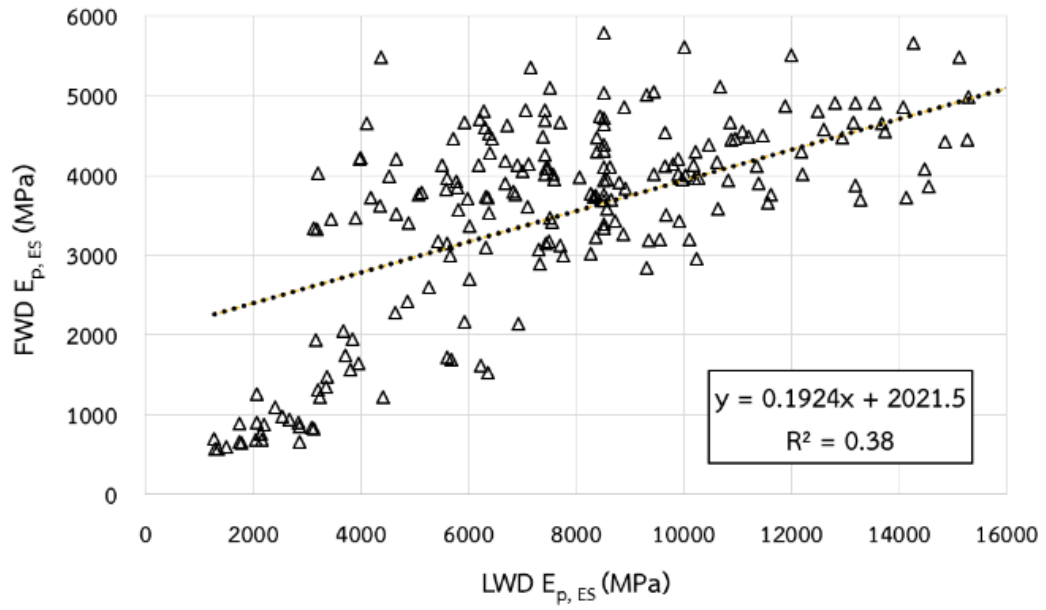
ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{p,ES}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ และ FWD $E_{p,Back}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ ในแปลงทดสอบประเภทที่ 1



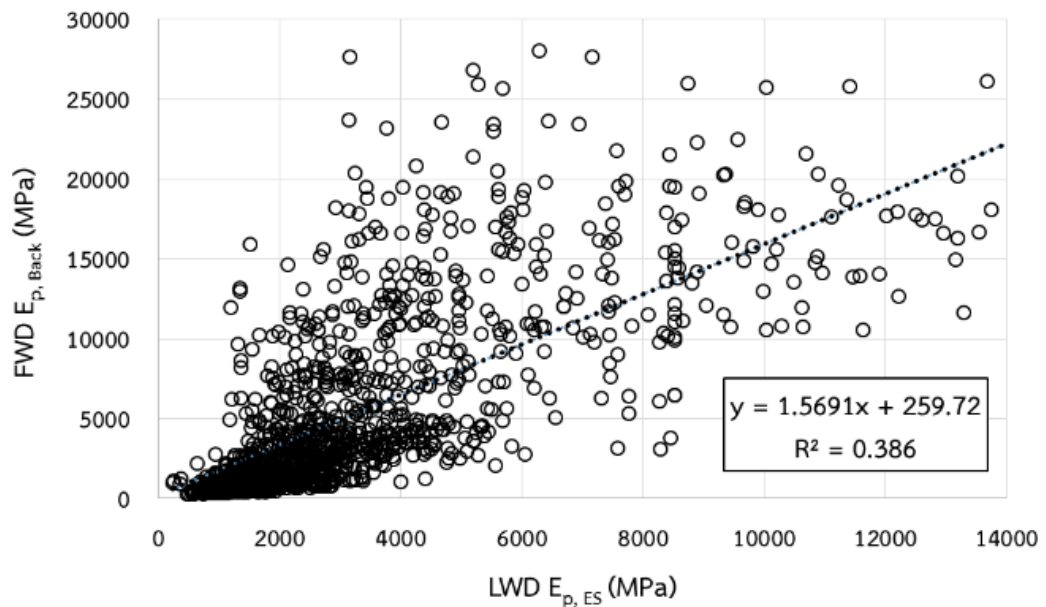
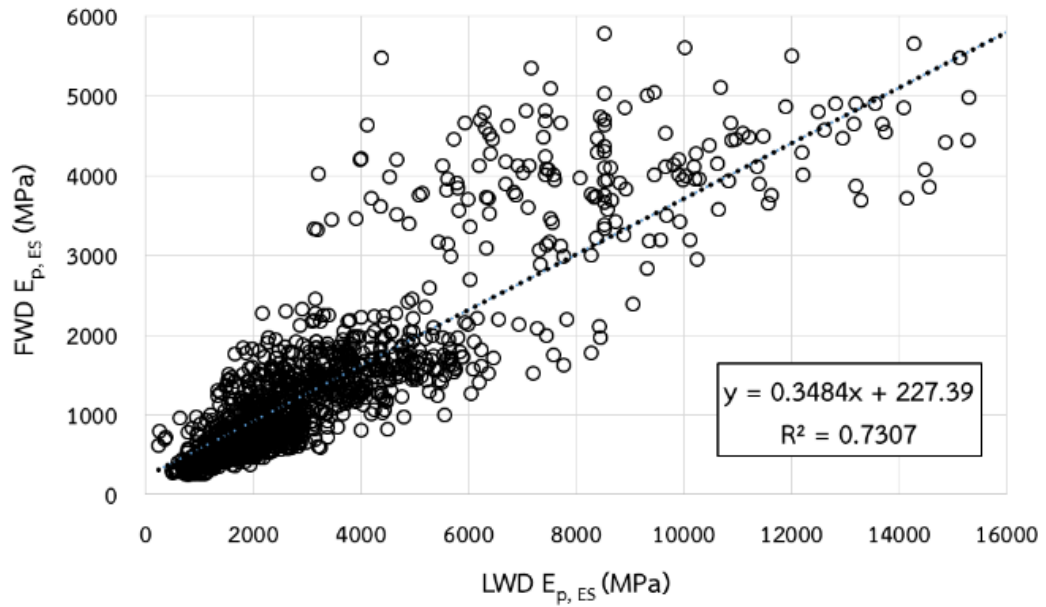
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{p,ES}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ และ FWD $E_{p,Back}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ ในแปลงทดสอบประเภทที่ 2



ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{p,ES}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ และ FWD $E_{p,Back}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ ในแปลงทดสอบประเภทที่ 3



ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{p,ES}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ และ FWD $E_{p,Back}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ ในแปลงทดสอบประเภทที่ 4



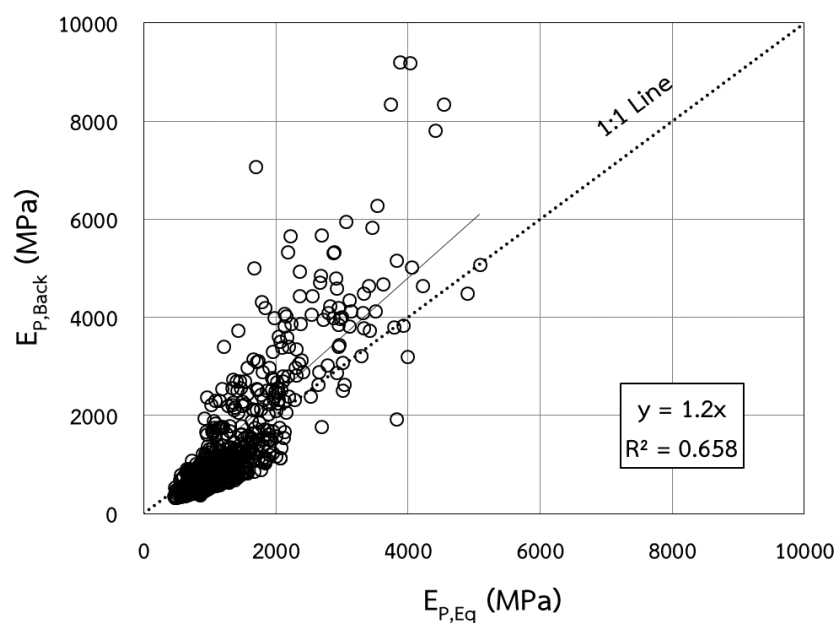
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{p,ES}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ และ FWD $E_{p,Back}$ กับ LWD $E_{p,ES}$ ในแปลงทดสอบทั้ง 4 ประเภท

4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนจากสมการเชิงประจักษ์ ($E_{P,EQ}$) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{P,Back}$)

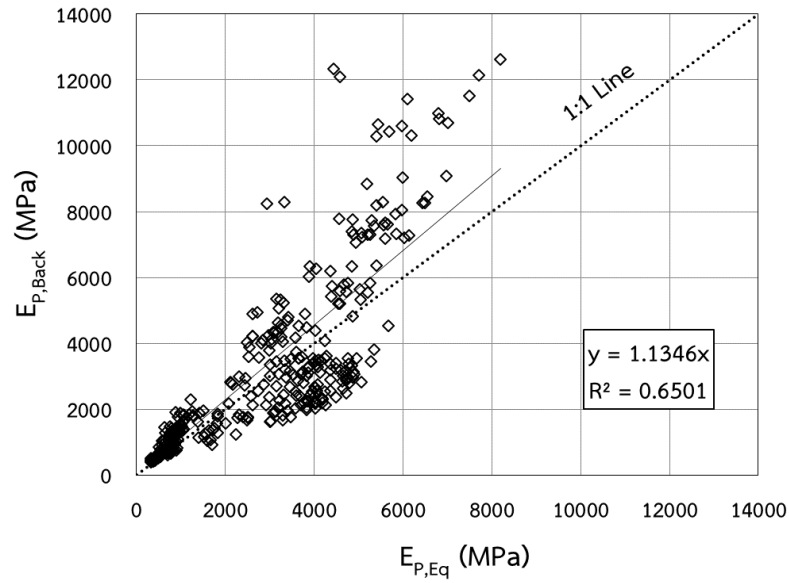
จากผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 1 และ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{P,Back}$) ด้วยโปรแกรม ELMOD 4.4 มีค่าประมาณ 1.1 ถึง 1.2 เท่าของค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ ($E_{P,EQ}$)

ดังภาพที่ 4.27 และภาพที่ 4.28 จึงอาจสรุปได้ว่าสมการที่ (23) – (25) มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) ซึ่งมีค่า $E_{P,Back}$ น้อยกว่า 10,000 MPa

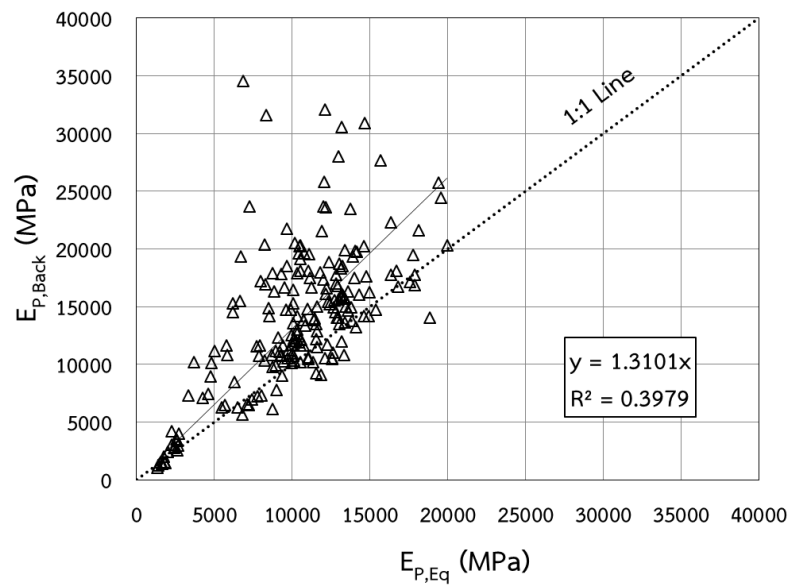
สำหรับกรณีโครงสร้างถนนเป็นโครงสร้างเดิมหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) ยกตัวอย่างเช่น แปลงทดสอบประเภทที่ 4 พบว่าค่า $E_{P,Back}$ ค่าประมาณ 1.3 เท่าของค่า $E_{P,Eq}$ ดังภาพที่ 4.29 จึงอาจสรุปได้ว่าสมการที่ (23) – (25) ให้ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน ต่ำกว่าวิธีการคำนวณย้อนกลับ โดยโครงสร้างถนนมีค่า $E_{P,Back}$ สูงกว่า 10,000 MPa



ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ ($E_{P,Eq}$) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{P,Back}$) ในแปลงทดสอบประเภทที่ 1

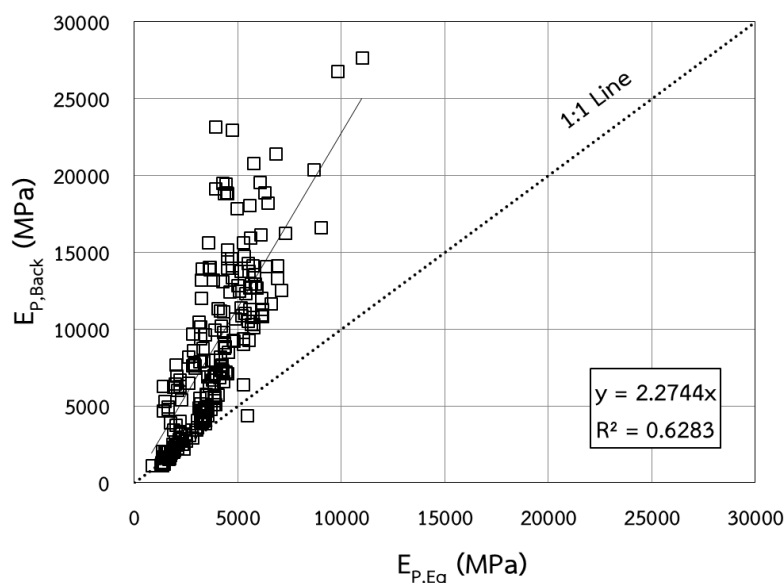


ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการ
เชิงประจักษ์ ($E_{P,Eq}$) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{P,Back}$)
ในแปลงทดสอบประเภทที่ 2



ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการ
เชิงประจักษ์ ($E_{P,Eq}$) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{P,Back}$)
ในแปลงทดสอบประเภทที่ 4

กรณีสำหรับโครงสร้างถนนเป็นโครงสร้างแบบผสม (Composite Pavement) เช่น การปูผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทับถนนคอนกรีตเดิม (Overlay) ยกตัวอย่างเช่น แปลงทดสอบประเภทที่ 3 พบว่าค่า $E_{P,Back}$ มีค่าประมาณ 2.27 เท่าของค่า $E_{P,Eq}$ ดังภาพที่ 4.30 จึงอาจสรุปได้ว่าค่าโมดูลัสที่คำนวณจากสมการที่ (23) – (25) ต่ำกว่าค่าโมดูลัสโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า R^2 ประมาณ 0.63



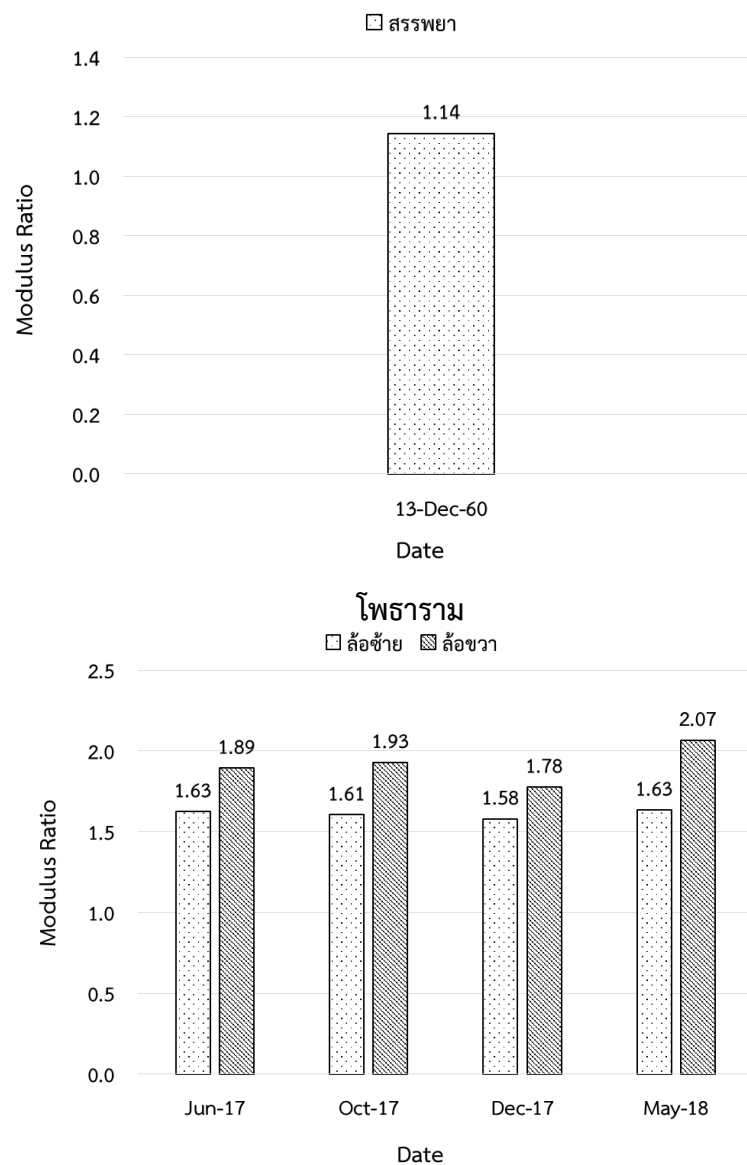
ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ ($E_{P,Eq}$) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{P,Back}$) ในแปลงทดสอบประเภทที่ 3

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงสรุปว่า สมการที่ (23) – (25) ใช้วิเคราะห์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) ซึ่งมีค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนน้อยกว่า 10,000 MPa ในขณะที่ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนซึ่งเป็นโครงสร้างเดิมหมุนเวียนออกมาใช้ใหม่ (Pavement Recycle) และโครงสร้างแบบผสม (Composite Pavement) ยกตัวอย่างเช่น แปลงทดสอบประเภทที่ 3 และ 4 มีค่าโมดูลัสค่อนข้างสูง (> 10,000 MPa) จึงอาจไม่เหมาะสมที่จะใช้สมการเชิงประจักษ์ในการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน ดังนั้นในการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) ในหัวข้อถัดไปจึงพิจารณาเฉพาะกรณีโครงสร้างชั้นทางแบบปกติ (Conventional Flexible Pavement) ซึ่งมีค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนน้อยกว่า 10,000 MPa

