



## การวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง Structural Performance Analysis and Evaluation of Flexible Pavement



โดย

ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์  
ธีรภัทร์ ศิริรัตนวัตร  
ณัฏญ์ฐ กาวร  
สุนนท์ เขี้ยวรงค์  
และ  
อรรณพล หายทุกขี



เอกสารรายงานโครงการวิจัยฯ

ติดต่อสอบถามข้อมูลเพิ่มเติม

สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

อาคารศูนย์พัฒนาเทคโนโลยีงานทาง ชั้น 3

153/1 ถนนพระรามที่ 2 แขวงสามเต่า เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150

โทรศัพท์ 0 2354 6668 ต่อ 23900 โทรสาร 0 2354 0052



## คำนำ

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

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานการวิจัยฉบับนี้จะนำไปต่อยอดและขยายผลในวงกว้าง เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิศวกรรมงานทางโดยเฉพาะการวิเคราะห์สมรรถนะด้านความแข็งแรงและการพัฒนาแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพโครงสร้างถนนลาดยางของกรมทางหลวงอย่างมีประสิทธิภาพและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น สอดคล้องกับสภาพการใช้งานตามบริบทของประเทศไทย

## สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญภาพ	ง
สารบัญตาราง	ฅ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 สมมติฐานที่ใช้ในการวิจัย	3
<b>บทที่ 2 การศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 สมรรถนะของโครงสร้างถนน	4
2.2 การประเมินสมรรถนะด้านโครงสร้างถนน	6
2.3 การวิเคราะห์หัตถ์ชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน	38
<b>บทที่ 3 อุปกรณ์และแผนการศึกษา</b>	<b>46</b>
3.1 อุปกรณ์	46
3.2 แผนการวิจัย	48
3.3 ขั้นตอนการวิจัย	49
3.4 รายละเอียดของแปลงทดสอบ	54
3.5 วิธีการวิเคราะห์	56
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษา</b>	<b>58</b>
4.1 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของชั้นโครงสร้างทาง ที่ได้จากการทดสอบด้วย เครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD	58

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน	72
4.3 ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) และ ค่าดัชนีความแข็งแรง (Structural Condition Index, SCI)	82
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>88</b>
5.1 สรุป	88
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>91</b>
ภาคผนวก ก แบบรูปตัดชั้นโครงสร้างทาง	93
ภาคผนวก ข ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT)	110
ภาคผนวก ค ค่า Deflection ของชั้นโครงสร้างทางที่ได้จากการทดสอบด้วย เครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD	121

## 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 ชั้นทางตามปริมาณจราจรและการยืดอายุการใช้งาน	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	แบบจำลอง ¼ ของรถยนต์ (Quarter Car Model) ในการวิเคราะห์ค่า IRI	15
ภาพที่ 2.8	Freeway Regression Model	17
ภาพที่ 2.9	Arterials Regression Model	18
ภาพที่ 2.10	Collector Regression Model	18
ภาพที่ 2.11	ค่า IRI ที่ใช้กำหนดอายุบริการของโครงสร้างถนนตามระยะทางประเมิน	19
ภาพที่ 2.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI กับความเร็วยานพาหนะ	20
ภาพที่ 2.13	ตัวอย่างการจำแนกระดับความขรุขระตามเกณฑ์ของสำนักบริหารบำรุงทาง และสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง	21
ภาพที่ 2.14	การประเมินสมรรถนะด้านสภาพผิวทาง	21
ภาพที่ 2.15	Pavement Condition Index (PCI) ตามวิธี ASTM D 6433 – 07	23
ภาพที่ 2.16	ตัวอย่างการแบ่งถนนเป็นช่วงย่อยๆ เพื่อสำรวจเก็บข้อมูล	23
ภาพที่ 2.17	ตัวอย่างการหาค่าลดทอน (Deduct Value) สำหรับชนิดความเสียหาย Alligator Cracking	26
ภาพที่ 2.18	ตัวอย่างการหาจำนวนค่าลดทอนปรับแก้ที่จะใช้คำนวณค่า PCI (Adjustment of Number of Deduct Value, m)	27

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.19 ตัวอย่างการหาค่าลดทอนปรับแก้ (Corrected Deduct Value, CDV) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต	29
ภาพที่ 2.20 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดระหว่างล้อยานพาหนะกับผิวทาง	31
ภาพที่ 2.21 ระดับความหยาบและความขรุขระของผิวทาง	32
ภาพที่ 2.22 วิธีการคำนวณค่า Mean Segment Depth	33
ภาพที่ 2.23 จำนวนอุบัติเหตุต่อระยะทางล้านกิโลเมตรต่อคันตามช่วงค่า IFI	37
ภาพที่ 2.24 ค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD บนโครงสร้างถนน	44
ภาพที่ 3.1 เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)	47
ภาพที่ 3.2 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD)	48
ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการวิจัย	49
ภาพที่ 3.4 พื้นที่ศึกษา	51
ภาพที่ 3.5 การทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD	
ภาพที่ 3.6 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 1	54
ภาพที่ 3.7 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 2	55
ภาพที่ 3.8 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 3	55
ภาพที่ 3.8 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 4	56
ภาพที่ 4.1 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.323 ตอน 100 ชื่อตอน หนองตะแครง - ลูกแก บริเวณ กม.4+900 - กม. 5+150 (บริเวณสถานีบ้านโป่ง)	59
ภาพที่ 4.2 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.117 ตอน 100 ชื่อตอน นครสวรรค์ - คลองพลังด้านใต้ บริเวณ กม. 24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีเก้าเลี้ยว)	59
ภาพที่ 4.3 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.2 ตอน 202 ชื่อตอน บ่อทอง - มอจะบก บริเวณ กม. 94+950 - กม. 95+200 (บริเวณสถานีสี่คิ้ว)	60

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.4 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.35 ตอน 301 ชื่อตอน นาโคก – แพรกหนามแดง บริเวณ กม.54+000 - กม. 54+250 (บริเวณ สถานีสมุทรสาคร)	60
ภาพที่ 4.5 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคกลาง	62
ภาพที่ 4.6 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคกลาง	62
ภาพที่ 4.7 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบสถานีโพธาราม	63
ภาพที่ 4.8 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบสถานีโพธาราม	63
ภาพที่ 4.9 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก	64
ภาพที่ 4.10 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก	64
ภาพที่ 4.11 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบ ภาคเหนือตอนล่าง	65
ภาพที่ 4.12 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบ ภาคเหนือตอนล่าง	65
ภาพที่ 4.13 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	66
ภาพที่ 4.14 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	66
ภาพที่ 4.15 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคใต้	67
ภาพที่ 4.16 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคใต้	67
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 1	69
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 2	69

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 3	70
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 4	70
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบทั้ง 4 ประเภท	71
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	74
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	75
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	76
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	77
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	78
ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ ( $E_{p,Eq}$ ) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ( $E_{p, Back}$ ) แปลงทดสอบประเภทที่ 1	79

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ $E_{P,Eq}$ กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ( $E_{P, Back}$ ) แปลงทดสอบประเภทที่ 2	80
ภาพที่ 4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ $E_{P,Eq}$ กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ( $E_{P, Back}$ ) แปลงทดสอบประเภทที่ 4	80
ภาพที่ 4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ $E_{P,Eq}$ กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ( $E_{P, Back}$ ) แปลงทดสอบประเภทที่ 3	81
ภาพที่ 4.31	ค่า MR ของพื้นที่ศึกษาภาคกลาง	82
ภาพที่ 4.32	ค่า SCI ของพื้นที่ศึกษาภาคกลาง	83
ภาพที่ 4.33	ค่า MR ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออก	84
ภาพที่ 4.34	ค่า SCI ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออก	84
ภาพที่ 4.35	ค่า MR ของพื้นที่ศึกษาภาคเหนือตอนล่าง	85
ภาพที่ 4.36	ค่า SCI ของพื้นที่ศึกษาภาคเหนือตอนล่าง	85
ภาพที่ 4.37	ค่า MR ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	86
ภาพที่ 4.38	ค่า SCI ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	86
ภาพที่ 4.39	ค่า MR ของพื้นที่ศึกษาภาคใต้	87
ภาพที่ 4.40	ค่า SCI ของพื้นที่ศึกษาภาคใต้	87

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
<b>ภาคผนวก ก</b>	
ภาพผนวกที่ ก1	94
แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.35 ตอน 301 ชื่อตอน นาโคก – แพรกหนามแดง บริเวณ กม.54+000 - กม. 54+250 (บริเวณสถานีสมุทรสาคร)	
ภาพผนวกที่ ก2	95
แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.3 ตอน 104 ชื่อตอน บางตำหรุ – คลองด่าน บริเวณ กม.54+250 - กม. 54+500 (บริเวณสถานีชลบุรี)	
ภาพผนวกที่ ก3	96
แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.36 ตอน 201 ชื่อตอน มะขามคู้ – มาบข่า บริเวณ กม.28+575 - กม. 28+825 (บริเวณสถานีระยอง)	
ภาพผนวกที่ ก4	97
แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.331 ตอน 103 ชื่อตอน พันเสด็จนอก – หนองปรือ บริเวณ กม.47+050 - กม. 47+300 (บริเวณสถานีศรีราชา)	
ภาพผนวกที่ ก5	98
แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.117 ตอน 100 ชื่อตอน นครสวรรค์ – คลองปลั่งด้านใต้ บริเวณ กม.24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีเก้าเหลียว)	
ภาพผนวกที่ ก6	99
แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 801 ชื่อตอน ทางน้ำหนองแถม – บ้านหว่า บริเวณ กม.308+300 - กม. 308+550 (บริเวณสถานีพยุหะคีรี)	
ภาพผนวกที่ ก7	100
แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 804 ชื่อตอน วังไผ่ – โนนปอแดง บริเวณ กม.379+950 - กม. 380+200 (บริเวณสถานีบรรพตพิสัย)	
ภาพผนวกที่ ก8	101
แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 902 ชื่อตอน ปากดง – นครชุม บริเวณ กม.440+750 - กม. 441+000 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร)	

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพผนวกที่ ก9 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.2 ตอน 102 ชื่อตอน ตาลเดี่ยว – ซับบอน บริเวณ กม.17+750 - กม. 18+000 (บริเวณสถานีแก่งคอย)	102
ภาพผนวกที่ ก10 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.2 ตอน 301 ชื่อตอน นครราชสีมา – ดอนหวาย บริเวณ กม.168+750 - กม. 169+000 (บริเวณสถานีโนนสูง)	103
ภาพผนวกที่ ก11 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.2 ตอน 402 ชื่อตอน พล – บ้านไผ่ บริเวณ กม.268+100 - กม. 268+350 (บริเวณสถานีพล)	104
ภาพผนวกที่ ก12 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.24 ตอน 302 ชื่อตอน หนองกี่ – นางรอง บริเวณ กม.98+750 - กม. 99+000 (บริเวณสถานีหนองกี่)	105
ภาพผนวกที่ ก13 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.4 ตอน 502 ชื่อตอน เขาวัง – สระพระ บริเวณ กม.170+750 - กม. 171+000 (บริเวณสถานีท่ายาง)	106
ภาพผนวกที่ ก14 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.323 ตอน 100 ชื่อตอน หนองตะแครง – ลูกแก บริเวณ กม.4+900 - กม. 5+150 (บริเวณสถานีบ้านโป่ง)	107
ภาพผนวกที่ ก15 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.4 ตอน 603 ชื่อตอน หนองหมู – ห้วยยาง บริเวณ กม.304+750 - กม. 305+000 (บริเวณสถานีประจวบคีรีขันธ์)	108
ภาพผนวกที่ ก16 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.4 ตอน 703 ชื่อตอน วังครก – เสียบญวน บริเวณ กม.473+500 - กม. 473+750 (บริเวณสถานีท่าแชะ)	109

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
<b>ภาคผนวก ข</b>	
ตารางที่ ข1 ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคกลาง	111
ตารางที่ ข2 ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออก	112
ตารางที่ ข3 ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคเหนือตอนล่าง	114
ตารางที่ ข4 ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคอีสาน	116
ตารางที่ ข5 ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT) ของพื้นที่ศึกษาภาคใต้	119

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
<b>ภาคผนวก ค</b>	
ภาพผนวกที่ ค1 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.32 ตอน 400 ชื่อตอน โพนางดำออก – ท่าฉนวน บริเวณ กม.119+800 - กม. 120+050 (บริเวณสถานีสรรพยา)	122
ภาพผนวกที่ ค2 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 302 ชื่อตอน คลองอีจาง - หลุมดิน บริเวณ กม.88+570 - กม. 88+745 (บริเวณสถานีโพธาราม ล้อซ้าย)	122
ภาพผนวกที่ ค3 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 302 ชื่อตอน คลองอีจาง - หลุมดิน บริเวณ กม.88+570 - กม. 88+745 (บริเวณสถานีโพธาราม ล้อขวา)	123
ภาพผนวกที่ ค4 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.35 ตอน 301 ชื่อตอน นาโคก - แพรกหนามแดง บริเวณ กม.54+000 - กม. 54+250 (บริเวณสถานีสมุทรสาคร)	123
ภาพผนวกที่ ค5 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.3 ตอน 104 ชื่อตอน บางตำรุ - คลองด่าน บริเวณ กม.54+250 - กม. 54+500 (บริเวณสถานีชลบุรี)	124
ภาพผนวกที่ ค6 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.36 ตอน 201 ชื่อตอน มะขามคู่ - มาบข่า บริเวณ กม.28+575 - กม. 28+825 (บริเวณสถานีระยอง)	124
ภาพผนวกที่ ค7 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.331 ตอน 103 ชื่อตอน พันเสด็จนอก - หนองปรือ บริเวณ กม.47+050 - กม. 47+300 (บริเวณสถานีศรีราชา)	125
ภาพผนวกที่ ค8 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.33 ตอน 701 ชื่อตอน พระปรัง - โนนจิก บริเวณ กม.267+000 - กม. 267+250 (บริเวณสถานีวัฒนานคร)	125

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพผนวกที่ ค9 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.117 ตอน 100 ชื่อตอน นครสวรรค์ – คลองพลังด้านใต้ บริเวณ กม.24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีเก้าเสี้ยว)	126
ภาพผนวกที่ ค10 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 801 ชื่อตอน ทางน้ำหนองแวม – บ้านหว่า บริเวณ กม.308+300 - กม. 308+550 (บริเวณสถานีพยุหะคีรี)	126
ภาพผนวกที่ ค11 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 804 ชื่อตอน วังไผ่ – โนนปอแดง บริเวณ กม.379+950 - กม. 380+200 (บริเวณสถานีบรรพตพิสัย)	127
ภาพผนวกที่ ค12 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 902 ชื่อตอน ปากดง – นครชุม บริเวณ กม.440+750 - กม. 441+000 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร ขาเข้า)	127
ภาพผนวกที่ ค13 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 902 ชื่อตอน ปากดง – นครชุม บริเวณ กม.440+000 - กม. 441+250 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร ขาออก)	128
ภาพผนวกที่ ค14 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 102 ชื่อตอน ตาลเดี่ยว – ชับบอน บริเวณ กม.17+750 - กม. 18+000 (บริเวณสถานีแก่งคอย)	128
ภาพผนวกที่ ค15 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 301 ชื่อตอน นครราชสีมา – ดอนหวาย บริเวณ กม.168+750 - กม. 169+000 (บริเวณสถานีโนนสูง)	129
ภาพผนวกที่ ค16 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 202 ชื่อตอน บ่อทอง – มอจะบก บริเวณ กม.94+950 - กม. 95+200 (บริเวณสถานีสีคิ้ว)	129

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพผนวกที่ ค17 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 402 ชื้อตอน พล – บ้านไผ่ บริเวณ กม.268+100 - กม. 268+350 (บริเวณสถานีพล)	130
ภาพผนวกที่ ค18 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.24 ตอน 302 ชื้อตอน หนองกี้ – นางรอง บริเวณ กม.98+750 - กม. 99+000 (บริเวณสถานีหนองกี้)	130
ภาพผนวกที่ ค19 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 502 ชื้อตอน เขาวัง – สระพระ บริเวณ กม.170+750 - กม. 171+000 (บริเวณสถานีท่ายาง)	131
ภาพผนวกที่ ค20 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.323 ตอน 100 ชื้อตอน หนองตะแครง – ลูกแก บริเวณ กม.4+900 - กม. 5+150 (บริเวณสถานีบ้านโป่ง)	131
ภาพผนวกที่ ค21 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 603 ชื้อตอน หนองหมู – ห้วยยาง บริเวณ กม.304+750 - กม. 305+000 (บริเวณสถานีประจวบคีรีขันธ์)	132
ภาพผนวกที่ ค22 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 703 ชื้อตอน วังครก – เสียบญวน บริเวณ กม.473+500 - กม. 473+750 (บริเวณสถานีท่าแซะ)	132

## สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 2.1	ค่า Regression Coefficient สำหรับคำนวณค่า $SN_{eff}$ ตามวิธีของ Rohde (1994)	10
ตารางที่ 2.2	อัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง	14
ตารางที่ 2.3	เกณฑ์การชี้วัดคุณภาพการขับขี (FHWA 1990)	16
ตารางที่ 2.4	ค่า IRI แนะนำจากสมการถดถอยเชิงเส้นสำหรับ District of Columbia (DC) แบ่งตามประเภทถนน	19
ตารางที่ 2.5	เกณฑ์การประเมิน Present Serviceability Rating (PSR) ตามวิธีของ AASHTO	22
ตารางที่ 2.6	จำนวนการสู่มสำรวจตัวอย่างสำหรับการตรวจสอบผิวทาง	24
ตารางที่ 2.7	ตัวอย่างแบบฟอร์มการตรวจสอบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (ASTM D 6433 – 07)	25
ตารางที่ 2.8	ตัวอย่างแบบฟอร์มการตรวจสอบผิวทางคอนกรีต (ASTM D6433 – 07)	25
ตารางที่ 2.9	ตัวอย่างการคำนวณดัชนีสภาพผิวทาง (PCI) สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต	28
ตารางที่ 2.10	ดัชนีบ่งชี้สภาพผิวทางและคุณภาพการขับขีของหน่วยงานต่างๆ	30
ตารางที่ 2.11	ค่าสัมประสิทธิ์ a, b ตามรูปแบบการทดสอบค่าความหยาบผิวทาง (Macrotexture)	35
ตารางที่ 2.12	ค่าสัมประสิทธิ์ A, B และ C ตามรูปแบบเครื่องมือทดสอบความผิด	35
ตารางที่ 2.13	ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดของผิวทางที่ระดับพึงระวังและระดับปรับปรุงแก้ไข	36
ตารางที่ 2.14	สรุปเกณฑ์ระดับพึงระวัง (Investigatory Level) และระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level) กรมทางหลวง	38
ตารางที่ 2.15	ค่าโมดูลัสของชั้นโครงสร้างทางที่ใช้ในการออกแบบ	40
ตารางที่ 2.16	ค่าคงที่สมการ (Rohde 1994)	45
ตารางที่ 3.1	พื้นที่ศึกษาวิจัย	52

# 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

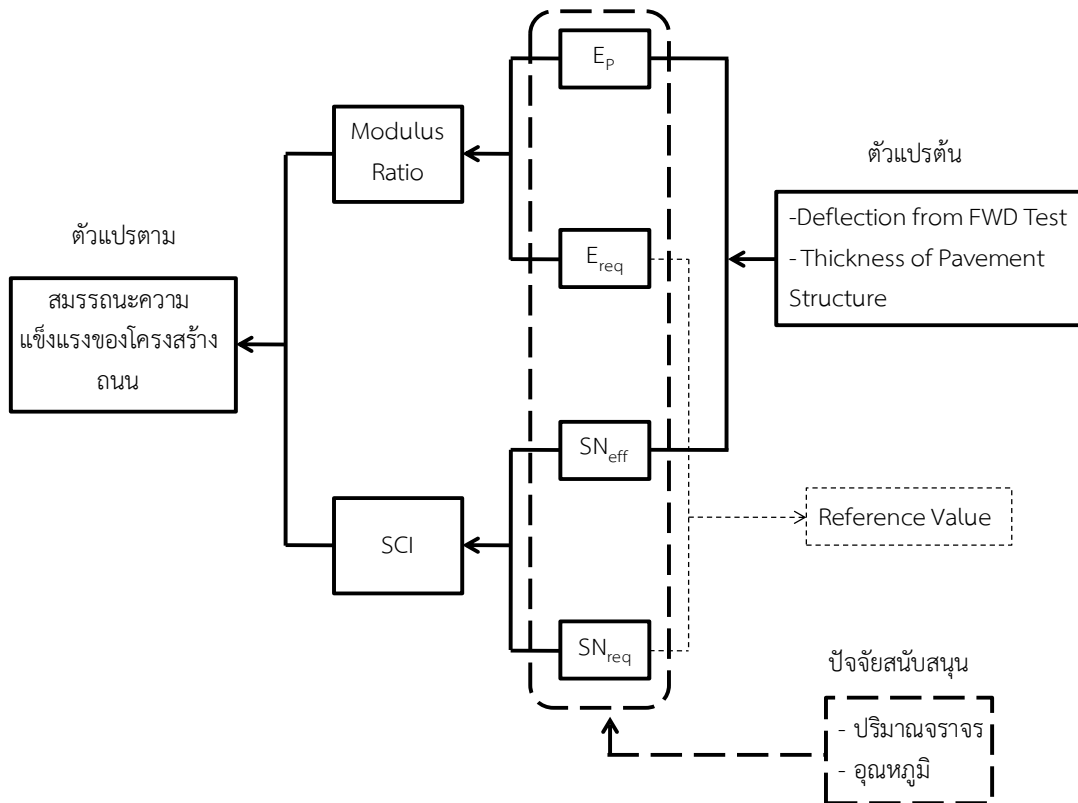
## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 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

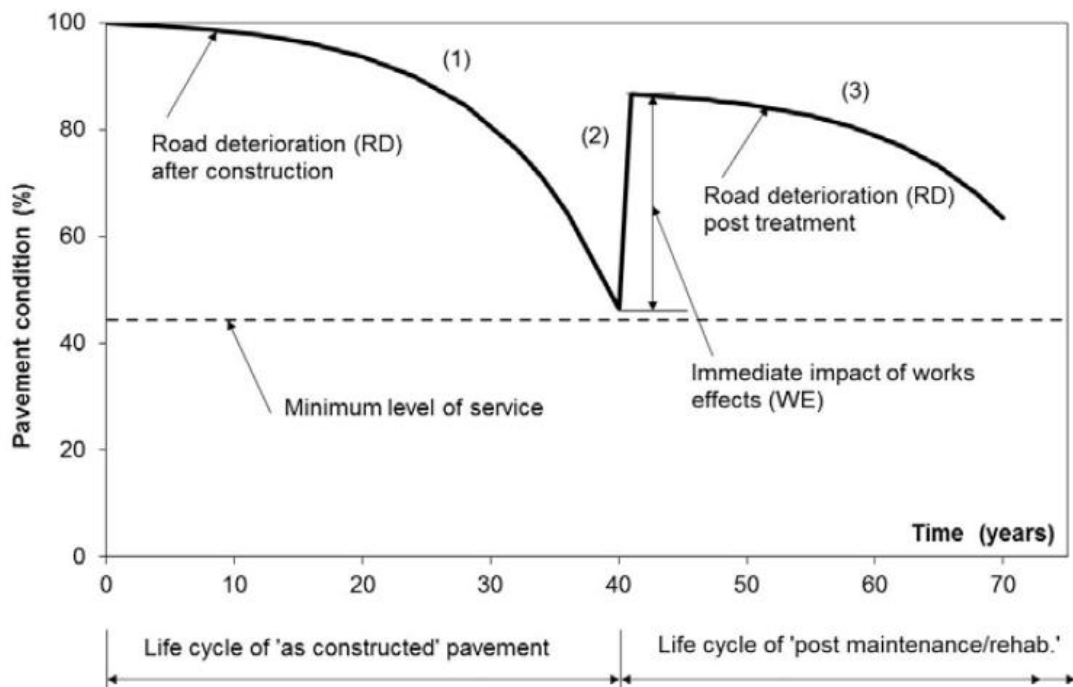
หนึ่งในปัจจัยการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างถนนที่มีความสำคัญต่องานบริหารบำรุงทาง ได้แก่ ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Number Condition) เนื่องจากแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพโครงสร้างถนนที่กรมทางหลวงใช้อยู่ในปัจจุบันค่อนข้างล้าสมัยและไม่ตรงกับสภาพข้อเท็จจริงของประเทศไทย จึงต้องมีการปรับปรุงดัชนีชี้วัดคุณภาพด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนนโดยใช้เครื่องมือ 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 ความสามารถของผิวทางในการต้านทานไม่ให้เกิดที่แล่นผ่านเกิดการเสียหลักลื่นไถลจากเส้นทาง 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

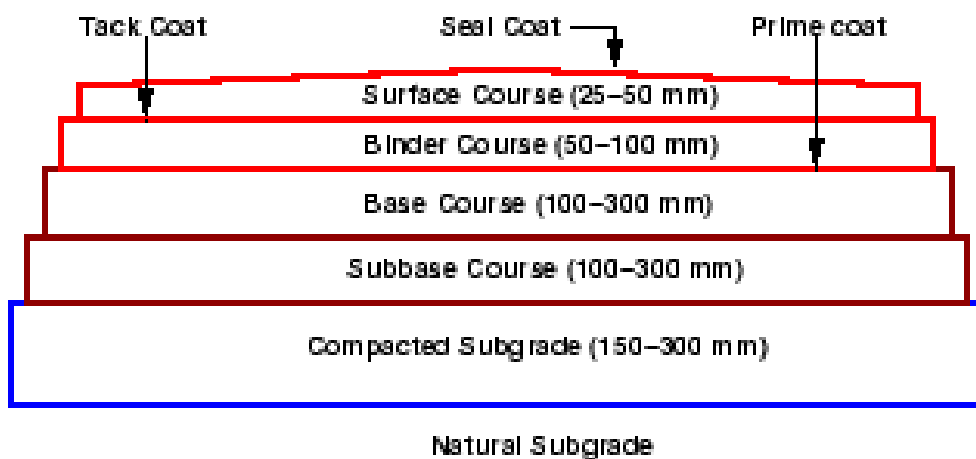
### 2.2.1 การประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

AASHTO (1993) ได้เสนอวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยาง (ดังรูปที่ 2.2) เชิงประจักษ์ (Empirical Design Method) โดยใช้สมการที่อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง โมดูลัสยืดหยุ่นของดินเดิม จำนวนเที่ยวของเพลาดึงมาตรฐาน (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

- $W_{18}$  = จำนวนเที่ยวของเพลลาเดี่ยวมาตรฐาน (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  $S_0 = 0.5$
- $\Delta PSI$  = 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

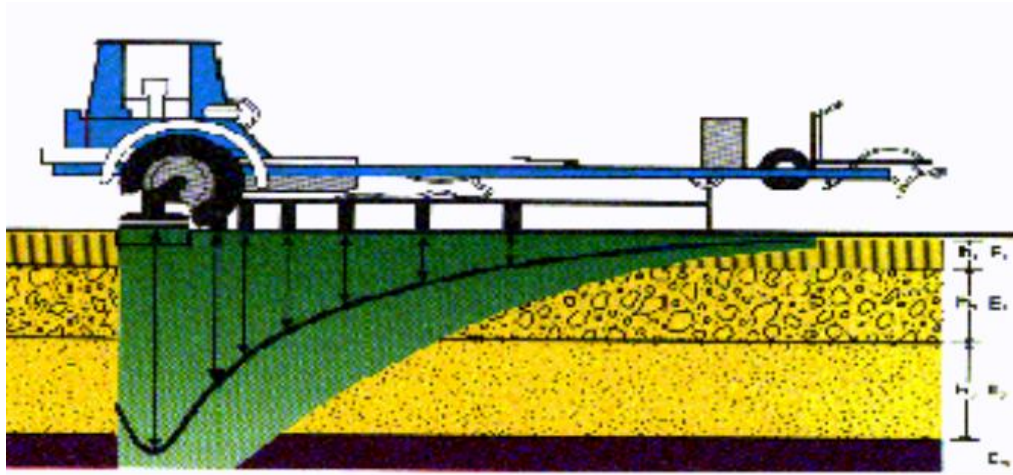
จากสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่าความสามารถในการรับน้ำหนักจราจรของโครงสร้างถนนขึ้นอยู่กับค่า SN ของโครงสร้างชั้นทางแต่ละชั้นและค่า  $M_R$  ของดินเดิม เมื่อถนนเปิดใช้งาน แรงกระทำจากน้ำหนักของยานพาหนะ แสงแดด การไหลซึมของน้ำฝน และปัจจัยอื่นๆ อาจส่งผลให้ผิวทางเสื่อมสภาพ เกิดรอยแตก น้ำซึมผ่านเข้าสู่โครงสร้างถนน 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

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

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

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

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 (ตำแหน่งที่น้ำหนักตกกระทบบ) และค่าการอ่อนตัวของ Sensor ตัวที่ 7 (ห่างจาก Sensor ตัวที่ 1 เป็นระยะทาง 72 นิ้ว) ตามลำดับ หน่วยเป็น นิ้ว
- $P$  = น้ำหนักตกกระทบบ (Applied Load) หน่วยเป็นปอนด์

หรืออาจใช้วิธีประเมินค่า  $SN_{eff}$  ที่เสนอโดย Rohde (1994) ดังนี้

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

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

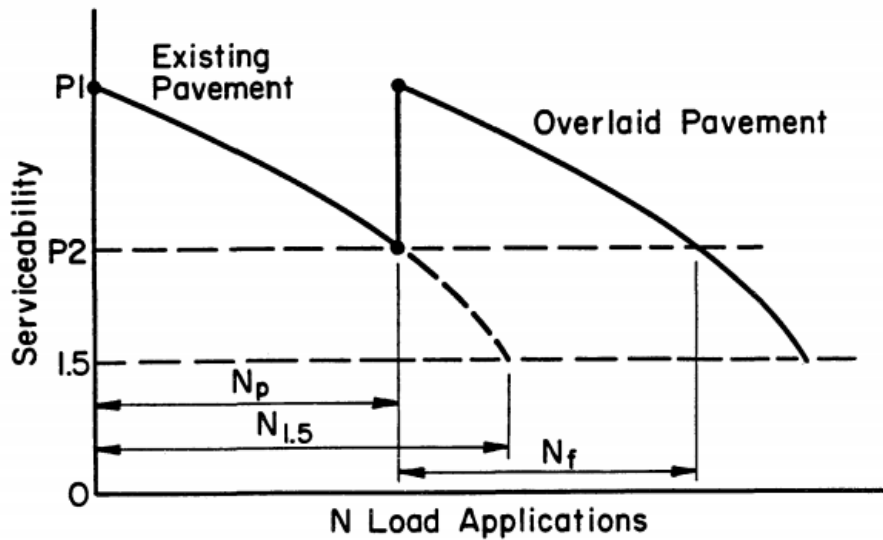
เมื่อ

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

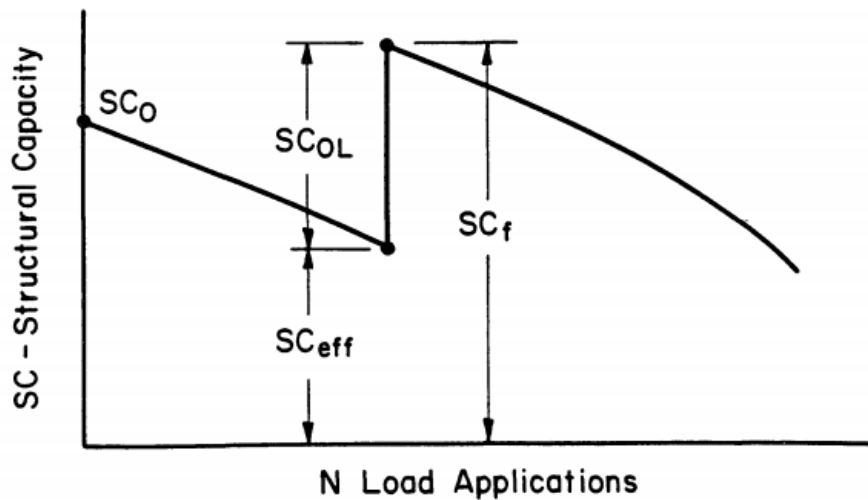
ตารางที่ 2.1 ค่า Regression Coefficient สำหรับคำนวณค่า  $SN_{eff}$  ตามวิธีของ Rohde (1994)

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

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

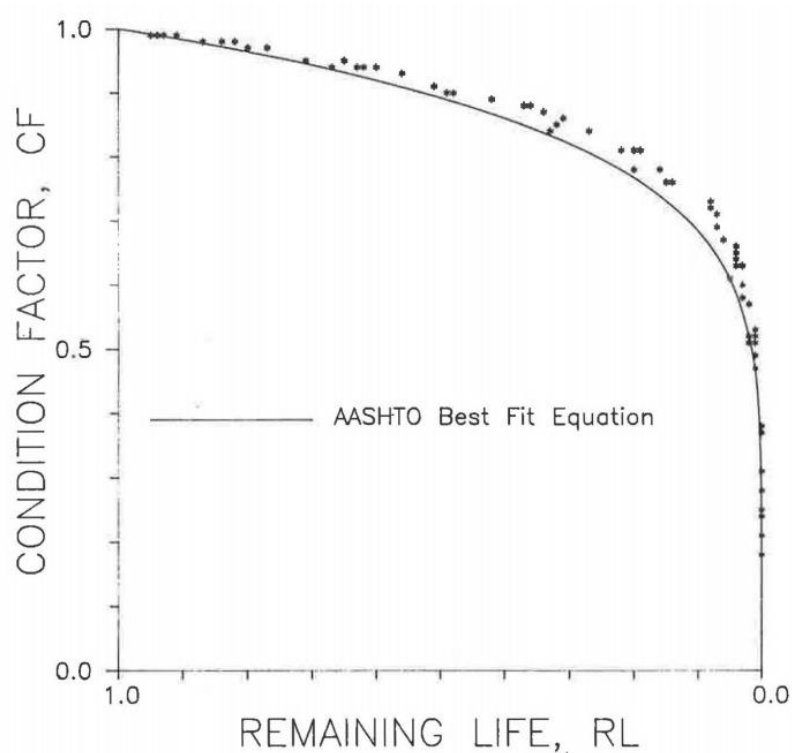
จากพฤติกรรมการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนและระดับการให้บริการสามารถสรุปได้ว่า หากต้องการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างถนน ควรทำการเสริมผิวทางก่อนที่โครงสร้างถนนจะเสื่อมสภาพไปมาก ทั้งนี้เพื่อลดความหนาที่มากเกินไปความจำเป็นและช่วยประหยัดงบประมาณในการซ่อมบำรุงรักษา ภาพที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (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<sub>eff</sub> = สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนประสิทธิผล (Effective Structural Capacity) เมื่อจำนวนเที่ยว ESALs เท่ากับ N<sub>p</sub>
- SC<sub>o</sub> = สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนหลังก่อสร้างเสร็จใหม่
- RL = ร้อยละของอายุการใช้งานคงเหลือ (%)
- N<sub>p</sub> = จำนวนเที่ยว ESALs ที่กระทำต่อโครงสร้างถนนตั้งแต่เริ่มเปิดใช้งานจนถึงปัจจุบัน
- N<sub>1.5</sub> = จำนวนเที่ยว ESALs ที่ทำให้โครงสร้างถนนมีค่า PSI ลดลงเหลือเท่ากับ 1.5



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

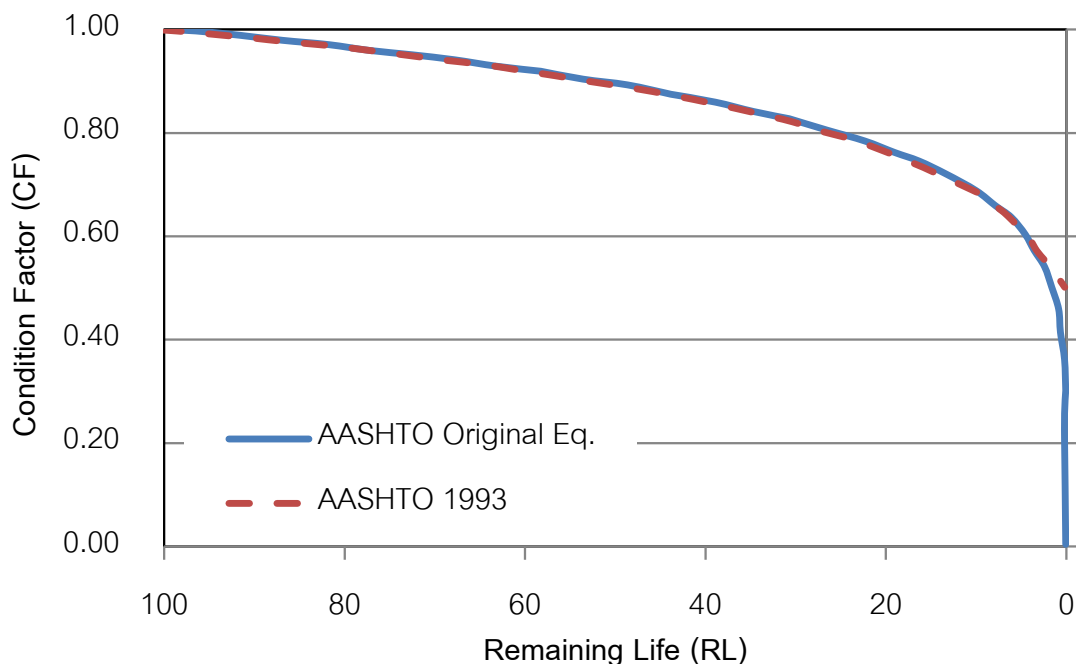
ในกรณีโครงสร้างถนนลาดยาง สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนประสิทธิผล (Effective Structural Capacity,  $SC_{eff}$ ) สามารถใช้ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบัน ( $SN_{eff}$ ) แทนได้ ในขณะที่สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนหลังก่อสร้างเสร็จใหม่ ( $SC_0$ ) แทนด้วยค่า  $SN_{req}$  ดังนั้นค่า SCI สามารถแทนด้วยค่า 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 เป็นเกณฑ์ในงานซ่อมบำรุงทางอาภัพพิจารณาจากอัตราการเสื่อมสภาพ 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

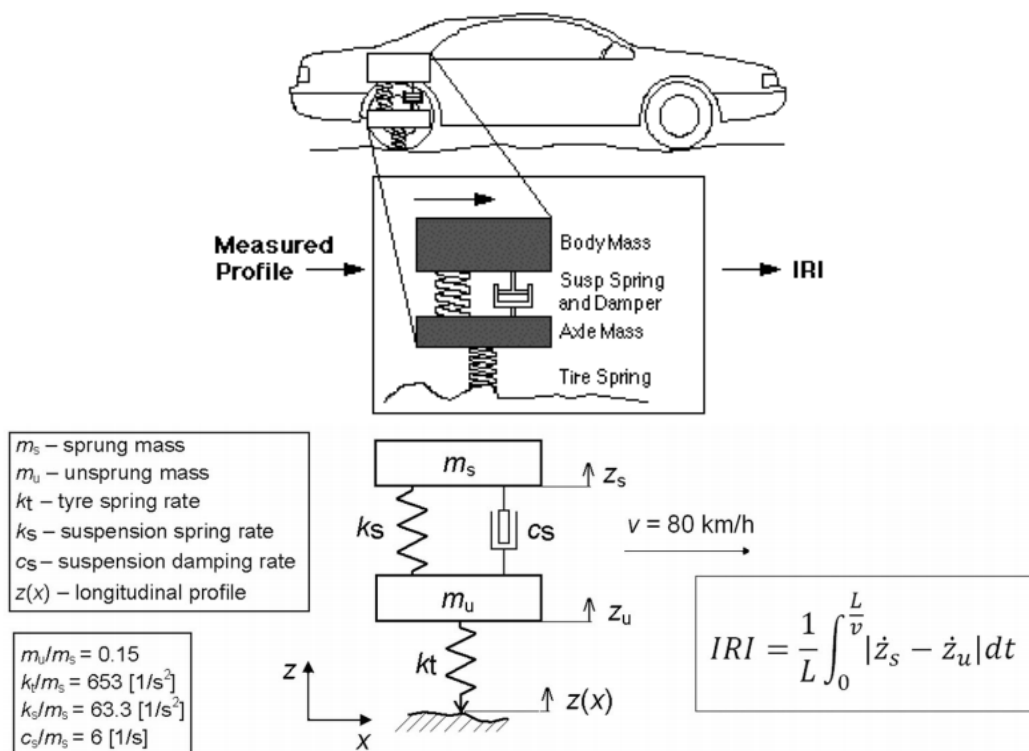
ร้อยละของอายุการใช้งานคงเหลือที่เหลืออยู่ (RL)	แฟคเตอร์สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (CF=SCI)	อัตราการเสื่อมสภาพ dCF/dRL	อัตราการเสื่อมสภาพเทียบกับช่วงเริ่มต้น
100	1.00	0.165	1.0
43	0.87	0.334	2.0
19	0.76	0.660	4.0
8.3	0.66	1.318	8.0
0.0	0.50	N/A	N/A

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

### 2.2.2 การประเมินสมรรถนะด้านความราบเรียบในการขับขี่

ความขรุขระ (Roughness) ของผิวทางเป็นอีกหนึ่งสมรรถนะสำคัญของโครงสร้างถนนที่ต้องพิจารณาในงานบำรุงรักษาทาง ผิวทางที่ดีควรมีความราบเรียบเพื่อให้ผู้ใช้ทางมีความสะดวกสบายในการขับขี่ ลดการเสื่อมสภาพของยานพาหนะ ประหยัดน้ำมันในการเดินทางและการขนส่ง อีกทั้งยังช่วยลดแรงไดนามิกจากการจราจรที่กระทำต่อโครงสร้างถนน ทำให้ผิวทางสามารถใช้งานได้นานขึ้น เป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายงานบำรุงรักษาทาง โดยการประเมินสมรรถนะด้านความราบเรียบในการขับขี่นิยมใช้ค่าดัชนีความขรุขระสากล หรือ ค่า International Roughness Index (IRI)

การสำรวจความราบเรียบของผิวทางในปัจจุบันนิยมใช้ระบบเลเซอร์ในการวัดระยะ จากผิวทางที่ขรุขระถึงเครื่องยิงเลเซอร์ร่วมกับการวัดค่าความเร่งในแนวดิ่งจากเครื่อง IMU เพื่อ วิเคราะห์ค่าระดับของผิวทางที่ขรุขระเทียบกับค่าระดับของมวลเฉื่อย (Profile Relative to Inertia Reference) ซึ่งจะถูกใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งของรถบนถนนสายนั้น ความหยาบ ของผิวทาง (Macrotecture) มีผลต่อความราบเรียบในการขับขี่น้อยมาก ดังนั้นค่าระดับของผิวทางที่ ขรุขระจะถูกทำให้เป็นค่าระดับที่เรียบขึ้นด้วยวิธี Moving Average Filter โดยใช้ระยะผิวสัมผัสของ ล้อ 250 มม. (Base Length) จากนั้นจึงนำค่าระดับผิวทางที่ปรับแก้แล้วมาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง ไดนามิกของ Quarter Car Model (รถยนต์ที่ถูกผ่าออกเป็น 4 ส่วน ให้เหลือเพียงโครงรถด้านบนที่ วางบนระบบ Suspension ที่ติดกับล้อรถ) โดยจะให้ Quarter Car Model วิ่งบนผิวทางด้วย ความเร็วคงที่ 80 กม.ต่อชม. เพื่อจำลองระยะการเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งสะสมของ Spring Mass (มวลของโครงรถช่วงบน เบาะ และที่นั่ง) เทียบกับ Unsprung Mass (มวลของครึ่งเพลาล้อและล้อรถ) และหารด้วยระยะทางที่ใช้ประเมิน (L) เป็นค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI) ดังแสดงใน ภาพที่ 2.7 ซึ่งแสดงเป็นตัวเลขชี้วัดระดับความขรุขระในการขับขี่ โดยไม่ใช้ความรู้สึกของมนุษย์



ภาพที่ 2.7 แบบจำลอง ¼ ของรถยนต์ (Quarter Car Model) ในการวิเคราะห์ค่า IRI (Múčka 2016)

ถึงแม้ค่า IRI จะสามารถบ่งบอกความขรุขระของผิวทางได้อย่างเป็นมาตรฐาน แต่การกำหนดระดับที่ยอมรับได้กระทำได้อ่อนข้างลำบาก ทั้งนี้เนื่องจากแต่ละกลุ่มผู้ใช้ทางอาจมีระดับความต้องการที่แตกต่างกัน เช่น ชาวบ้านในชนบทอาจคุ้นเคยกับผิวทางที่ไม่ค่อยเรียบ และหรือใช้รถที่มีระดับการสั่นสะเทือนค่อนข้างมาก เช่น รถกระบะ จึงอาจมีความอดทนต่อความไม่ราบเรียบได้มากกว่าผู้มีฐานะที่ใช้รถยนต์ที่มีสมรรถนะสูง สัญจรโดยใช้ทางด่วนหรือทางพิเศษเป็นประจำ หรือประเทศที่มีฐานะทางเศรษฐกิจสูง เช่น อเมริกา หรือ ยุโรป อาจมีความต้องการคุณภาพการขับขี่ที่สูงกว่าประเทศที่มีความเจริญน้อยกว่า นอกจากนี้ระดับความเร็วที่ใช้สัญจรก็มีผลต่อระดับการสั่นสะเทือนเช่นกัน ด้วยผิวทางที่ขรุขระเท่ากัน หากวิ่งด้วยความเร็วที่สูงขึ้น รถย่อมสั่นสะเทือนมากขึ้น นอกจากนี้ค่า IRI เป็นค่าเฉลี่ยความขรุขระภายในระยะทางที่ใช้ประเมิน (L) หากระยะทางที่ใช้ประเมินสั้น ค่า IRI ในแต่ละช่วงสั้นๆ จะมีความแตกต่างกันได้มาก หากใช้ระยะทางประเมินที่ยาวขึ้น ค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วง จะแตกต่างกันน้อยลง ดังนั้นค่าแนะนำ IRI ที่ได้จากรายงานต่างๆ หรือที่ใช้ในหน่วยงานต่างๆ จึงมีค่าแตกต่างกันไป

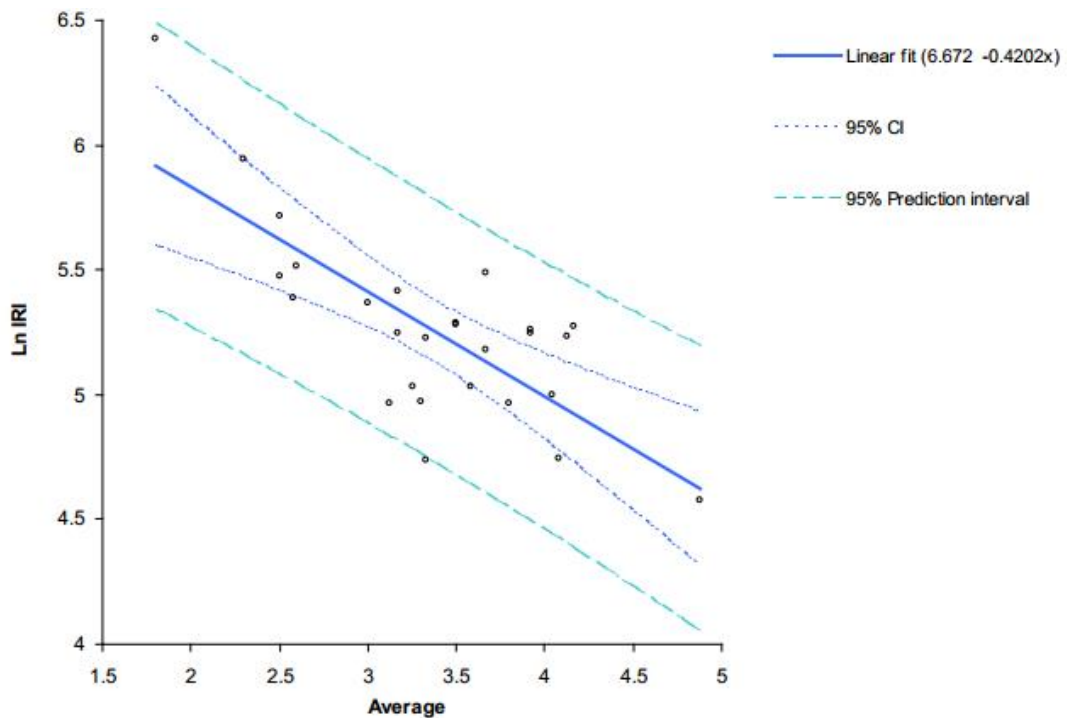
เนื่องจากค่า IRI เป็นค่าที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในงานบำรุงรักษาทาง จึงได้มีการศึกษาระดับตัวเลขที่เหมาะสมในการประเมินสมรรถนะความราบเรียบการขับขี่ FHWA ได้แนะนำขีดจำกัด (Threshold) 170 นิ้วต่อไมล์ (2.7 เมตรต่อกิโลเมตร) สำหรับใช้เป็นค่ายอมรับคุณภาพการขับขี่ในแผนยุทธศาสตร์ระบบทางหลวงในปี ค.ศ. 1998 ซึ่ง FHWA ได้กำหนดค่า IRI ตามระดับค่า Present Serviceability Rating (PSR) ซึ่งเป็นค่าชี้วัดถึงคุณภาพการขับขี่ประเมินตามความรู้สึกของมนุษย์ ค่า PSR แบ่งเป็น 5 ระดับ คือ 0-1 (Very Poor), 1-2 (Poor), 2-3 (Fair), 3-4 (Good) และ 4-5 (Very Good) แนะนำโดย FHWA แสดงในตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** เกณฑ์การชี้วัดคุณภาพการขับขี่ (FHWA 1990)

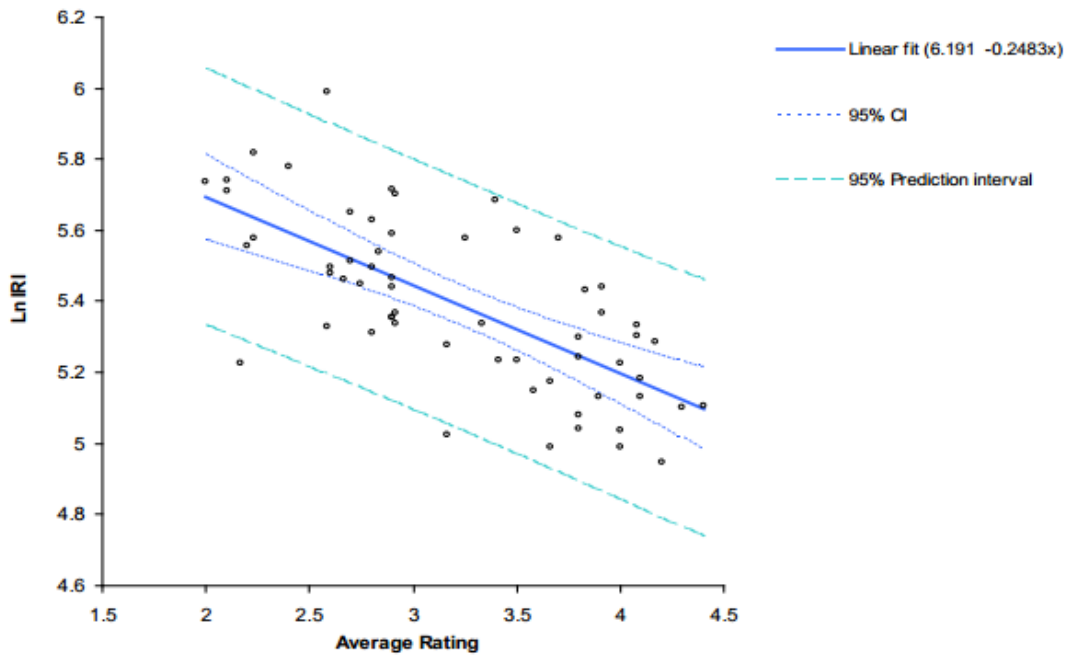
Road Quality Terms	PSR Rating	IRI Threshold	
		(in/mi)	(m/km)
Good	> 3.5	< 95	< 1.5
Acceptable	2.5 - 3.5	95 - 170	1.5 - 2.7

อย่างไรก็ตามหน่วยงานอื่นๆ อาจมีความเห็นต่างจากค่ามาตรฐานดังกล่าว เนื่องจากค่าที่ยอมรับได้ขึ้นอยู่กับชุมชนของแต่ละพื้นที่และหรือระดับความราบเรียบที่คาดหวัง ตัวอย่างเช่น Arhinet et al. (2015) ได้ศึกษาเกณฑ์ค่า IRI ที่เหมาะสมสำหรับ District of Columbia (DC)

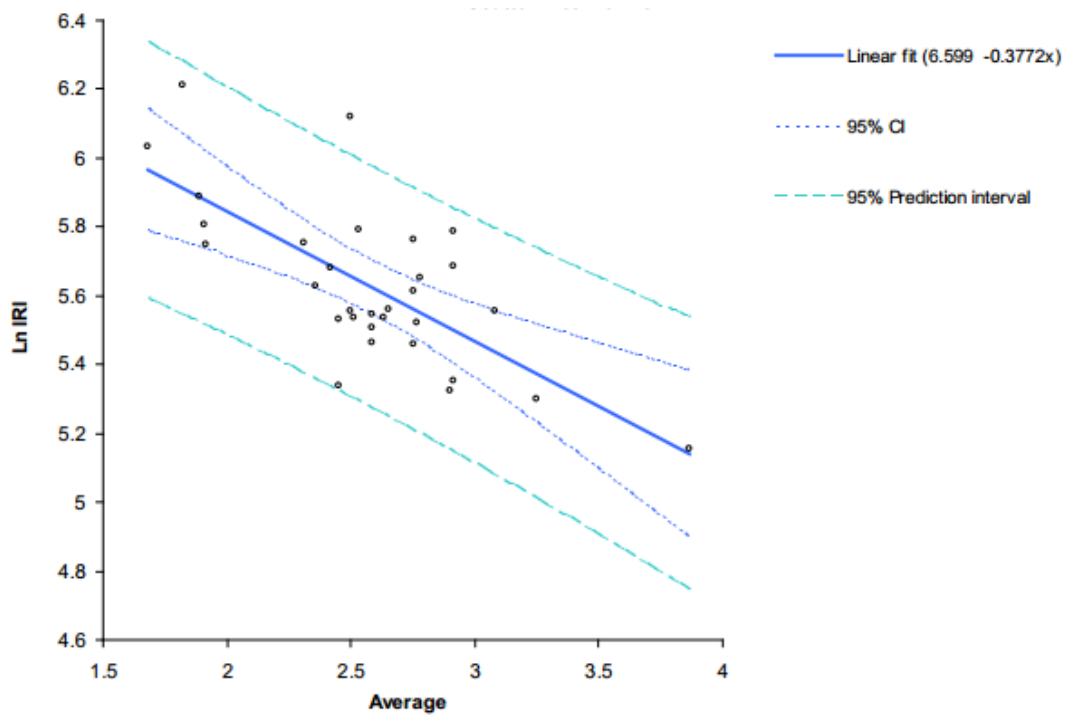
ซึ่งประชากรอยู่ในเขตเมือง (Urban) แต่ก็มีการใช้งานถนนประเภท Freeway และ Interstate อยู่บ้าง โดยการศึกษาได้เลือกกลุ่มตัวอย่างประชากรจำนวน 66 คน ที่มีช่วงอายุระหว่าง 21 ปี ถึง 61 ปี แบ่งเป็น 3 กลุ่มๆ ละ 22 คน ทำการประเมินคุณภาพการขับขี่ของทางหลวง 3 ประเภท คือ Interstate/Freeway จำนวน 30 แปลง Arterial จำนวน 62 แปลง และ Collector จำนวน 30 แปลง รวมทั้งสิ้น 122 แปลง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI กับ ค่า PSR โดยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ผลการประเมินของกลุ่ม Freeway, Arterial และ Collector แสดงในภาพที่ 2.8 ถึงภาพที่ 2.10 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า PSR แปรผกผันกับ ค่า IRI และความสัมพันธ์มีความแปรปรวนค่อนข้างสูง โดย Arhinet และคณะ ได้กำหนดค่า IRI ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งแตกต่างจากค่าแนะนำของ FHWA หรืออาจกล่าวได้ว่าชุมชนของแต่ละพื้นที่ หรือใช้งานต่างกันต้องการค่า IRI ไม่เท่ากัน



ภาพที่ 2.8 Freeway Regression Model (Arhinet et al. 2015)



ภาพที่ 2.9 Arterials Regression Model (Arhinet et al. 2015)

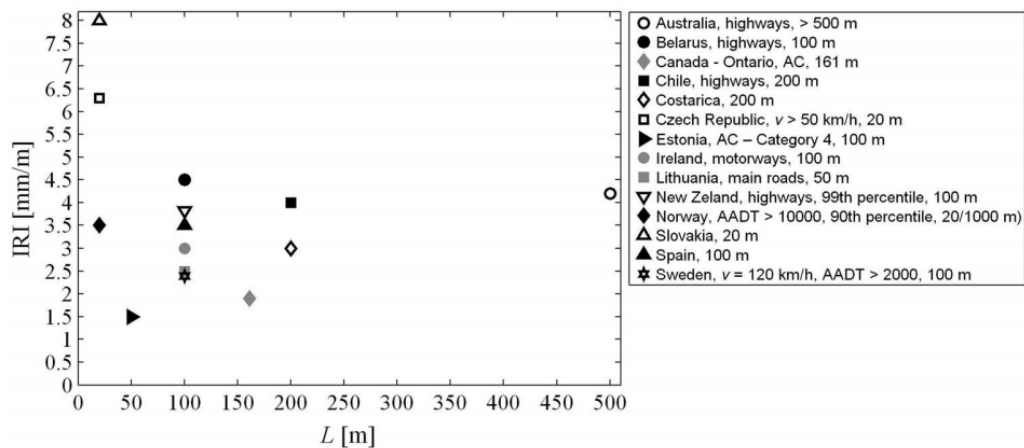


ภาพที่ 2.10 Collector Regression Model (Arhinet et al. 2015)

ตารางที่ 2.4 ค่า IRI แนะนำจากสมการถดถอยเชิงเส้นสำหรับ District of Columbia (DC) แบ่งตามประเภททางหลวง (Arhin et al. 2015)

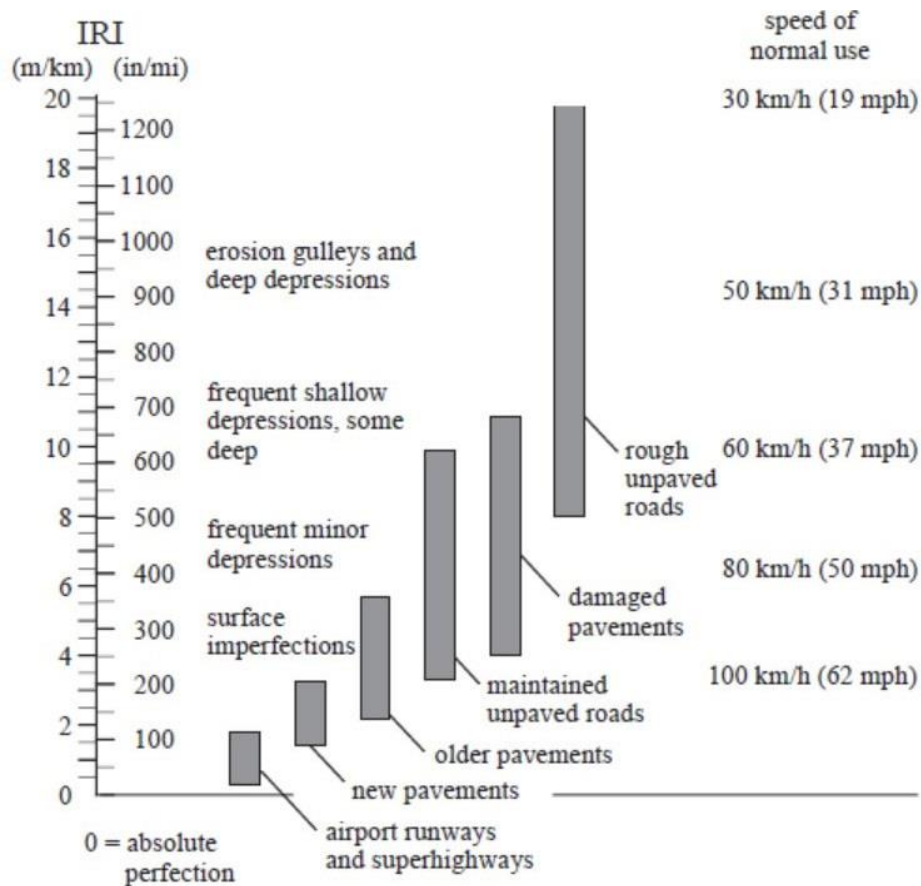
Road Quality Terms	IRI Threshold by Roadway Classification					
	Freeways		Arterials		Collectors	
	(in/mi)	(m/km)	(in/mi)	(m/km)	(in/mi)	(m/km)
Good	< 124	< 2.0	< 182	< 2.9	< 188	< 3.0
Acceptable	124 -	2.0 -	182 -	2.9 -	188 -	3.0 -
	218	3.4	281	4.4	318	5.0