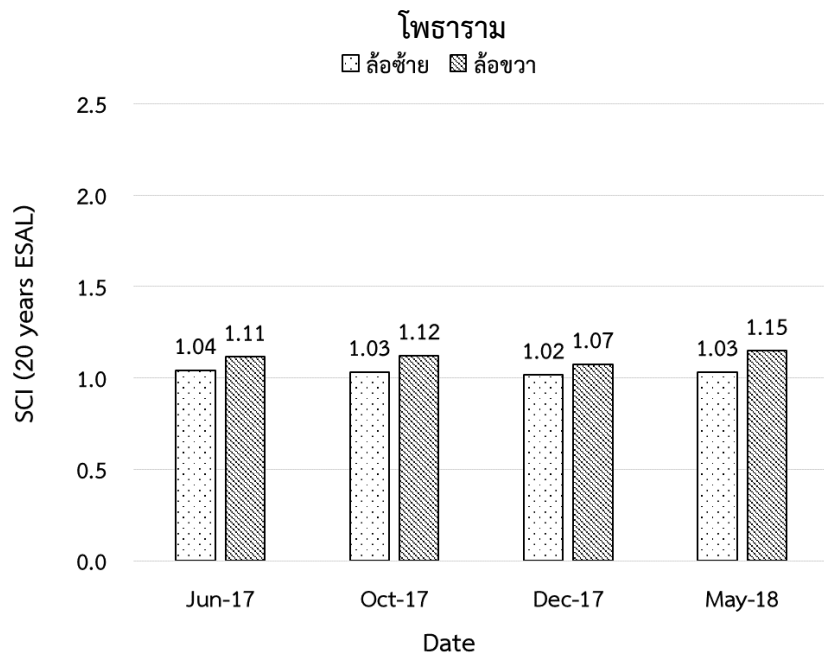
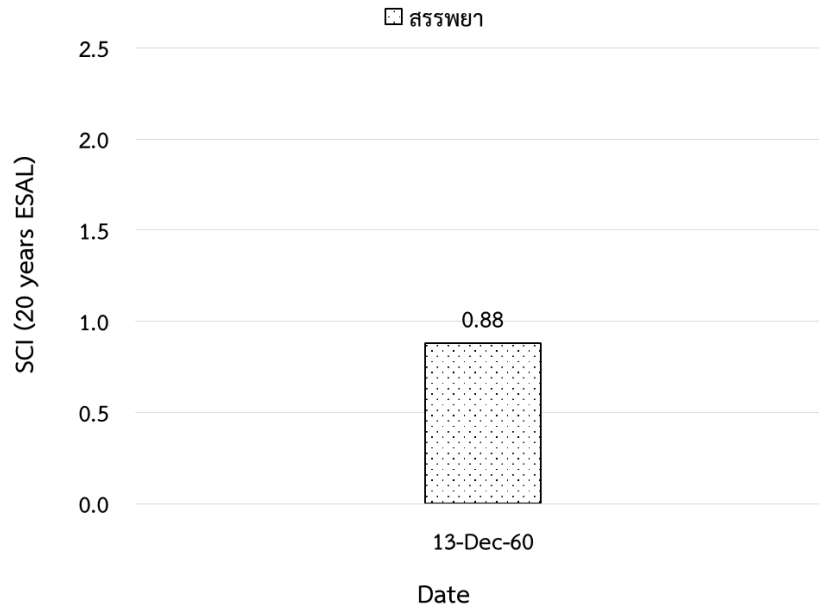
4.3 ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) และค่าดัชนีความแข็งแรง (Structural Condition Index, SCI)

คณะวิจัยได้รวบรวมผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) และค่าดัชนีความแข็งแรง Structural Condition Index (SCI) ของสายทางตามช่วงเวลาต่างกัน โดยพิจารณาเฉพาะกรณีโครงสร้างถนนแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) ด้วยเหตุผลตามที่อธิบายไว้ในข้างต้น ผลการวิเคราะห์แบ่งตามพื้นที่ทดสอบ มีดังนี้

4.3.1 ค่า MR และค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคกลาง แสดงดังภาพที่ 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ

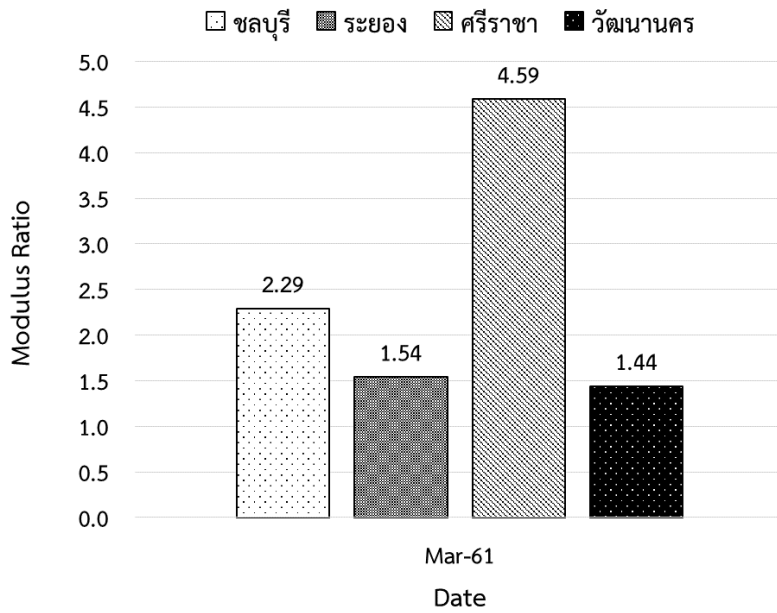


ภาพที่ 4.31 ค่า MR ของพื้นที่ทดสอบภาคกลาง

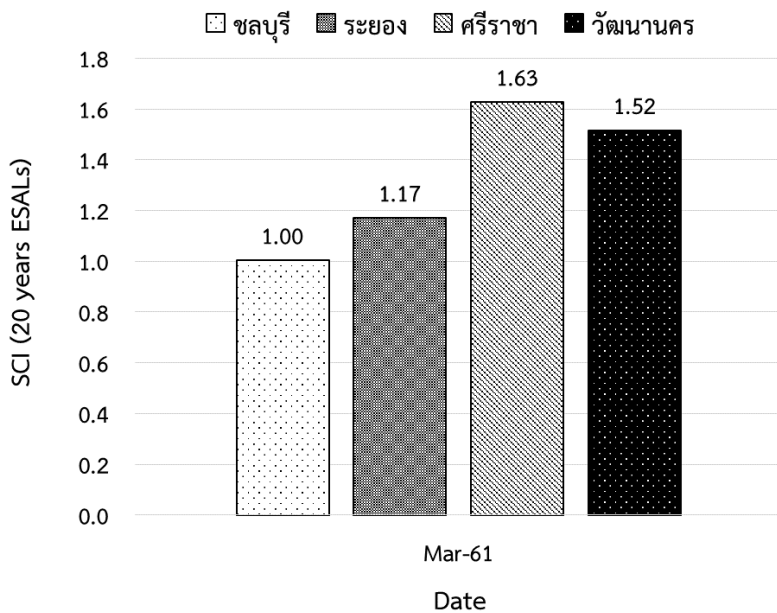


ภาพที่ 4.32 ค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคกลาง

4.3.2 ค่า MR และค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก แสดงดังภาพที่ 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ

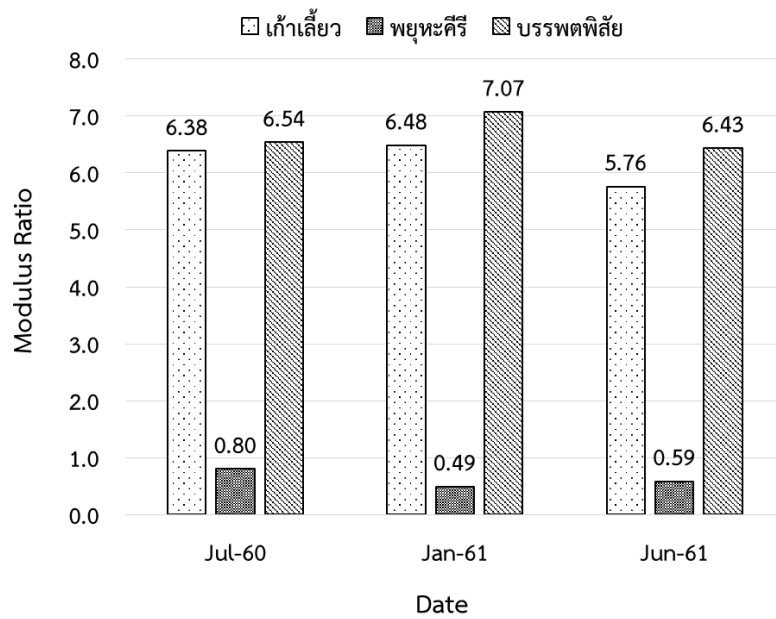


ภาพที่ 4.33 ค่า MR ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก

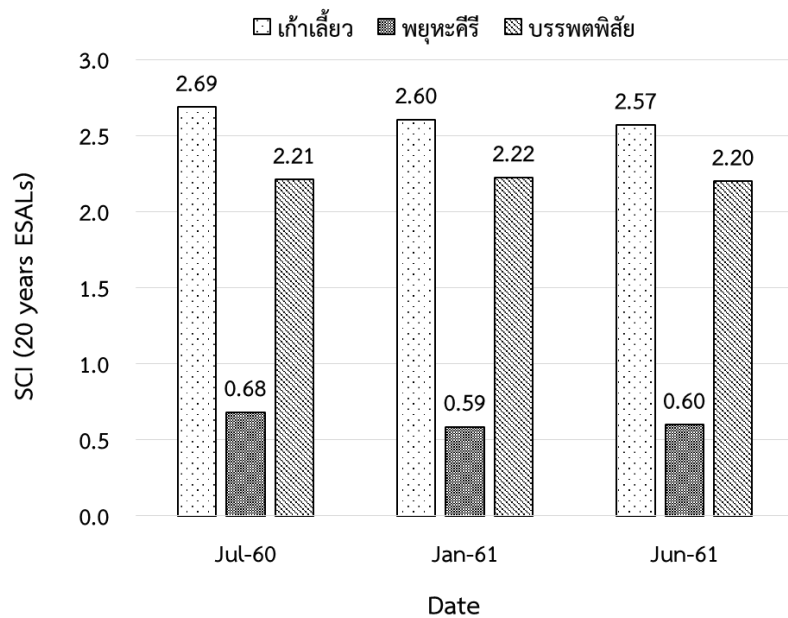


ภาพที่ 4.34 ค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก

4.3.3 ค่า MR และค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคเหนือตอนล่าง แสดงดังภาพที่ 4.35 และ 4.36 ตามลำดับ

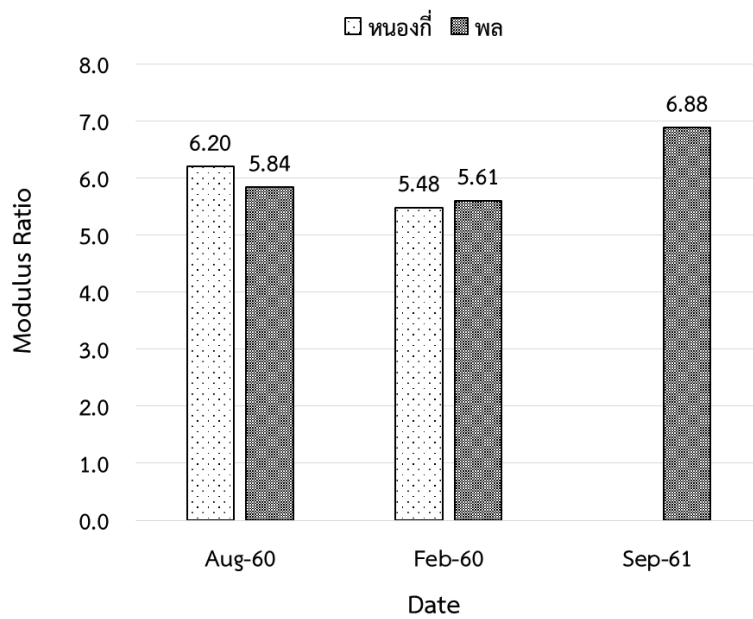


ภาพที่ 4.35 ค่า MR ของพื้นที่ทดสอบภาคเหนือตอนล่าง

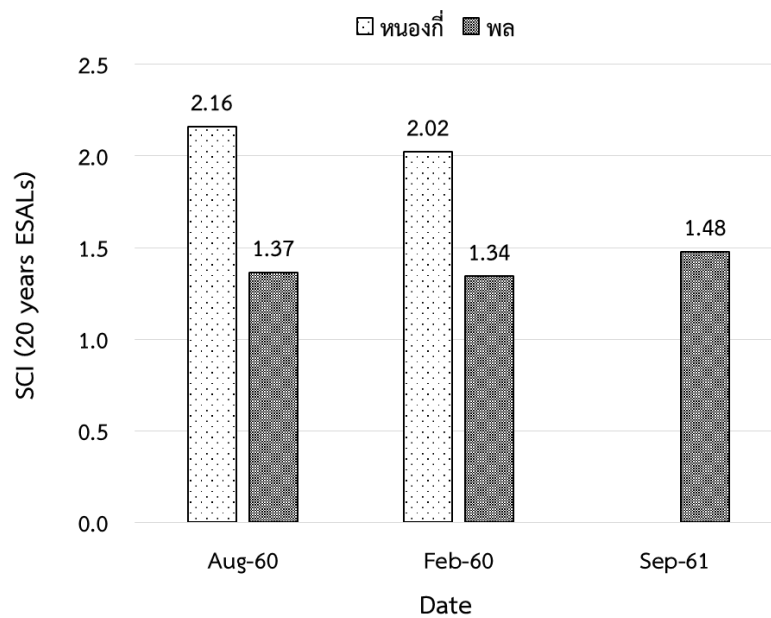


ภาพที่ 4.36 ค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคเหนือตอนล่าง

4.3.4 ค่า MR และค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แสดงดังภาพที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ

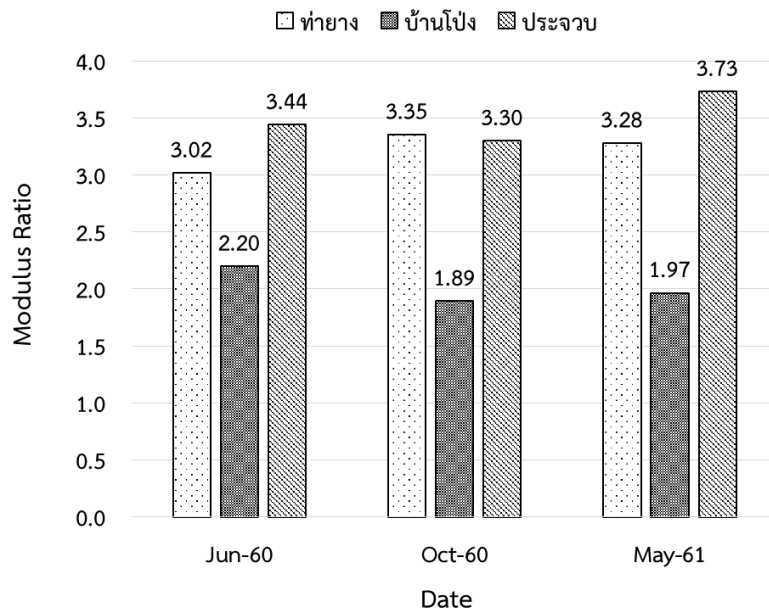


ภาพที่ 4.37 ค่า MR ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

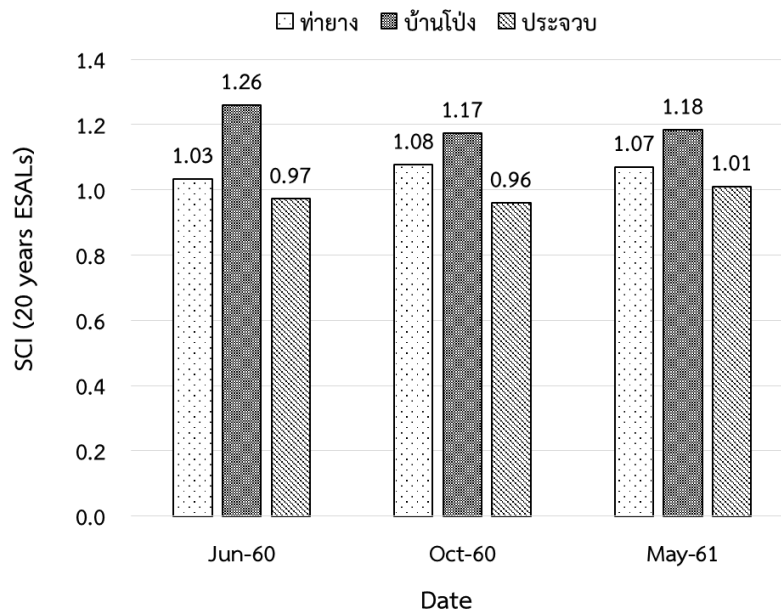


ภาพที่ 4.38 ค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

4.3.5 ค่า MR และค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคใต้ แสดงดังภาพที่ 4.39 และ 4.40 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.39 ค่า MR ของพื้นที่ทดสอบภาคใต้



ภาพที่ 4.40 ค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคใต้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง เป็นระยะเวลา 2 ปี ระหว่างปีพ.ศ. 2560 - 2561 โดยใช้ผลการตรวจวัดค่าความแอ่นตัว (Deflection) ด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) และเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) บนแปลงทดสอบจำนวนทั้งสิ้น 20 แปลง ของทางหลวงสายหลัก 12 สายทางทั่วประเทศ บริเวณโดยแต่ละแปลงตั้งอยู่ในสถานีทดสอบน้ำหนักระดับชั้นตอนการทดสอบประกอบด้วย การทดสอบ FWD ซึ่งใช้แผ่นจานโลหะ (Loading Plate) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร และให้หน่วยแรงกระทำประมาณ 754 kPa ตามด้วยการทดสอบ LWD ซึ่งใช้แผ่นจานโลหะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร และให้หน่วยแรงกระทำ 181 kPa ทำการทดสอบทุกๆ ระยะ 25 เมตร เป็นระยะทางรวม 250 เมตรต่อแปลงทดสอบ ทั้งนี้คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบซ้ำในแต่ละแปลงทดสอบทุก 3 ถึง 4 เดือน เพื่อติดตามความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างถนนผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือทั้งสองชนิดพบว่า แนวความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวในแต่ละแปลงทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่มีขนาดต่างกัน เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการทดสอบเครื่องมือทั้งสองชนิดต่างกัน นอกจากนี้อัตราส่วนค่าการแอ่นตัว (Deflection Ratio) จากเครื่องมือทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลง เนื่องจากตำแหน่งการทดสอบในแต่ละรอบการทดสอบอาจคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งทดสอบเดิม รวมถึงระยะเวลาการเก็บข้อมูลอาจไม่เพียงพอ ทำให้แนวโน้มอัตราส่วนค่าการแอ่นตัวยังไม่ชัดเจนเท่าไรนัก

2. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD แบ่งตามชนิดของวัสดุสร้างชั้นทาง จำนวนทั้งสิ้น 4 ประเภท ได้แก่ แปลงทดสอบประเภทที่ 1 ประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต พื้นทางหินคลุก และรองพื้นทางดินลูกรัง แปลงทดสอบประเภทที่ 2 ประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ และรองพื้นทางดินลูกรัง แปลงทดสอบประเภทที่ 3 ประกอบด้วยผิวทางเป็นแอสฟัลต์คอนกรีต ปูทับบนพื้นทางคอนกรีตเสริมเหล็ก และแปลงทดสอบประเภทที่ 4 ประกอบด้วยผิวทางเป็นแอสฟัลต์คอนกรีต และพื้นทาง Pavement Recycling จากผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear) ค่า R^2 ของแปลงทดสอบแต่ละประเภทประมาณ 0.6 – 0.8 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งหมด

โดยไม่แบ่งตามประเภทของแปลงทดสอบพบว่า ค่า R^2 ประมาณ 0.7 และค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือ FWD สูงกว่าเครื่องมือ LWD ประมาณ 10 เท่า

3. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ซึ่งคำนวณตามทฤษฎี Elastic Solution และวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{P,ES}$ กับค่า LWD $E_{P,ES}$ มีค่า R^2 ระหว่าง 0.3 – 0.7 ในขณะที่ค่า R^2 ของข้อมูลทั้งหมดประมาณ 0.73 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{P,Back}$ กับค่า LWD $E_{P,ES}$ มีค่า R^2 ระหว่าง 0.02 – 0.47 และค่า R^2 ของข้อมูลทั้งหมดประมาณ 0.38 อนึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD $E_{P,Back}$ กับค่า LWD $E_{P,ES}$ มีค่า R^2 ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากวิธีการคำนวณย้อนกลับต้องใช้ค่าโมดูลัสและความหนาของวัสดุชั้นทางการวิเคราะห์ ในขณะที่การคำนวณค่าโมดูลัสตามทฤษฎี Elastic Solution จะแปรผกผันตามค่าการแอ่นตัวได้แรงกระทำเท่านั้น

4. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD โดยใช้สมการเชิงประจักษ์ ($E_{P,Eq}$) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD โดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ($E_{P,Back}$) พบว่าแปลงทดสอบประเภทที่ 1 และ 2 ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างถนนเป็นแบบยืดหยุ่นปกติ (Conventional Flexible Pavement) มีค่า $E_{P,Back}$ ประมาณ 1.20 และ 1.13 เท่าของค่า $E_{P,Eq}$ ในขณะที่แปลงทดสอบประเภทที่ 4 ซึ่งเป็นโครงสร้างเดิมหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (Recycling Pavement) มีค่า $E_{P,Back}$ ประมาณ 1.31 เท่าของค่า $E_{P,Eq}$ และแปลงทดสอบประเภทที่ 3 ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบผสม (Composite Pavement) มีค่า $E_{P,Back}$ ประมาณ 2.27 เท่าของค่า $E_{P,Eq}$ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การวิเคราะห์ค่าโมดูลัสโดยใช้สมการเชิงประจักษ์ให้ค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับเมื่อโครงสร้างถนนเป็นโครงสร้างแบบยืดหยุ่นค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนน้อยกว่า 10,000 MPa ทั้งนี้การวิเคราะห์ค่าโมดูลัสโดยใช้สมการเชิงประจักษ์อาจไม่เหมาะสมเมื่อค่าโมดูลัสของโครงสร้างมากกว่า 10,000 MPa

5. การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) และค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index, SCI) ในช่วงเวลาต่างๆ สามารถพิจารณาใช้สมการเชิงประจักษ์ในการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างถนนลาดยางได้ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากปริมาณข้อมูลและระยะเวลาในการเก็บข้อมูลมีส่วนสำคัญในการพัฒนาแบบจำลอง ทำนายสมรรถนะของโครงสร้างถนน ข้อมูลจากโครงการวิจัยนี้ยังไม่เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของโครงสร้างถนนอย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

รายงานวิจัยฉบับนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง โดยใช้ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) และค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index, SCI) เป็นทางเลือกในการพัฒนาแบบจำลองทำนายสมรรถนะของโครงสร้างถนน รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือสองชนิด ได้แก่ เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) และ Light Weight Deflectometer (LWD) เพื่อเพิ่มทางเลือกในการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างถนนของกรมทางหลวง

ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาของโครงการวิจัยนี้เป็นเพียงข้อมูลในช่วงเวลาสั้นๆ ระยะเวลาประมาณ 2 ปี เพื่อให้แบบจำลองทำนายสมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างถนนมีความถูกต้องและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น คณะผู้วิจัยจำเป็นต้องดำเนินการศึกษา เก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผลในระยะยาวต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- กรมทางหลวง (2550), คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง
- กรมทางหลวง (2560), โครงการศึกษาการใช้เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ในการควบคุมคุณภาพวัสดุสร้างทาง, , สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง
- ดุษฎีนิพนธ์ ธาร, ธีรภัทร์ ศิริรัตฉัตร, สุรนนท์ เยื้องยงค์, และอัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์ (2561), การศึกษาแนวทางประเมินสมรรถนะทางหลวงด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD , การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23 โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, นครนายก
- แสงชัย เทพสิทธิทรากรณ์, ประเสริฐ บุญรักษา, และไพบุลย์ รติวิริยะพงศ์ (2534), การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างชั้นทางโดยโปรแกรม ELMOD, ส่วนสำรวจและประเมินสภาพทาง สำนักวิเคราะห์ตรวจสอบ กรมทางหลวง
- อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์ และธนภุต เผือกทอง (2555), การศึกษาประเมินความแข็งแรงและอายุการใช้งานของถนนลาดยางภายหลังก่อสร้าง, วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต, ปีที่ 2 ฉบับที่ 2, หน้า 1-17.
- AASHTO (1993), AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, Washington, DC.
- Horak, E. (2008), Benchmarking the Structural Condition of Flexible Pavement with Deflection Bowl Parameters, Journal of the South African Institution of Civil Engineering. Vol. 50, No. 2, pp. 2-9.
- Irwin, L.H. (1983), User's Guide to Modcomp2, Version 2.1., Local Roads Program, Cornell University, Ithaca, NY.
- Rohde, G.T. (1994), Determining Pavement Structural Number from FWD Testing, Transportation Research Record 1448, Washington, DC., pp. 61-68.

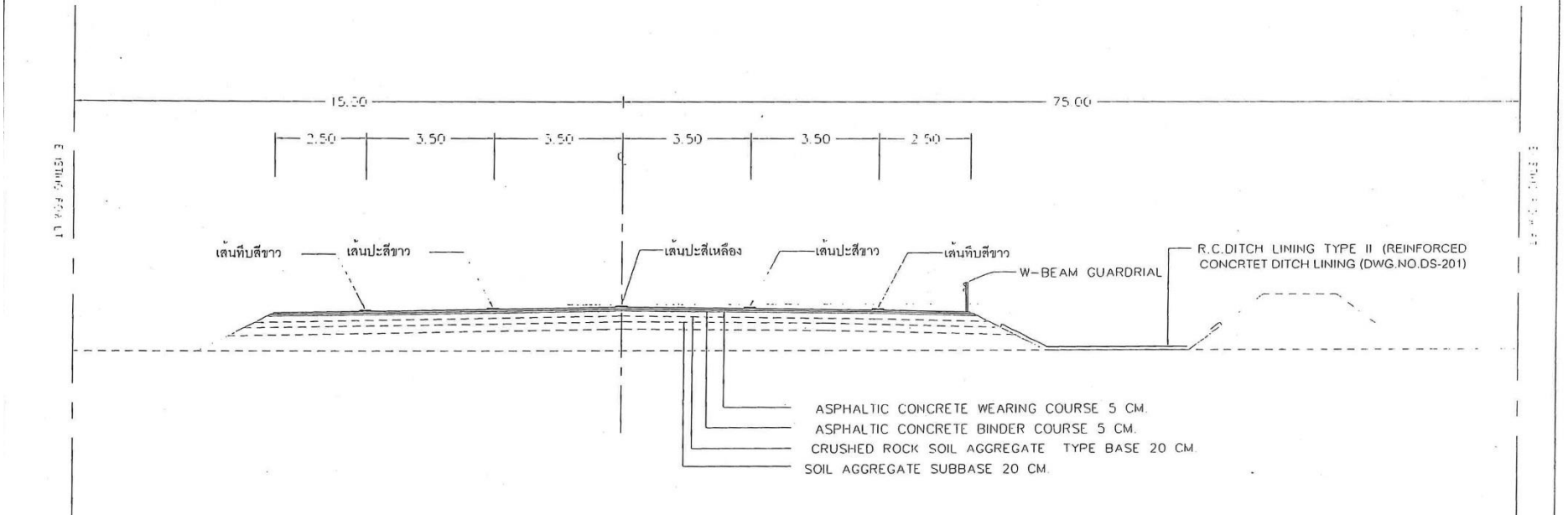
Wimsatt, A. J. (1999) , Direct Analysis Methods for Falling Weight Deflectometer Deflection Data, Transportation, Research Record 1655, Washington, DC. , pp. 135-144.

Zhang, Z., Manuel, L., Damnjanovic, I., and Li, Z. (2003)., Development of a New Methodology for Characterizing Pavement Structural Condition for Network-Level Applications, Research Report No. 0-4322-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, TX.

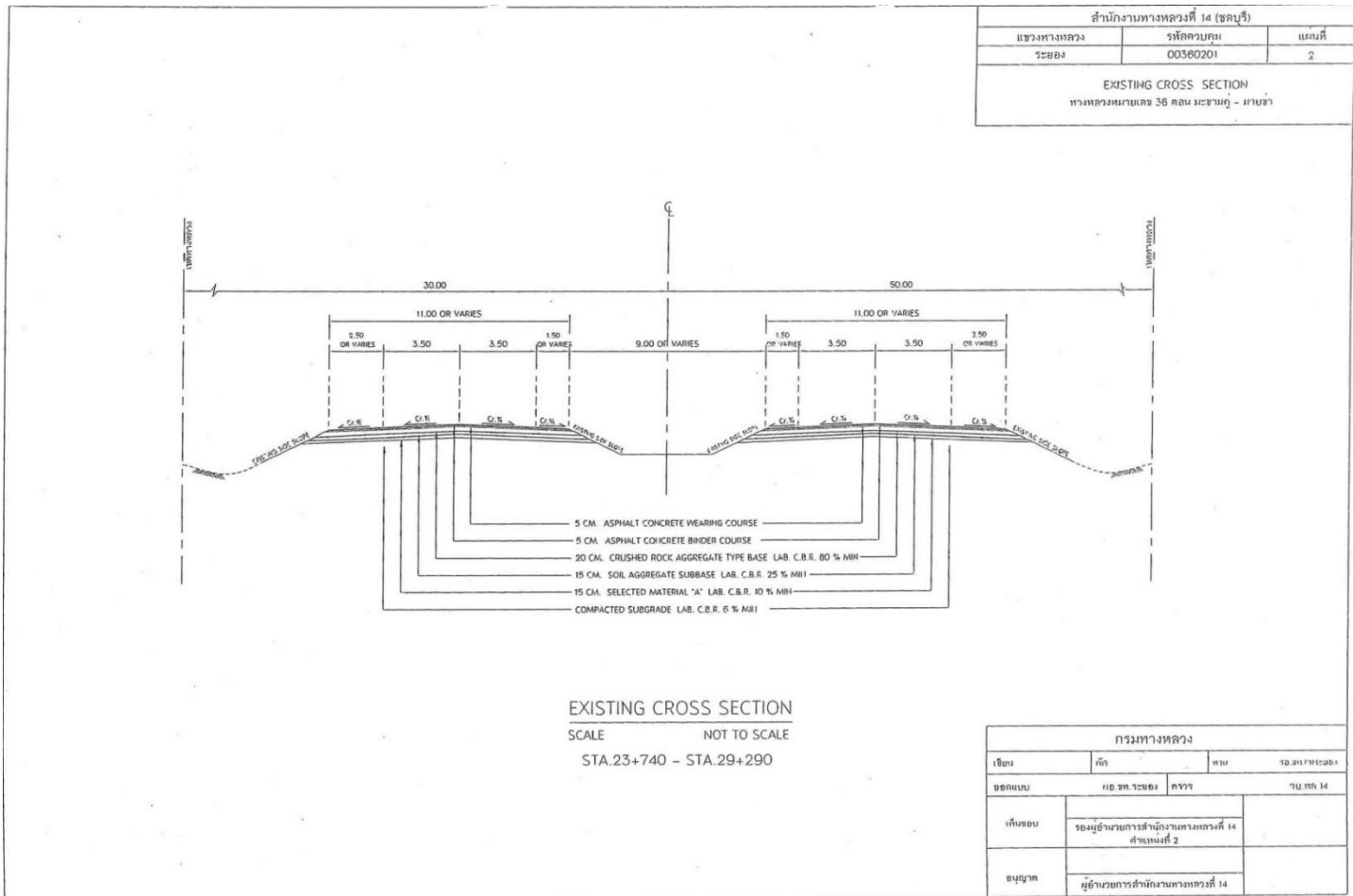
ภาคผนวก ก
แบบรูปตัดชั้นโครงสร้างทาง

CROSS SECTION

รหัส 25200 งานขยายทางจราจร (โครงการพัฒนาและปรับปรุงทางหลวง)
ในทางหลวงหมายเลข 3 ตอนบางตำรุ - คลองด่าน ระหว่าง กม.54+000 กม.57+000

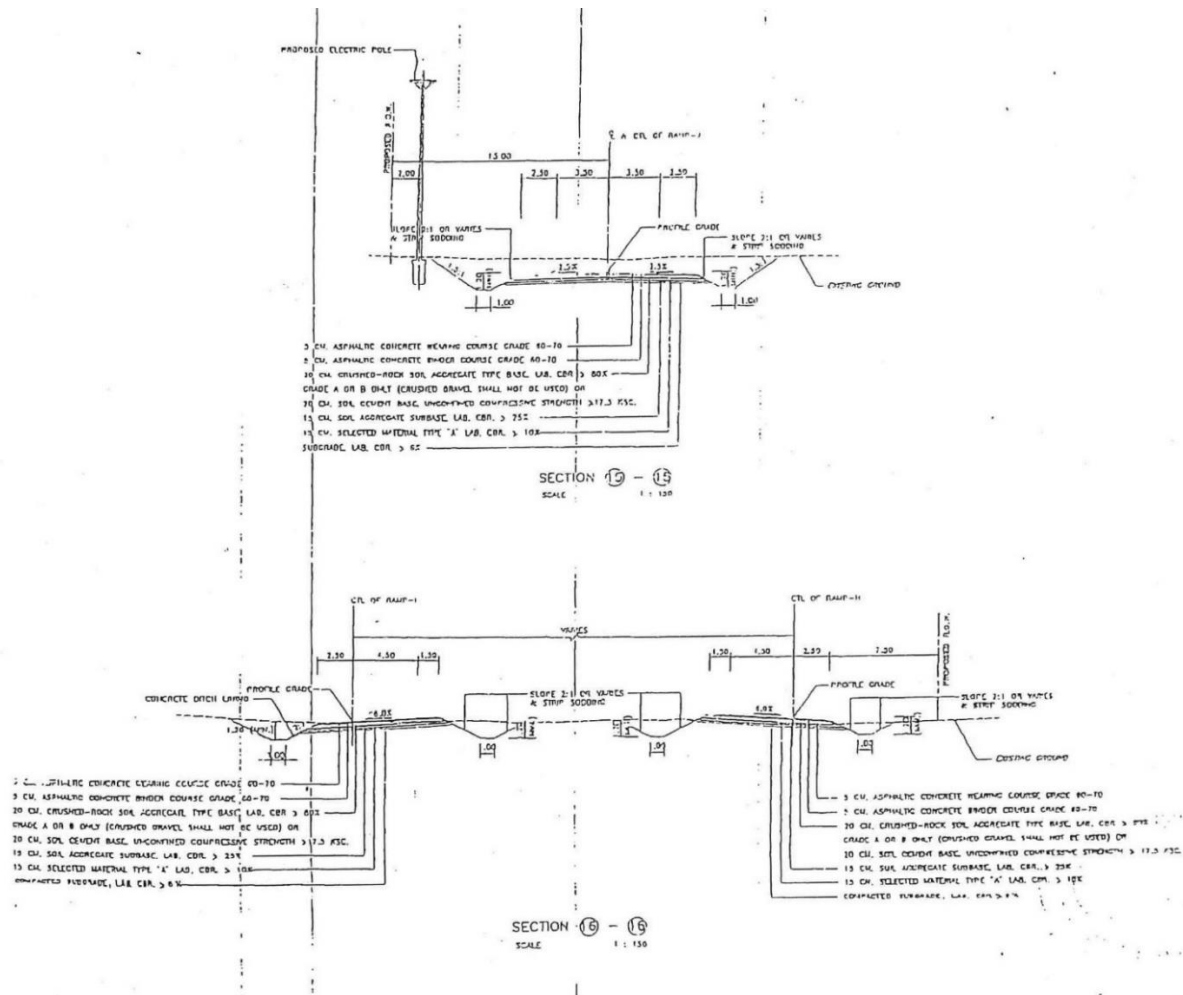


ภาพที่ ก2 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.3 ตอน 104 ซี่ตอน
บางตำรุ - คลองด่าน บริเวณ กม.54+250 - กม. 54+500 (บริเวณสถานีชลบุรี)

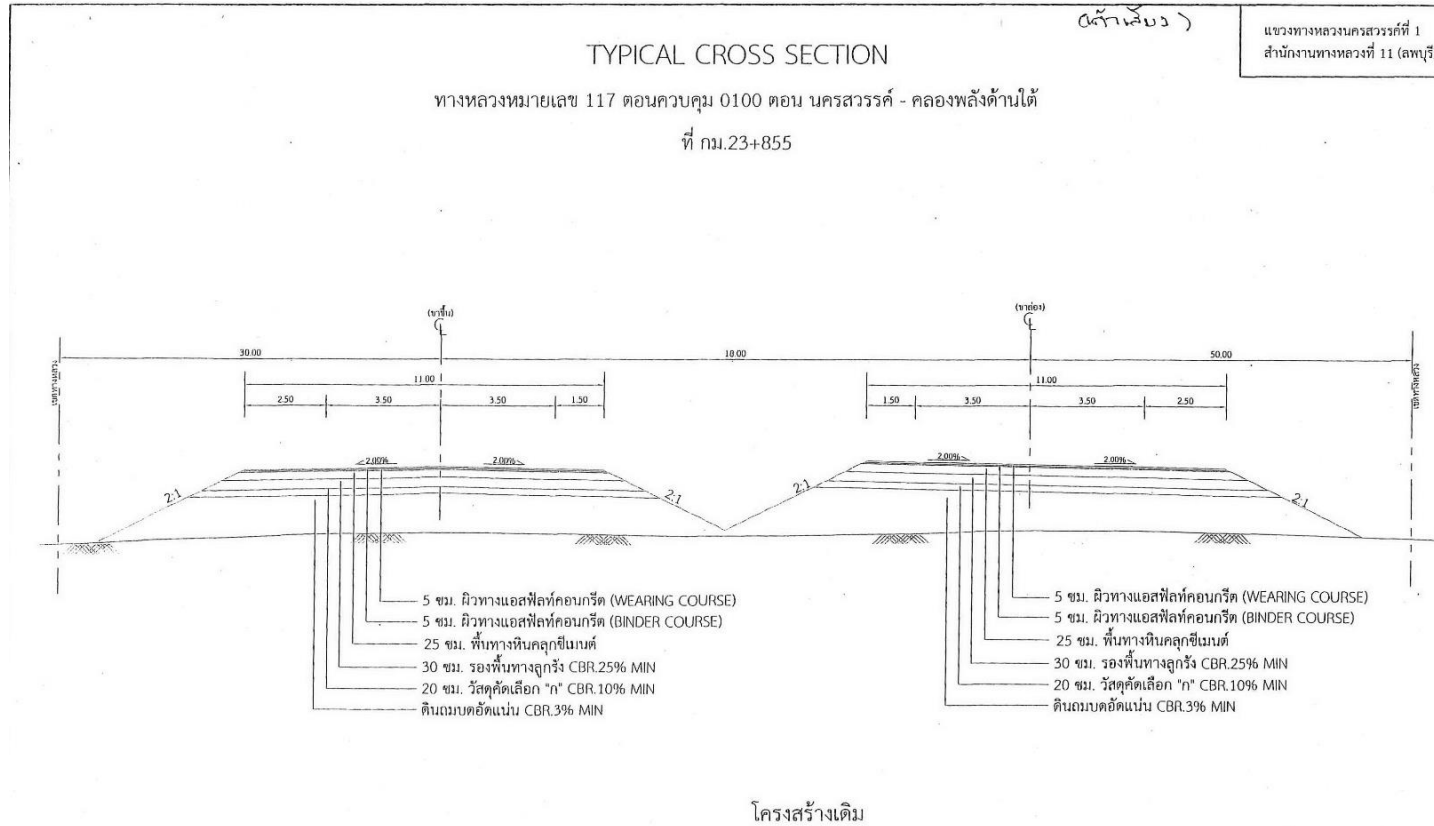


ภาพที่ ก3 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.36 ตอน 201 ซี่งตอน