จากงานศึกษาของ Múčka (2017) ค่า IRI ที่ใช้กำหนดอายุบริการของโครงสร้างถนนในประเทศอื่นๆ ที่ไม่ใช่ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทั่วไปจะสูงกว่าค่าแนะนำของ FHWA ประเทศสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ระยะทาง (L) ที่ใช้ในการประเมินค่า IRI ก็มีความหลากหลาย ตั้งแต่ 10 เมตร ถึง 500 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.11 หรือในบางประเทศก็ใช้ระยะทางตลอดสายทาง ซึ่งค่า IRI เป็นค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแนวตั้งที่สะสมในช่วงระยะทางหนึ่ง (L) หากประเมินค่า IRI ช่วงสั้นๆ เช่น ทุกระยะ 10 เมตร ค่า IRI ในแต่ละช่วงจะมีความผันผวนมาก แต่จะช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งที่มีความผิดปกติได้ง่าย เช่น ความต่างระดับบริเวณคอสะพาน หลุมบ่อ เป็นต้น แต่ถ้าประเมินค่า IRI ช่วงยาวๆ เช่น ทุกระยะ 500 เมตร ค่า IRI ในแต่ละช่วงจะมีความผันผวนลดลง แต่จะเป็นตัวแทนความขรุขระในภาพรวมได้มากขึ้น



ภาพที่ 2.11 ค่า IRI ที่ใช้กำหนดอายุบริการของโครงสร้างถนนตามระยะทางประเมิน (Múčka 2017)

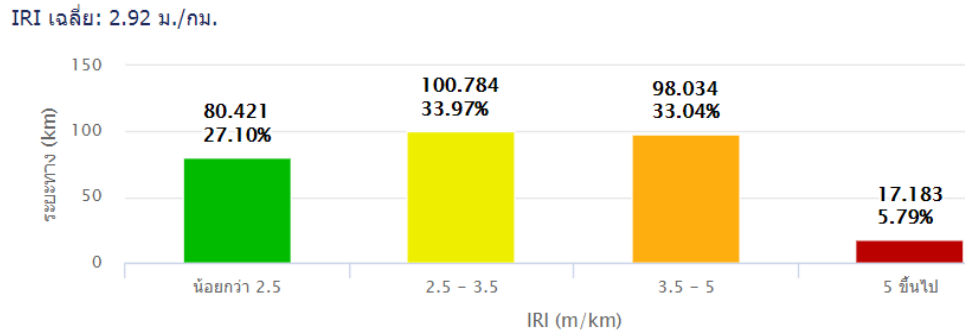
นอกจากนี้การกำหนดเกณฑ์สำหรับค่า IRI อาจพิจารณาจากความเร็วยานพาหนะในช่วงการใช้งานปกติ (Normal Use) แสดงในภาพที่ 2.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าต้องการให้ถนนสามารถรองรับการสัญจรด้วยความเร็วสูง จะต้องกำหนดเกณฑ์ค่า IRI ให้ต่ำ แต่ในทางกลับกัน ถ้าถนนไม่ต้องการความเร็วสูงในการสัญจรก็สามารถกำหนดเกณฑ์ค่า IRI ที่สูงขึ้นได้



ภาพที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI กับความเร็วยานพาหนะ (Paterson 1987)

หากพิจารณาเกณฑ์ค่า IRI ที่กำหนดในประเทศอื่นๆ ที่ไม่ใช่ประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งประเมินด้วยระยะทาง L ในช่วง 200 – 500 เมตร ดังภาพที่ 2.11 จะได้เกณฑ์ค่า IRI ประมาณ 3.0– 4.0 ม.ต่อกม. และหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI กับความเร็วยานพาหนะที่แสดงในภาพที่ 2.12 พบว่า ค่า IRI ระหว่าง 3.5 ถึง 5.0 ม.ต่อกม. จะเหมาะสำหรับความเร็วปกติ 90-100 กม.ต่อชม. ตามลำดับ

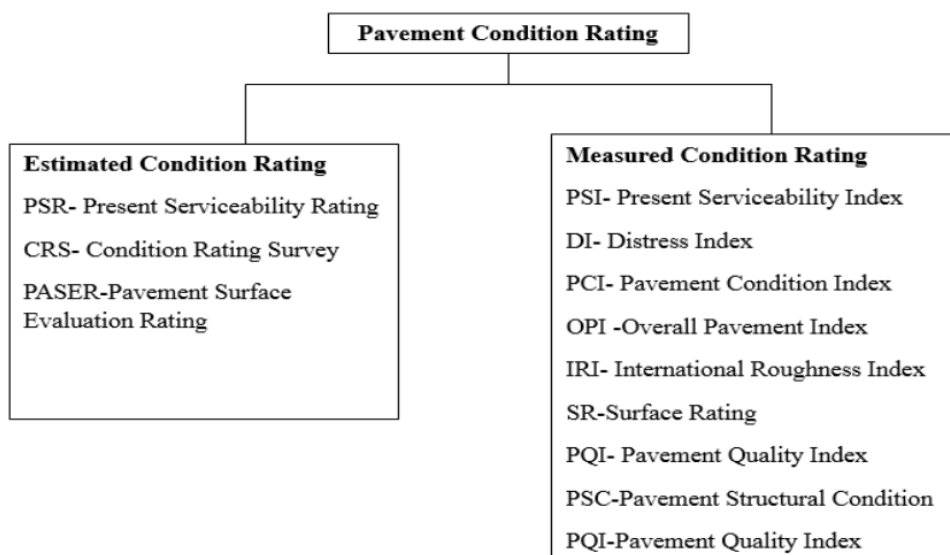
ปัจจุบันระบบ Roadnet ของสำนักบริหารบำรุงทางและระบบ MIRS ของสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง จำแนกระดับความขรุขระของทางหลวงเป็น 4 ระดับ ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 2.13 ซึ่งค่อนข้างสอดคล้องกับต่างประเทศ



ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างการจำแนกระดับความขรุขระตามเกณฑ์ของสำนักบริหารบำรุงทาง และสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง

### 2.2.3 การประเมินสมรรถนะด้านสภาพผิวทาง

การประเมินสภาพผิวทาง (Pavement Condition Rating) ของแต่ละหน่วยงานมีวิธีการที่แตกต่างกันแบ่งเป็น 2 วิธี คือ วิธีการประเมินสภาพผิวทางโดยการคาดประมาณ (Estimated Condition Rating) และวิธีการประเมินสภาพผิวทางโดยการตรวจวัด (Measured Condition Rating) ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 การประเมินสมรรถนะด้านสภาพผิวทาง (Farashah 2012)

วิธีการประเมินสภาพผิวทางเป็นวิธีการประเมินด้วยสายตา และเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งอาจเป็นข้อความบรรยายสภาพผิวทาง ลักษณะความเสียหาย ปริมาณความเสียหาย และระดับความรุนแรง นอกจากนี้อาจมีตัวอย่างภาพความเสียหายเพื่อใช้ประกอบการประเมิน ตัวอย่างการประเมินที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่ ค่า Present Serviceability Rating (PSR) ตามวิธีของ AASHTO ซึ่งขึ้นอยู่กับผลการสำรวจโดยใช้กลุ่มผู้ประเมินนั่งไปในรถ จดบันทึกสภาพผิวทาง และคุณภาพการขับขี่ และประเมินผลลัพธ์เป็นตัวเลขระหว่าง 0 ถึง 5 ตามคำจำกัดความที่แสดงในตารางที่ 2.5

**ตารางที่ 2.5** เกณฑ์การประเมิน Present Serviceability Rating (PSR) ตามวิธีของ AASHTO

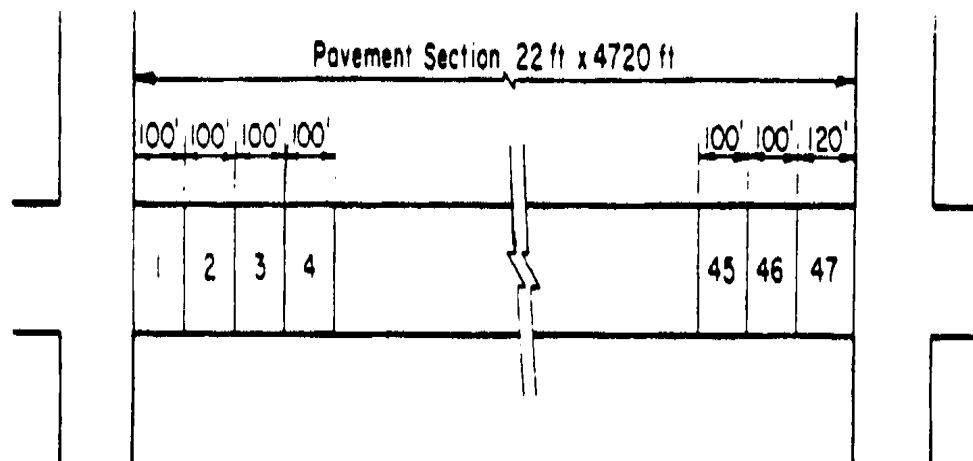
ระดับ	คำจำกัดความ
4-5	ดีมาก (Very Good) ไม่มีความเสียหาย ผิวทางมีสภาพใหม่
3-4	ดี (Good) สังเกตเห็นร่องรอยการเสื่อมสภาพบ้าง
2-3	พอใช้ (Fair) คุณภาพการขับขี่แยกว่าผิวทางสภาพใหม่ คุณภาพการขับขี่ที่ความเร็วสูงยังพอรับได้
1-2	แย่ (Poor) ผิวทางมีความเสียหายเกิน 50 % มีรอยแตกลึก และมีหลุมบ่อขนาดใหญ่
0-1	แย่มาก (Very Poor) ผิวทางมีความเสียหายเกิน 75 % มีรอยแตกลึก มีหลุมบ่อขนาดใหญ่ ต้องลดความเร็วลงจึงจะสามารถขับผ่านได้

วิธีการประเมินสภาพผิวทางโดยการตรวจวัด เป็นวิธีการสำรวจเก็บข้อมูลความเสียหาย เช่น ชนิดความเสียหาย (Type of Distress) ปริมาณความเสียหาย (Quantity) ระดับความรุนแรง (Level of Severity) ขอบเขตความเสียหาย (Distribution หรือ Extent) เป็นต้น รายละเอียดในการจัดเก็บข้อมูลอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับข้อกำหนดด้านงบประมาณ จำนวนเจ้าหน้าที่ เงื่อนไขในทางปฏิบัติ เป็นต้น จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้มาประมวลผลเป็นดัชนีชี้วัดระดับสภาพการใช้งานของผิวทางในแต่ละช่วง ตัวอย่างการประเมินที่สำคัญในกลุ่มนี้ ได้แก่ ค่า Pavement Condition Index (PCI) ตามวิธี ASTM D 6433 – 07 ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ซึ่งมีวิธีการเก็บข้อมูลและการคำนวณโดยย่อ ดังนี้

Standard PCI™ Rating Scale		Suggested Colors
100	<b>Good</b>	Dark Green
85	<b>Satisfactory</b>	Light Green
70	<b>Fair</b>	Yellow
55	<b>Poor</b>	Light Red
40	<b>Very Poor</b>	Medium Red
25	<b>Serious</b>	Dark Red
10	<b>Failed</b>	Dark Grey
0		

ภาพที่ 2.15 Pavement Condition Index (PCI) ตามวิธี ASTM D 6433 – 07

1. ทำการแบ่งถนนที่ต้องการตรวจสอบออกเป็นช่วงย่อยๆ (Sample Unit) เพื่อสำรวจเก็บข้อมูล โดยแต่ละช่วงย่อยต้องมีพื้นที่เท่าขนาดมาตรฐาน (Standard Size) ประมาณ 139.35 ถึง 325.16 ตารางเมตร ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 2.16 ซึ่งถนนกว้าง 6.71 เมตร ยาว 1438.66 เมตร แบ่งเป็น 47 ช่วงย่อย โดยแต่ละช่วงยาว 30.48 เมตร (พื้นที่  $6.71 \times 30.48 = 204.52$  ตารางเมตร) และช่วงสุดท้ายยาว 36.58 เมตร (พื้นที่  $6.71 \times 36.58 = 245.45$  ตารางเมตร)



ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างการแบ่งถนนเป็นช่วงย่อยๆ เพื่อสำรวจเก็บข้อมูล

2. ทำการเลือกช่วงถนนที่จะตรวจสอบโดยอาจพิจารณาจากจำนวนช่วงถนนทั้งหมดที่จะทำให้ผลการประเมินมีระดับความเชื่อมั่น (Confidence Level) มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ หรืออาจเลือกตรวจสอบช่วงถนนทั้งหมดเพื่อใช้คำนวณหาค่า PCI เฉลี่ย ทั้งนี้จำนวนช่วงที่คัดเลือกจะต้องไม่น้อยกว่าจำนวนขั้นต่ำที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.6

**ตารางที่ 2.6** จำนวนการสุ่มสำรวจตัวอย่างสำหรับการตรวจสอบผิวทาง

จำนวนช่วงถนนทั้งหมด	จำนวนการสุ่มสำรวจตัวอย่าง (Sample Unit)
1 ถึง 5	≥ 1
6 ถึง 10	≥ 2
11 ถึง 15	≥ 3
16 ถึง 40	≥ 4
มากกว่า 40	≥ 10 (เศษปัดขึ้น)

3. ทำการตรวจสอบผิวทางของแต่ละช่วงถนนเพื่อเก็บข้อมูลความเสียหายซึ่งประกอบด้วย ชนิดความเสียหาย ปริมาณความเสียหาย ระดับความรุนแรง โดยรูปแบบการเก็บข้อมูลจะแยกเป็น 2 กลุ่มผิวทาง คือ กลุ่มผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต มีรูปแบบความเสียหาย 19 ประเภท และกลุ่มผิวทางคอนกรีต มีรูปแบบความเสียหาย 21 ประเภท ตารางที่ 2.7 แสดงตัวอย่างแบบฟอร์มการตรวจสอบความเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่อยู่ในเมือง Spring Field ตอน 1 ช่วงที่ 1 กว้าง 7.62 เมตร ยาว 30.48 เมตร คิดเป็นพื้นที่ 232.26 ตารางเมตร บรรทัดแรกในตารางบันทึกความเสียหาย คือ ความเสียหายชนิดที่ 1 (Alligator Cracking) ระดับความเสียหายเล็กน้อย (Low, L) จำนวน 3 ตำแหน่ง ซึ่งมีขนาด 1x0.46, 1x1.0.37 และ 1x0.37 รวมพื้นที่ความเสียหายเท่ากับ 1.20 ตารางเมตร คิดเป็นความหนาแน่นความเสียหายเท่ากับ  $1.20/232.26 \times 100 = 0.52$  เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเก็บข้อมูลความเสียหายของผิวทางคอนกรีตก็สามารถดำเนินการได้ในลักษณะเดียวกันโดยใช้แบบฟอร์มที่แสดงในตารางที่ 2.8



4. คำนวณค่าลดทอน (Deduct Value, DV) สำหรับความเสียหายแต่ละชนิด และระดับความรุนแรงดังภาพที่ 2.17 ซึ่งแสดงตัวอย่างการหาค่าลดทอนสำหรับความเสียหายประเภท Alligator Cracking ที่มีระดับความรุนแรงต่ำ (L) ซึ่งมีปริมาณ 0.52 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ที่ตรวจสอบ จากกราฟจะได้ค่าลดทอน 7.9 และนำค่านี้ไปใส่ในตารางที่ 2.7 ส่วนความเสียหายชนิดอื่นๆ ก็สามารถหาค่าลดทอนได้โดยใช้กราฟของความเสียหายชนิดนั้นๆ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าลดทอนของความเสียหายที่บันทึกในแบบฟอร์มเก็บข้อมูล

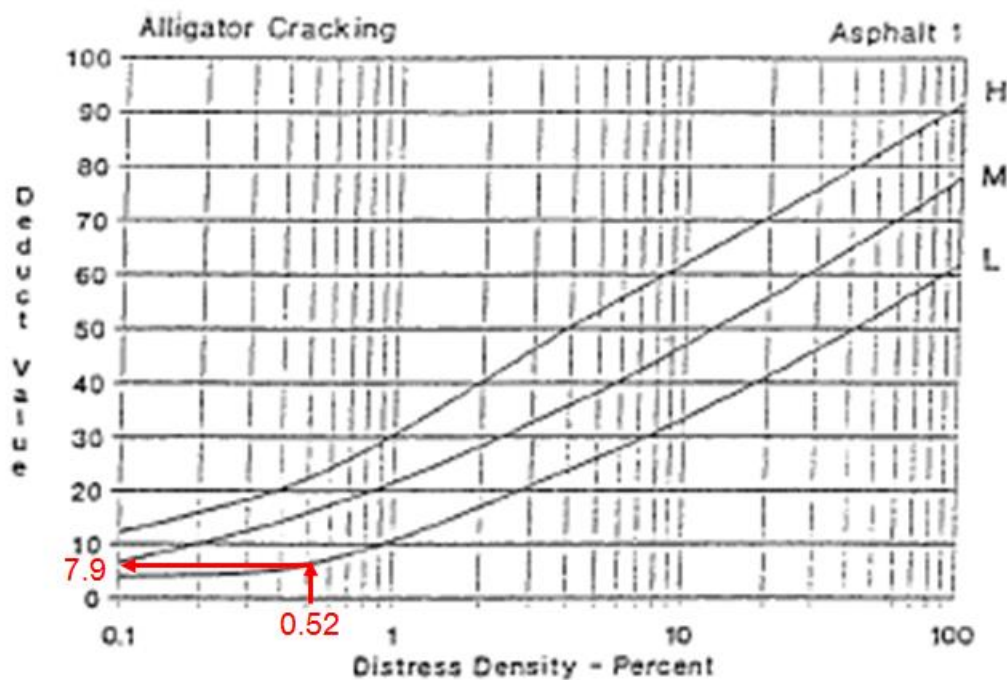
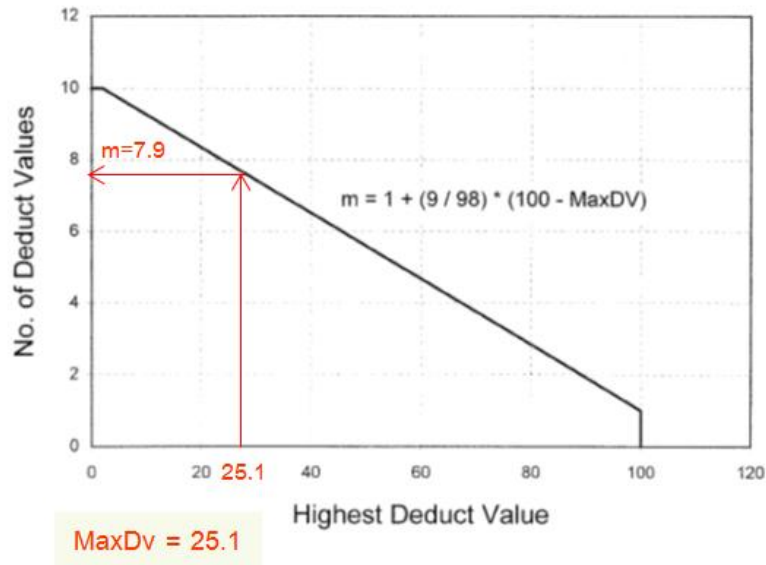


FIG. X3.1 Alligator Cracking

ภาพที่ 2.17 ตัวอย่างการหาค่าลดทอน (Deduct Value) สำหรับชนิดความเสียหาย Alligator Cracking

5. หากจำนวนค่าลดทอนปรับแก้ที่จะใช้คำนวณค่า PCI (Adjustment of Number of Deduct Value, m) กรณีที่ไม่มีค่าลดทอนหรือมีเพียงค่าเดียวที่เกิน 2 ให้ใช้จำนวนค่าลดทอนทั้งหมดในการคำนวณค่า PCI กรณีอื่นๆ ให้ใช้ค่าลดทอนสูงสุด (MaxDV) ในการคำนวณจำนวนค่าลดทอนปรับแก้ (m) จากตารางที่ 2.7 จะเห็นได้ว่ามีค่าลดทอนหลายค่า โดยค่าลดทอนที่มากที่สุด (MaxDV) คือ 25.1 จากภาพที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าเมื่อลากกราฟในแนวดิ่งจากค่าลดทอนสูงสุด 25.1 จะได้จำนวนค่าลดทอนปรับแก้  $m = 7.9$  ซึ่งหมายความว่า จะเลือกค่าลดทอนสูงสุด 7 ลำดับแรก และเศษ 0.9 คูณกับค่าลดทอนลำดับที่ 8  $= 0.9 * 5.3 = 4.8$  ในการคำนวณค่า PCI

## Adjustment of Number of Deduct Values



ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างการหาจำนวนค่าลดทอนปรับแก้ที่จะใช้คำนวณค่า PCI (Adjustment of Number of Deduct Value, m)

### 6. คำนวณดัชนีสภาพผิวทาง (PCI) ดังนี้

— เรียงค่าลดทอน (Deduct Value) จากสูงไปต่ำตามจำนวนค่าลดทอนปรับแก้ (m) ดังแสดงในบรรทัดแรกของตารางที่ 2.9 จากนั้นทำการรวมค่าลดทอนทั้งหมด ได้เท่ากับ 104.7 (ซึ่งเกิน 100 จะต้องปรับแก้ให้มีค่าไม่เกิน 100)

— หาค่า q ซึ่งเป็นจำนวนค่าลดทอนที่มีค่าไม่น้อยกว่า 2.0 ยกตัวอย่าง บรรทัดแรก  $q = 8$

— หาค่าลดทอนปรับแก้ (Corrected Deduct Value, CDV) กรณีผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะใช้กราฟดังแสดงในภาพที่ 2.19 จากผลรวมค่าลดทอน 104.7 และค่า  $q = 8$  จะได้ค่าลดทอนปรับแก้เท่ากับ 51.0 (ปรับแก้ให้มีค่าไม่เกิน 100 แล้ว)

— ทำการประเมินทางเลือกอื่นๆ (Alternative Solution) ดังแสดงในบรรทัดที่ 2 ถึง 8 โดยทำการแทนค่าลดทอนตัวที่น้อยที่สุดที่มีค่าไม่น้อยกว่า 2.0 ด้วย 2.0 คำนวณค่า q และ CDV ของบรรทัดนั้นๆ และทำแบบนี้ไปเรื่อยๆ ทุกบรรทัดจนกระทั่ง  $q = 1$

— เลือกค่า CDV สูงสุดจากทุกทางเลือกที่เป็นไปได้ (ทุกบรรทัด) ซึ่งกรณีนี้จะ ได้ 51.0

— คำนวณ PCI =  $100 - \text{CDV} = 100 - 51 = 49$  (Fair) ซึ่งจะได้ค่า PCI ของ ช่วงถนนนั้น

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างการคำนวณดัชนีสภาพผิวทาง (PCI) สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

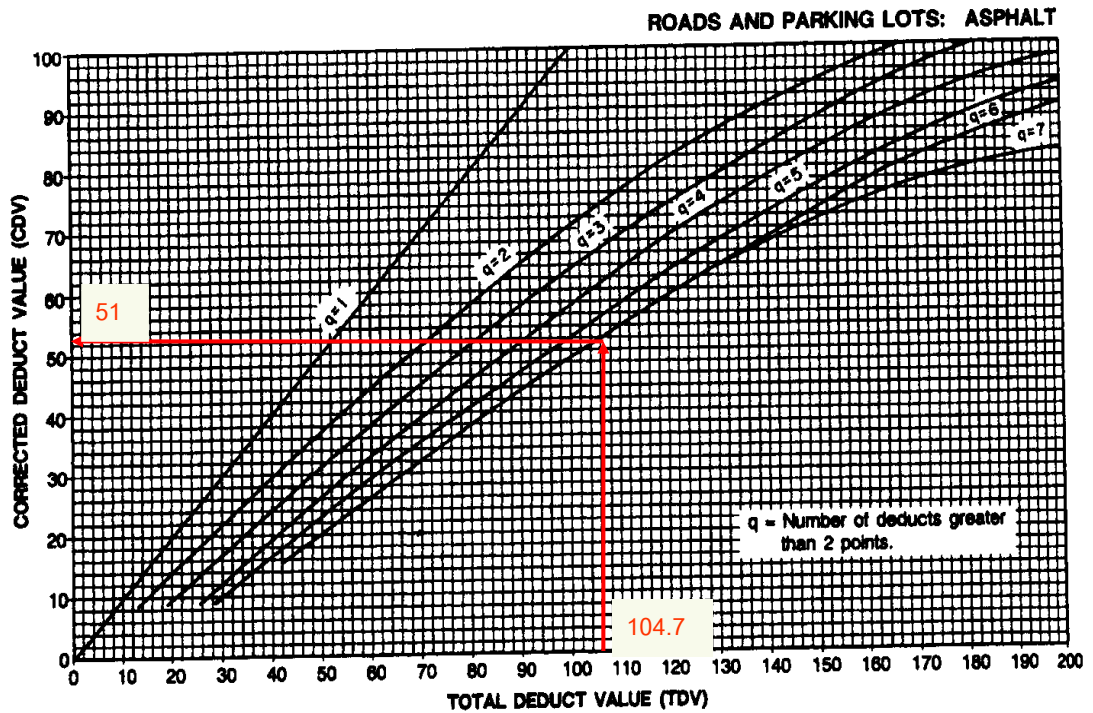
$$m = 1 + (9/98)(100 - 25.1) = 7.9 < 8$$

Use highest 7 deducts and 0.9 of eighth deduct.

$$0.9 \times 5.3 = 4.8$$

#	Deduct Values									Total	q	CDV
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	25.1	23.4	17.9	11.2	7.9	7.5	6.9	4.8		104.7	8	51.0
2	25.1	23.4	17.9	11.2	7.9	7.5	6.9	2		101.9	7	50.0
3	25.1	23.4	17.9	11.2	7.9	7.5	2	2		96.0	6	46.0
4	25.1	23.4	17.9	11.2	7.9	2	2	2		90.5	5	47.0
5	25.1	23.4	17.9	11.2	2	2	2	2		84.6	4	48.0
6	25.1	23.4	17.9	2	2	2	2	2		75.4	3	48.0
7	25.1	23.4	2	2	2	2	2	2		59.5	2	44.0
8	25.1	2	2	2	2	2	2	2		38.1	1	38.0
9												
10												

Max CDV = 51  
 PCI = 100 - Max CDV = 49  
 Rating = FAIR



ภาพที่ 2.19 ตัวอย่างการหาค่าลดทอนปรับแก้ (Corrected Deduct Value, CDV) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

7. คำนวณค่า PCI ของช่วงถนนอื่นๆ ในสายทางที่จะต้องการประเมิน (ดังภาพที่ 2.16) ตัวอย่างช่วงถนนนี้มีทั้งสิ้น 47 หน่วยย่อย สุดท้ายทำการหาค่าเฉลี่ยดัชนีสภาพผิวทาง (PCI) ของช่วงถนน (Section)

- หากประเมินค่า PCI ของทุกหน่วยย่อย จะสามารถหาค่าเฉลี่ยที่แท้จริงของช่วงถนนนั้นได้
- หากสุ่มประเมินค่า PCI ของหน่วยย่อยบางส่วน จะสามารถคำนวณค่าเฉลี่ย PCI ได้ตามระดับความเชื่อมั่น เช่น 95%

ถึงแม้ AASHTO หรือ ASTM จะมีมาตรฐานการตรวจวัดและการประเมินดัชนีที่บ่งชี้สภาพผิวทาง แต่มีหน่วยงานจำนวนมากไม่น้อยซึ่งมีแนวทางการตรวจวัดและวิธีการประเมินดัชนีที่บ่งชี้สภาพผิวทางเป็นของตนเอง ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของแต่ละหน่วยงานและข้อกำหนดด้านงบประมาณบุคลากร ตลอดจนเงื่อนไขในทางปฏิบัติ นอกจากนี้บางหน่วยงานอาจพัฒนาดัชนีประกอบ (Composite Index) ซึ่งรวมดัชนีความเสียหายและคุณภาพการขับขี่ไว้ด้วยกัน ตัวอย่างดัชนีที่ใช้บ่งชี้สภาพผิวทางและหรือคุณภาพการขับขี่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.10 เนื่องจากดัชนีชี้วัดที่ใช้กันทั่วโลกมีหลายตัว ซึ่งแต่ละตัวถูกพัฒนาขึ้นจากหน่วยงานต่างๆ ดังนั้นการเรียกชื่อดัชนี

เหล่านี้จึงอาจซ้ำกันบ้าง แต่วิธีการคำนวณแตกต่างกัน ยกตัวอย่างค่า PCI มีการคำนวณได้หลายวิธี เช่น  $PCI_{ASTM}$ ,  $PCI_{Iowa}$ ,  $PQI_{Albata}$ ,  $PQI_{Indiana}$ ,  $PQI_{Minnesota}$ ,  $PQI_{Tennessee}$  เป็นต้น ดังนั้นค่า PCI หรือ PQI ของหน่วยงานต่างกันจึงมีความหมายไม่เหมือนกัน

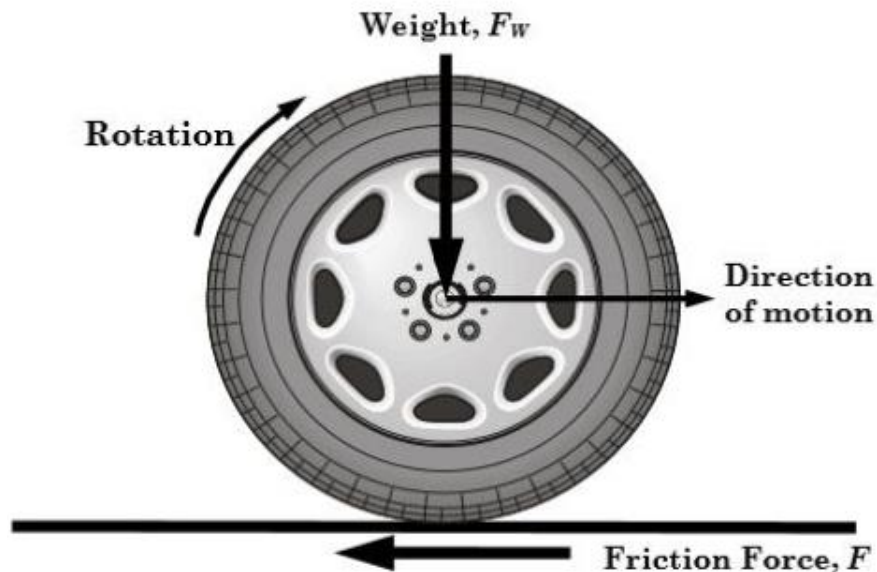
**ตารางที่ 2.10** ดัชนีบ่งชี้สภาพผิวทางของหน่วยงานต่างๆ

(NCHRP 2004, Papagiammakis et al. 2009)

State/Agency	Survey/Score Name	Rating Computation
Alberta	Surface Condition Rating (SCR) converted to Surface Distress Index (SDI) Pavement Quality Index (PQI) combination of SCR and SDI	$PQI = (100 * e^{(-0.2221 * IRI)^{0.7}}) * SDI^{0.3}$
Arizona	Present Serviceability Rating (PSR) 0-5	PSI AASHTO expression
California	Pavement Condition Survey (PCS)	Combinations of individual distresses observed on a pavement are evaluated for severity and broadly classified into overall levels of structural distress.
Delaware	Overall Pavement Condition (OPC)	$OPC = (\text{Threshold Value}) + [(\text{Remaining Service Life}) * (\text{Reduction Rate})]$
Florida	Pavement Condition Rating (PCR)	Crack, Ride, and Rutting – the three indices are equally important, and the lowest one represents Overall Pavement Condition
Indiana	Pavement Quality Index (PQI)	Combine PCR with IRI and Rutting into Pavement Quality Index $(PQI) = PCR * a(IRI)^b$
Iowa	Pavement Condition Index (PCI)	$PCI = 100 - \text{Deduct values, Deduct} = f(\text{Distress type, Severity, and Extent})$
Main	Pavement Condition Index (PCI 0-5)	Deduct Values
Minnesota	RQI: Ride Quality Index SR: Surface Rating PQI: Pavement Quality Index (Combination of RQI and SR)	$PQI = \sqrt{(RQI)(SR)}$ $SR = e^{(1.386 - (.045)(TWD))}$ TWD = Total Weighed Distresses
Ohio	Pavement Condition Rating (PCR)	$PCR = 100 - \text{Deduct, Deduct} = (\text{Weight of Distress})(\text{Weight for Severity})(\text{Weight for Extent})$
Tennessee	Pavement Quality Index (PQI)	PSI: Pavement Serviceability Index (Based on Roughness) PDI: Pavement Distress Index (Based on Distresses) $PQI = PDI^{0.7} * PSI^{0.3}$
Wyoming	Present Serviceability rating (PSR) 0-5	PSI AASHTO expression

## 2.2.4 การประเมินสมรรถนะด้านความฝืดของผิวทาง

ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืด ( $\mu$ ) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงแรงต้านทานการเคลื่อนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างล้อรถกับผิวทางต่อหน่วยแรงกดทับ (Normal Pressure) ซึ่งแรงต้านทานนี้จะเกิดขึ้นขณะเหยียบเบรกและล้อรถลื่นไถลไปบนผิวทางดังแสดงในภาพที่ 2.20 และสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ ดังนี้



ภาพที่ 2.20 ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดระหว่างล้อยานพาหนะกับผิวทาง (NCHRP 108, 2009)

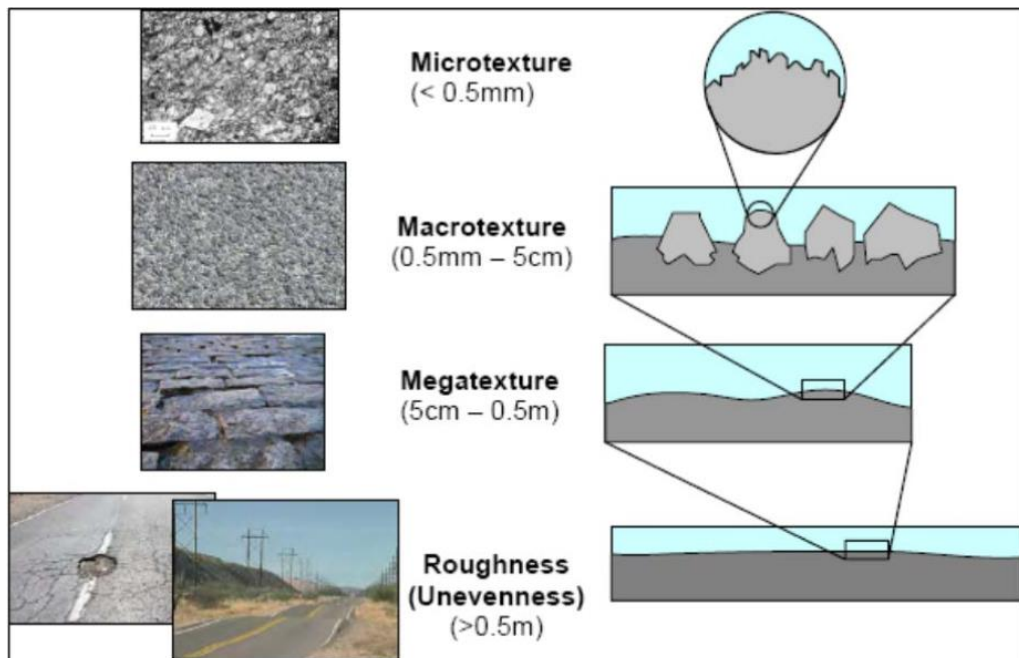
$$\mu = \frac{F}{F_w} \quad (12)$$

เมื่อ

$\mu$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืด (Friction Coefficient)
$F$	=	แรงต้านทานที่ผิวสัมผัสในแนวนอน (Friction Force)
$F_w$	=	แรงที่กดทับล้อในแนวตั้ง (Weight)

ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดเป็นตัวแปรสำคัญในการห้ามล้อ กล่าวคือผิวทางที่มีค่าความฝืดสูงผู้ขับขี่จะสามารถควบคุมยานพาหนะได้ง่ายกว่าผิวทางที่มีค่าความฝืดต่ำ ปัจจัยที่มีผลต่อความฝืดระหว่างล้อรถ กับผิวทาง ได้แก่ สภาพแห้ง/เปียก ลักษณะของยางรถยนต์ ลักษณะเนื้อผิวทาง (Texture) และอื่นๆ

เมื่อฝนตกจะเกิดฟิล์มน้ำเคลือบหรือปกคลุมผิวทาง ทำให้ถนนมีสภาพลื่นกว่าสภาพแห้ง ล้อยางรถยนต์จึงมีการออกแบบดอกยาง เพื่อรีดน้ำที่อยู่ระหว่างผิวทางกับล้อรถให้ออกทางด้านข้าง ทำให้ล้อสัมผัสกับผิวทางมากขึ้น เพิ่มพื้นที่การยึดเกาะถนนหากดอกยางสึกหรือไปมากความสามารถการยึดเกาะผิวทางจะน้อยลงและอาจทำให้เกิดอันตรายได้ นอกจากนี้ผิวทางที่มีลักษณะหยาบก็มีส่วนสำคัญที่ช่วยให้ผิวทางมีความฝืดมากขึ้น ช่วยต้านทานการลื่นไถลของล้อได้ โดยลักษณะพื้นผิว (Texture) อาจจำแนกได้หลายระดับ เช่น Microtexture, Macrottexture, Megatexture ส่วนระดับความหยาบที่สูงกว่านั้นจะพิจารณาเป็นเรื่องความไม่ราบเรียบหรือความขรุขระ (Uneven or Roughness) ดังภาพที่ 2.21 ความหยาบของผิวทางที่ส่งผลกระทบต่อค่าความฝืดจะอยู่ในช่วง Microtexture และ Macrottexture

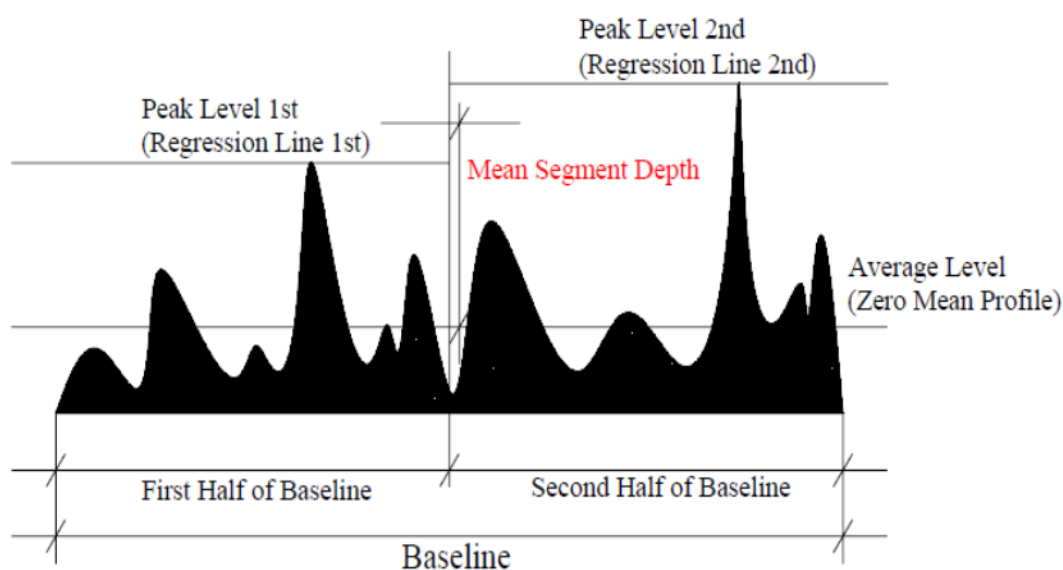


ภาพที่ 2.21 ระดับความหยาบและความขรุขระของผิวทาง

การประเมินคุณลักษณะความหยาบของผิวทาง (Macrottexture) อาจใช้พารามิเตอร์ Mean Profile Depth (MPD) ตามมาตรฐาน ASTM E 1845 ซึ่งค่า MPD มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของมวลรวม รูปร่าง ขนาดคละ รวมถึงการเรียงตัว และทิศทางการวางตัวของมวลรวม โดย ASTM E1845 มีข้อกำหนดดังนี้

- เครื่องมือยิงแสงเลเซอร์มีขนาดจุดลำแสงไม่เกิน 1 มิลลิเมตร
- มุมระหว่างเครื่องมือยิงแสงเลเซอร์กับพื้นผิวและมุมระหว่างเครื่องมือรับแสงเลเซอร์กับพื้นผิวมีมุมไม่เกิน 30 องศา

- เก็บข้อมูลต่อเนื่องเป็นระยะทางไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร ต่อหนึ่งตัวอย่าง
- เก็บข้อมูล 10 ตัวอย่าง ทุกระยะทาง 100 เมตร
- หนึ่งตัวอย่าง (100 มิลลิเมตร) แบ่งข้อมูลเป็น 2 ชุดย่อยชุดย่อยละ 50 มิลลิเมตร
- ค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดของ 2 ชุดย่อยนี้จะเรียกว่า Mean Segment Depth (MSD) ดังภาพที่ 2.22 และสมการที่ (13)
- MPD คือ ค่าเฉลี่ยของ Mean Segment Depth (MSD) ของทุกตัวอย่างดังสมการที่ (14)



ภาพที่ 2.22 วิธีการคำนวณค่า Mean Segment Depth (ASTM E1845)

$$MSD_i = 0.5 * (H_{PeakLevel1st} + H_{PeakLevel2st}) \quad (13)$$

$$MPD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n MSD_i \quad (14)$$

เนื่องจากการตรวจวัดค่าความฝืดโดยใช้เครื่องมือต่างชนิดกันอาจให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกัน ในปี ค.ศ. 1994 PIARC ได้ศึกษาและพัฒนาดัชนีความฝืดสากล (International Friction Index, IFI) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความฝืดที่อาจได้จากเครื่องมือทดสอบต่างชนิดกัน และเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลงานวิจัยระหว่างประเทศ มีการพัฒนาสมการเพื่อแปลงค่าความฝืดที่วัดได้จากเครื่องมือทดสอบชนิดต่างๆ ให้เป็นค่ากลางที่เรียกว่า ดัชนีความฝืดสากล (International Friction Index, IFI) การศึกษานี้ได้รับความร่วมมือจาก 16 ประเทศทั่วโลก 54 สถานที่ทดสอบ แบ่งเป็น 28 ที่ในประเทศเบลเยียม (รันเวย์สนามบิน 2 แห่ง สนามแข่งรถ 4 แห่ง ถนน 22 แห่ง) และ 26 ที่ในประเทศสเปน (รันเวย์สนามบิน 8 แห่ง ถนน 18 แห่ง) เครื่องมือทดสอบ

47 ชนิด แบ่งเป็นเครื่องมือทดสอบค่าความฝืด 4 ชนิด ได้แก่ Side Force Testers, Variable-Slip Testers, Fixed-Slip Testers และ Locked Wheel Testers และเครื่องมือทดสอบพื้นผิว 3 ชนิด ได้แก่ Stationary, Mobile-Walking Speed และ Mobile-High Speed

การคำนวณดัชนีความฝืดสากล (IFI) ตามมาตรฐาน ASTM E1960 มีขั้นตอนดังนี้

1) คำนวณค่าคงที่ความเร็ว (Speed Constant,  $S_p$ ) ดังนี้

$$S_p = a + b * T_x \quad (15)$$

เมื่อ

$S_p$  = ค่าคงที่ความเร็ว

$a, b$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายค่าคงที่ความเร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบค่าความหยาบผิวทาง (Macrotexture) ซึ่งอาจเป็น Mean Profile Depth (MPD) เมื่อทดสอบด้วยเครื่องมือ High Speed Laser Measurement หรือ Mean Texture Depth (MTD) เมื่อทดสอบด้วยเครื่องมือ Sand Patch โดยค่าสัมประสิทธิ์  $a$  และ  $b$  แสดงในตารางที่ 2.11

$T_x$  = ค่าความหยาบผิวทาง (Macrotexture หน่วยมิลลิเมตร) อาจใช้ค่า MPD หรือค่า MTD ก็ได้

2) คำนวณค่าความฝืดปรับแก้ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง (FR60) ดังนี้

$$FR60 = FRS * e^{\frac{S-60}{S_p}} \quad (16)$$

เมื่อ

FR60 = ค่าความฝืดปรับแก้ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง

FRS = ค่าความฝืดที่ได้จากเครื่องมือทดสอบ

S = ค่าความเร็วเส้นไถสที่เก็บข้อมูลค่าความฝืด (กิโลเมตร/ชั่วโมง)

3) คำนวณค่าความฝืดปรับแก้ตามเครื่องมือ (IFI) จากค่าความฝืดปรับแก้ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง (FR60) ดังนี้

$$IFI = A + B * FR60 + C \quad (17)$$

เมื่อ

IFI = ค่าความฝืดปรับแก้ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่ปรับแก้ตามชนิดของเครื่องมือแล้ว

A,B,C = ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับแก้ตามชนิดของเครื่องมือทดสอบความฝืดเช่น British Pendulum Tester (BPT) หรือ Airport Surface Friction Tester T-10 (ASFT T-10) ดังแสดงตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์ a, b ตามรูปแบบการทดสอบค่าความหยาบผิวทาง (Macrotexture)

ความหยาบผิวทาง (Macro texture)	a	b
Mean Profile Depth (MPD) from High Speed Laser Measurement	14.2	89.7
Mean Texture Depth (MTD) from Sand Patch Test	-11.6	113.6

ตารางที่ 2.12 ค่าสัมประสิทธิ์ A, B และ C ตามรูปแบบเครื่องมือทดสอบความฝืด

เครื่องมือทดสอบค่าความฝืด	A	B	C
British Pendulum Tester (BPT)	0.056	0.008	0
Airport Surface Friction Tester T-10 (ASFT T-10)	0.082	0.910	0

การใช้ค่าดัชนีความฝืดสากล (International Friction Index, IFI) ในการกำหนดผิวทางที่ต้องวางแผนซ่อมบำรุงในระดับโครงข่ายในต่างประเทศ พบว่ามีการกำหนดเป็น 2 ระดับ คือ

- ระดับพึงระวัง (Investigatory Level) หมายถึง ระดับที่ค่าความฝืดเริ่มมีอัตราลดลงอย่างรวดเร็วอย่างมีนัยสำคัญ พื้นที่บริเวณนั้นควรให้ความระมัดระวัง และอาจติดตั้งป้ายเตือนแก่ผู้ใช้ทาง เพิ่มความถี่ในการตรวจสอบสภาพผิวทาง หรือทำการปรับปรุงผิวทางในระยะสั้น
- ระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level) หมายถึง ระดับที่ค่าความฝืดของสายทางบริเวณนั้นๆ ควรได้รับการปรับปรุงแก้ไขอย่างเร่งด่วน

ตัวอย่างการกำหนดเกณฑ์ค่าความผิดของประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศออสเตรเลีย และประเทศนิวซีแลนด์ ที่ระดับพึงระวัง (Investigatory Level) และระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level) แสดงดังตารางที่ 2.13

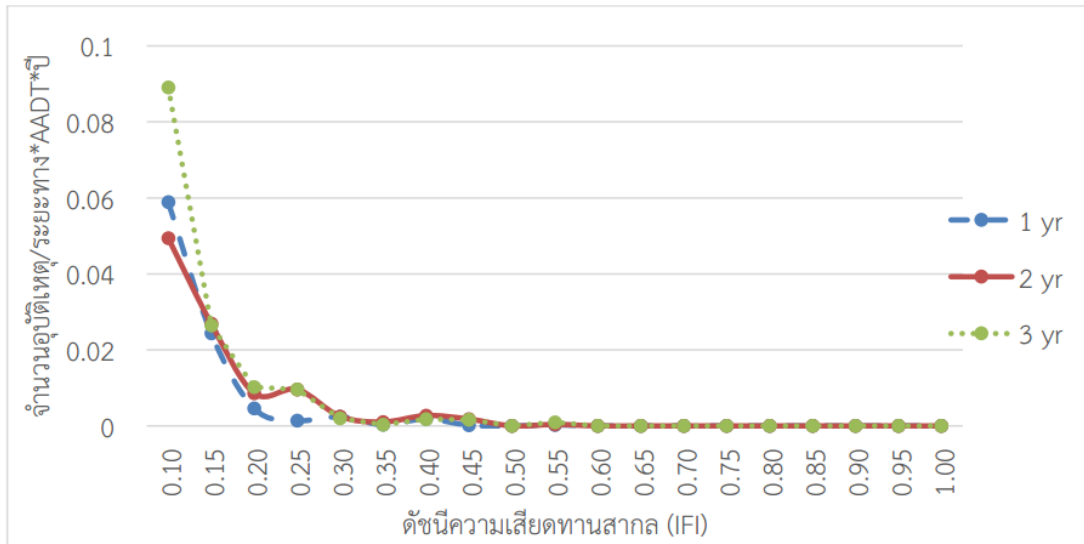
**ตารางที่ 2.13** ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดของผิวทางที่ระดับพึงระวังและระดับปรับปรุงแก้ไข

(ที่มา : สถาบันการขนส่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

เกณฑ์สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความผิด ( $\mu$ )	สหรัฐอเมริกา	ออสเตรเลีย	นิวซีแลนด์
ระดับพึงระวัง (Investigatory Level)	0.45 - 0.55	0.45 - 0.50	0.45 - 0.55
ระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level)	0.30 - 0.40	0.30 - 0.40	0.30 - 0.40

หมายเหตุ ค่าสัมประสิทธิ์ความผิด ( $\mu$ ) ที่ระบุในตาราง คือ ค่าน้อย-ค่ามาก โดย Minor Road (AADT < 2500 คัน/ช่องจราจร) ใช้ค่าน้อย ส่วน Major Road (AADT  $\geq$  2,500 คัน/ช่องจราจร) ใช้ค่ามาก

กรมทางหลวง ได้ศึกษาแนวทางการกำหนดค่า IFI โดยได้เก็บประวัติการเกิดอุบัติเหตุในถนนสายทางต่างๆ ในรอบ 1 ปี 2 ปี และ 3 ปี ที่คาดว่าจะมีสาเหตุเกิดจากความผิดของผิวทางที่ไม่เพียงพอ โดยสายทางที่ยาวกว่าย่อมมีโอกาสเกิดอุบัติเหตุได้มากกว่า หรือจำนวนปริมาณจราจรที่มากกว่าย่อมมีโอกาสเกิดอุบัติเหตุได้มากกว่า หรือภายในระยะเวลาเก็บข้อมูลที่นานกว่าย่อมมีโอกาสเกิดอุบัติเหตุได้มากกว่า ดังนั้นจึงได้ทำการหารจำนวนอุบัติเหตุด้วย ระยะทางxปริมาณจราจร (AADT)xจำนวนปี เพื่อให้ได้อัตราการเกิดอุบัติเหตุที่ไม่ขึ้นกับตัวแปร ระยะทาง ปริมาณจราจร หรือจำนวนปี แต่ขึ้นกับค่าความผิดของผิวทางเพียงอย่างเดียว เมื่อนำจำนวนอุบัติเหตุ/(ระยะทางxAADTxปี) มาแจกแจงเทียบกับค่า IFI จะได้แนวโน้มดังแสดงในภาพที่ 2.23 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าค่า IFI ต่ำกว่า 0.25 จำนวนอุบัติเหตุ/(ระยะทางxAADTxปี) จะเพิ่มขึ้นมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่า IFI ที่ระดับปรับปรุงแก้ไขที่จำเป็นต้องดำเนินการแก้ไขอย่างเร่งด่วนเพื่อป้องกันมิให้ผิวทางที่ลื่นเป็นสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุจำนวนมาก



ภาพที่ 2.23 จำนวนอุบัติเหตุต่อระยะทางล้านกิโลเมตรต่อคันตามช่วงค่า IFI  
(สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง 2560)

เกณฑ์ค่า IFI ที่ระดับพึงระวัง มีแนวคิดจากการพิจารณาระยะเวลาที่กรมทางหลวง ต้องใช้เพื่อเตรียมการและวางแผนงบประมาณในการซ่อมบำรุงผิวทาง ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ปี เพื่อจัดการงบประมาณต่างๆ ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าระดับพึงระวังของค่าดัชนีความผิวด้านการจราจร จึงคำนึงถึงค่า IFI ที่ลดลงตามอายุการใช้งานของผิวทาง โดยใช้แบบจำลองการเสื่อมสภาพดังนี้

$$IFI = 0.34 * e^{-1.29 \times 10^{-8} (Age * AADT / Lane)} \quad (18)$$

เมื่อ

IFI = ค่าดัชนีความผิวด้านการจราจร (IFI)

Age = อายุของผิวทาง (วัน)

AADT/Lane = ปริมาณจราจรต่อช่องจราจร (คันต่อวัน/ช่องจราจร)

เมื่อใช้สมมติฐานที่ว่าค่า IFI ของผิวทางที่ระดับพึงระวัง (Investigatory Level) จะลดลงถึงค่า IFI ที่ระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level) ภายในช่วงระยะเวลา 1 ปี พบว่า ค่า IFI ณ ระดับพึงระวังที่เหมาะสมควรมีค่าเท่ากับ 0.32 นอกจากนี้ยังได้ทำการแปลงค่า IFI ให้เป็นความผิวด้านการจราจร สำหรับเครื่องมือ T10 และ BPT ด้วยสมมติฐานค่า MPD เท่ากับ 1.2 มม. ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการสำรวจ และได้สรุปเกณฑ์ระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไข สำหรับค่าความผิวด้านการจราจรแสดงในตารางที่ 2.14 ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์สำหรับดัชนีชี้วัดด้านความผิวด้านการจราจรได้

**ตารางที่ 2.14** สรุปเกณฑ์ระดับพึงระวัง (Investigatory Level) และระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level) กรมทางหลวง (สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง 2560)

เกณฑ์ระดับ	IFI	$\mu$ (T10)	BPT
ค่าระดับพึงระวัง (Investigatory Level)	0.32	0.43	42
ค่าระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level)	0.25	0.29	30

หมายเหตุ : เกณฑ์สำหรับค่าความผิดคำนวณจากการแปลงค่า IFI จากเครื่องมือ T10 และ BPT กำหนดให้ MPD มีค่าเท่ากับ 1.2 มม. ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการสำรวจ

### 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 (19) และสมการที่ (20) ตามลำดับ

$$E_{ratio} = E_p / E_{design} \quad (19)$$

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 2.15)
$H_{AC}$	=	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

$$SCI = SN_{eff}/SN_{req} \quad (20)$$

เมื่อ

- SCI = ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน  
(Structural Condition Index)
- SN<sub>eff</sub> = ค่าความแข็งแรง (Structural Number) ของโครงสร้างถนน  
ทดสอบในสนาม ณ ช่วงเวลาใดๆ
- SN<sub>req</sub> = ค่าความแข็งแรง (Structural Number) ของโครงสร้างถนน  
ออกแบบตาม AASHTO (1993) ดังสมการที่ (21)

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_0 + 9.36 \log_{10}(SN_{req} + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{2.7} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN_{req} + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07 \quad (21)$$

เมื่อ

- W<sub>18</sub> = จำนวนเที่ยวของเพลาดียวมาตรฐาน 18,000 ปอนด์ตลอดอายุ  
การออกแบบ  
= ADT × T × T<sub>F</sub> × G × Y × D × L × 365
- ADT = ปริมาณจราจรเฉลี่ยรายวัน
- T = เพอร์เซ็นต์รถบรรทุกทุกหนัก
- T<sub>F</sub> = 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<sub>R</sub> = ค่าเบี่ยงเบนที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 90 เพอร์เซ็นต์  
(เท่ากับ -1.282)
- S<sub>0</sub> = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.45)
- Δ PSI = ผลต่างระหว่างค่าดัชนีสมรรถนะการให้บริการของถนน  
ตั้งแต่เริ่มเปิดใช้งานจนถึงสิ้นสุดการใช้งาน  
(p<sub>i</sub> - p<sub>t</sub> = 4.2 - 2.5 = 1.7)

$$\begin{aligned}
 M_R &= \text{ค่าโมดูลัสของดินเดิม (psi)} \\
 &= 1500 \times \text{CBR (\%)} \text{ หรือ} \\
 &= 0.24 \times P / (d_{72} \times 72) \text{ (AASHTO 1993)} \\
 P &= \text{น้ำหนักตกกระแทกจากการทดสอบ FWD (ปอนด์)} \\
 d_{72} &= \text{ค่าการแอนตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ 72 นิ้ว}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.15 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 ค่าการแอนตัวที่ตรวจวัดได้สัมพันธ์โดยตรงกับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน 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

$$E_{p,ES} = 2(1-\nu^2)\sigma_0 a^2/d_0 \quad (22)$$

เมื่อ

$E_{p,ES}$	=	ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณโดย Elastic Solution (MPa)
$\sigma_0$	=	หน่วยแรงกระทำ (754 kPa สำหรับการทดสอบ FWD และ 181 kPa สำหรับการทดสอบ LWD)
$\nu$	=	อัตราส่วนของปัวซองส์ (Poisson's Ratio)
$a$	=	รัศมีของแผ่นงานโลหะ (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 (23) สำหรับวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน (Pavement Modulus) กับค่าโมดูลัสของดินเดิม (Subgrade Modulus) โดยพิจารณาค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบ FWD ณ ตำแหน่งของแรงกระทำ หรือที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร ( $d_0$ ) แทนดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน ในขณะที่ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ 1,800 มิลลิเมตร ( $d_{1800}$ ) แทนดัชนีความแข็งแรงของดินเดิม (Subgrade) ค่าโมดูลัสของดินเดิม (Subgrade Modulus,  $E_{SG}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (24) ส่วนค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน (Pavement Modulus,  $E_{p,Eq}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25)

$$E_{P, Eq} / E_{SG} = 331.37(d_{1800}/d_0)^{5/2} - 158.63(d_{1800}/d_0)^2 + 100.05(d_{1800}/d_0)^{3/2} + 18.39(d_{1800}/d_0) + 0.53(d_{1800}/d_0)^{1/2} \quad (23)$$

$$E_{SG} = 0.24P / (d_{1800} * 1800) \quad (24)$$

$$E_{P, Eq} = (E_{P, Eq} / E_{SG}) * E_{SG} \quad (25)$$

เมื่อ

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

### 2.3.3 การคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation)

ในการคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation) ขั้นตอนแรกจะสมมติค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชั้น โดยสมมติว่าค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของวัสดุทุกชั้นเท่ากันแล้วนำค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ วิเคราะห์ได้ตามทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ FWD ขั้นตอนที่สองจะเฉลี่ยค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางที่คำนวณได้จากขั้นตอนแรกกับค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ FWD แล้ววิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ ทำการคำนวณเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ วิเคราะห์ได้ตามทฤษฎีกับค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ FWD ใกล้เคียงกันมากที่สุด ก็จะได้ค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชั้น (แสงชัยและคณะ 2534) ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณได้จากการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) ของค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชั้นตามสมการที่ (26)

$$E_{p,Back} = \sum_i^n E_i h_i / H_T \quad (26)$$

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 (27) (AASHTO 1993)

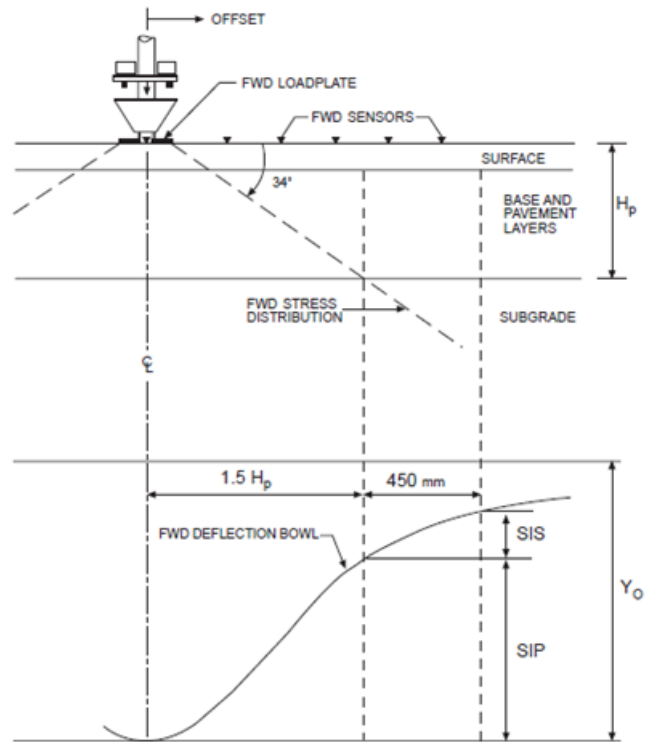
$$SN_{eff} = 0.0045 D E_{p, Eq}^{0.333} \quad (27)$$

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,  $d_0$ ) ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD ได้จากผลรวมของค่าการแอ่นตัวในดินเดิม Subgrade และโครงสร้างถนน Irwin (1983) พบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูกระจายทำมุม 34 องศาจากระดับผิวดิน ในขณะที่ Rohde (1994) ได้เสนอวิธีการประมาณค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD บนโครงสร้างถนน โดยแนะนำว่าค่าการแอ่นตัวในโครงสร้างถนนสามารถประมาณได้จากผลต่างระหว่างค่าการแอ่นตัวสูงสุด ( $d_0$ ) กับค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ  $1.5H_p$  ( $d_{1.5H_p}$ ) ซึ่งเป็นค่าการแอ่นตัวของดินเดิม Subgrade แสดงดังภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 ค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD บนโครงสร้างถนน  
(Zhang et al. 2003)