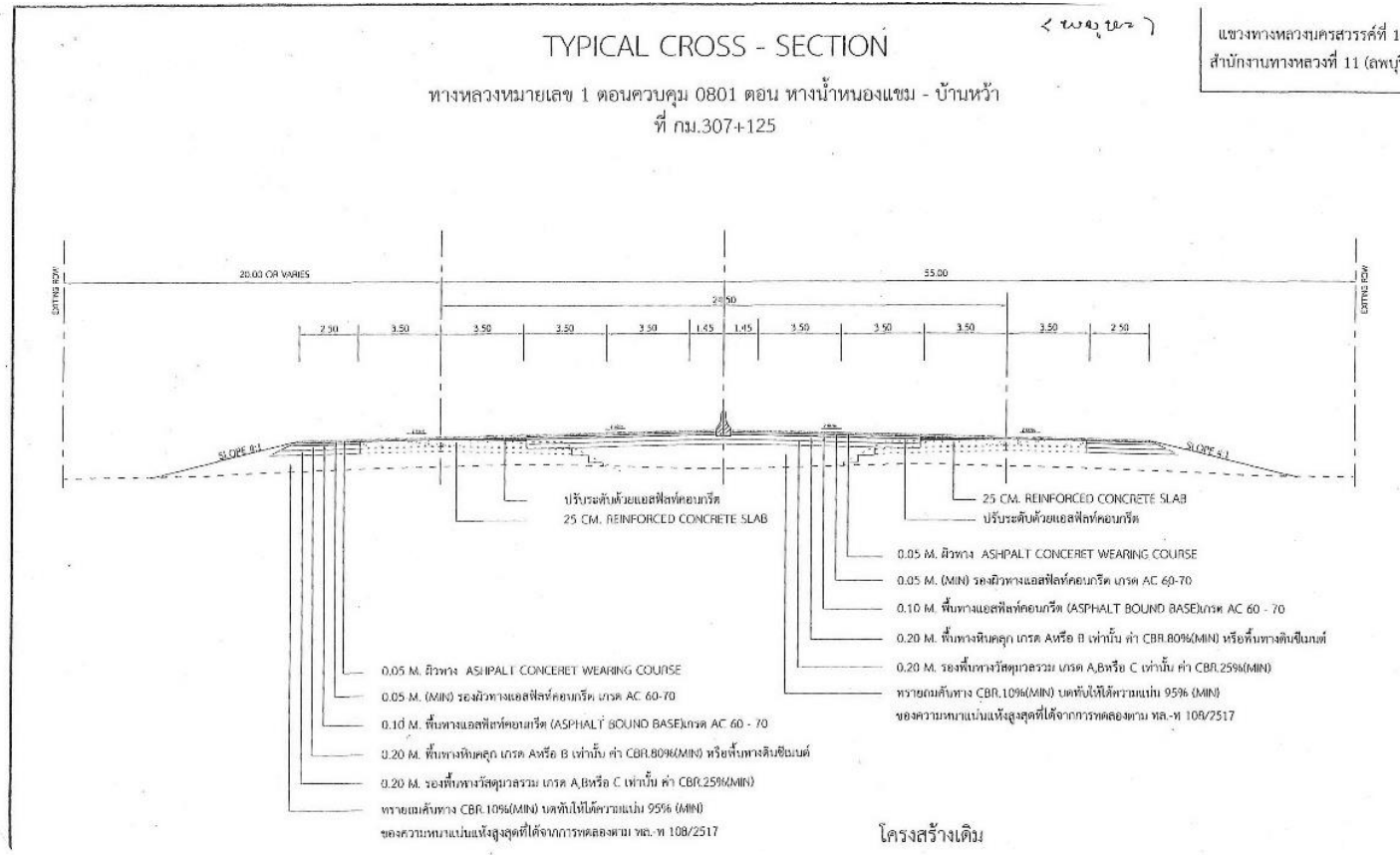
มะขามคู่ - ฝายท่า บริเวณ กม.28+575 - กม. 28+825 (บริเวณสถานีระยอง)



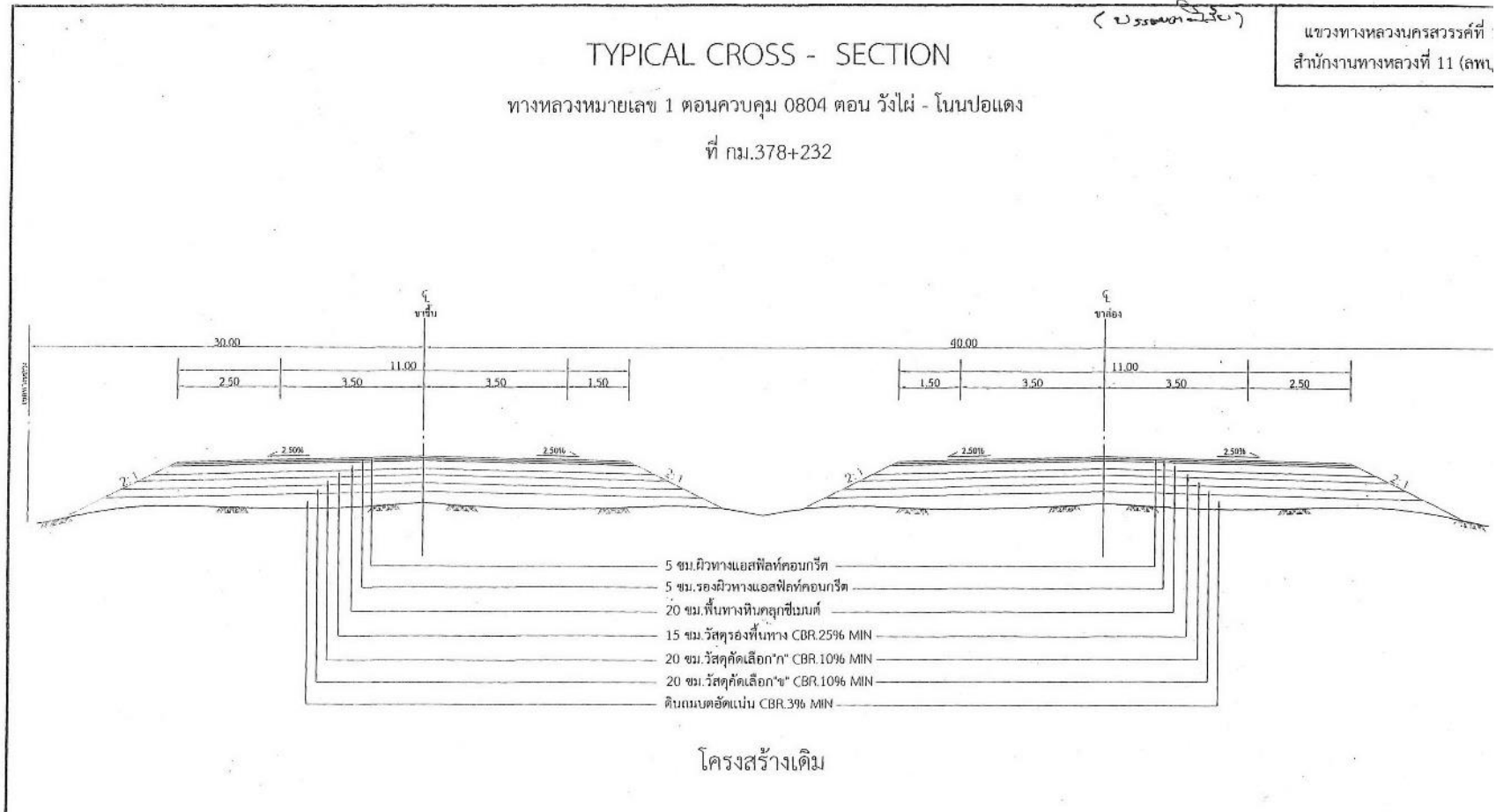
ภาพที่ ก4 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.331 ตอน 103 ซี่ดถนน
 พันเสด็จนอก - หนองปรือ บริเวณ กม.47+050 - กม. 47+300 (บริเวณสถานีศรีราชา)



ภาพที่ ก5 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.117 ตอน 100 ซี่งตอน
นครสวรรค์ - คลองปลั่งด้านใต้ บริเวณ กม.24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีเก้าเลี้ยว)



ภาพที่ ก6 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 801 ซี่ดตอน
ทางน้ำหนองแวม - บ้านหว่า บริเวณ กม.308+300 - กม. 308+550 (บริเวณสถานีพยุหะคีรี)



ภาพที่ ก7 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 804 ซี่งตอน
วังไผ่ - โนนปอแดง บริเวณ กม.379+950 - กม. 380+200 (บริเวณสถานีบรรพตพิสัย)

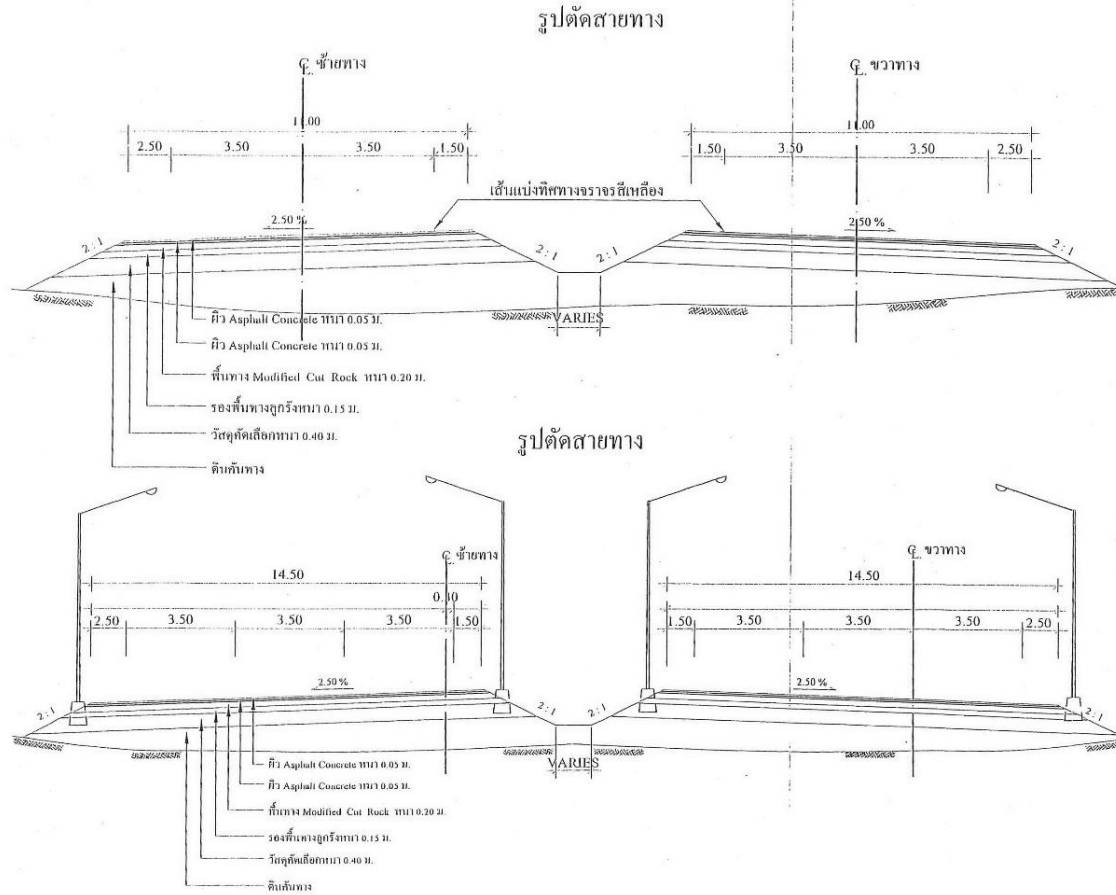
ทางหลวงหมายเลข 1 หมายเลขควบคุม 0901,0902 ตอน โนนโปแตง-ปากดง-นครชุม

ประวัติงานบำรุงทาง

ทางหลวงหมายเลข 1 AC 1300 - 1400
 คอน โนนโปแตง-ปากดง
 กม.412+300 - กม.439+400
 เขตทาง ค้ำซ้าย 30 ม. , ค้ำขวา 40 ม.
 ADT: 15,187 มาตรฐานทางขึ้น - (7/11)

ประวัติงานบำรุงทาง

ทางหลวงหมายเลข 1 AC 1400
 คอน ปากดง-นครชุม
 กม.439+400 - กม.441+600
 เขตทาง ค้ำซ้าย 30 ม. , ค้ำขวา 40 ม.
 ADT: 14,998 มาตรฐานทางขึ้น - (10.50/14.50)



ภาพที่ ก8 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 902 ซี้อตอน
 ปากดง - นครชุม บริเวณ กม.440+750 - กม. 441+000 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร)

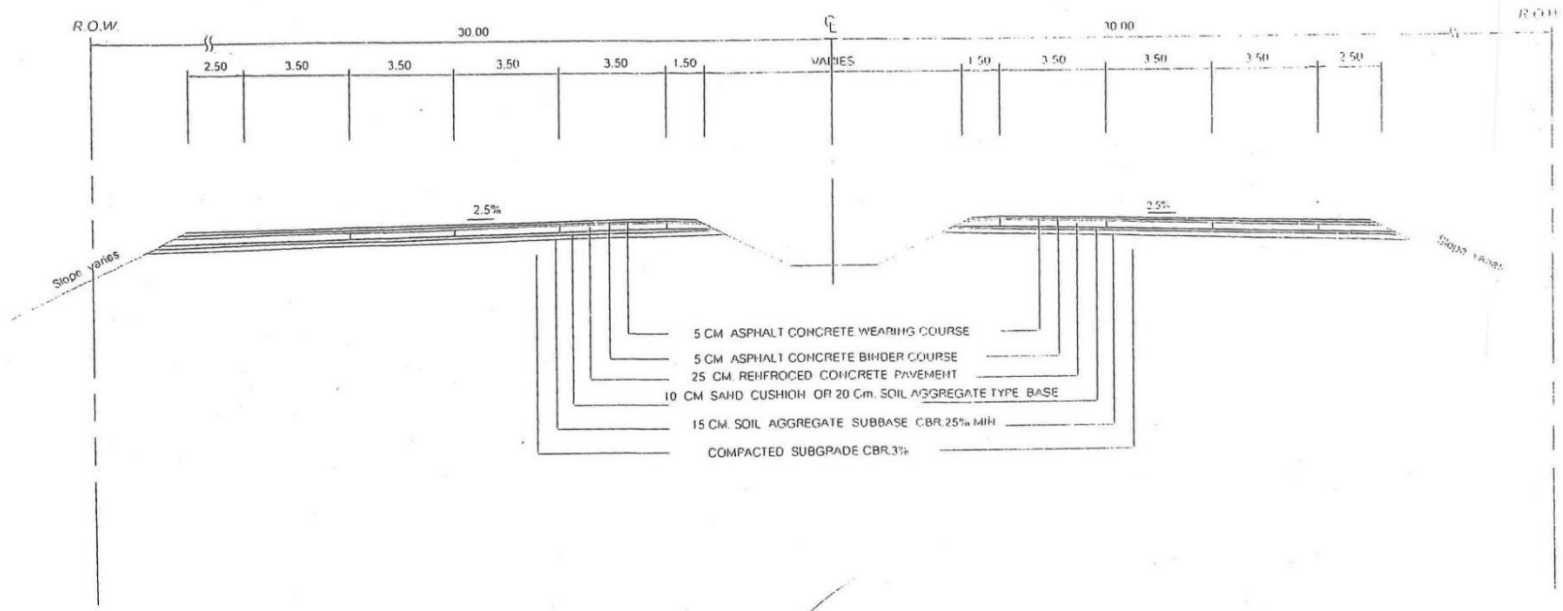
TYPICAL CROSS SECTION

ทางหลวงหมายเลข 20102 ตอน สระบุรี-อกลเดี้ยว-ซับบอน
ระหว่าง กม.21+260 - กม.23+070 และ 24+006-25+210 ขาเข้าถากน.

แขวงทางหลวงสระบุรี

สำนักทางหลวงที่ 11 (สระบุรี)

ก่อนปรับปรุง



อดิศร สดใส
เขียน
(นายอดิศร สดใส)

สมชาย
ตรวจ
(นายสมชาย สิทธิภาพ) รว.ขท.(ว) สระบุรี

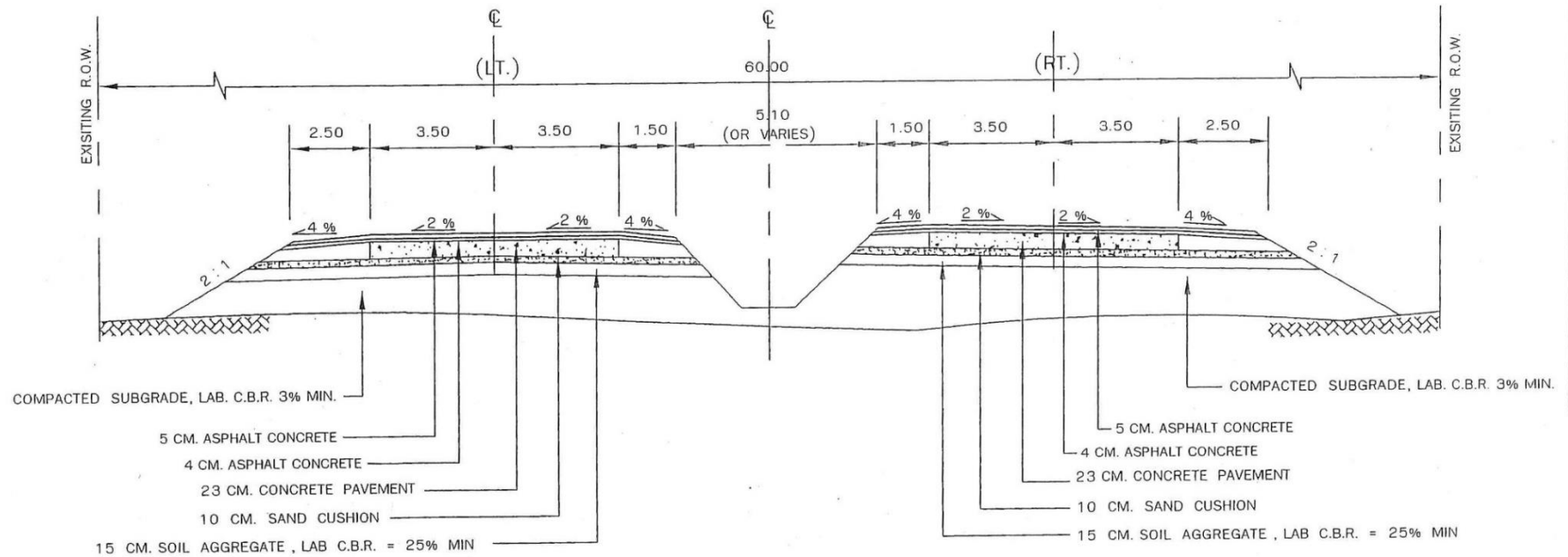
สมชาย
เป็นมอบ
(นายสมชาย สิทธิภาพ) ผอ.ขอ.สระบุรี

ภาพที่ ก9 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.2 ตอน 102 ซี่ดตอน
ตาลเดี่ยว - ซับบอน บริเวณ กม.17+750 - กม. 18+000 (บริเวณสถานีแก่งคอย)