นอกจากนี้ Rohde (1994) ยังเสนอว่าค่า Structural Number (SN) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (28)

$$SN_{eff} = k_1 SIP^{k_2} H_p^{k_3} \quad (28)$$

เมื่อ

- $SN_{eff}$  = ค่า Structural Number (SN) ทดสอบในสนาม
- $k_1, k_2, k_3$  = ค่าคงที่สมการ (ดูตารางที่ 2.16)
- $SIP$  = ดัชนีการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน (ไมครอน)
- =  $d_0 - d_{1.5H_p}$
- $d_0$  = ค่าการแอ่นตัวสูงสุดภายใต้น้ำหนักตกกระแทกมาตรฐาน 9,000 ปอนด์หรือประมาณ 4,000 กิโลกรัม (ไมครอน)
- $d_{1.5H_p}$  = ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ  $1.5H_p$  (ไมครอน)
- $H_p$  = ความหนารวมของโครงสร้างถนน (มิลลิเมตร)

ตารางที่ 2.16 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 (อัคคัพตันและธนภฤต 2555)

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

ไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ และประมวลผลต่อไป (อัคคพัฒนและธนภฤต 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) มาตรการวัดการอ่อนตัว (Geophone หรือ Accelerometer) แผ่นจานโลหะ (Load Plate) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 100 มิลลิเมตร ถึง 300 มิลลิเมตร และชุดรับส่งสัญญาณข้อมูลแบบไร้สาย (Bluetooth) เครื่องคอมพิวเตอร์พกพานำติดตัวได้ (Personal Digital Assistant, PDA) สำหรับรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย (Wireless Data Collection) ซึ่งขอบเขตของการวัด (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

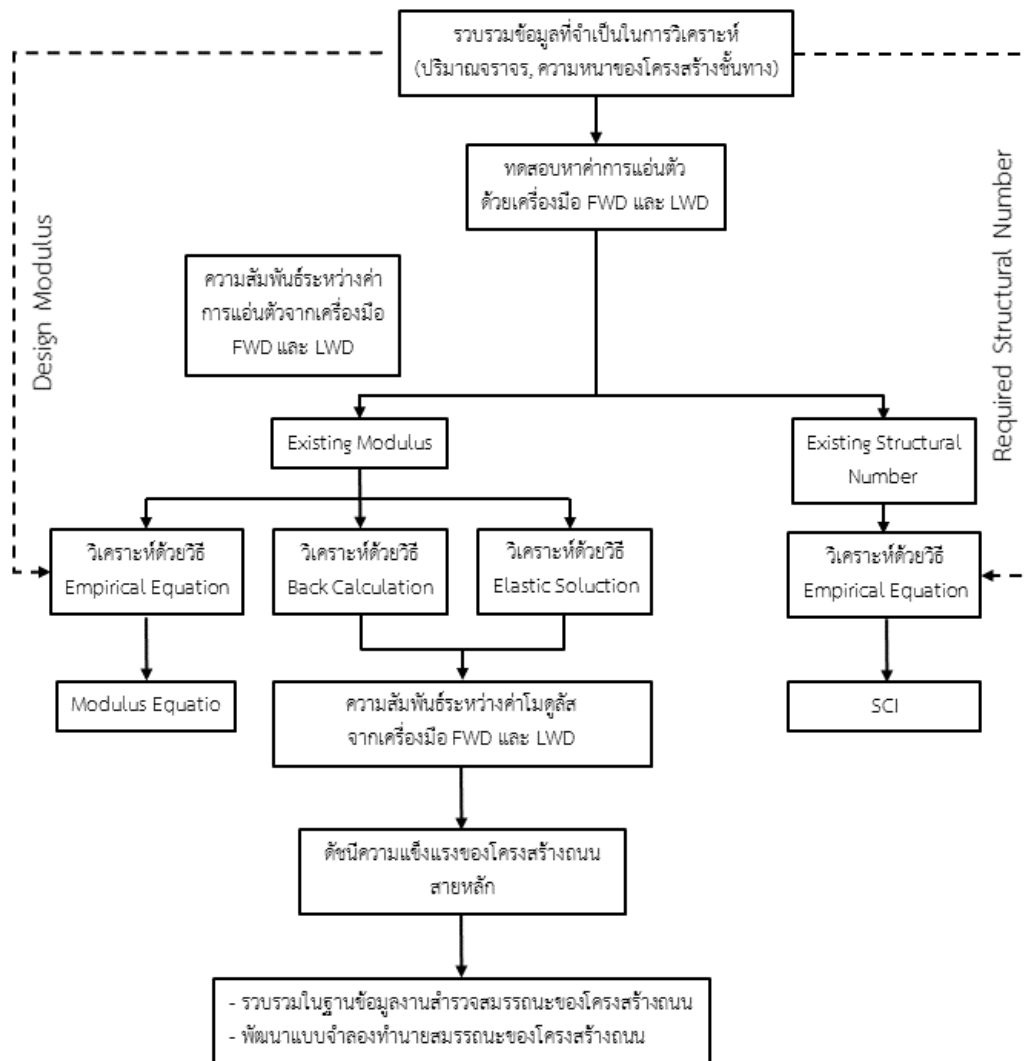


ภาพที่ 3.2 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD)

### 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) หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากเครื่องมือ FWD กับ LWD (2) หาค่าความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสที่ได้จากเครื่องมือ 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

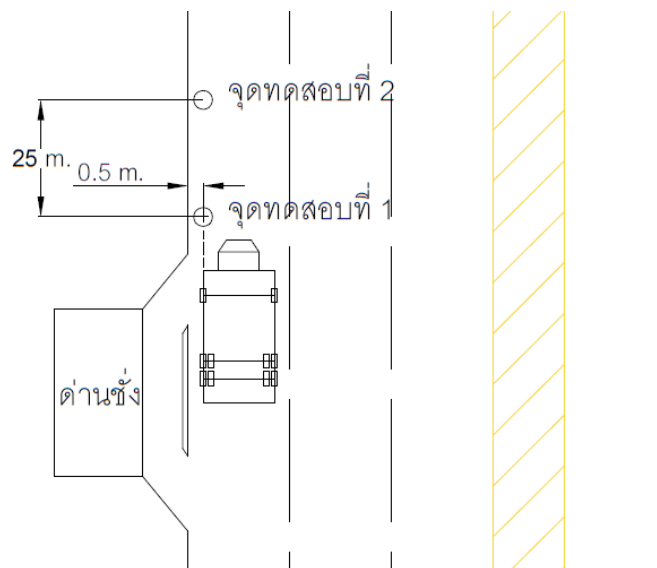
ตารางที่ 3.1 พื้นที่ศึกษา

ภาค	สทล	แขวง	ทล.	ตอน	ชื่อตอน	ทิศทาง	กม. - กม.	บริเวณสถานี
กลาง	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
ตะวันออก	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
เหนือตอนล่าง	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	เก้าเลี้ยว
	สำนักงานทางหลวงที่ 4	แขวงทางหลวงกำแพงเพชร	1	902	ปากดง - นครชุม	ขาเข้า	440+750 - 441+000	กำแพงเพชร
อีสาน	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 ในช่วงจราจรช้าสุดซึ่งเป็นช่องจราจรของรถบรรทุกหนัก ดังภาพที่ 3.5 การทดสอบเริ่มต้นโดยการอ่านค่าอุณหภูมิของผิวทางจากมาตรวัดอุณหภูมิ (Thermometer) ที่ฝังในผิวทางลึกประมาณ 10 เซนติเมตร จากนั้นทำการทดสอบ FWD โดยปล่อยตุ้มน้ำหนักของเครื่องมือ FWD เพื่อวัดตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น 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



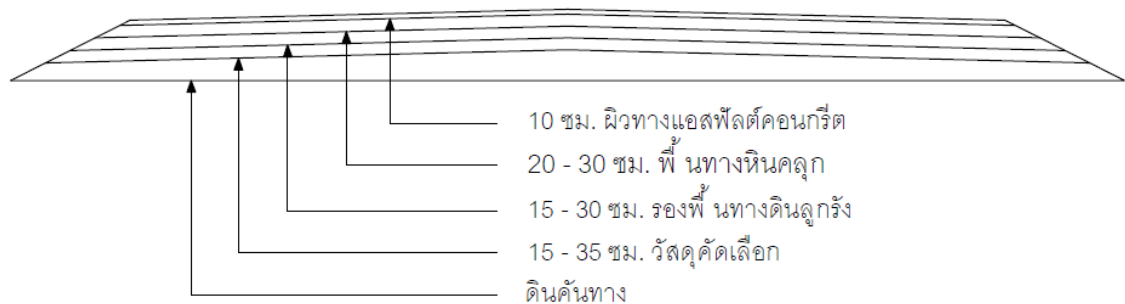
ภาพที่ 3.5 การทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD

### 3.4 รายละเอียดของแปลงทดสอบ

แปลงทดสอบที่คัดเลือกในโครงการนี้แบ่งเป็น 4 ประเภท ตามชนิดของวัสดุก่อสร้างชั้นทาง เพื่อจำแนกและจัดกลุ่มรูปแบบโครงสร้างถนนที่มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน แปลงทดสอบมีรายละเอียด ดังนี้

#### 3.4.1 แปลงทดสอบประเภทที่ 1

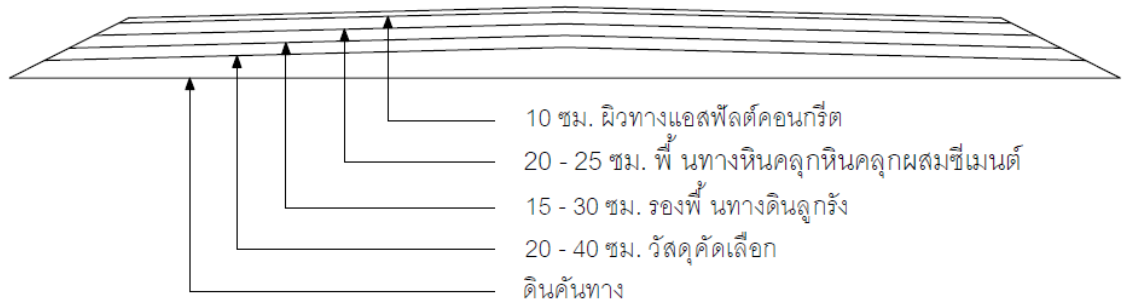
แปลงทดสอบประเภทที่ 1 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC 60-70 พื้นทางหินคลุก และรองพื้นทางดินลูกรัง (ภาพที่ 3.6) โดยแปลงทดสอบประเภทที่ 1 ตั้งอยู่ใกล้ด้านซ่งน้ำหนักสถานีสรรพยา ด้านซ่งน้ำหนักสถานีโพธาราม ด้านซ่งน้ำหนักสถานีชลบุรี ด้านซ่งน้ำหนักสถานีศรีราชา ด้านซ่งน้ำหนักสถานีระยอง ด้านซ่งน้ำหนักสถานีวัฒนานคร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



ภาพที่ 3.6 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 1

#### 3.4.2 แปลงทดสอบประเภทที่ 2

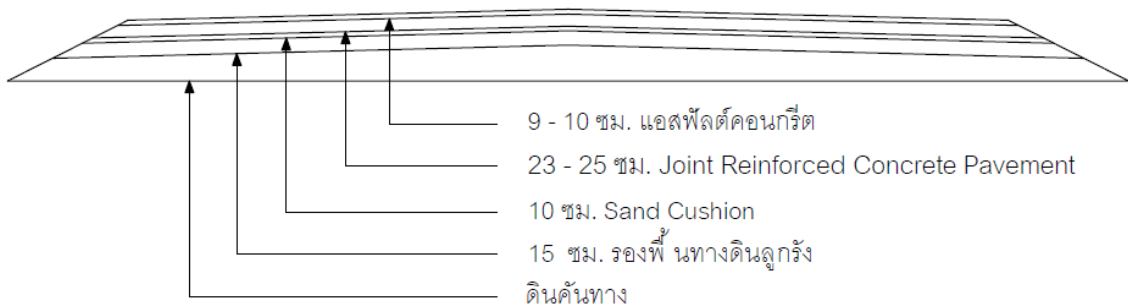
แปลงทดสอบประเภทที่ 2 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC 60-70 พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และรองพื้นทางดินลูกรัง (ภาพที่ 3.7) โดยแปลงทดสอบประเภทที่ 2 ตั้งอยู่ใกล้ด้านซ่งน้ำหนักสถานีพยุหะคีรี ด้านซ่งน้ำหนักสถานีบรรพตพิสัย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



ภาพที่ 3.7 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 2

### 3.4.2 แปลงทดสอบประเภทที่ 3

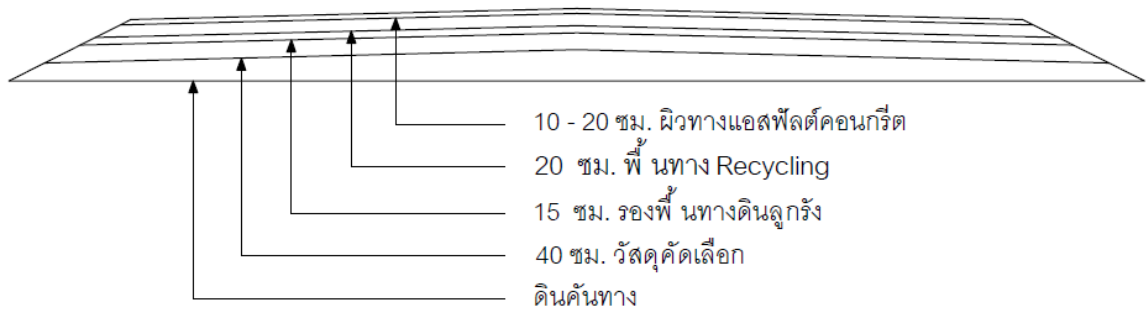
แปลงทดสอบประเภทที่ 3 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC 60-70 ปูทับพื้นทางคอนกรีตเสริมเหล็ก (Joint Reinforced Concrete Pavement, JRCP) (ภาพที่ 3.8) โดยแปลงทดสอบประเภทที่ 3 ตั้งอยู่ใกล้ด้านซ่งน้ำหนักสถานีแก่งคอย ด้านซ่งน้ำหนักสถานีสีคิ้ว และด้านซ่งน้ำหนักสถานีโนนสูง



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 ตั้งอยู่ใกล้ด้านซ่งน้ำหนักสถานีสมุทรสาคร และด้านซ่งน้ำหนักสถานีกำแพงเพชร



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

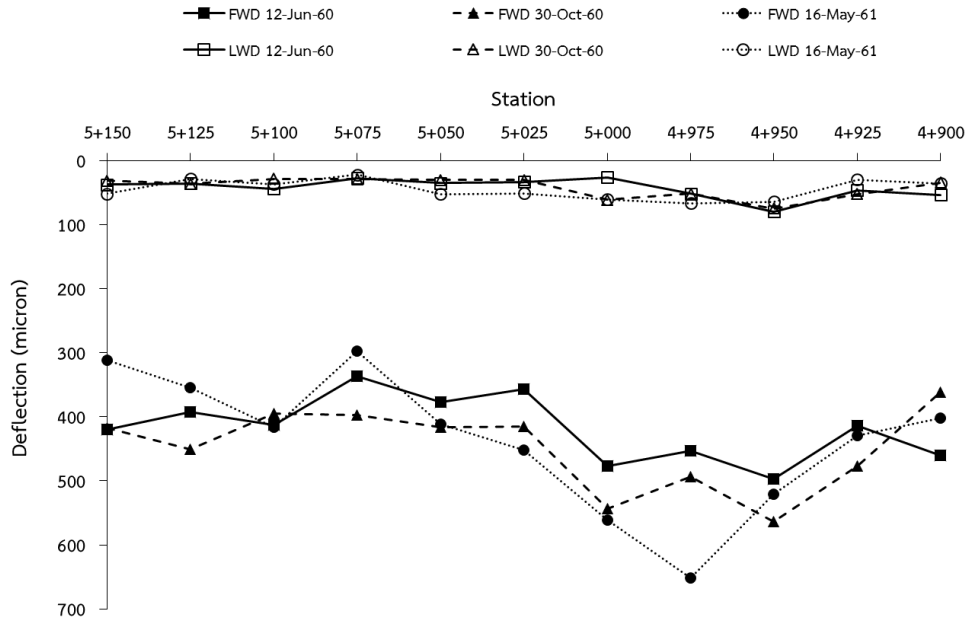
## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

#### 4.1 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD

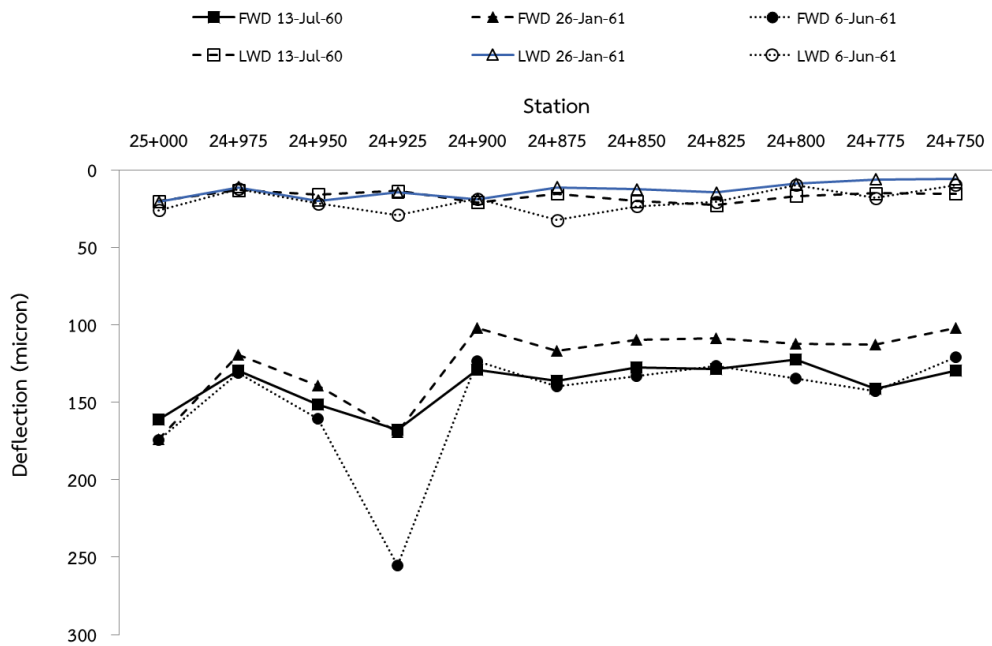
##### 4.1.1 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของโครงสร้างถนน

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.

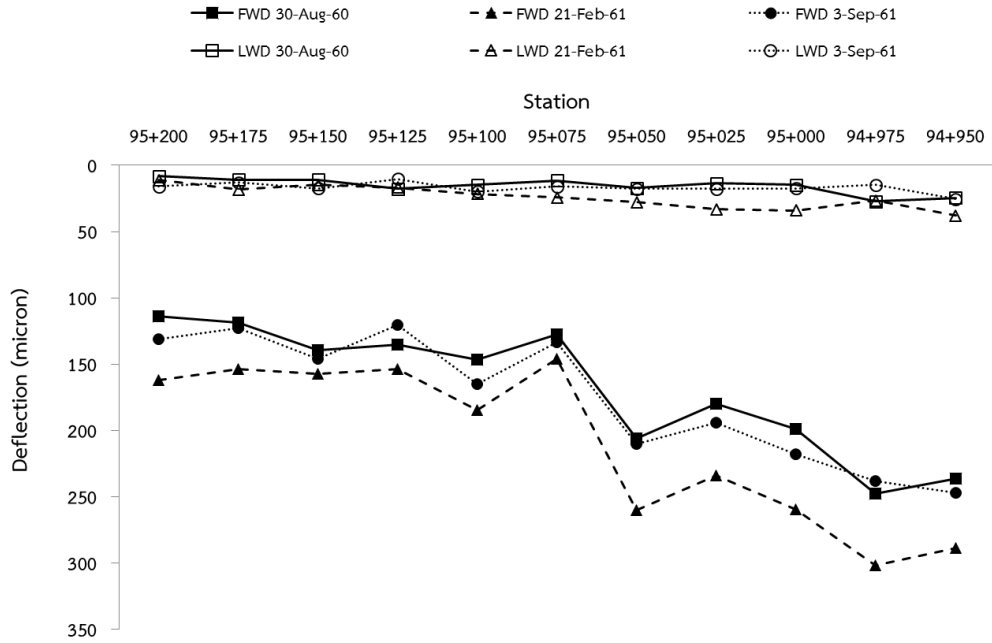


ภาพที่ 4.1 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.323 ตอน 100

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

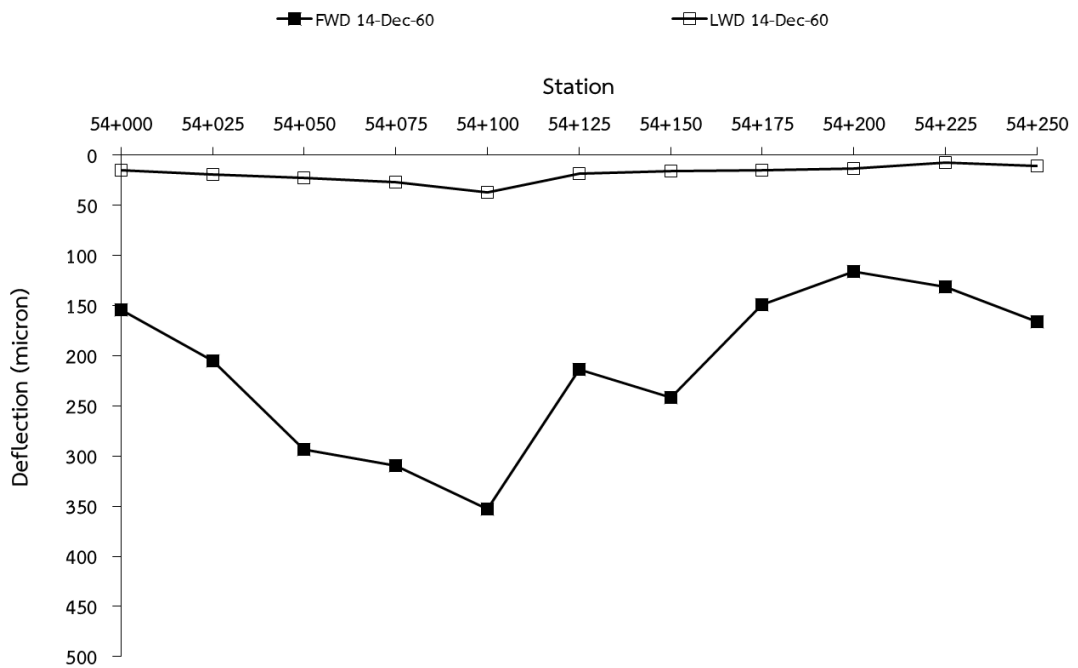


ภาพที่ 4.2 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.117 ตอน 100 ชื่อตอน นครสวรรค์ - คลองพลังด้านใต้ บริเวณ กม. 24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีแก้วเขียว)



ภาพที่ 4.3 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.2 ตอน 202

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



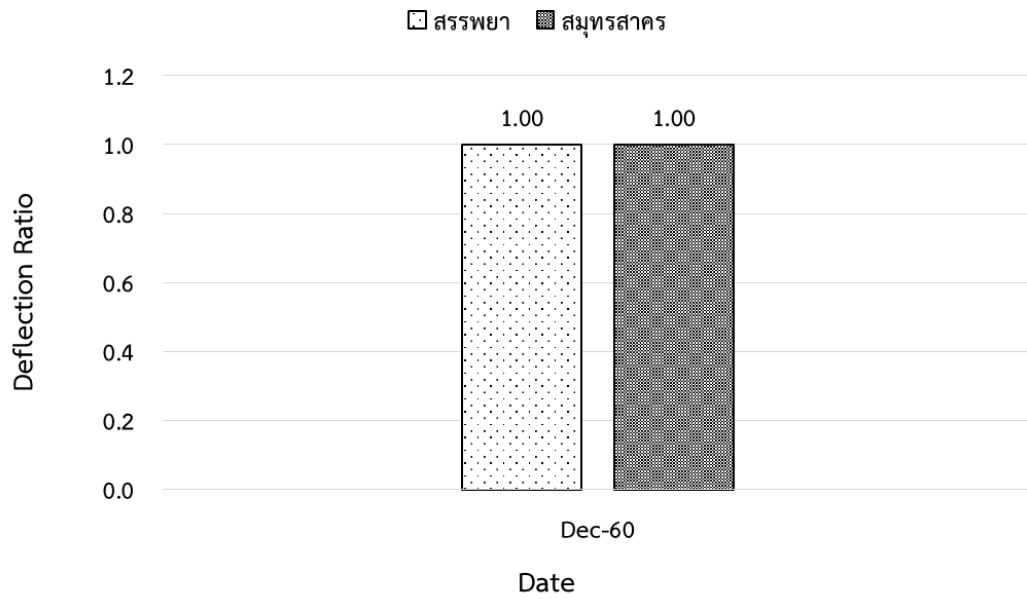
ภาพที่ 4.4 ค่าการแอ่นตัวของ ทล.35 ตอน 301

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

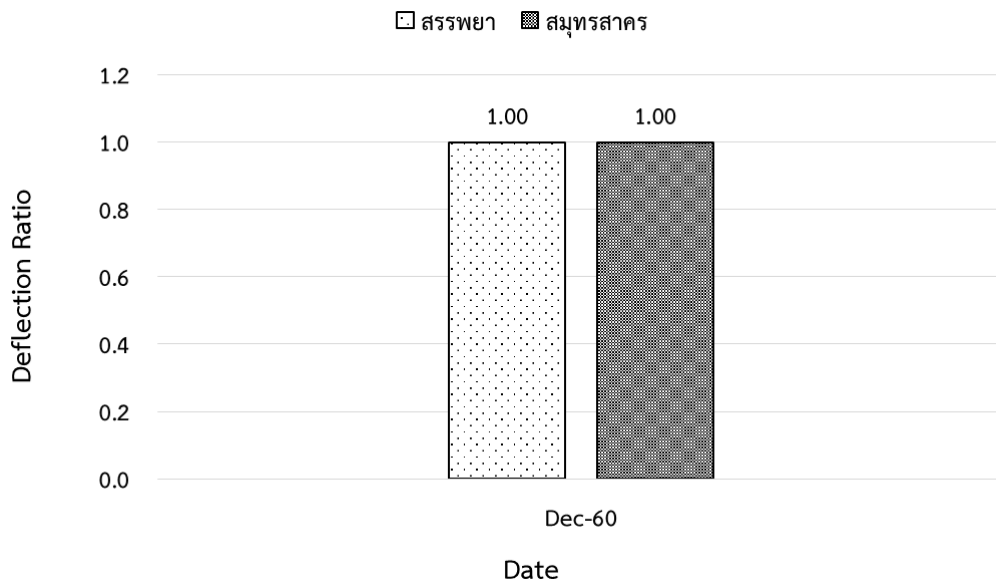
#### 4.1.2 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัว (Deflection Ratio) ของโครงสร้างถนน

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

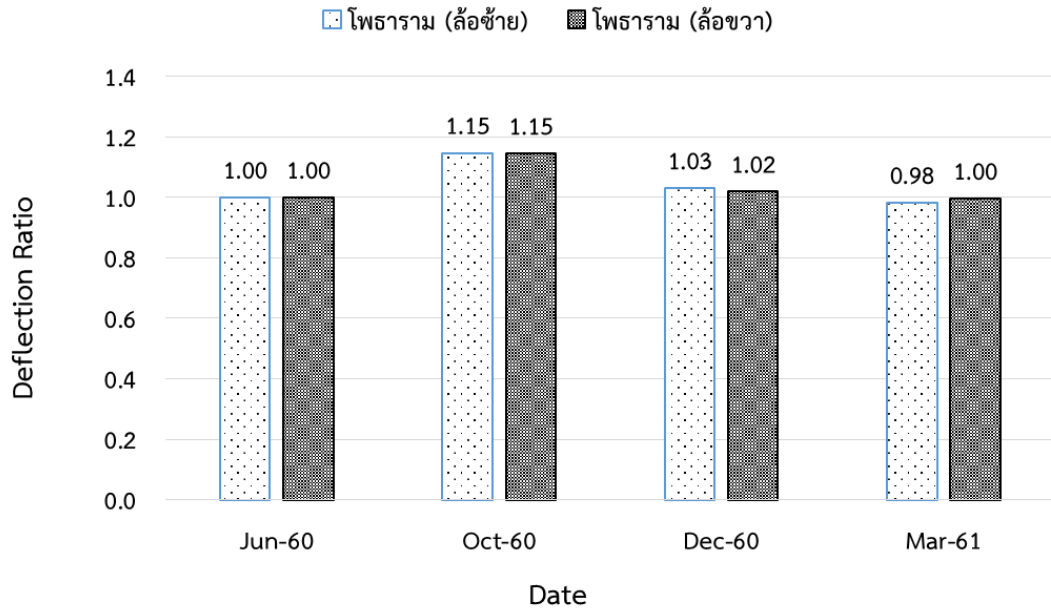
อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของโครงสร้างถนนแต่อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวดัง ภาพที่ 4.5 ถึงภาพที่ 4.15 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลง สาเหตุอาจเกิดจากจำนวนข้อมูลและระยะเวลาที่เก็บข้อมูลค่อนข้างจำกัด (ประมาณ 1 ปี) รวมถึงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งจุดทดสอบ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



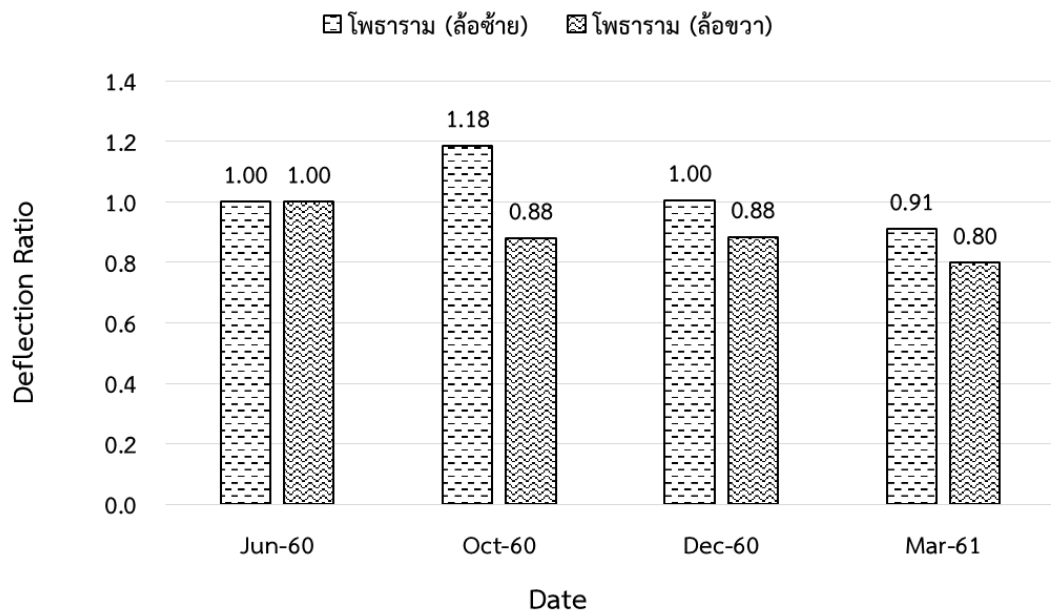
ภาพที่ 4.5 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคกลาง



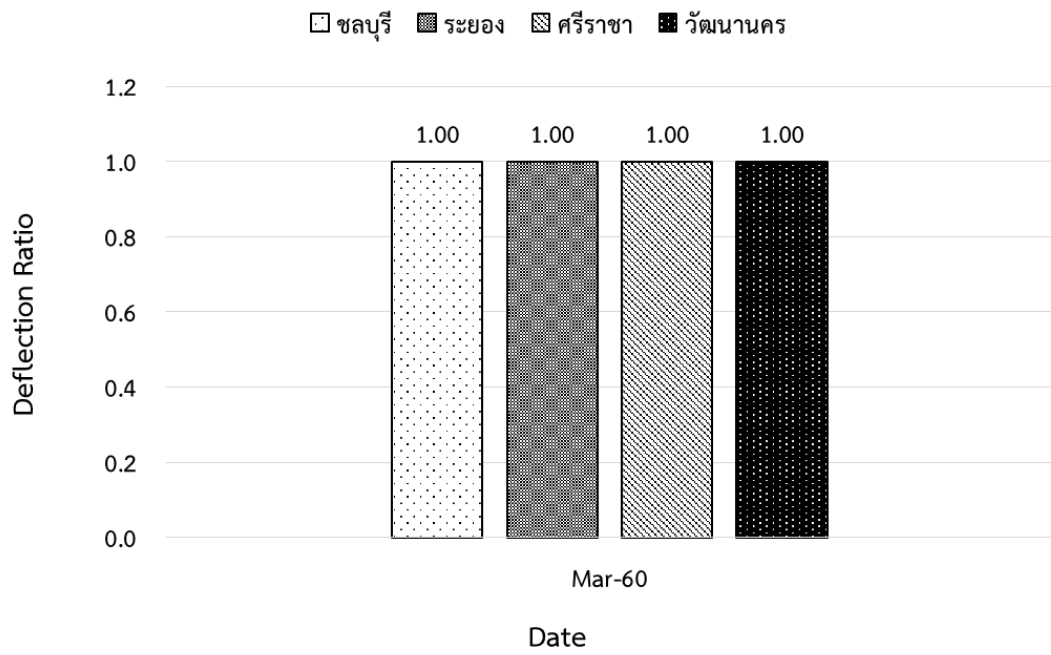
ภาพที่ 4.6 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคกลาง



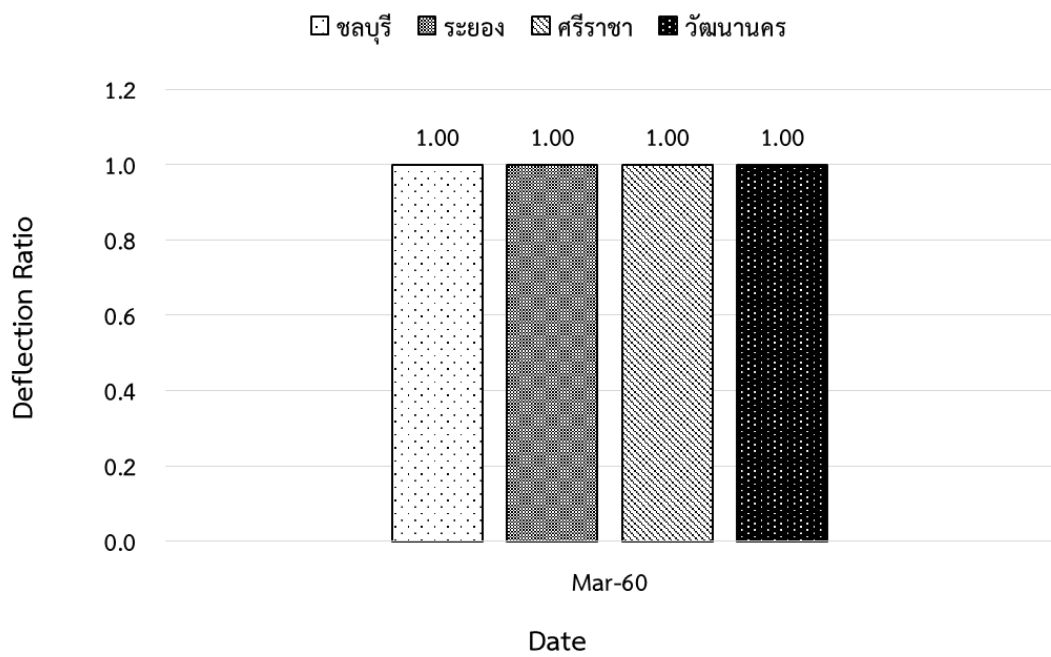
ภาพที่ 4.7 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบสถานีโพธาราม



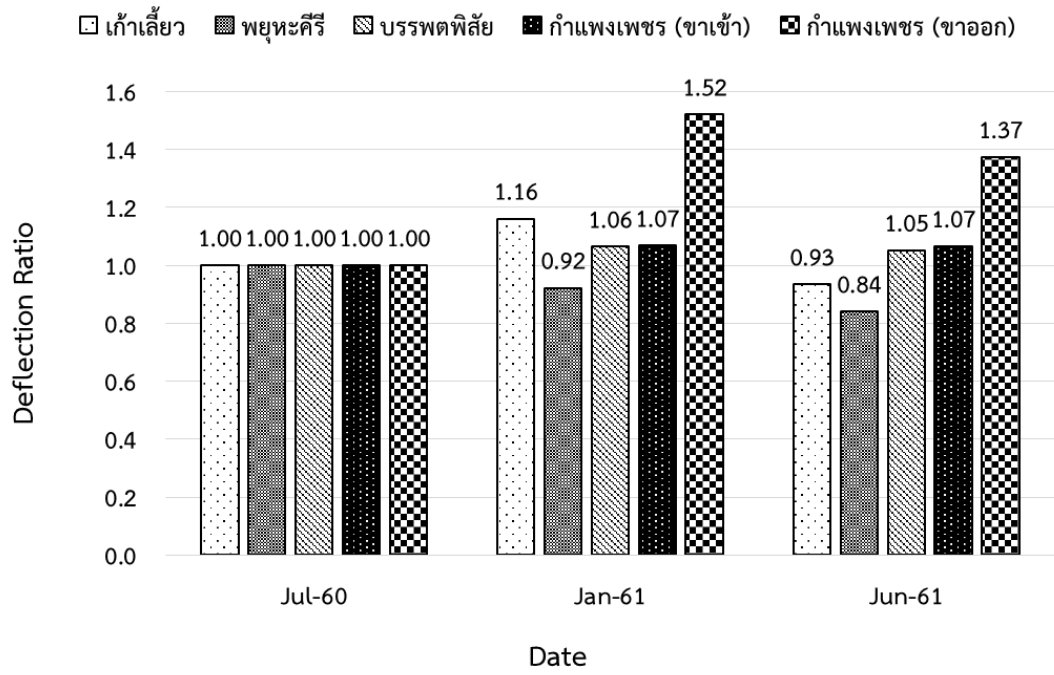
ภาพที่ 4.8 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบสถานีโพธาราม



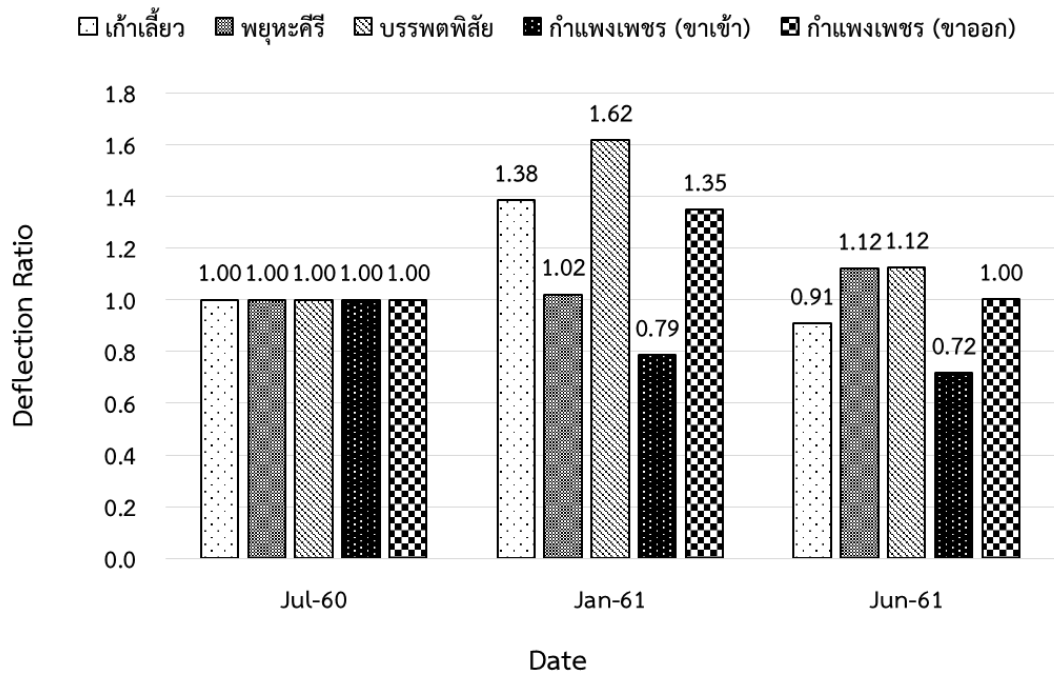
ภาพที่ 4.9 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก



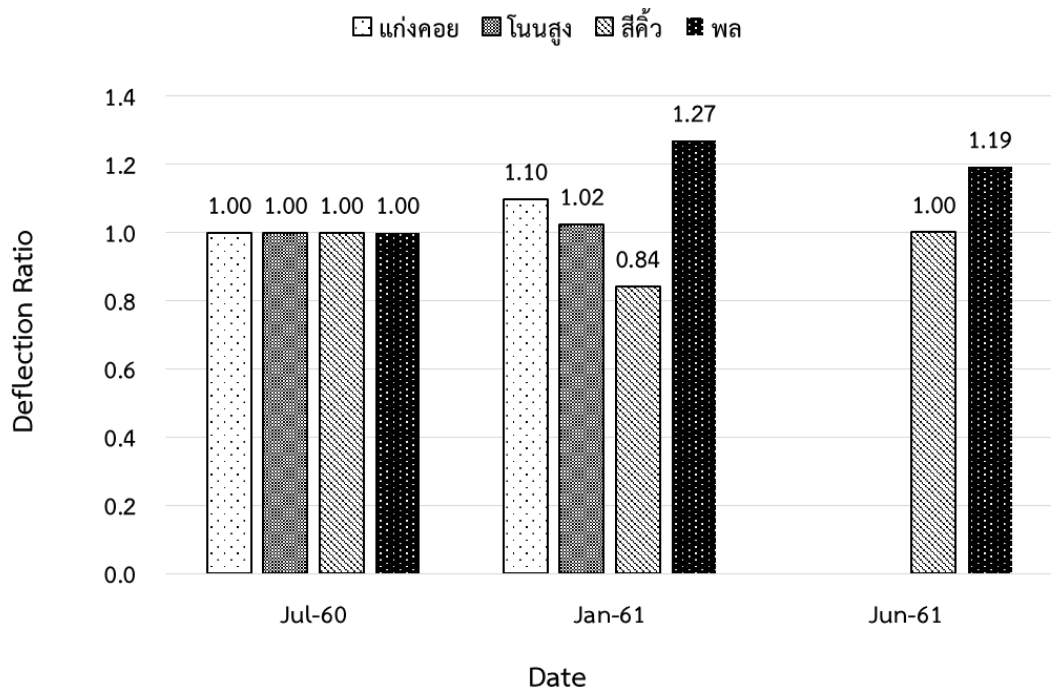
ภาพที่ 4.10 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก



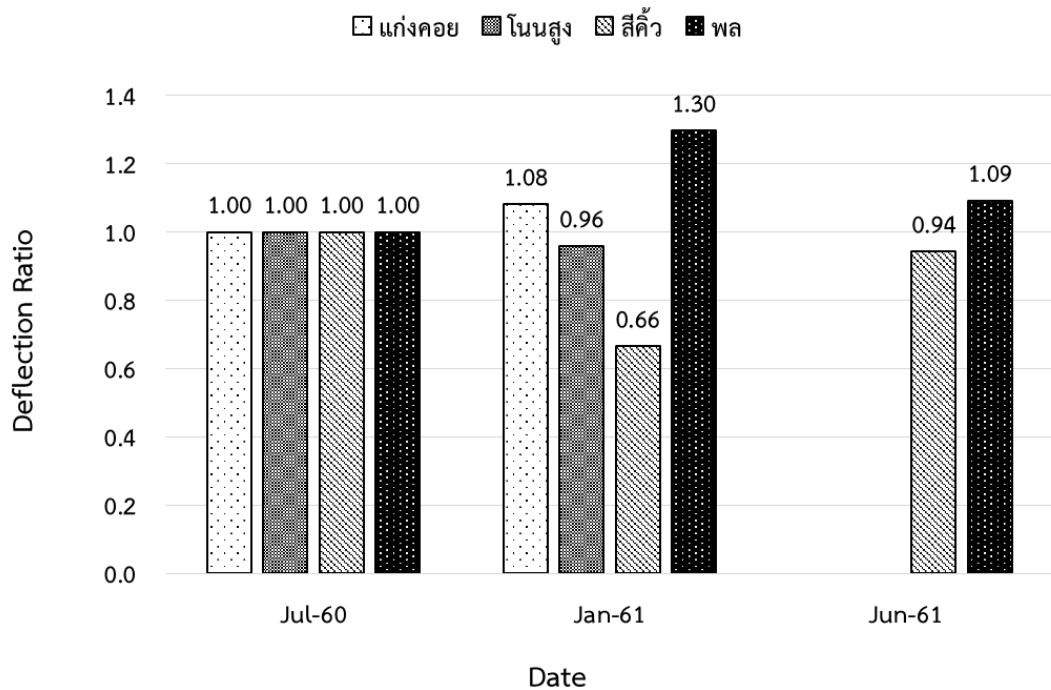
ภาพที่ 4.11 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคเหนือตอนล่าง



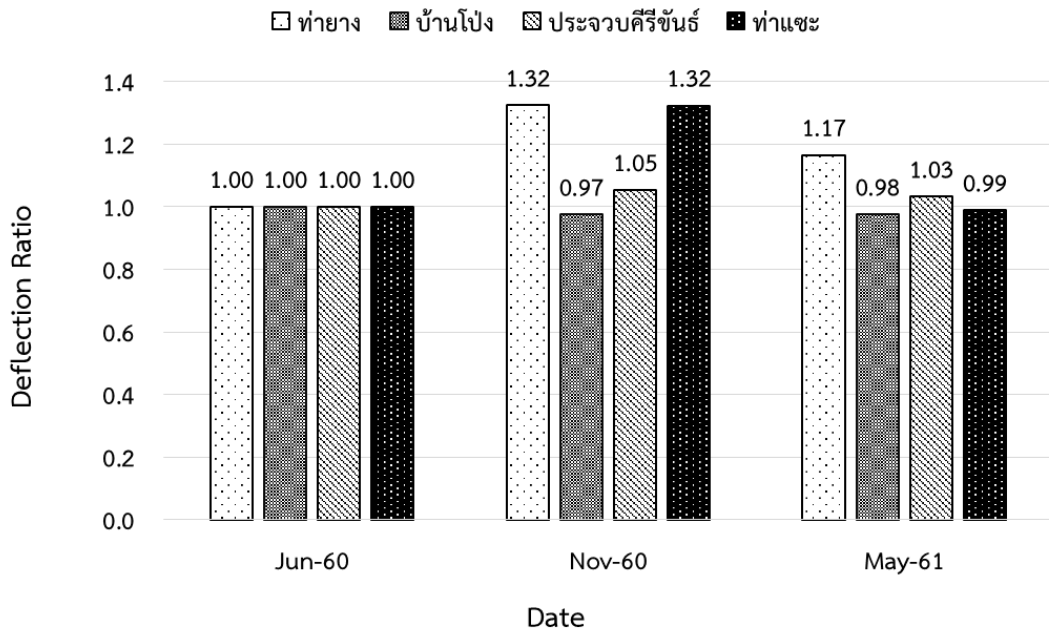
ภาพที่ 4.12 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคเหนือตอนล่าง



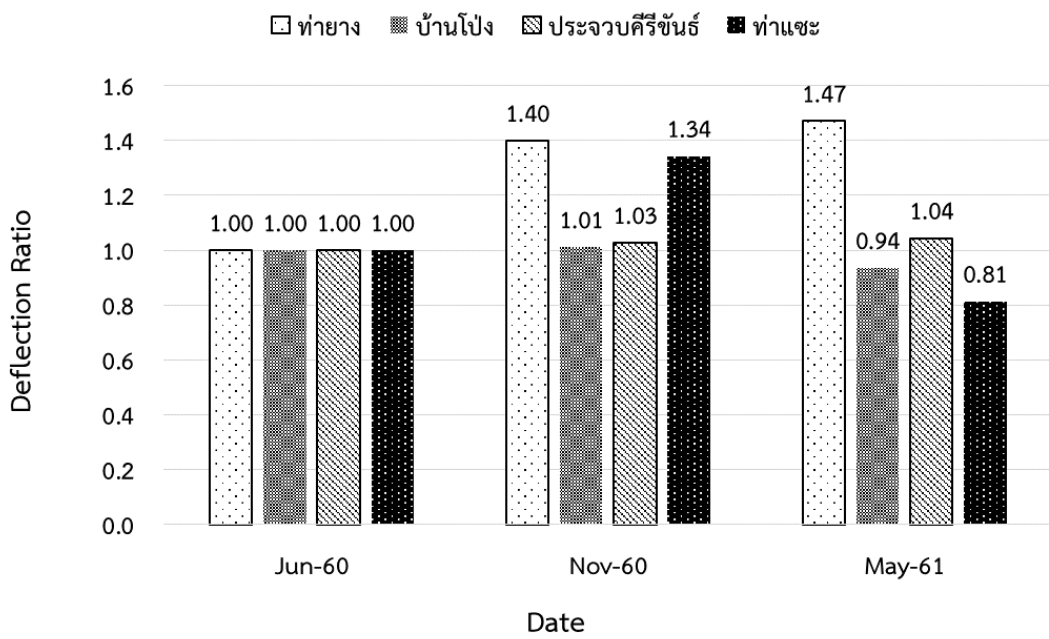
ภาพที่ 4.13 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



ภาพที่ 4.14 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



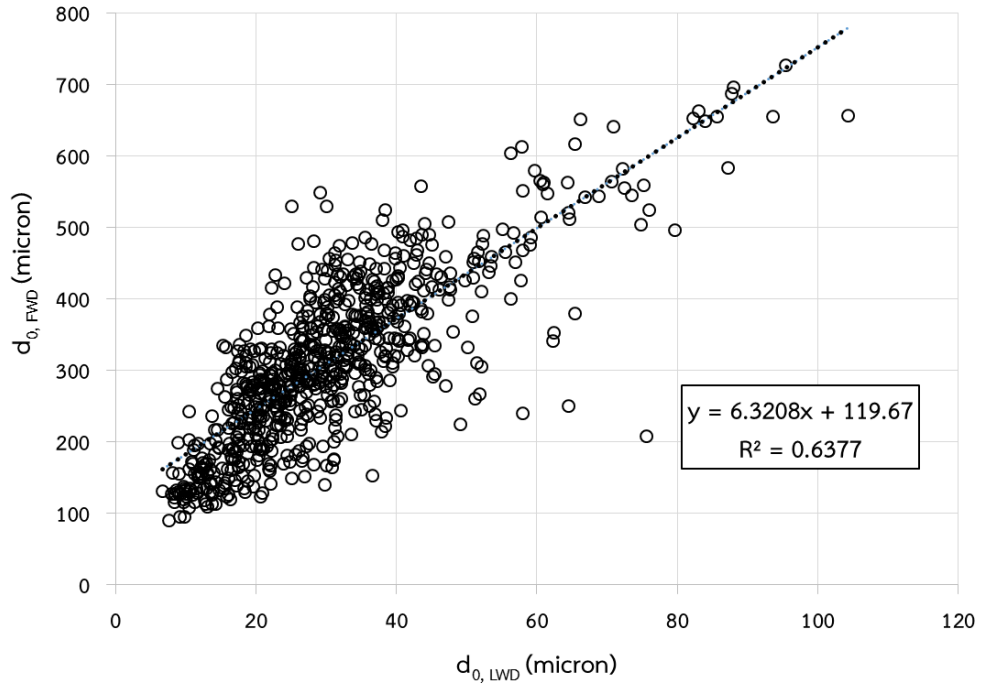
ภาพที่ 4.15 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ทดสอบภาคใต้



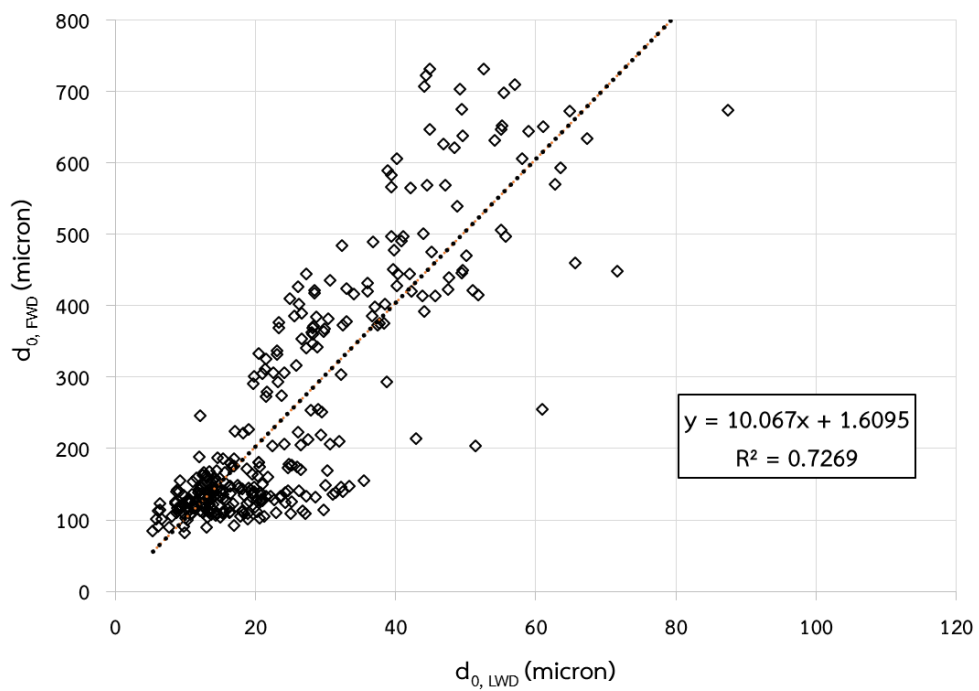
ภาพที่ 4.16 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวทดสอบโดยเครื่องมือ LWD ในพื้นที่ทดสอบภาคใต้

#### 4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD

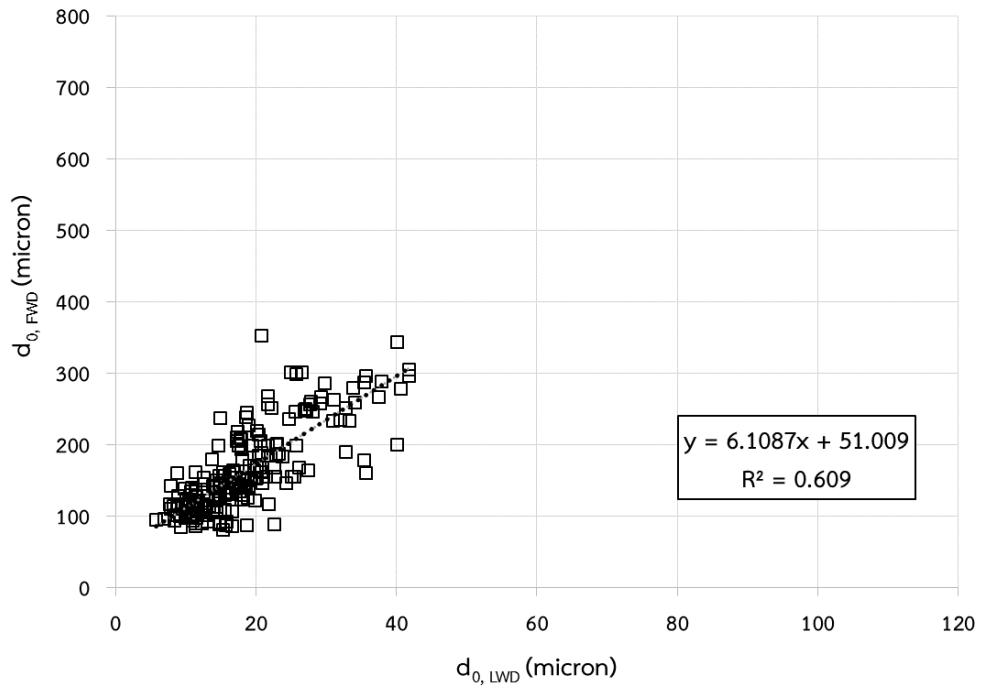
เมื่อนำผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนจากแปลงทดสอบจำนวนทั้งสิ้น 20 แปลง มาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ทดสอบได้จากเครื่องมือ FWD กับค่าการแอ่นตัวที่ทดสอบได้จากเครื่องมือ LWD โดยแบ่งพิจารณาตามประเภทของแปลงทดสอบ ได้แก่ แปลงทดสอบประเภทที่ 1 (ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต พื้นทางหินคลุก และรองพื้นทางดินลูกรัง) 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



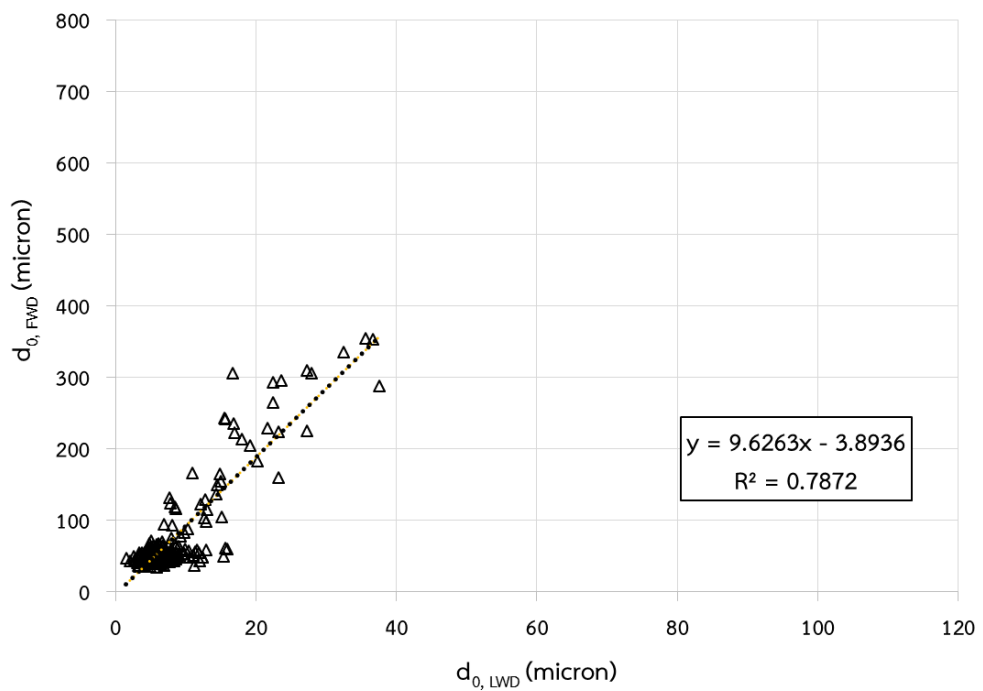
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 1



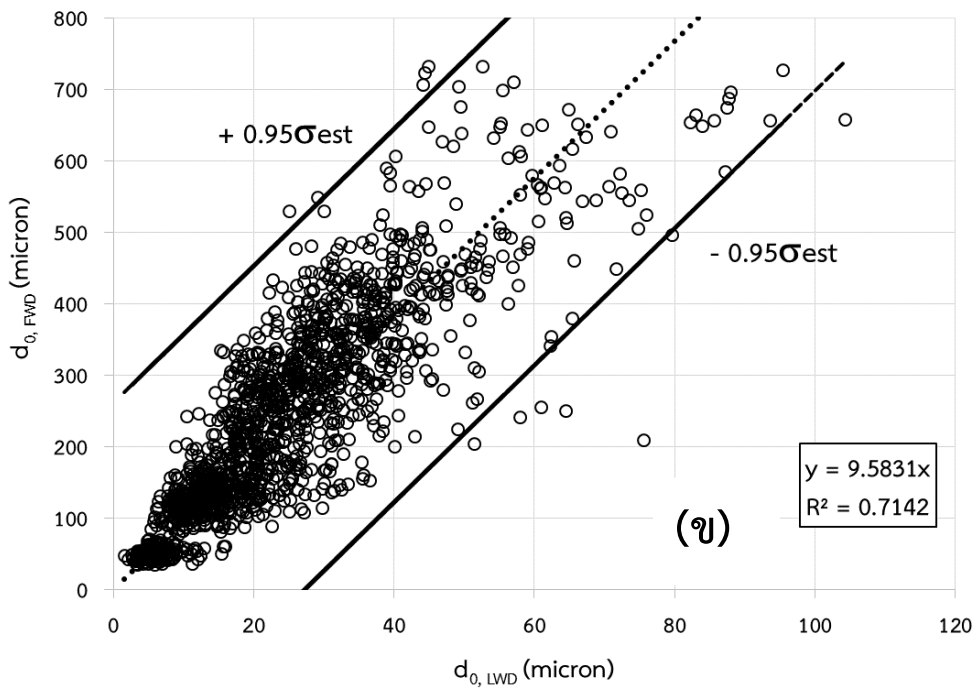
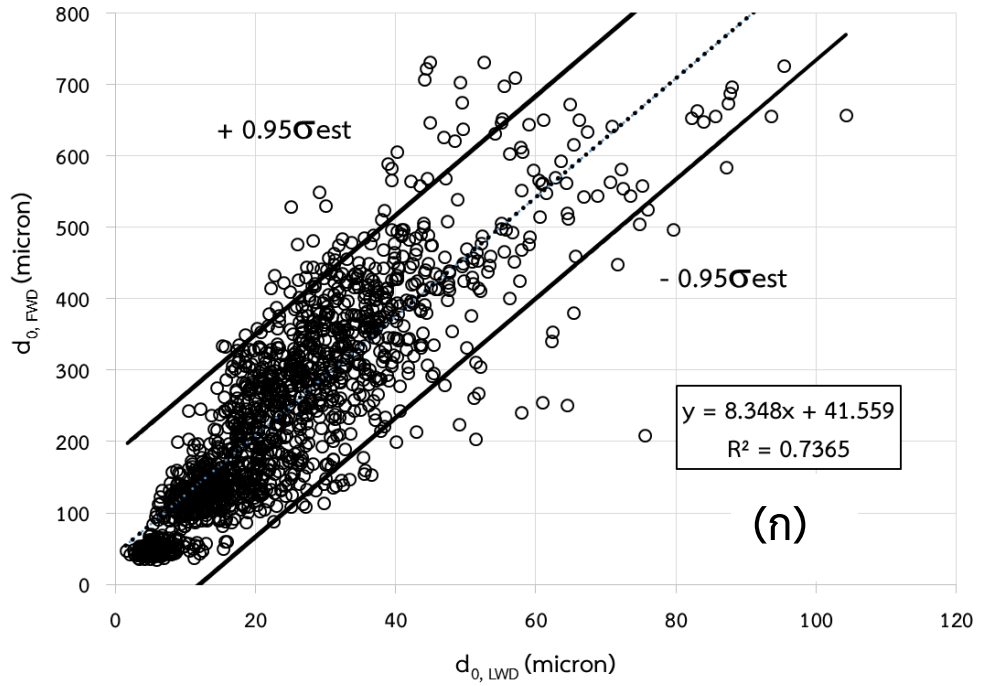
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับเครื่องมือ LWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 2



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

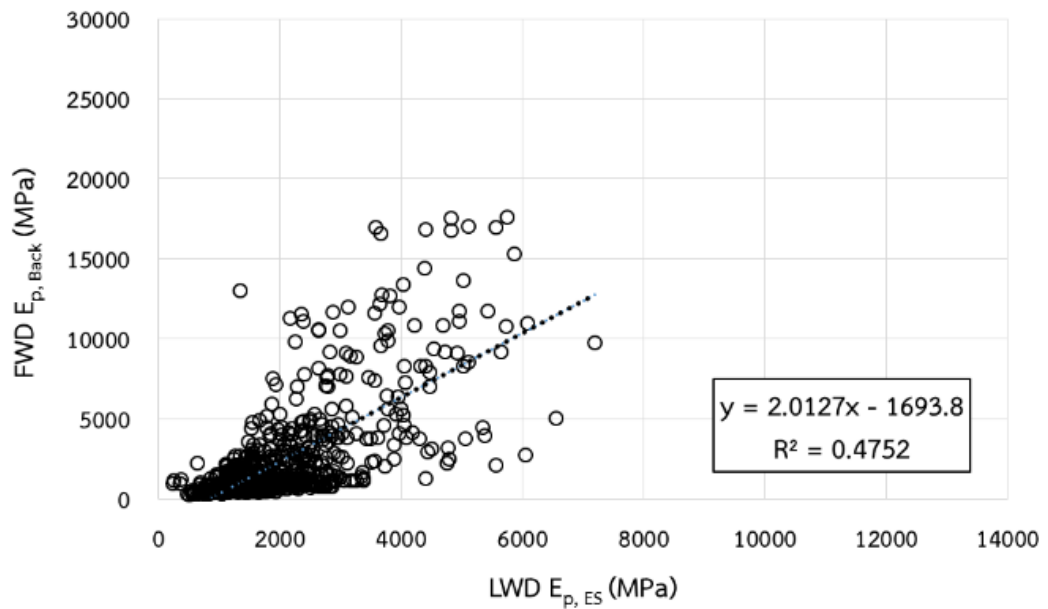
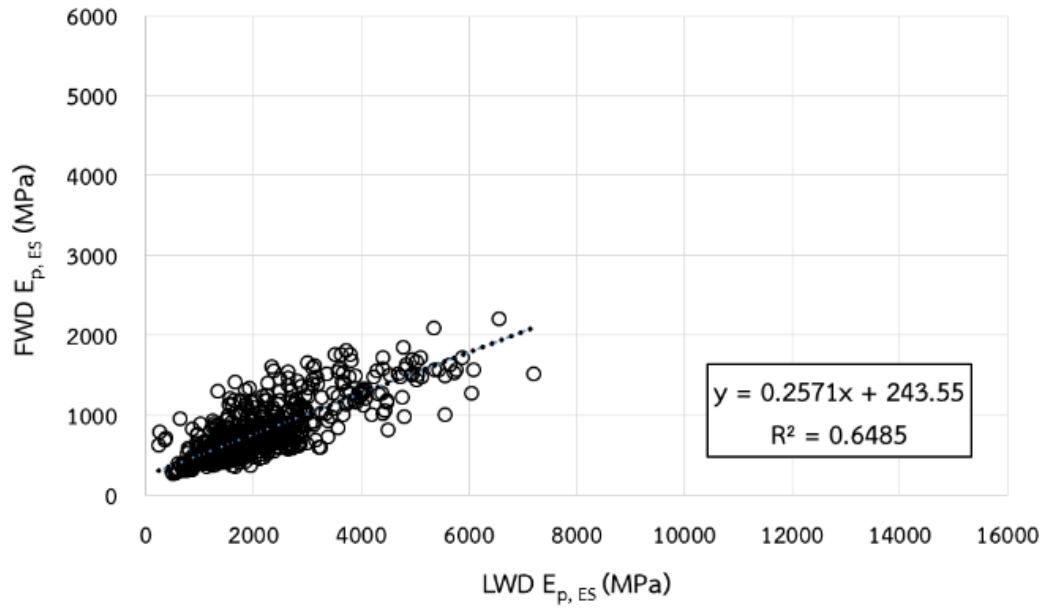
## 4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของชั้นโครงสร้างถนน

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

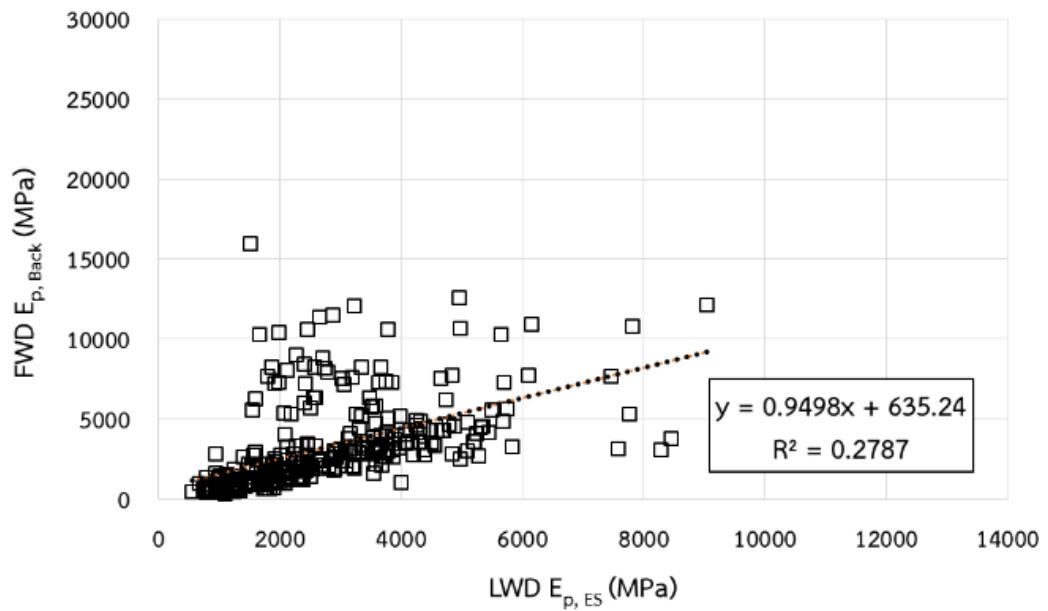
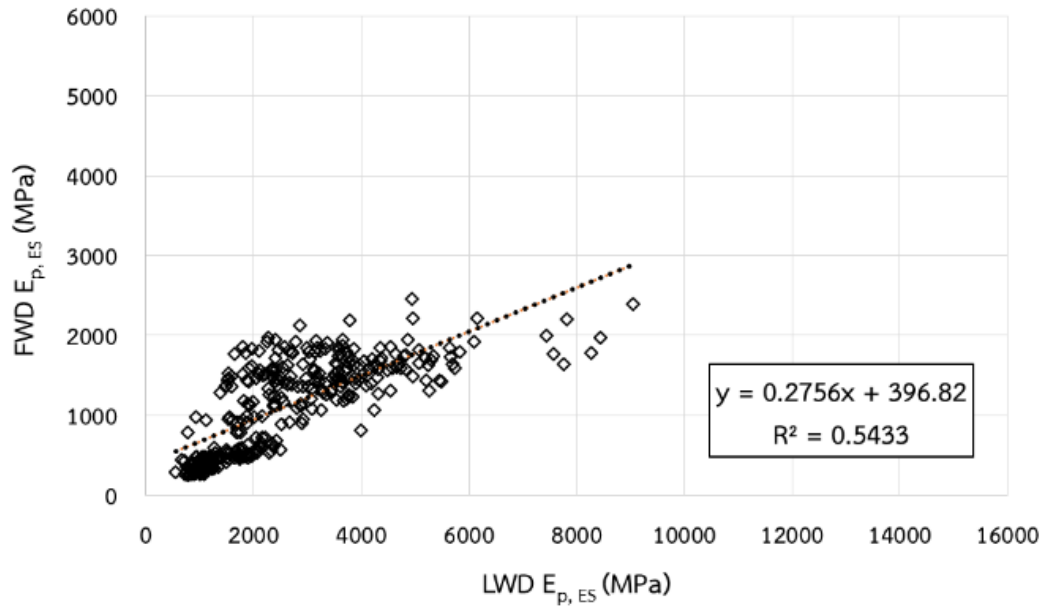
4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนตามทฤษฎี Elastic Solution ( $E_p, E_s$ ) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ( $E_p, E_{Back}$ )

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)

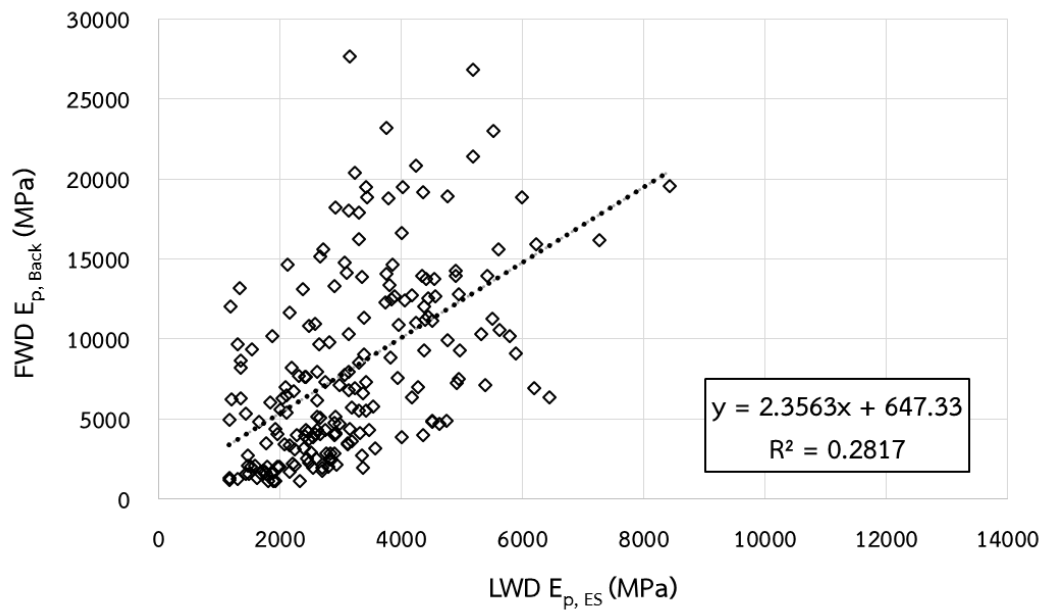
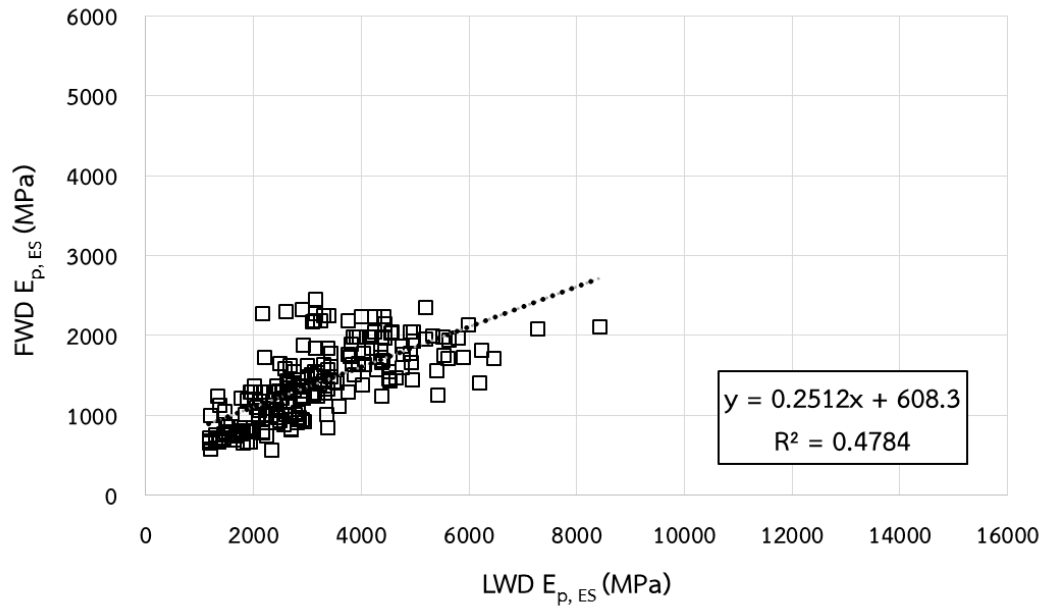
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนตามทฤษฎี Elastic Solution กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับของแต่ละแปลงทดสอบ (ภาพที่ 4.21 ถึง ภาพที่ 4.25) พบว่าค่า  $R^2$  ค่อนข้างต่ำสำหรับแปลงทดสอบแต่ละประเภท ค่า  $R^2$  อยู่ระหว่าง 0.02 ถึง 0.48 และค่า  $R^2$  สำหรับแปลงทดสอบทั้ง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



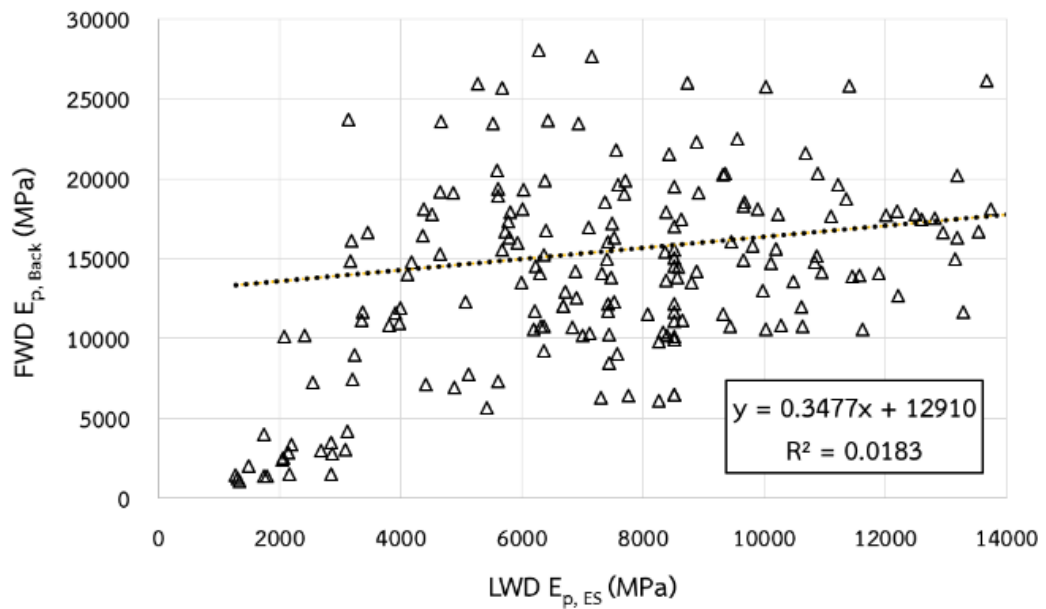
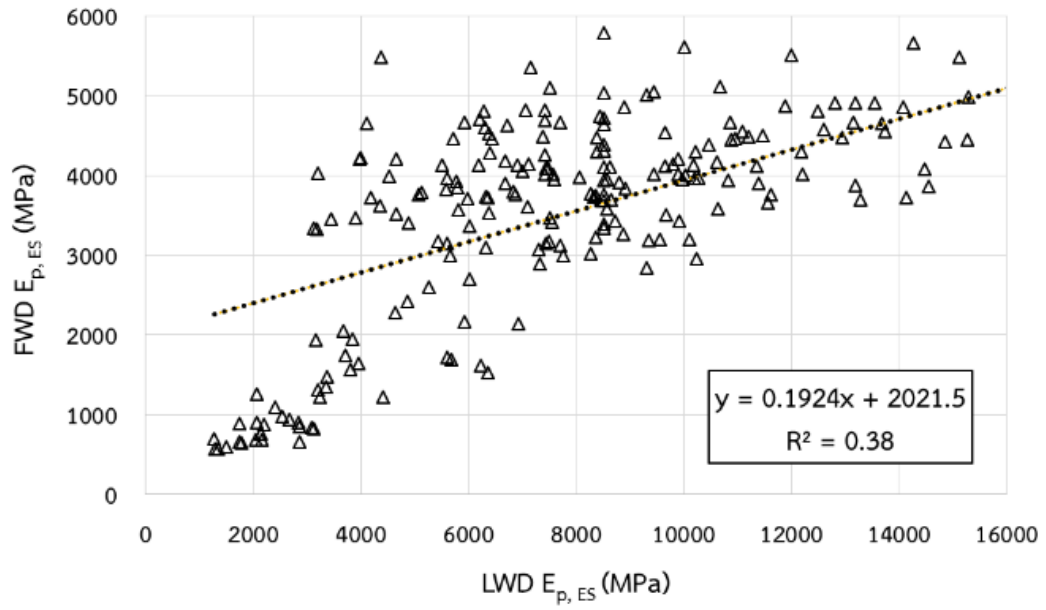
ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD  $E_{p,ES}$  กับ LWD  $E_{p,ES}$  และ FWD  $E_{p,Back}$  กับ LWD  $E_{p,ES}$  ในแปลงทดสอบประเภทที่ 1



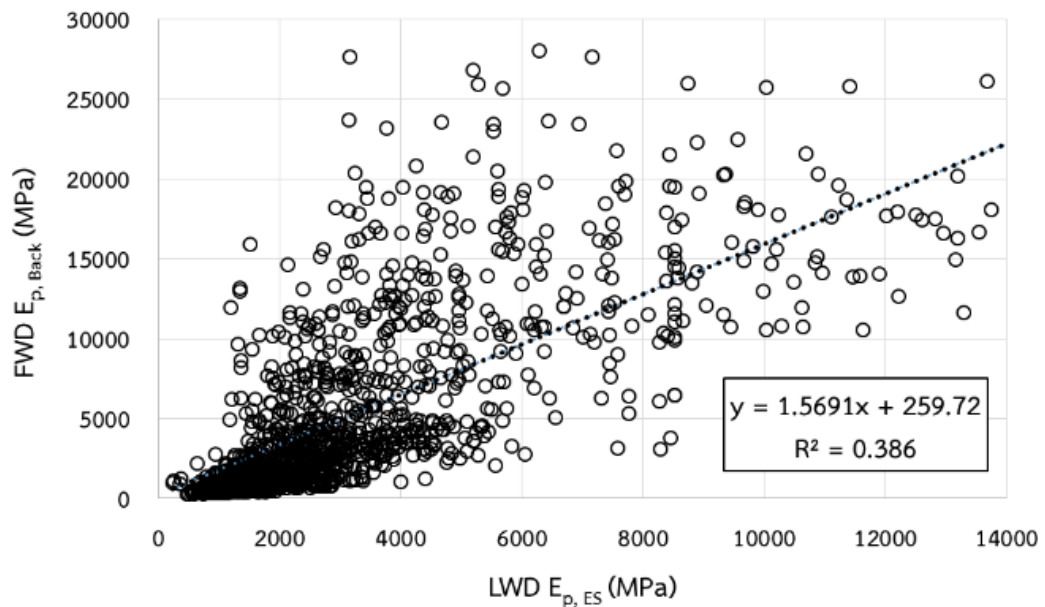
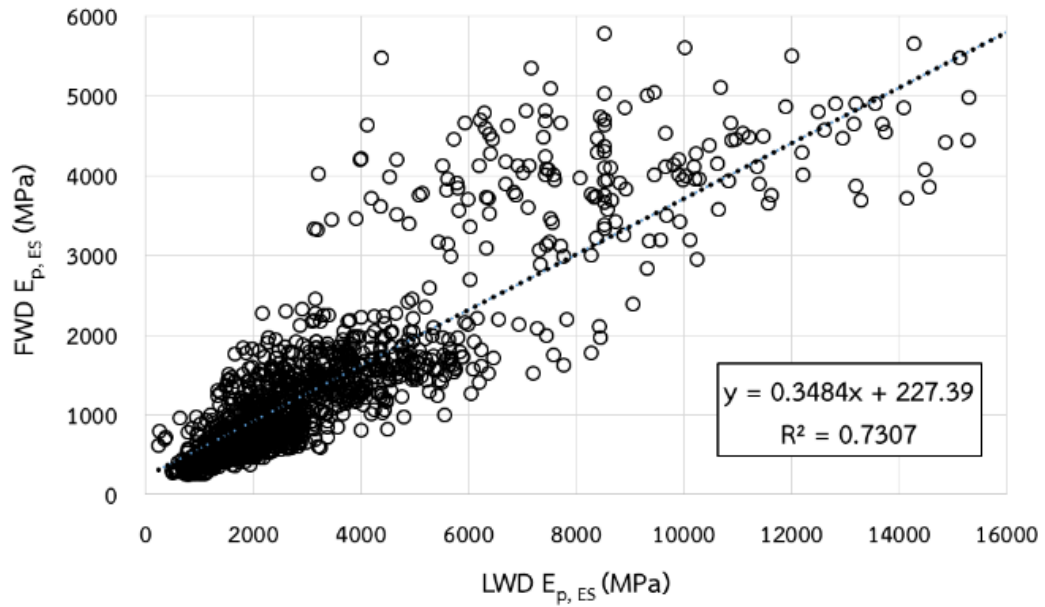
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD  $E_{p,ES}$  กับ LWD  $E_{p,ES}$  และ FWD  $E_{p,Back}$  กับ LWD  $E_{p,ES}$  ในแปลงทดสอบประเภทที่ 2



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



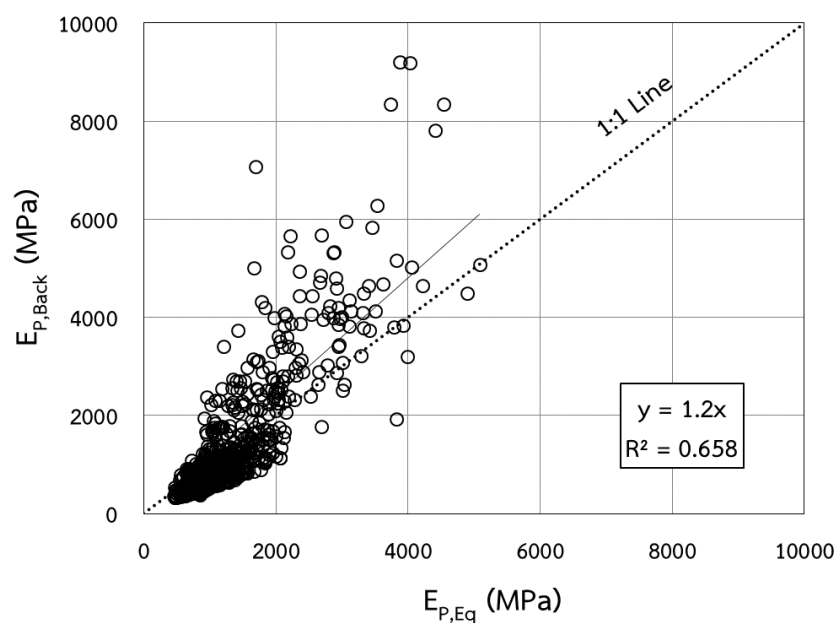
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWD  $E_{p,ES}$  กับ LWD  $E_{p,ES}$  และ FWD  $E_{p,Back}$  กับ LWD  $E_{p,ES}$  ในแปลงทดสอบทั้ง 4 ประเภท

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

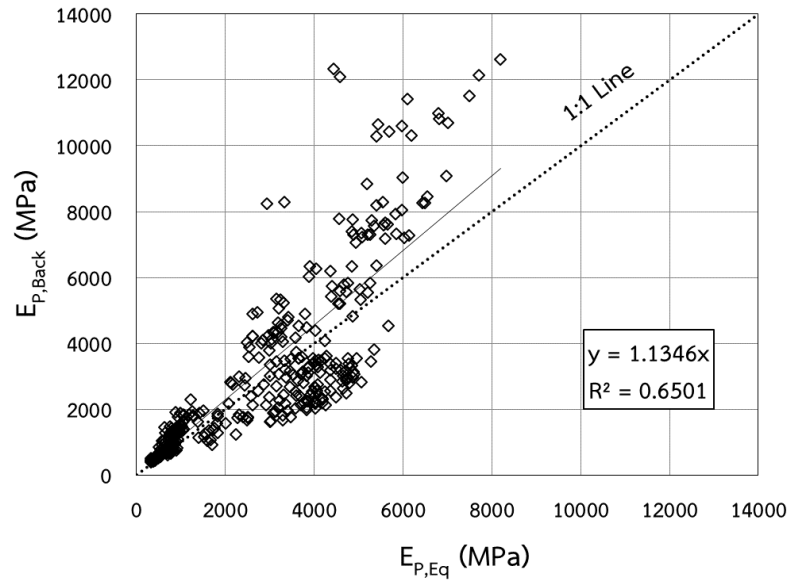
จากผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ในแปลงทดสอบประเภทที่ 1 และ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ( $E_{P,Back}$ ) ด้วยโปรแกรม ELMOD 4.4 มีค่าประมาณ 1.1 ถึง 1.2 เท่าของค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ ( $E_{P,EQ}$ )

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

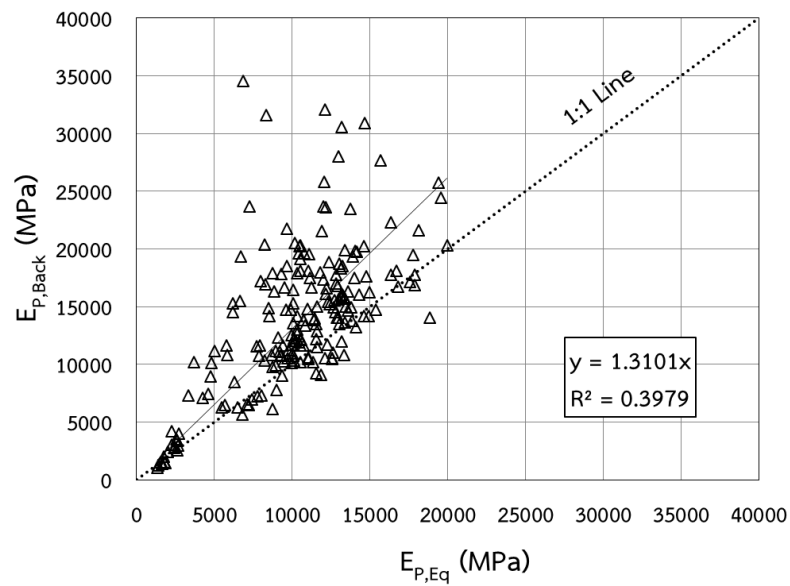
สำหรับกรณีโครงสร้างถนนเป็นโครงสร้างเดิมหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) ยกตัวอย่างเช่น แปลงทดสอบประเภทที่ 4 พบว่าค่า  $E_{P,Back}$  ค่าประมาณ 1.3 เท่าของค่า  $E_{P,Eq}$  ดังภาพที่ 4.29 จึงอาจสรุปได้ว่าสมการที่ (23) – (25) ให้ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน ต่ำกว่าวิธีการคำนวณย้อนกลับ โดยโครงสร้างถนนมีค่า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



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

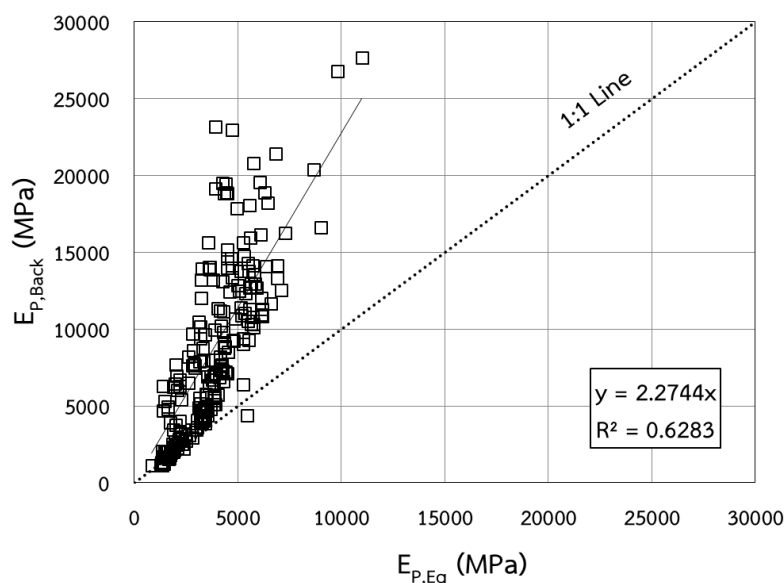


ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการ  
เชิงประจักษ์ ( $E_{P,Eq}$ ) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ( $E_{P,Back}$ )  
ในแปลงทดสอบประเภทที่ 2