TYPICAL CROSS SECTION

ทางหลวงหมายเลข 2 ตอนควบคุม 0301,0302 ตอน นครราชสีมา - ดอนหวาย - บ้านวัด

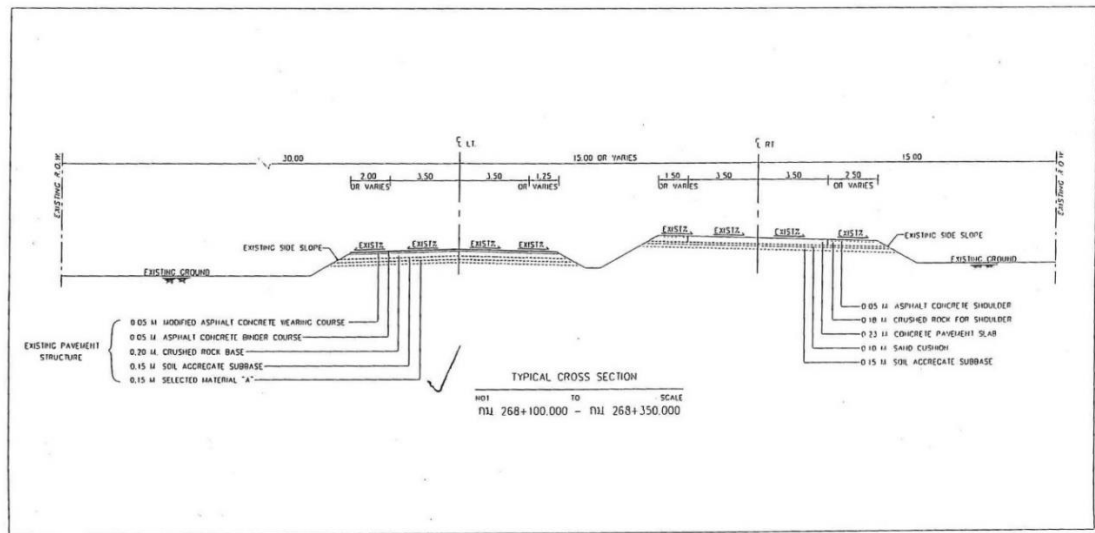
ระหว่าง กม.155+000 - กม.197+000



ภาพที่ ก10 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.2 ตอน 301 ซี่ดถนน
นครราชสีมา - ดอนหวาย บริเวณ กม.168+750 - กม. 169+000 (บริเวณสถานีเนินสูง)

วคร.	ศทล.	แขวง	ทล.	ตอน	ชื่อตอน	ทิศทาง	กม. - กม.	ช่องจราจร	ชั้นโครงสร้าง		
									วัสดุ	ความหนา (mm)	
2	สำนักงานทางหลวงที่ 7	แขวงทางหลวงขอนแก่นที่ 3 (บ้านไผ่)	2	0402	พล - บ้านไผ่	ขาออก	268+100 - 268+350	ซ้ายซุก	SURFACE	MODIFIED ASPHALT CONCRETE WEARING COURSE	50
										ASPHALT CONCRETE BINDER COURSE	50
									BASE	CRUSHED ROCK BASE	200
									SUBBASE	SOIL AGGREGATE SUBBASE	150
	SELECTED	SELECTED MATERIAL "A"	150								

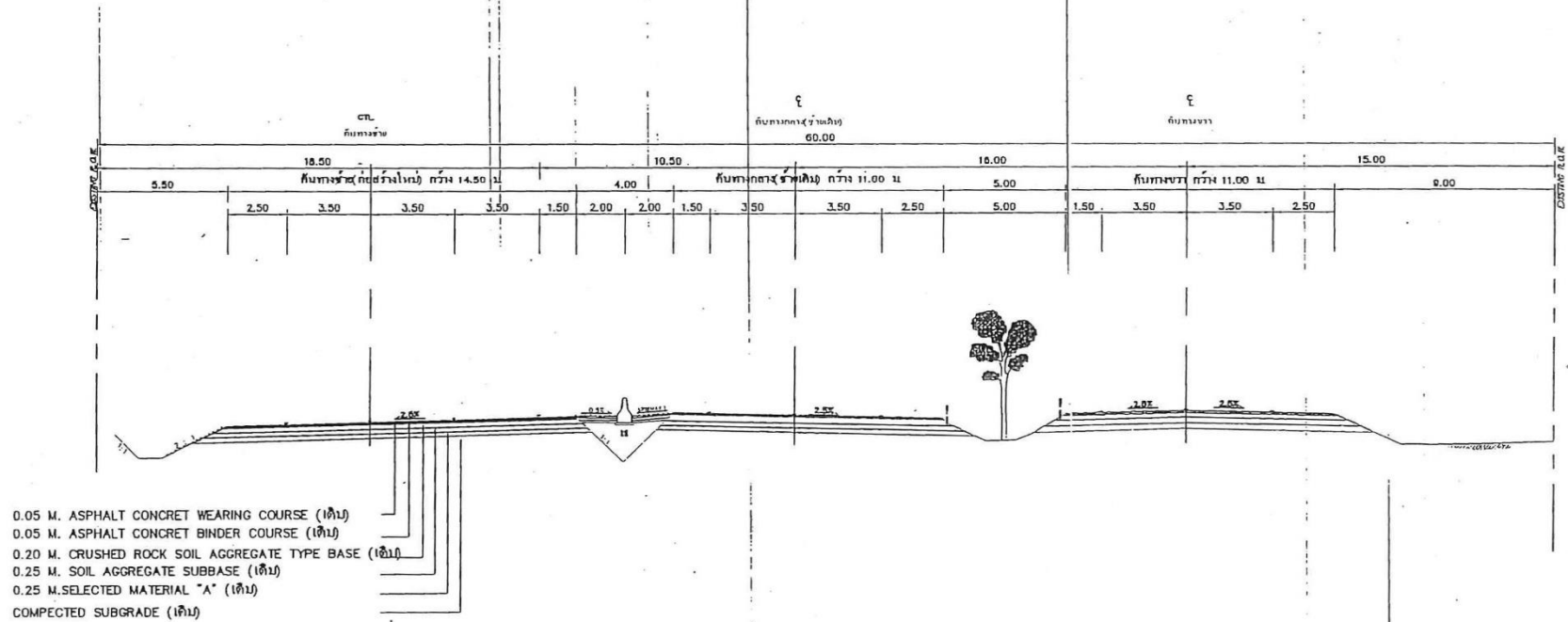
TYPICAL CROSS SECTION



ภาพที่ ก11 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.2 ตอน 402 ชื่อตอน
 พล - บ้านไผ่ บริเวณ กม.268+100 - กม. 268+350 (บริเวณสถานีพล)

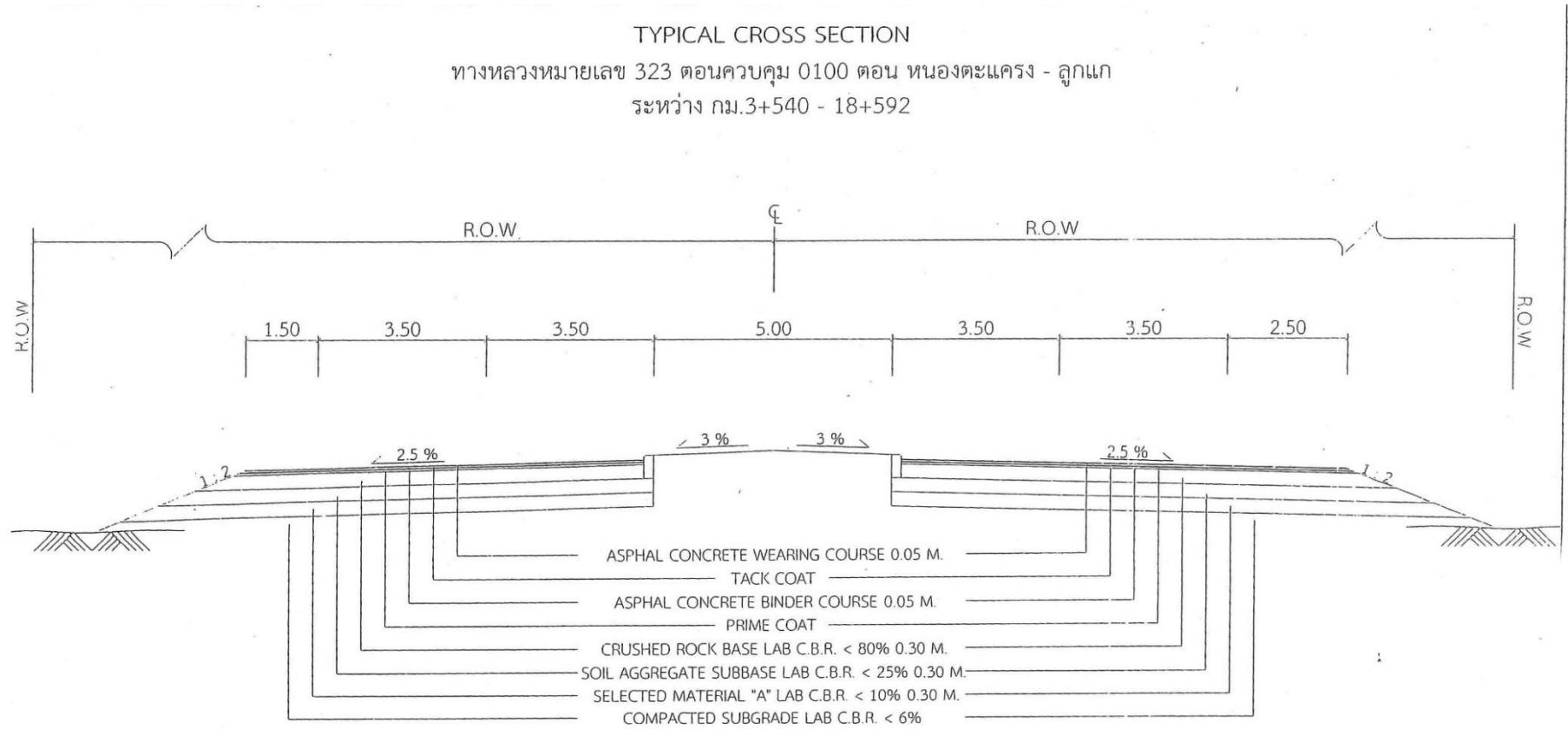
TYPICAL CROSS - SECTION

ทางหลวงหมายเลข 4 ตอนควบคุม 0502 ตอน เขาวัง - สระอำ
ระหว่าง กม.162+217 BK/156+399 AH - กม.176+294

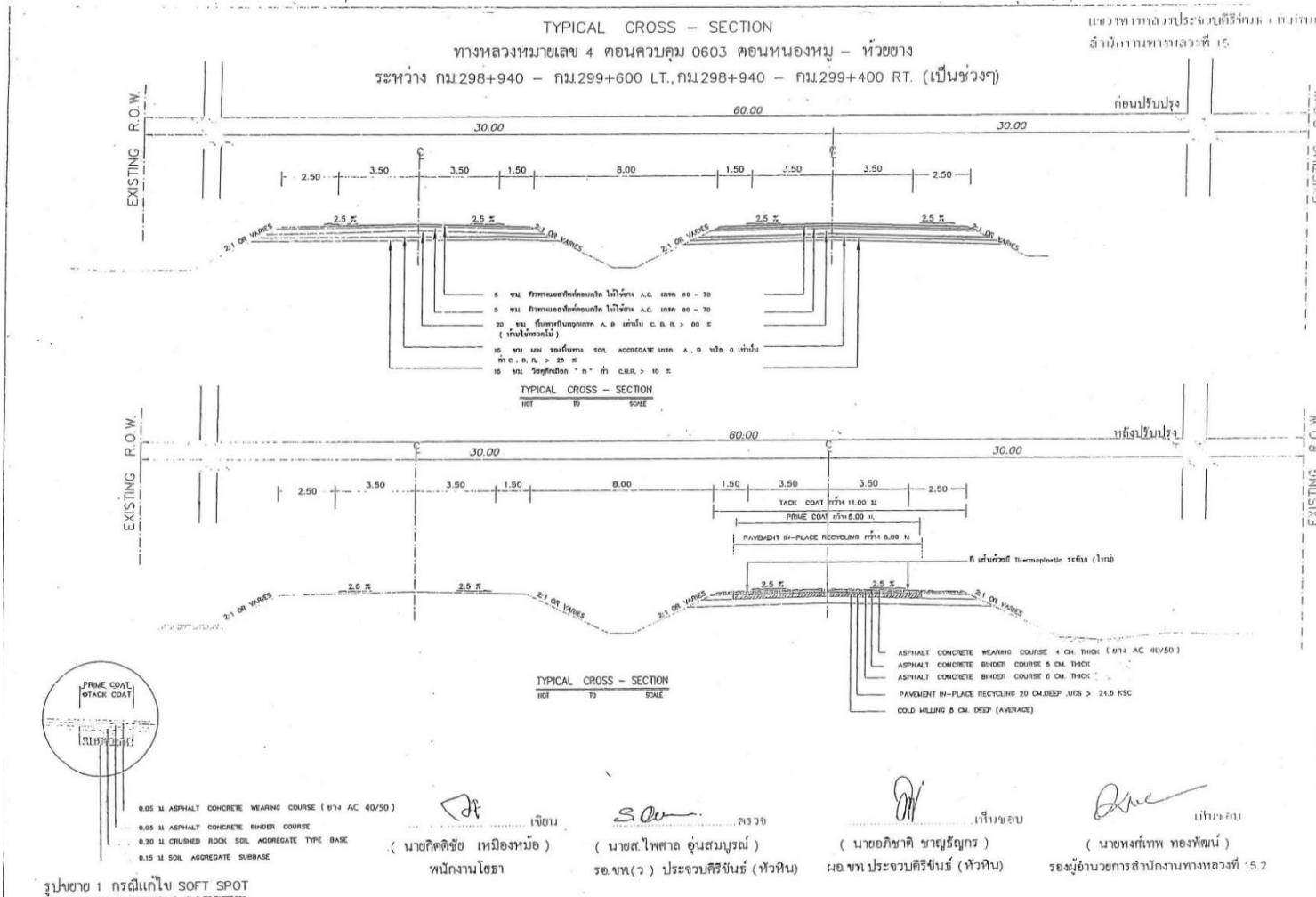


ภาพที่ ก13 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.4 ตอน 502 ชื่อตอน

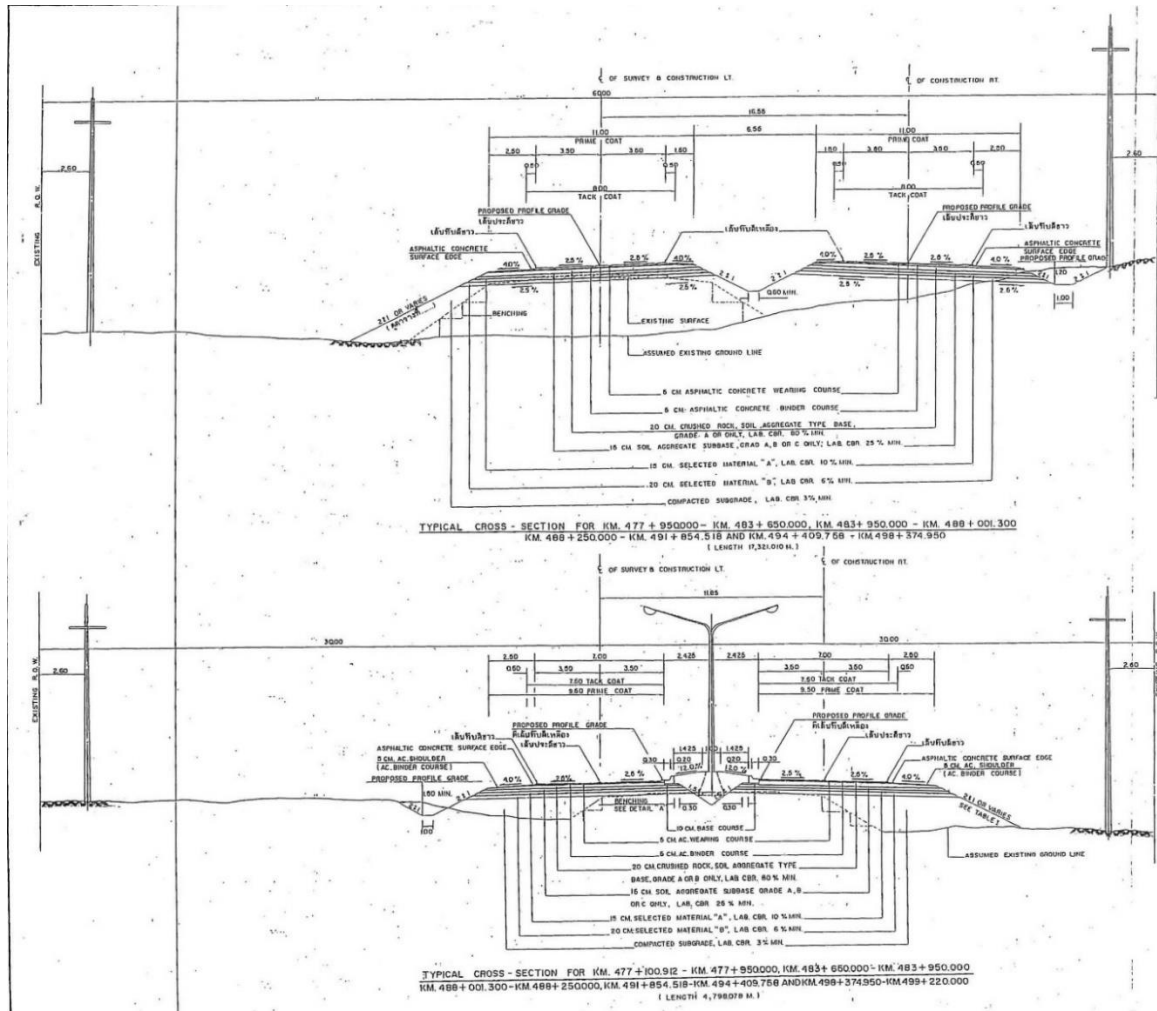
เขาวัง - สระพระ บริเวณ กม.170+750 - กม. 171+000 (บริเวณสถานีท่าayang)



ภาพที่ ก14 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.323 ตอน 100 ซี่ดถนน
 หนองตะแครง - ลูกแก บริเวณ กม.4+900 - กม. 5+150 (บริเวณสถานีบ้านโป่ง)



ภาพที่ ก15 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.4 ตอน 603 ซี่งตอน
 หนองหมู - ห้วยยาง บริเวณ กม.304+750 - กม. 305+000 (บริเวณสถานีประจวบคีรีขันธ์)



รูปพรรณสัณฐาน	
ชื่อโครงการ	เลขที่
TYPICAL CROSS-SECTION	
วันที่ออกพิมพ์	

การตรวจเช็ค	
ชื่อ	ตำแหน่ง
ชื่อ	ตำแหน่ง
ชื่อ	ตำแหน่ง
ชื่อ	ตำแหน่ง

ภาพที่ ก16 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.4 ตอน 703 ซี่ดถนน
 วงครก - เสียบญวน บริเวณ กม.473+500 - กม. 473+750 (บริเวณสถานีท่าแซะ)

ภาคผนวก ข

ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT)

ตารางที่ ข1 ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคกลาง

บริเวณสถานี	หมายเลข ทางหลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุดสำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559	2560
สรรพยา	0032 (0400)	โพนางดำออก - ท่า ฉนวน	130+000	AADT	เข้า	19,247	21,835	20,898	20,187	17,917
					ออก	19,666	19,834	19,211	17,485	17,622
					รวม	38,913	41,669	40,109	37,672	35,539
				% รถบรรทุก	เข้า	24.37	33.79	17.71	19.33	19.80
					ออก	28.94	32.17	20.32	20.68	21.28
					รวม	26.68	33.02	18.96	19.96	20.53
โพธาราม	0004 (0302)	คลองอีจาง - หลุมดิน	92+667	AADT	เข้า	38,417	42,228	45,468	48,001	48,567
					ออก	38,130	42,737	45,320	46,756	46,383
					รวม	76,547	84,965	90,788	94,757	94,950
				% รถบรรทุก	เข้า	26.13	26.53	25.86	27.04	27.80
					ออก	32.51	33.26	34.55	35.84	35.13
					รวม	29.31	29.91	30.20	31.38	31.38
สมุทรสาคร	0035 0301	นาโคก - แพรกหนาม แดง	62+150	AADT	เข้า	55,755	50,154	40,622	38,551	39,913
					ออก	47,038	46,376	40,544	38,413	39,179
					รวม	102,793	96,530	81,166	76,964	79,092
				% รถบรรทุก	เข้า	48.86	51.40	53.42	53.38	53.55
					ออก	50.16	52.70	54.18	54.17	54.05
					รวม	49.45	52.02	53.80	53.33	53.80

ตารางที่ ข1 (ต่อ)

บริเวณสถานี	หมายเลข ทางหลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุดสำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559	2560
นครชัยศรี	0004 (0201)	นครชัยศรี - พระประ โทณ	41+500	AADT	เข้า	74,253	65,534	59,796	52,754	52,119
					ออก	76,470	60,939	57,111	58,698	55,017
					รวม	150,723	126,473	116,907	111,452	107,136
				% รถบรรทุก	เข้า	26.55	29.93	30.84	20.20	22.31
					ออก	25.11	29.12	30.57	17.38	20.91
					รวม	25.82	29.54	30.71	18.72	21.59

ตารางที่ ข2 ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออก

บริเวณสถานี	หมายเลข ทางหลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุดสำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559
ชลบุรี	0003 (0104)	บางตำรุ - คลองด่าน	40+800	AADT	เข้า	20,197	18,006	20,798	22,535
					ออก	20,774	17,886	20,492	22,361
					รวม	40,971	35,892	41,290	44,896
				% รถบรรทุก	เข้า	26.98	23.03	24.68	24.19
					ออก	30.87	27.57	25.08	23.88
					รวม	28.96	25.29	24.88	24.04

ตารางที่ ข2 (ต่อ)

บริเวณสถานี	หมายเลข ทางหลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุดสำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559
ศรีราชา	0331 0102	ห้วยใหญ่ - พันเสด็จนอก	44+258	AADT	เข้า	12,487	13,492	15,926	17,144
					ออก	13,834	15,235	18,098	18,940
					รวม	26,321	28,727	34,024	36,084
				% รถบรรทุก	เข้า	15.62	21.07	20.21	21.00
					ออก	14.95	18.73	20.78	21.37
					รวม	15.27	19.83	20.51	21.20
ระยอง	0036 (0202)	มาบข่า - ทับมา	37+087	AADT	เข้า	14,951	20,713	21,126	17,948
					ออก	14,733	20,567	22,420	18,202
					รวม	29,684	41,280	43,546	36,150
				% รถบรรทุก	เข้า	28.79	33.90	34.64	29.55
					ออก	31.35	34.57	34.34	28.33
					รวม	30.06	34.23	34.49	28.94

ตารางที่ ข2 (ต่อ)

บริเวณสถานี	หมายเลข ทางหลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุดสำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559
สระแก้ว	0033 (0701)	พระปรัง - โนนจิก	229+177	AADT	เข้า	6,493	6,249	5,974	6,301
					ออก	6,294	6,852	5,954	6,183
					รวม	12,787	13,101	11,928	12,484
				% รถบรรทุก	เข้า		17.09	14.75	15.54
					ออก		22.62	16.76	19.85
					รวม		19.98	15.75	17.67

ตารางที่ ข3 ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคเหนือตอนล่าง

บริเวณสถานี	หมายเลข ทางหลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุด สำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559	2560
พยุหะคีรี	0001 (0801)	ทางน้ำหนองแถม - บ้านห้วย	306+776	AADT	เข้า	13,975	20,233	21,737	24,376	24,734
					ออก	14,942	17,340	19,814	24,576	24,674
					รวม	28,917	37,573	41,551	48,952	49,408
				% รถบรรทุก	เข้า	30.33	30.40	32.94	18.26	18.67
					ออก	28.62	29.36	27.95	19.11	18.69
					รวม	29.45	29.82	30.56	18.69	18.68

ตารางที่ ข3 (ต่อ)

บริเวณสถานี	หมายเลข ทางหลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุด สำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559	2560
บรรพตพิสัย	0001 (0804)	วังไผ่ - โนนปอแดง	377+276	AADT	เข้า	13,804	11,414	8,955	10,742	8,549
					ออก	14,472	13,032	9,821	12,114	8,909
					รวม	28,276	24,446	18,776	22,856	17,458
				% รถบรรทุก	เข้า	33.99	23.39	31.99	26.28	32.18
					ออก	27.61	24.55	30.90	31.32	33.46
					รวม	30.53	24.01	31.41	28.95	32.83
เก้าเลี้ยว	0117 (0100)	นครสวรรค์ - คลองปลัดดันไต้	8+900	AADT	เข้า	9,829	8,820	9,951	11,214	11,067
					ออก	12,801	11,464	11,363	10,847	10,459
					รวม	22,630	20,284	21,314	22,061	21,526
				% รถบรรทุก	เข้า	18.55	17.69	16.73	10.13	9.25
					ออก	18.39	15.19	16.18	9.86	9.98
					รวม	18.46	16.27	16.44	10.00	9.61

ตารางที่ ข3 (ต่อ)

บริเวณสถานี	หมายเลข ทางหลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุด สำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559	2560
กำแพงเพชร	0001 (0902)	ปากดง - นครชุม	457+876	AADT	เข้า	9,158	10,028	10,881	13,771	15,748
					ออก	10,526	12,306	10,997	9,736	12,214
					รวม	19,684	22,334	21,878	23,507	27,962
				% รถบรรทุก	เข้า	21.81	16.65	26.12	22.99	38.15
					ออก	29.10	33.46	24.17	20.59	18.11
					รวม	25.71	25.92	25.41	22.00	29.40

ตารางที่ ข4 ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคอีสาน

บริเวณสถานี	หมายเลข ทางหลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุด สำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559	2560
แก่งคอย	0002 (0102)	ตาลเดี่ยว - ซับบอน	21+250	AADT	เข้า	26,691	33,766	45,703	47,984	46,507
					ออก	26,148	36,538	45,177	46,696	46,257
					รวม	52,839	70,304	90,880	94,680	92,764
				% รถบรรทุก	เข้า	42.69	38.80	45.77	45.07	44.49
					ออก	41.50	43.57	46.34	46.27	43.84
					รวม	42.10	41.28	46.05	45.66	44.16

ตารางที่ ข4 (ต่อ)

บริเวณสถานี	หมายเลข ทางหลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุด สำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559	2560
สี่คิ้ว	0002 (0202)	บ่อทอง - มอจะบก	87+438	AADT	เข้า	19,415	19,833	18,846	22,461	23,834
					ออก	23,011	18,351	18,707	21,730	21,360
					รวม	42,426	38,184	37,553	44,191	45,194
				% รถบรรทุก	เข้า	34.81	32.97	25.26	29.52	28.94
					ออก	24.50	30.06	25.80	25.06	27.82
					รวม	29.22	31.57	25.53	27.33	28.41
พล	0002 (0403)	บ้านไผ่ - ท่า พระ	310+578	AADT	เข้า	11,172	13,771	13,932	12,290	13,894
					ออก	10,755	13,910	14,751	12,718	15,970
					รวม	21,927	27,681	28,683	25,008	29,864
				% รถบรรทุก	เข้า	29.60	34.69	30.02	23.21	25.81
					ออก	35.32	29.78	25.18	23.52	21.04
					รวม	32.41	32.22	27.53	23.37	23.26

ตารางที่ ข4 (ต่อ)

บริเวณสถานี	หมายเลข ทางหลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุด สำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559	2560
โนนสูง	0002 (0301)	นครราชสีมา - ดอนหวาย	148+657	AADT	เข้า	50,184	58,035	69,854	61,603	54,044
					ออก	63,948	57,225	58,584	55,099	43,143
					รวม	114,132	115,260	128,438	116,702	97,187
				% รถบรรทุก	เข้า	2.22	2.14	1.86	1.71	1.73
					ออก	2.50	2.30	2.43	2.17	2.06
					รวม	2.37	2.22	2.12	1.93	1.88
หนองกี่	0024 (0302)	หนองกี่ - นางรอง	95+597	AADT	เข้า	7,503	8,125	7,920	8,939	9,821
					ออก	8,598	8,378	9,110	9,698	10,347
					รวม	16,101	16,503	17,030	18,637	20,168
				% รถบรรทุก	เข้า	16.77	15.94	18.71	18.59	17.31
					ออก	19.04	17.07	15.70	17.75	19.47
					รวม	17.98	16.51	17.10	18.15	18.42

ตารางที่ ข5 ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคใต้

บริเวณสถานี	หมายเลข ทาง หลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุด สำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559	2560
บ้านโป่ง	0323 (0100)	หนองตะแครง - ลูกแก	8+360	AADT	เข้า	13,479	15,032	15,660	16,619	17,173
					ออก	16,084	16,250	16,200	17,143	18,053
					รวม	29,563	31,282	31,860	33,762	35,226
				% รถบรรทุก	เข้า	16.06	18.44	19.85	23.37	20.24
					ออก	13.50	15.58	18.06	18.28	17.52
					รวม	14.67	16.95	18.94	20.78	18.84
ท่ายาง	0004 (0503)	สระพระ - ห้วยทรายใต้	185+782	AADT	เข้า	20,440	24,360	21,489	24,419	26,227
					ออก	20,300	23,738	20,724	24,372	25,782
					รวม	40,740	48,098	42,213	48,791	52,009
				% รถบรรทุก	เข้า	31.37	32.36	33.44	33.75	35.95
					ออก	31.50	32.11	34.09	33.75	34.80
					รวม	31.43	32.23	33.76	33.75	35.38

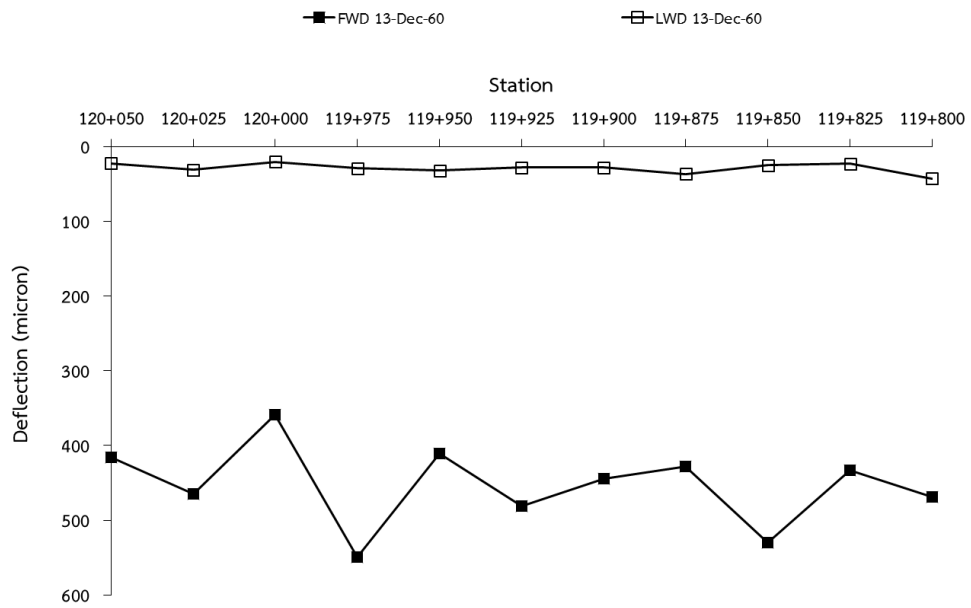
ตารางที่ ข5 (ต่อ)

บริเวณสถานี	หมายเลข ทาง หลวง	ชื่อสายทาง	กม.จุด สำรวจ (KM.)	รวม TOTAL	% รถบรรทุก	2556	2557	2558	2559	2560
ประจวบคีรีขันธ์	0004 (0603)	หนองหมู - ห้วยยาง	299+888	AADT	เข้า	5,660	9,147	8,496	8,732	10,815
					ออก	8,690	10,737	11,703	9,904	13,861
					รวม	14,350	19,884	20,199	18,636	24,676
				% รถบรรทุก	เข้า	48.20	39.49	24.00	31.06	29.33
					ออก	35.08	31.01	29.38	33.33	34.56
					รวม	40.25	34.91	27.12	32.37	32.27
ท่าแซะ	0004 (0702)	พ่อตาหินช้าง - วังครก	451+513	AADT	เข้า	15,281	16,288	10,242	9,754	8,759
					ออก	14,745	13,240	10,163	9,058	8,555
					รวม	30,026	29,528	20,405	18,812	17,314
				% รถบรรทุก	เข้า	29.87	31.30	30.09	33.01	33.22
					ออก	29.24	31.03	25.12	29.94	29.62
					รวม	29.56	31.18	27.62	31.53	31.44

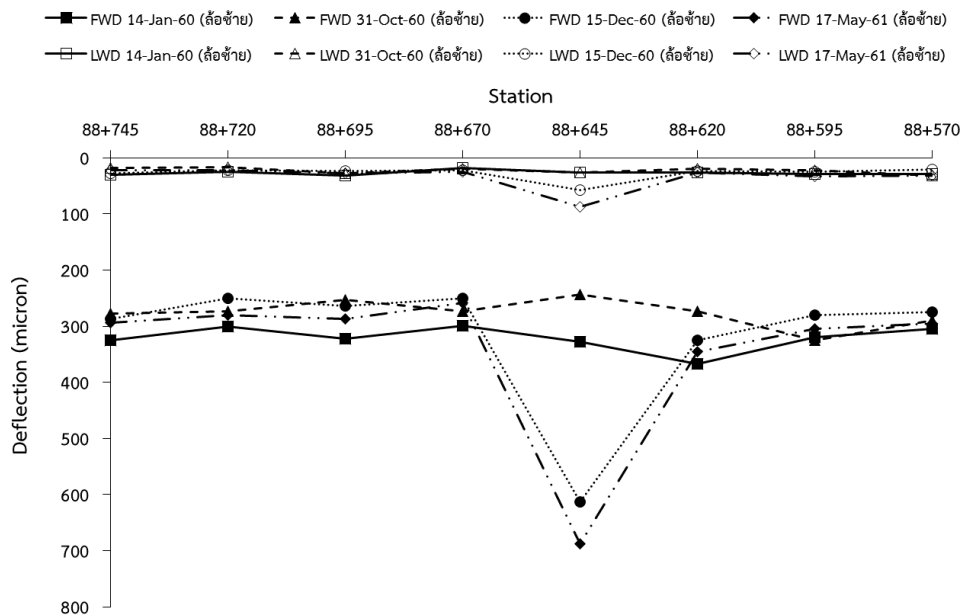
ภาคผนวก ค

ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของชั้นโครงสร้างทางที่ได้จากการทดสอบ
เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)
และเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD)

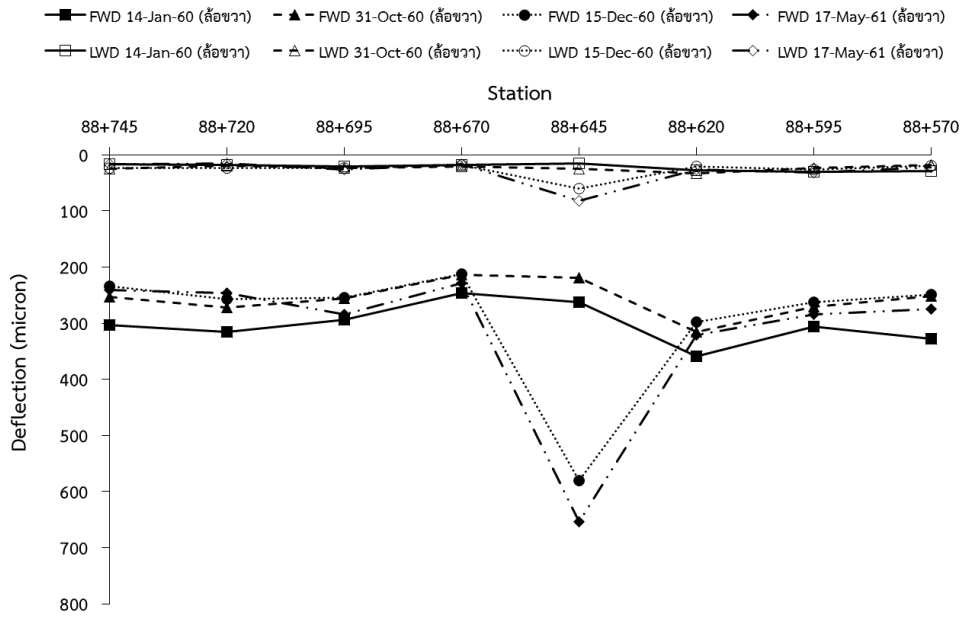
1. ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของพื้นที่ศึกษาภาคกลาง



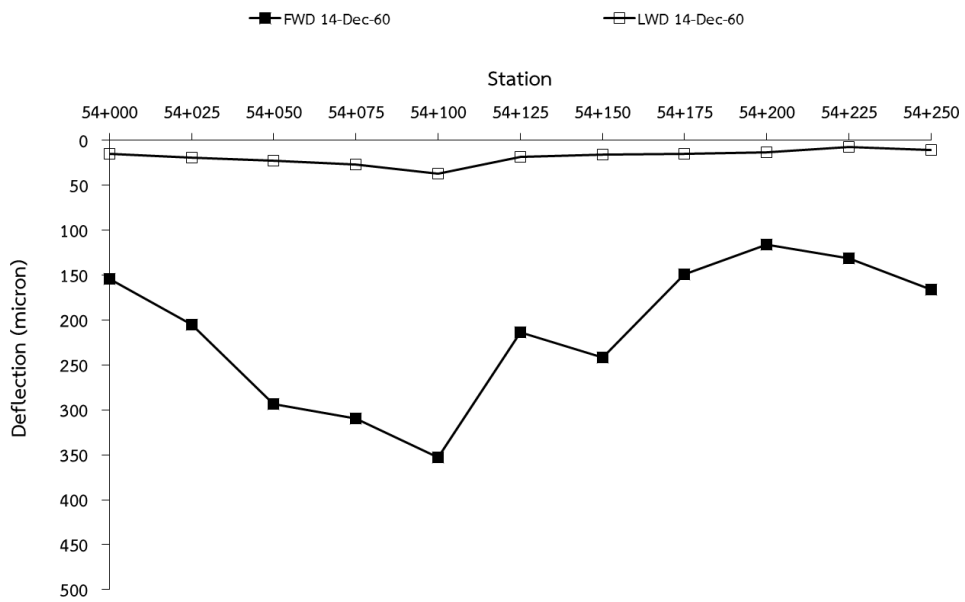
ภาพที่ ค1 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.32 ตอน 400 ซี่ตอน
 โพนางคำออก - ท่าฉนวน บริเวณ กม.119+800 - กม. 120+050 (บริเวณสถานีสรรรพยา)



ภาพที่ ค2 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 302 ซี่ตอน
 คลองอีจาง - หลุมดิน บริเวณ กม.88+570 - กม. 88+745 (บริเวณสถานีโพธาราม ล้อซ้าย)

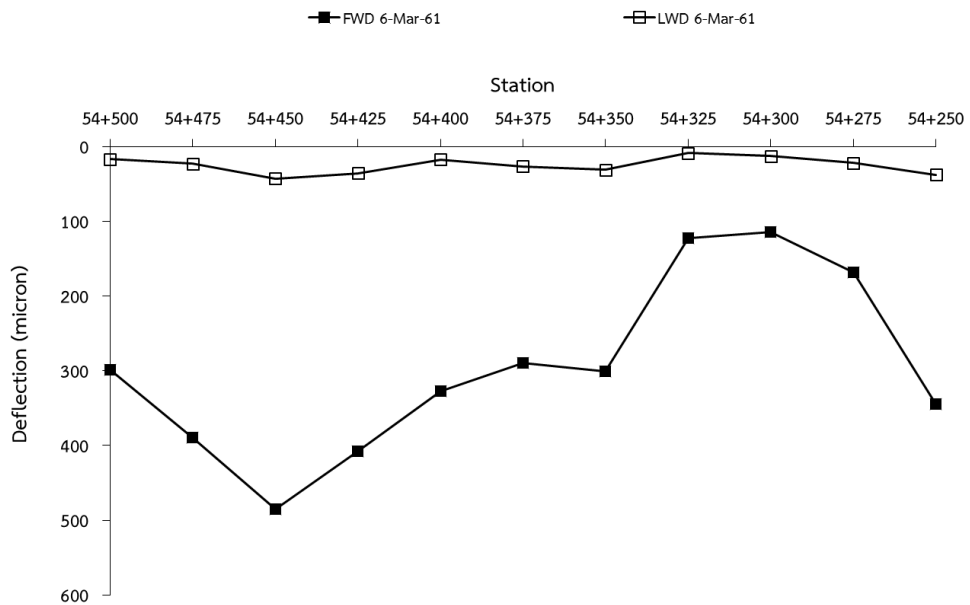


ภาพที่ ค3 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 302 ซี่ตอ
คลองอี่จาง - หลุมดิน บริเวณ กม.88+570 - กม. 88+745 (บริเวณสถานีโพธาราม ล้อขวา)

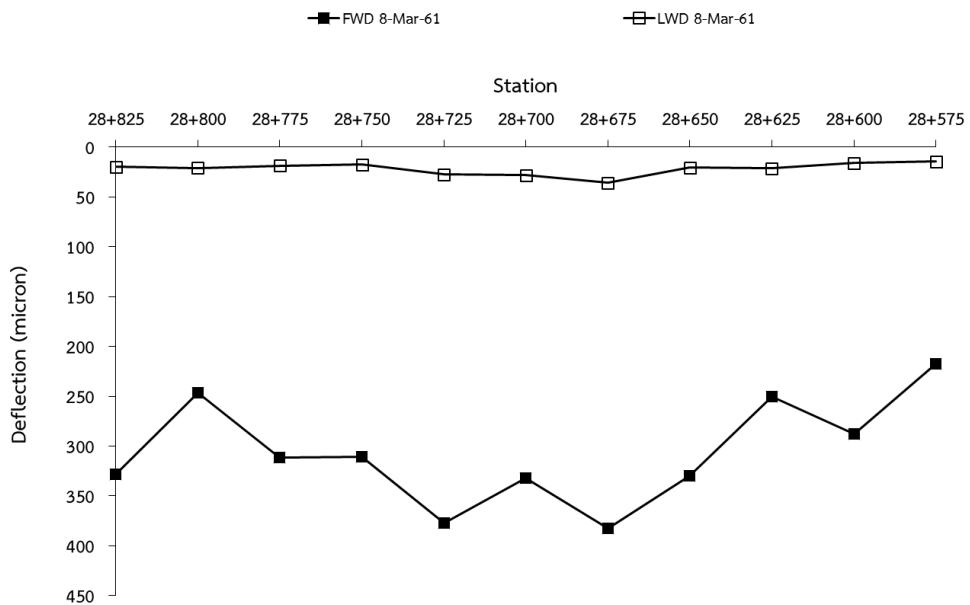


ภาพที่ ค4 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.35 ตอน 301 ซี่ตอ
นาโคก - แพรกหนามแดง บริเวณ กม.54+000 - กม. 54+250 (บริเวณสถานีสมุทรสาคร)

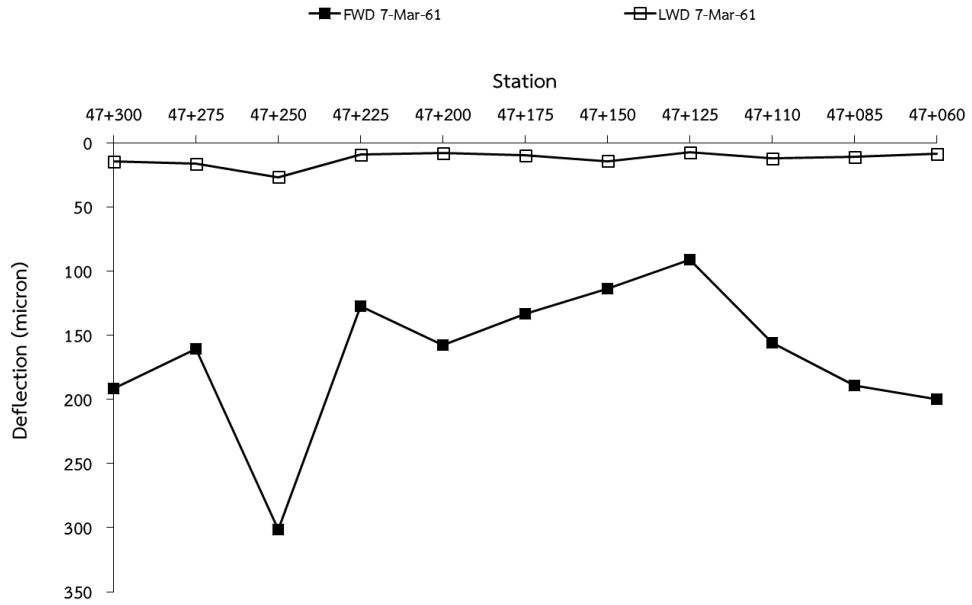
2. ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออก



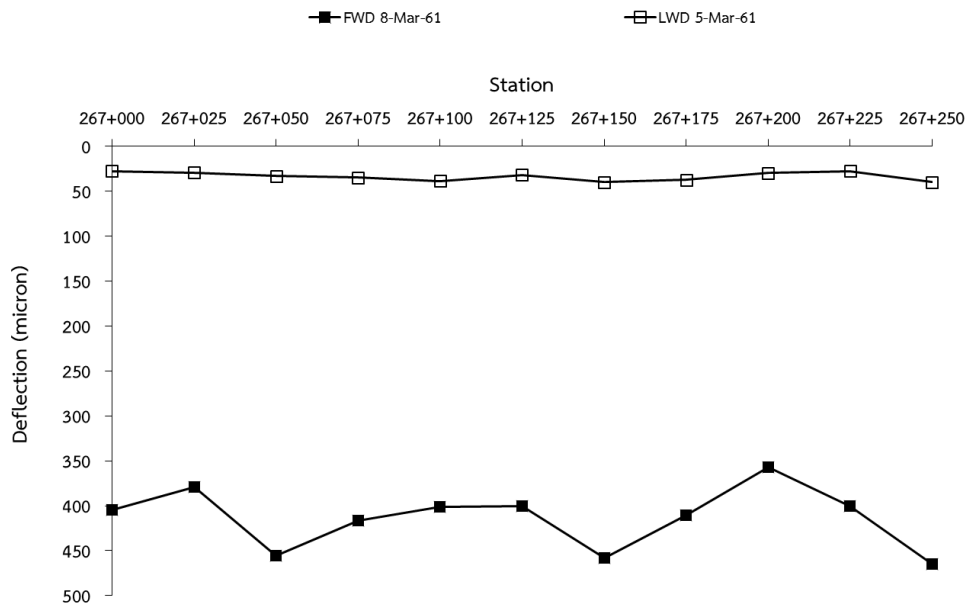
ภาพที่ ค5 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.3 ตอน 104 ซี่ดตอน
 บางตำหรุ – คลองด่าน บริเวณ กม.54+250 - กม. 54+500 (บริเวณสถานีชลบุรี)



ภาพที่ ค6 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.36 ตอน 201 ซี่ดตอน
 มะขามคู้ – มาบข่า บริเวณ กม.28+575 - กม. 28+825 (บริเวณสถานีระยอง)

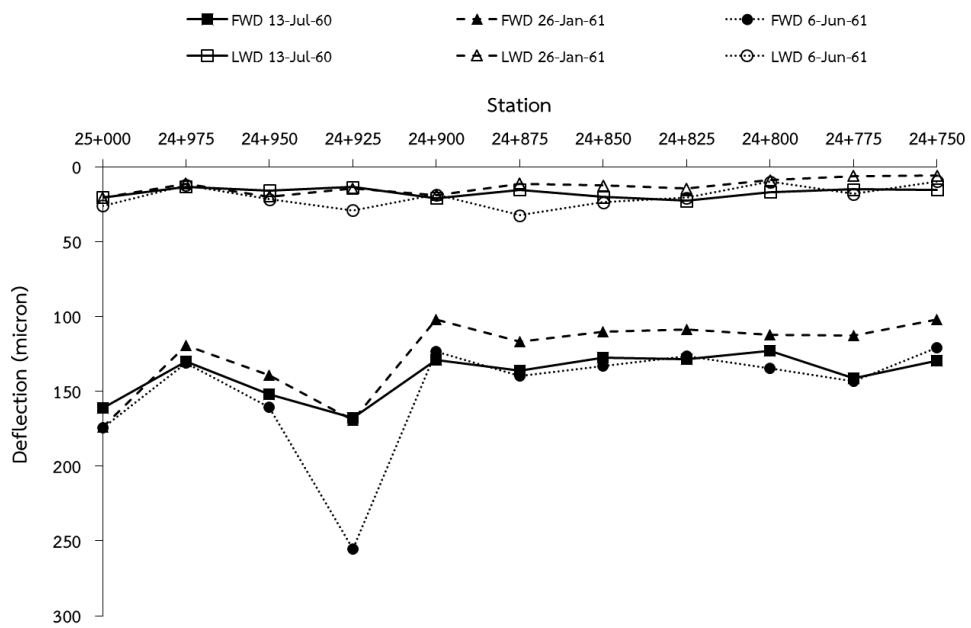


ภาพที่ ค7 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.331 ตอน 103 ซี่ตอ
 พันเสด็จนอก - หนองปรือ บริเวณ กม.47+050 - กม. 47+300 (บริเวณสถานีศรีราชา)



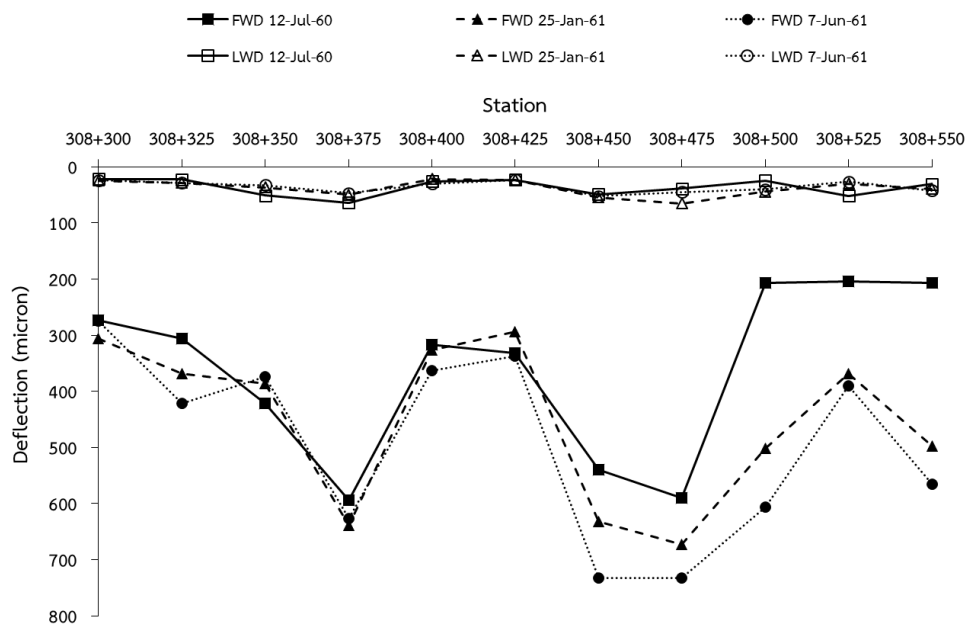
ภาพที่ ค8 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.33 ตอน 701 ซี่ตอ
 พระปรัง - โนนจิก บริเวณ กม.267+000 - กม. 267+250 (บริเวณสถานีวัฒนานคร)

3. ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของพื้นที่ศึกษาภาคเหนือตอนล่าง



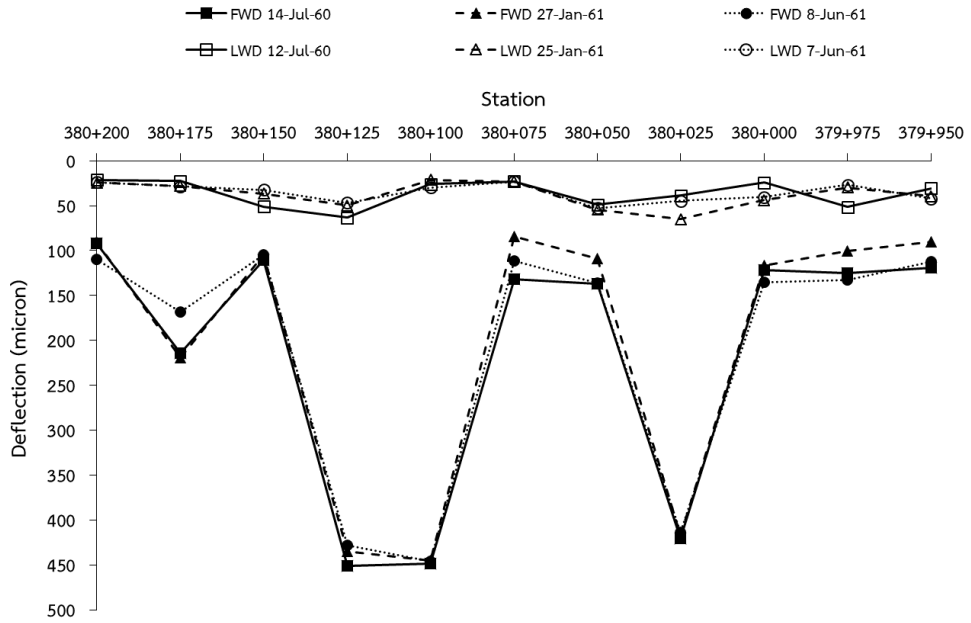
ภาพที่ ค9 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.117 ตอน 100 ซี่ดถนน

นครสวรรค์ – คลองพลังด้านใต้ บริเวณ กม.24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีเก้าเหลี่ยม)

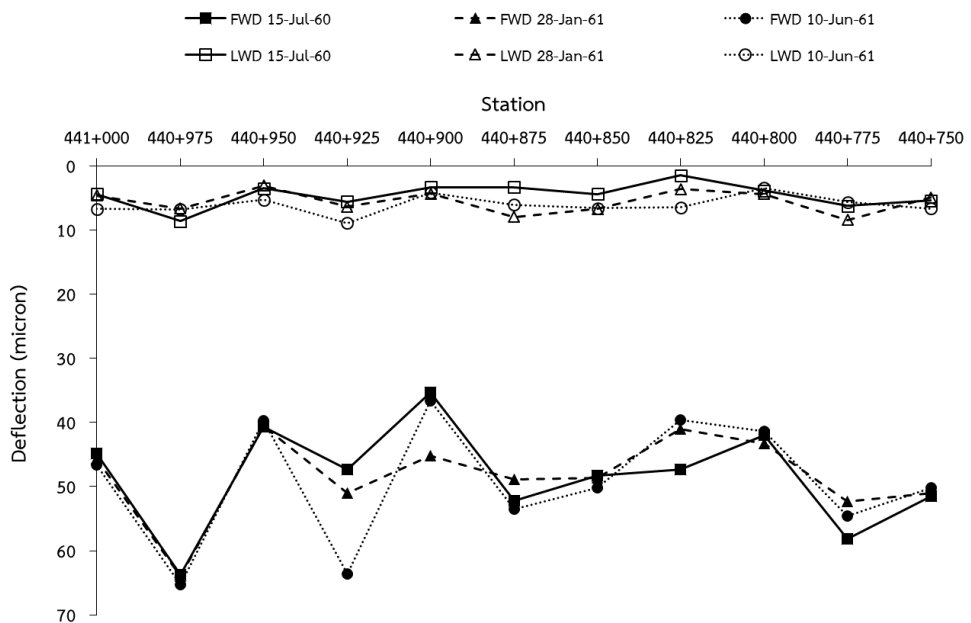


ภาพที่ ค10 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 801 ซี่ดถนน

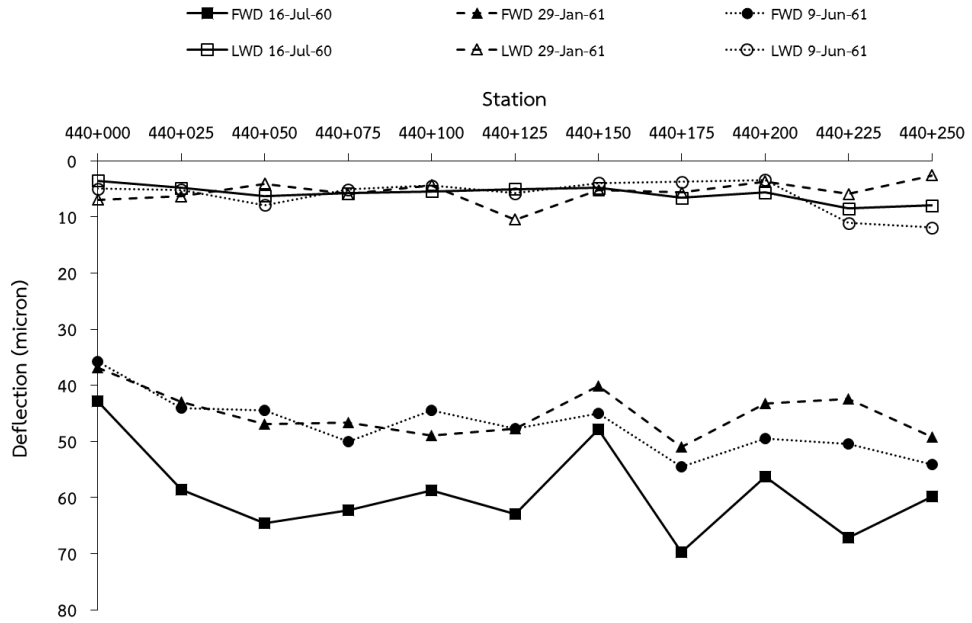
ทางน้ำหนองแถม – บ้านห้วย บริเวณ กม.308+300 - กม. 308+550 (บริเวณสถานีพยุหะคีรี)



ภาพที่ ค11 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 804 ซี่ดอน
วังไผ่ - โนนปอแดง บริเวณ กม.379+950 - กม. 380+200 (บริเวณสถานีบรรพตพิสัย)

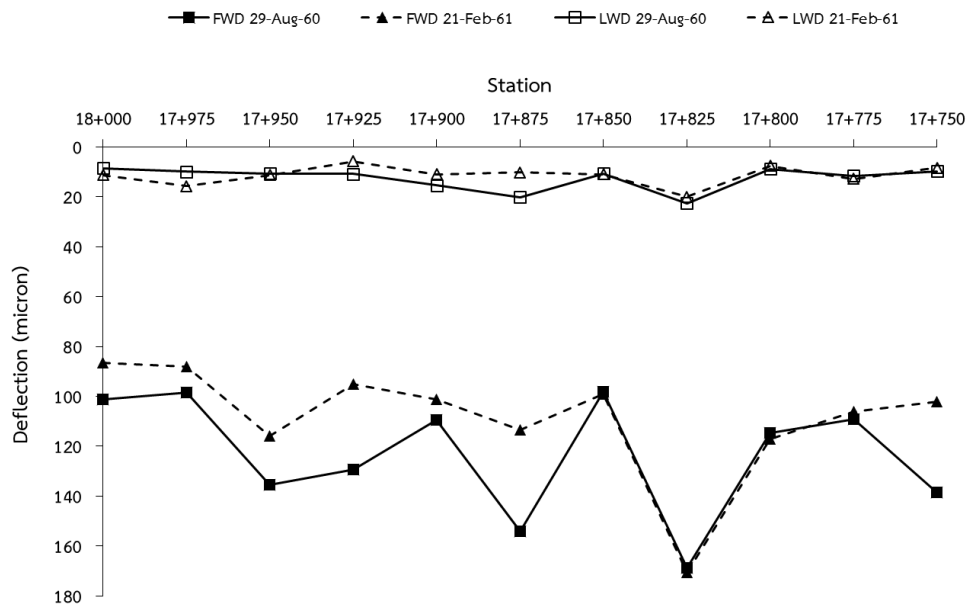


ภาพที่ ค12 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 902 ซี่ดอน
ปากดง - นครชุม บริเวณ กม.440+750 - กม. 441+000 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร ขาเข้า)

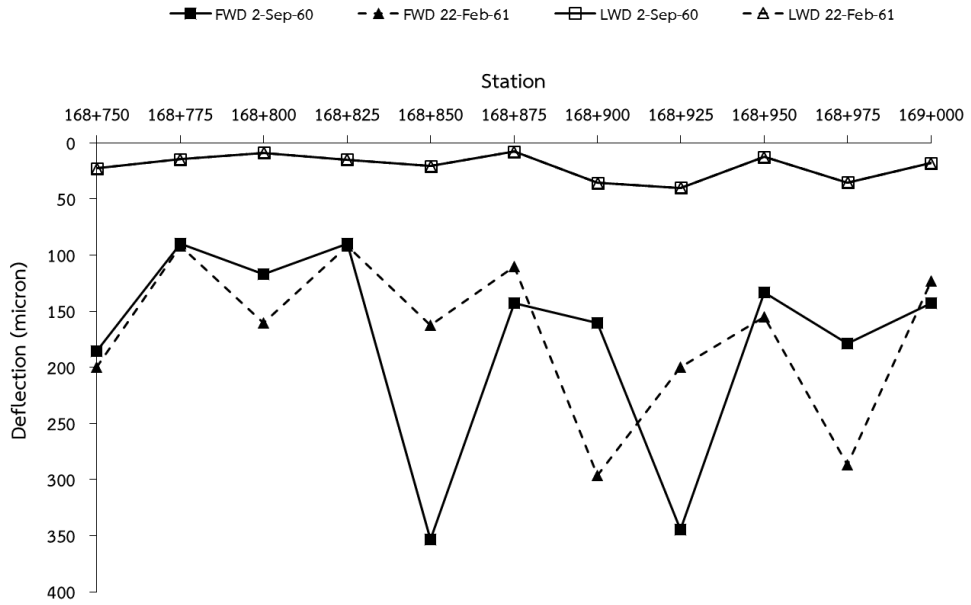


ภาพที่ ค13 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 902 ซี่ดถนน
ปากดง - นครชุม บริเวณ กม.440+000 - กม. 441+250 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร ขาออก)

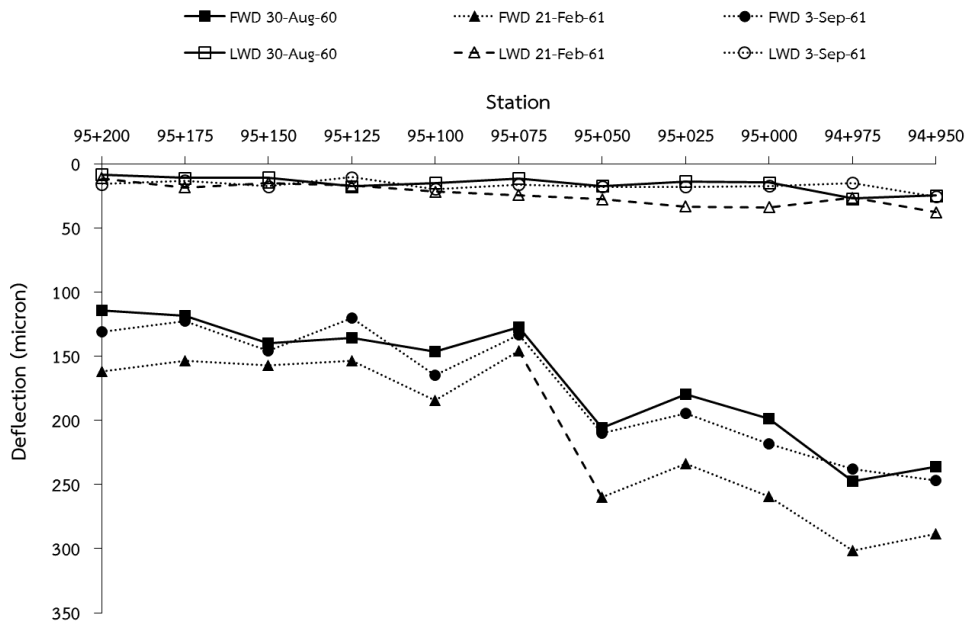
4. ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของพื้นที่ศึกษาภาคอีสาน



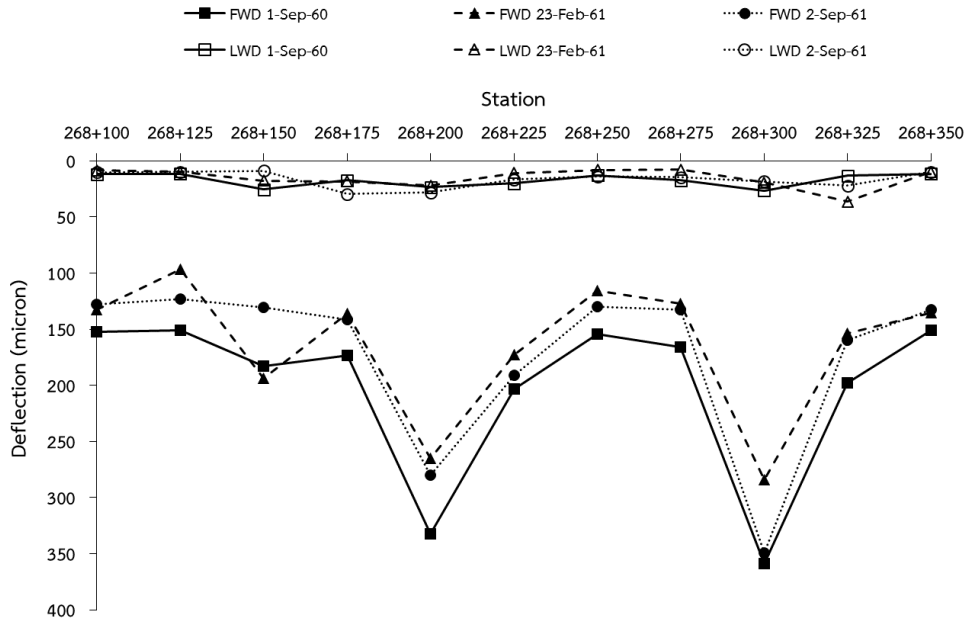
ภาพที่ ค14 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 102 ซี่ดถนน
ตาลเดี่ยว - ชับบอน บริเวณ กม.17+750 - กม. 18+000 (บริเวณสถานีแก่งคอย)



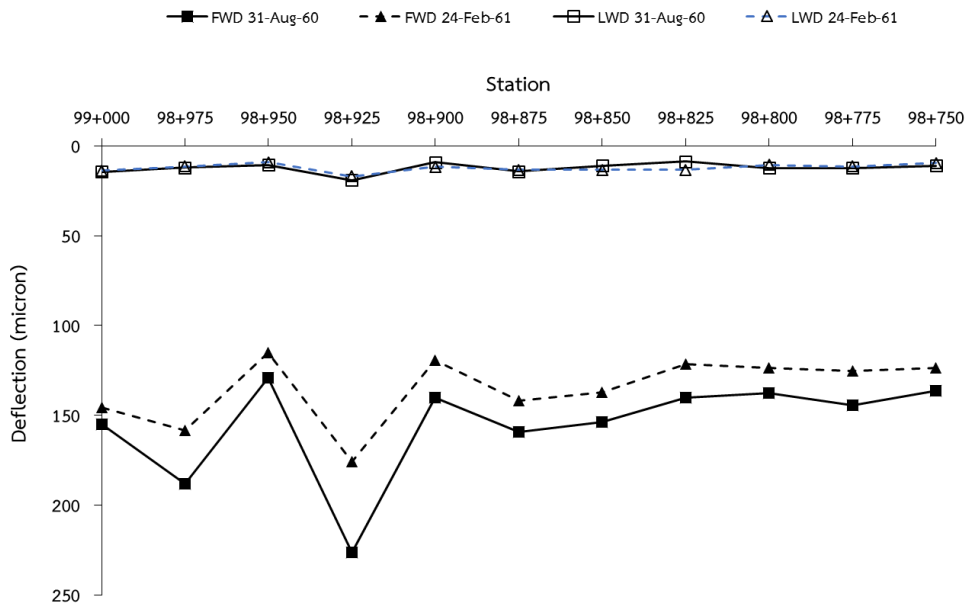
ภาพที่ ค15 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 301 ซี่ดถนน
นครราชสีมา - ดอนหวาย บริเวณ กม.168+750 - กม. 169+000 (บริเวณสถานีโนนสูง)



ภาพที่ ค16 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 202 ซี่ดถนน
บ่อทอง - มอจะบก บริเวณ กม.94+950 - กม. 95+200 (บริเวณสถานีสี่คิ้ว)

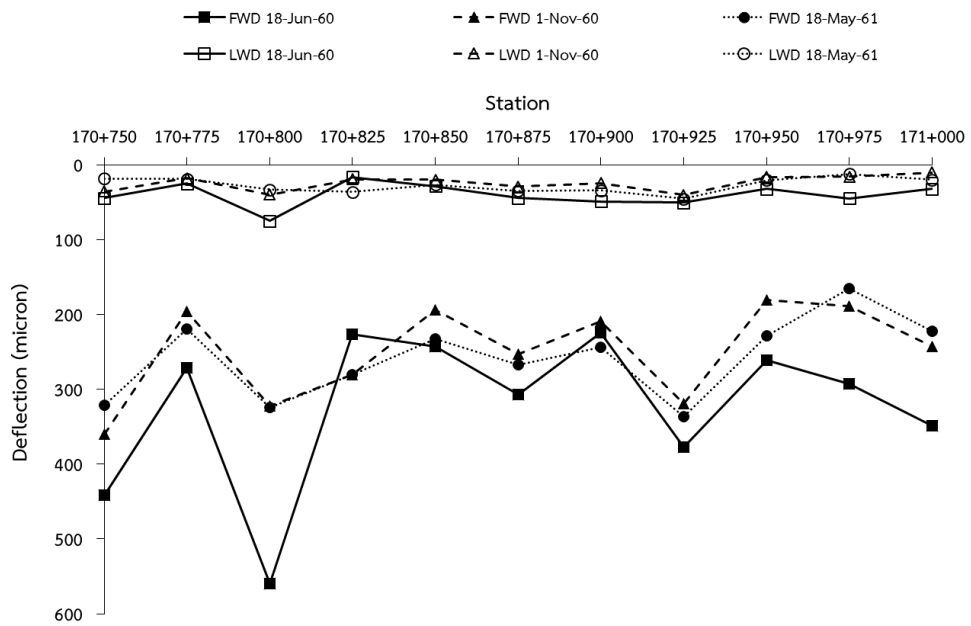


ภาพที่ ๑๗ ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.๒ ตอน ๔๐๒ ซี่ดถนน
พล - บ้านไผ่ บริเวณ กม.๒๖๘+๑๐๐ - กม. ๒๖๘+๓๕๐ (บริเวณสถานีพล)

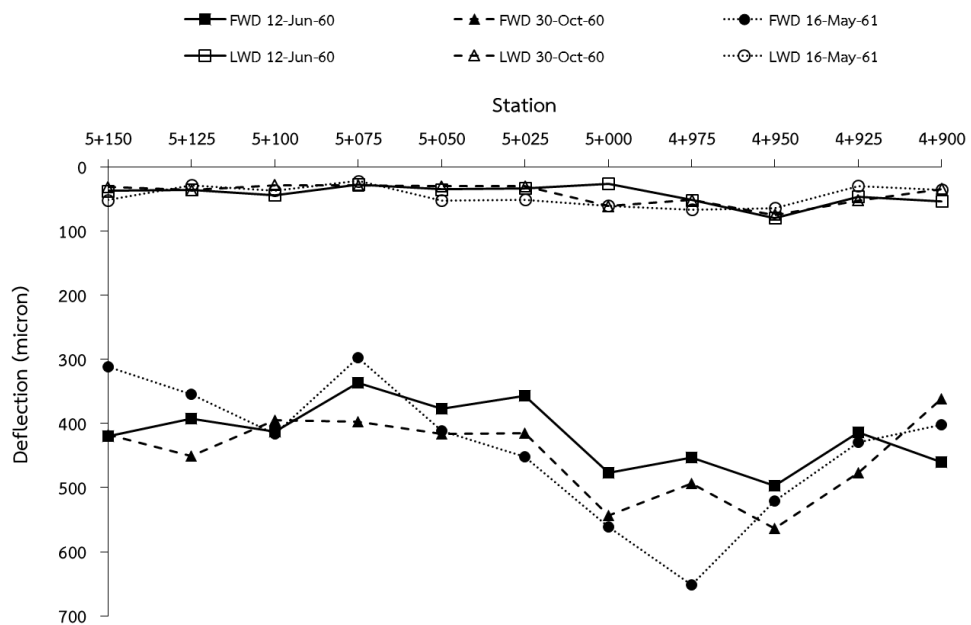


ภาพที่ ๑๘ ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.๒๔ ตอน ๓๐๒ ซี่ดถนน
หนองกี่ - นางรอง บริเวณ กม.๙๘+๗๕๐ - กม. ๙๙+๐๐๐ (บริเวณสถานีหนองกี่)

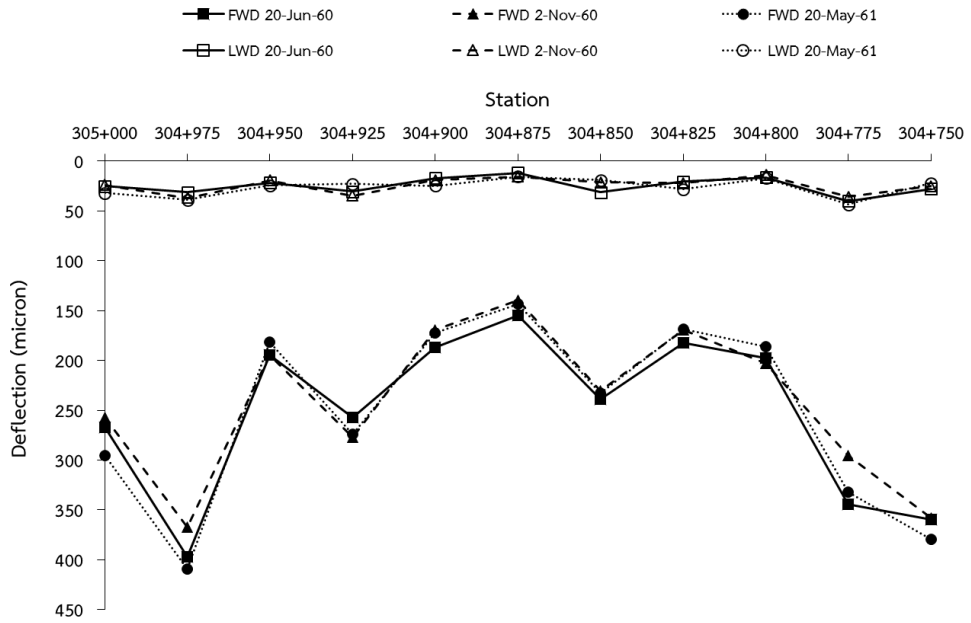
5. ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของพื้นที่ศึกษาภาคใต้



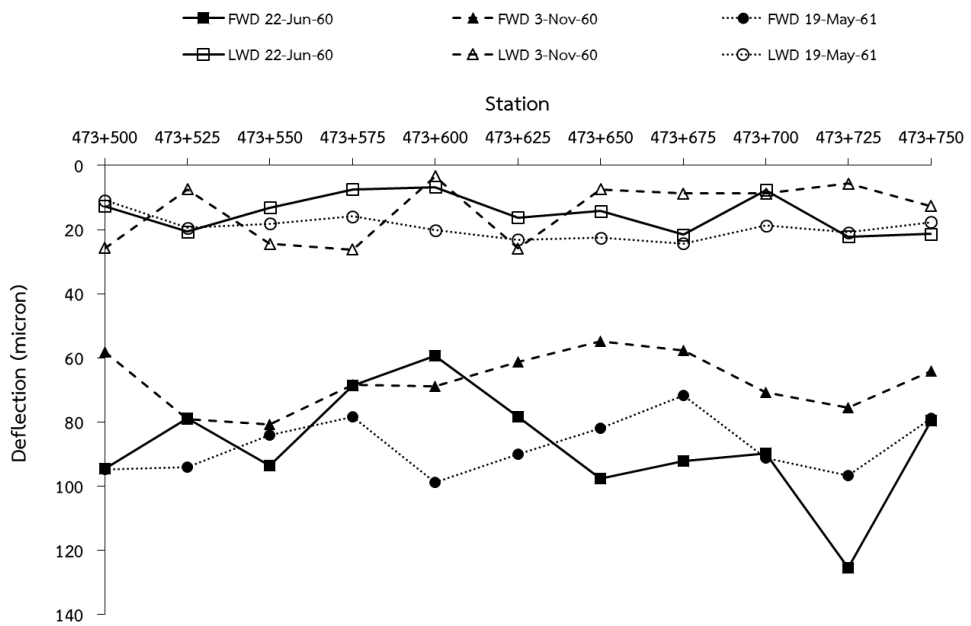
ภาพที่ ค19 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 502 ซี่ดตอน
 เขาวัง – สระพระ บริเวณ กม.170+750 - กม. 171+000 (บริเวณสถานีท่ามาย)



ภาพที่ ค20 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.323 ตอน 100 ซี่ดตอน
 หองตะแครง – ลูกแก บริเวณ กม.4+900 - กม. 5+150 (บริเวณสถานีบ้านโป่ง)



ภาพที่ ค21 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 603 ชี้อตอน
หนองหมู – ห้วยยาง บริเวณ กม.304+750 - กม. 305+000 (บริเวณสถานีประจวบคีรีขันธ์)



ภาพที่ ค22 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 703 ชี้อตอน
วังครก – เสียบญวน บริเวณ กม.473+500 - กม. 473+750 (บริเวณสถานีท่าแซะ)