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



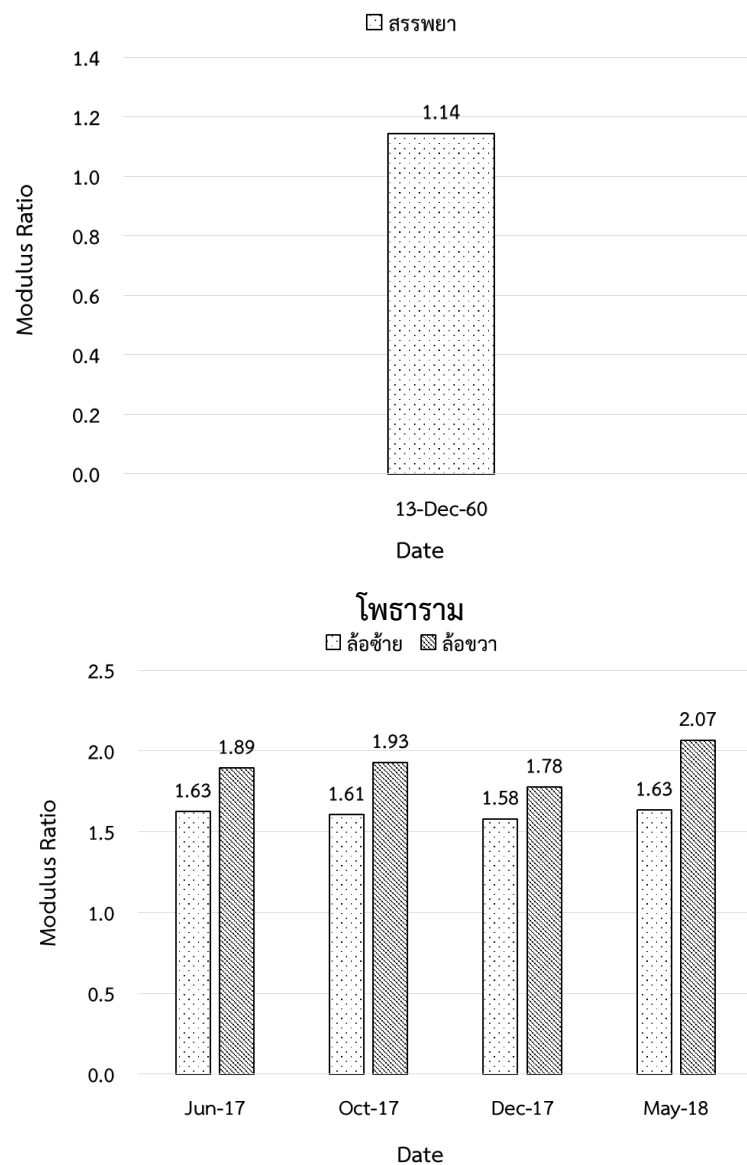
**ภาพที่ 4.30** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณจากสมการเชิงประจักษ์ ( $E_{P,Eq}$ ) กับค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ ( $E_{P,Back}$ ) ในแปลงทดสอบประเภทที่ 3

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

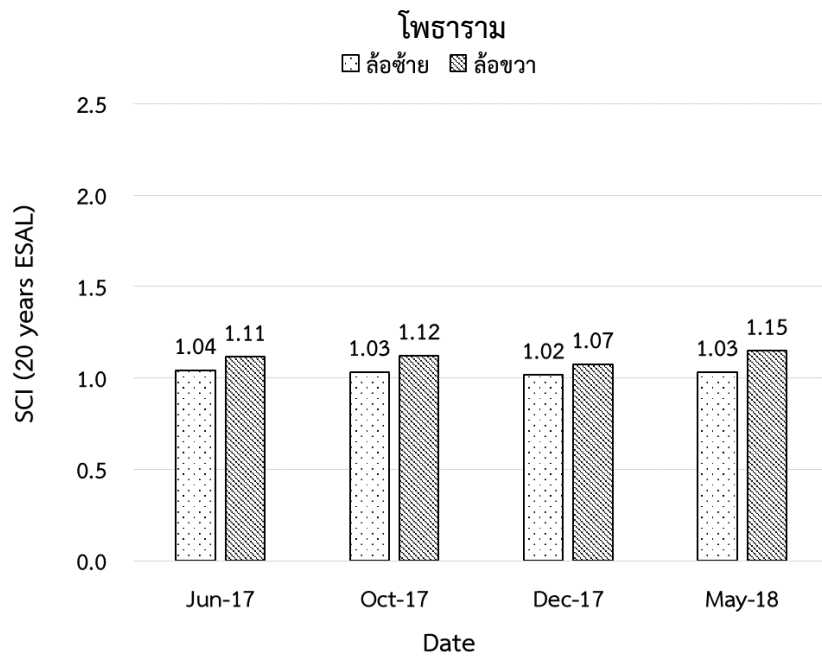
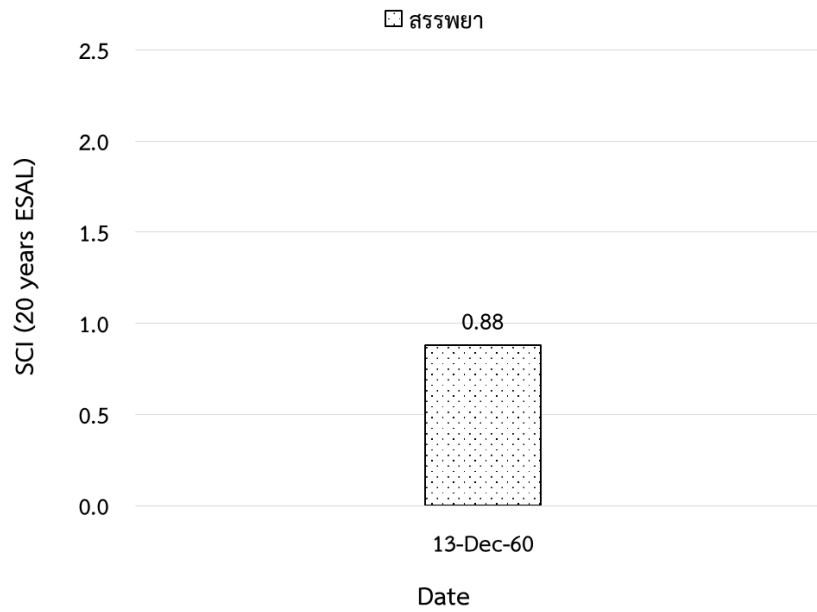
#### 4.3 ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) และค่าดัชนีความแข็งแรง (Structural Condition Index, SCI)

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

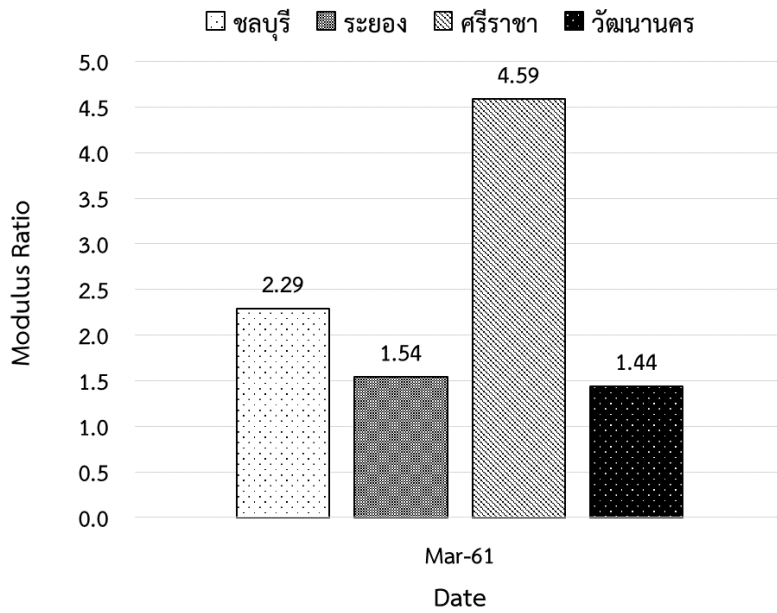


ภาพที่ 4.31 ค่า MR ของพื้นที่ทดสอบภาคกลาง

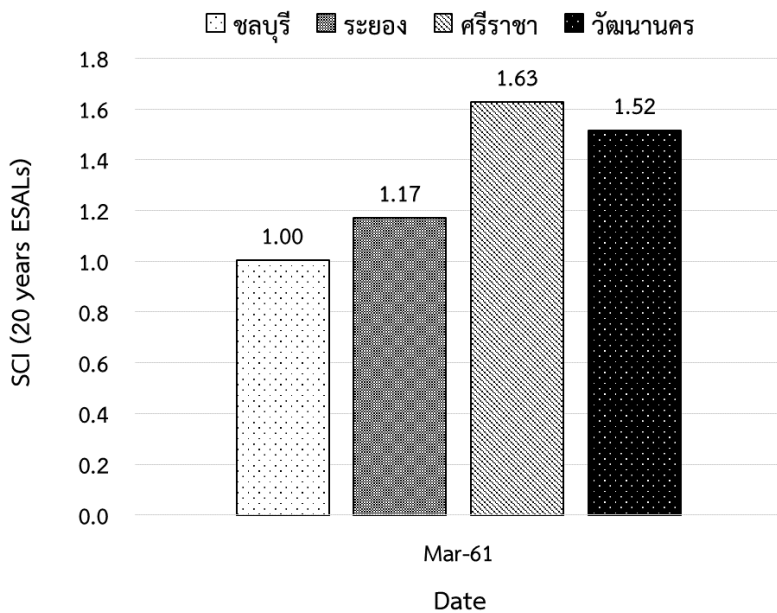


ภาพที่ 4.32 ค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคกลาง

4.3.2 ค่า MR และค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก แสดงดังภาพที่ 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ

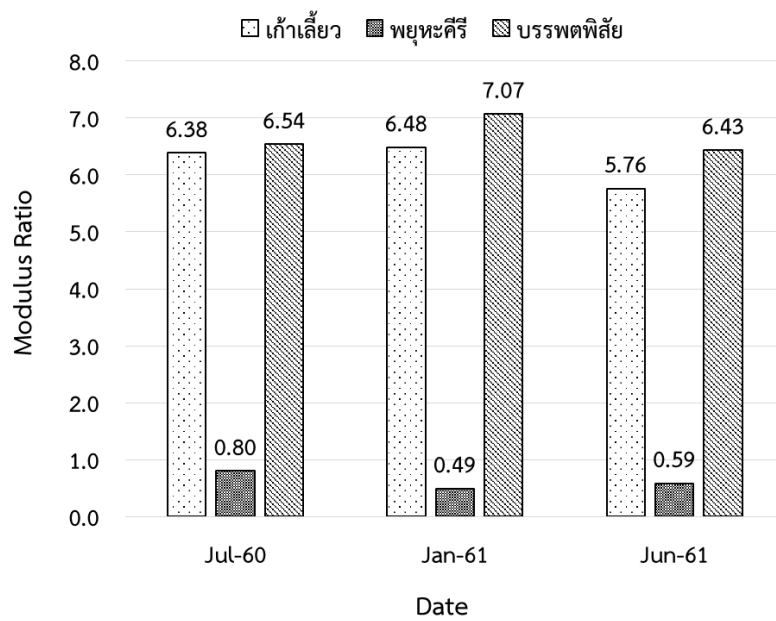


ภาพที่ 4.33 ค่า MR ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก

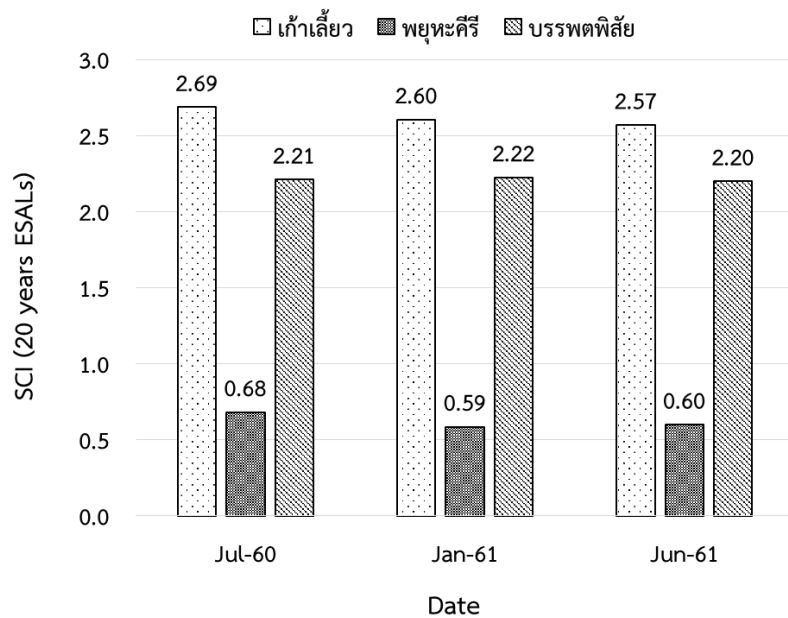


ภาพที่ 4.34 ค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออก

4.3.3 ค่า MR และค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคเหนือตอนล่าง แสดงดังภาพที่ 4.35 และ 4.36 ตามลำดับ

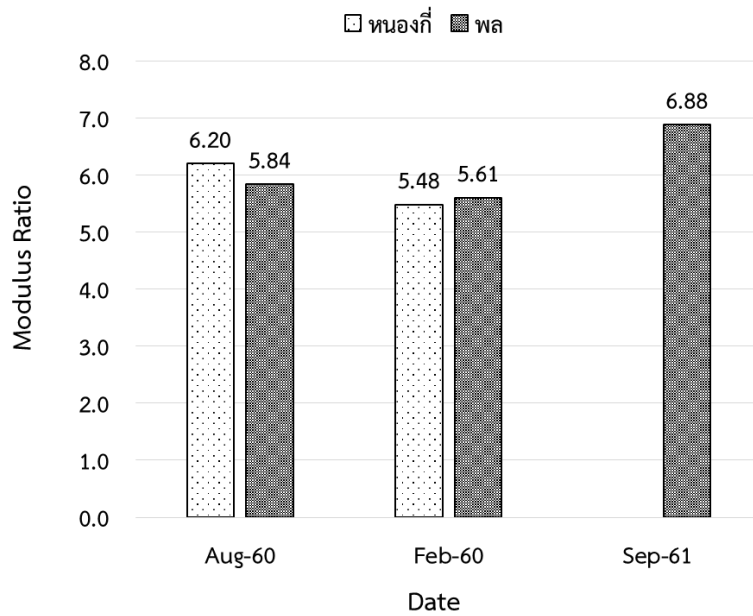


ภาพที่ 4.35 ค่า MR ของพื้นที่ทดสอบภาคเหนือตอนล่าง

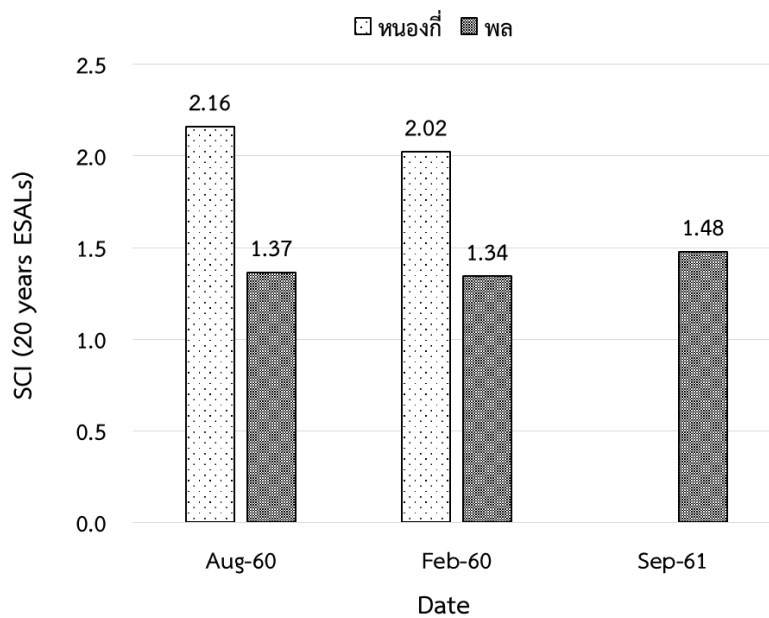


ภาพที่ 4.36 ค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคเหนือตอนล่าง

4.3.4 ค่า MR และค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แสดงดังภาพที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ

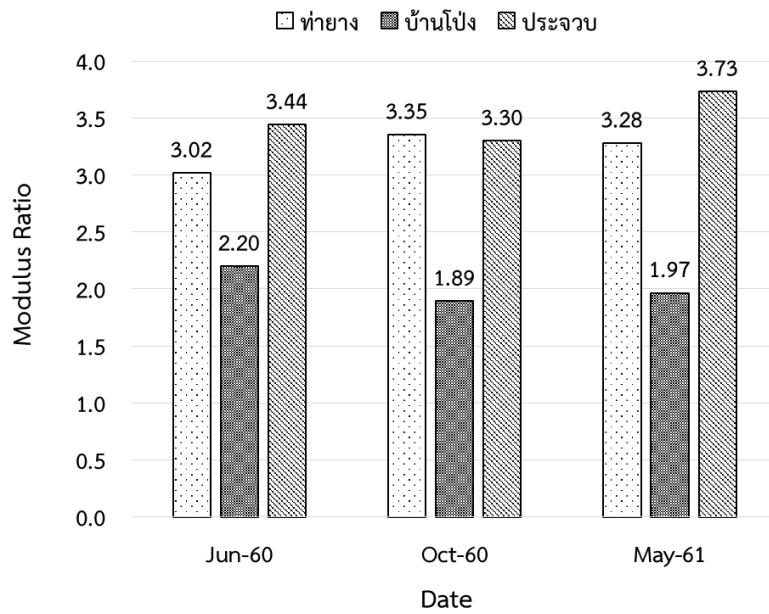


ภาพที่ 4.37 ค่า MR ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

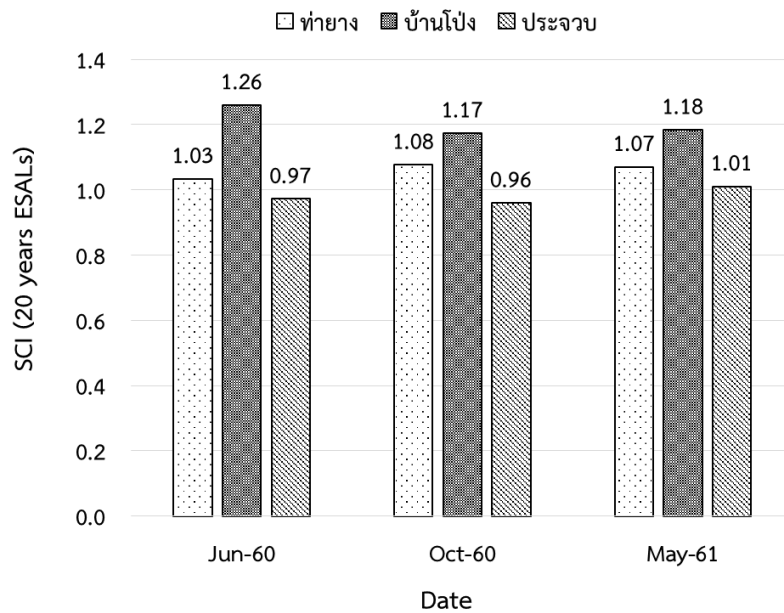


ภาพที่ 4.38 ค่า SCI ของพื้นที่ทดสอบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

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 เนื่องจากวิธีการคำนวณย้อนกลับต้องใช้ค่าโมดูลัสและความหนาของวัสดุชั้นทางในการวิเคราะห์ 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 Pavment) 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

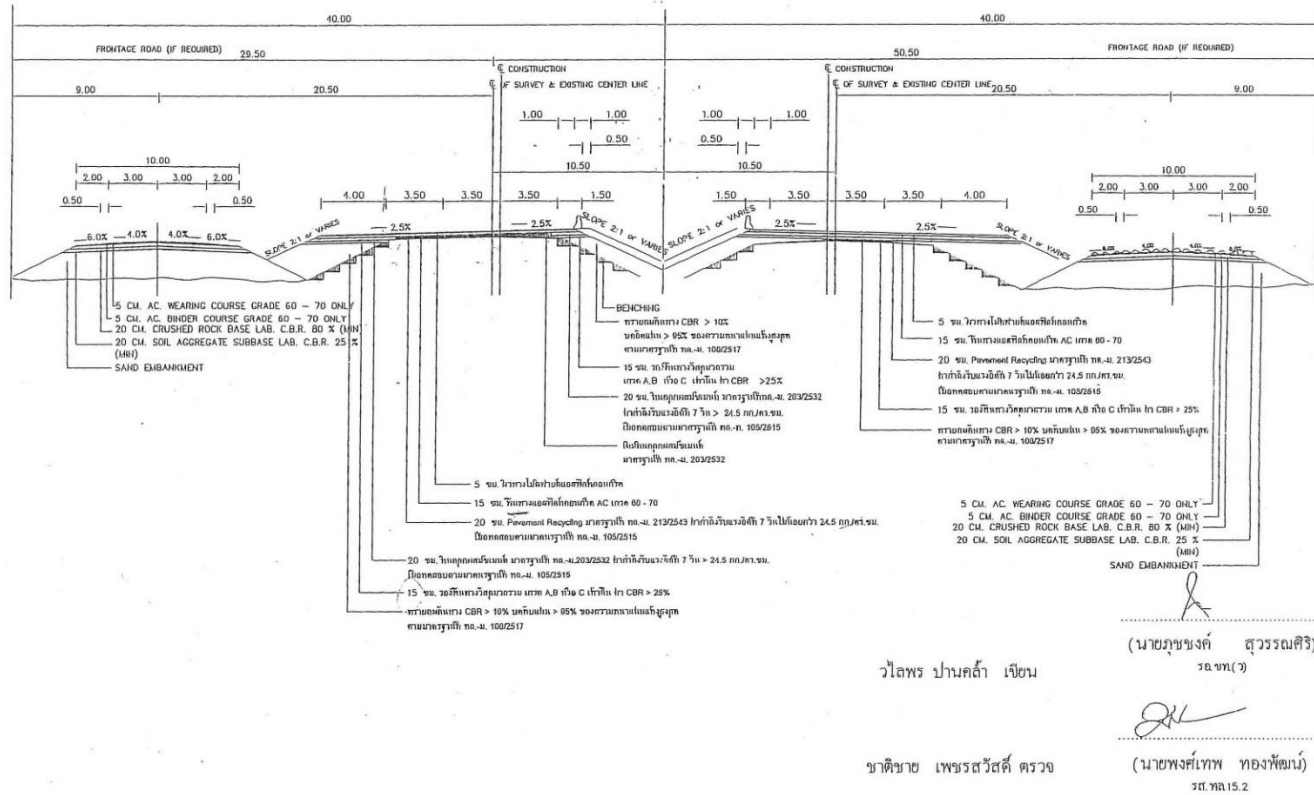
- กรมทางหลวง (2550), คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง
- กรมทางหลวง (2560), โครงการศึกษาการใช้เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ในการควบคุมคุณภาพวัสดุสร้างทาง, , สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง
- ดุษฎีนิพนธ์ ธาร, ธีรภัทร์ ศิริรัตฉัตร, 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

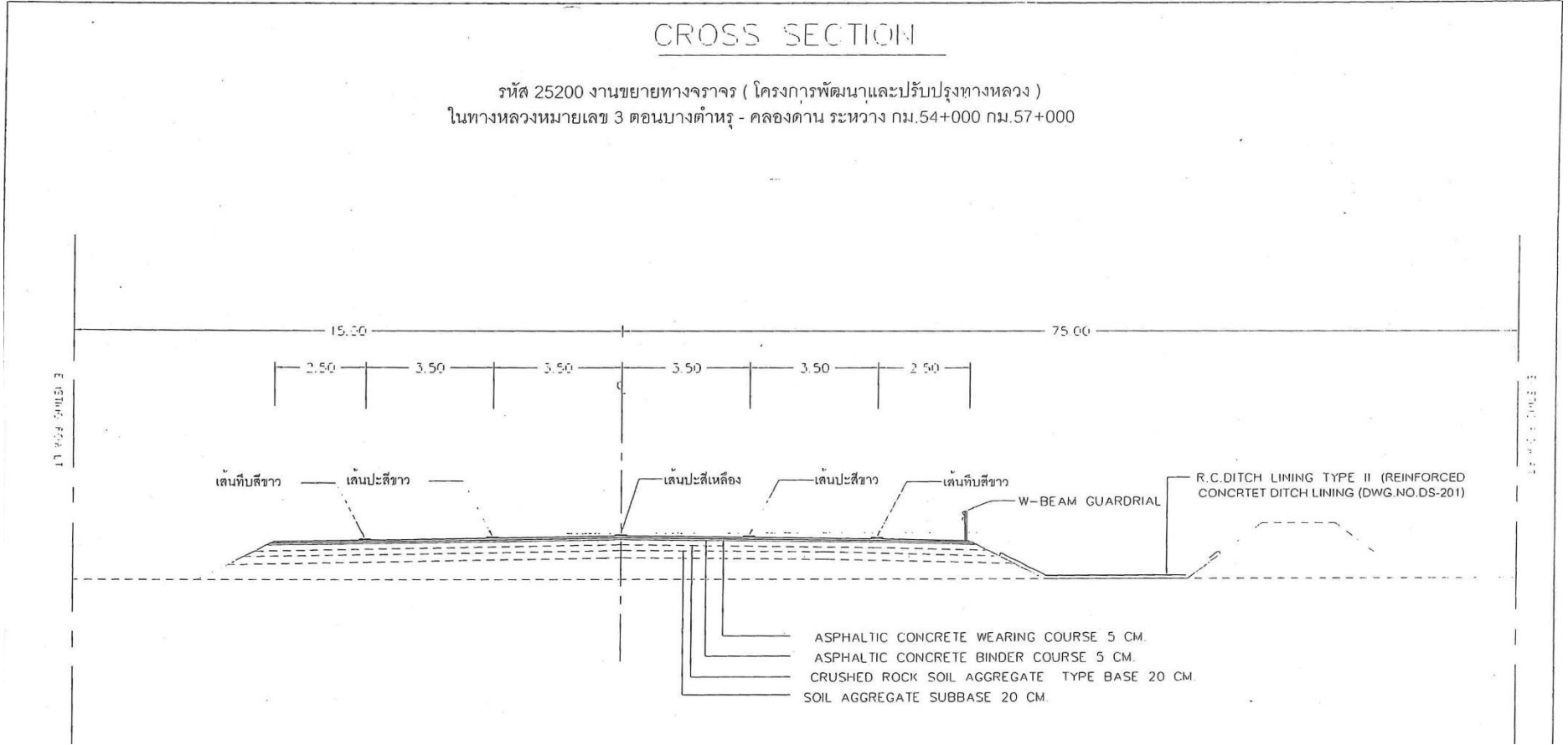
TYPICAL CROSS - SECTION  
ทางหลวงหมายเลข 35 ตอนควบคุม 0301  
ตอน นาโคก - แพรกหนามแดง  
ระหว่าง กม.53+875 - กม.80+826



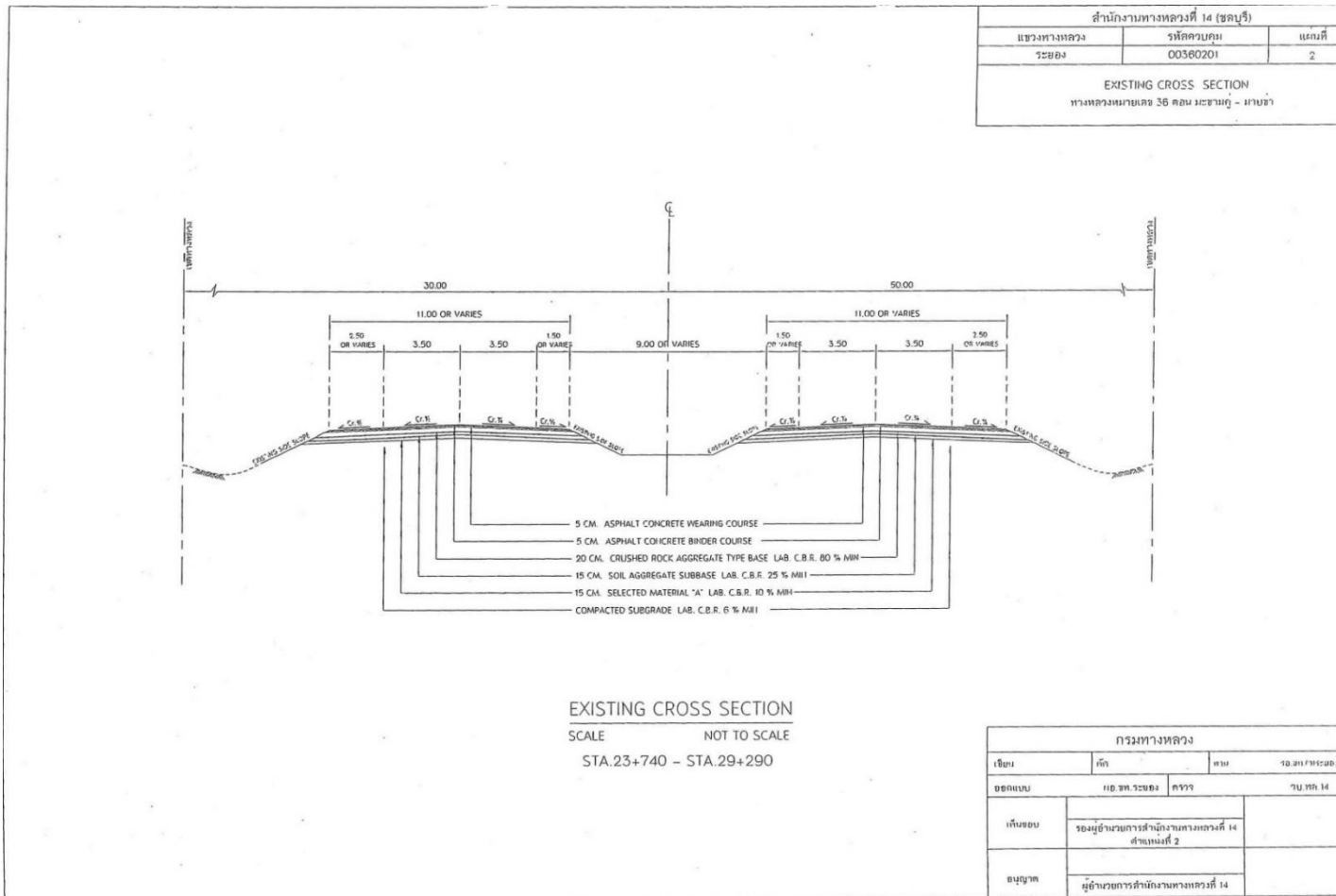
ภาพผนวกที่ ก1แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.35 ตอน 301 ชี้อตอน  
นาโคก - แพรกหนามแดง บริเวณ กม.54+000 - กม. 54+250 (บริเวณสถานีสมุทรสาคร)

## CROSS SECTION

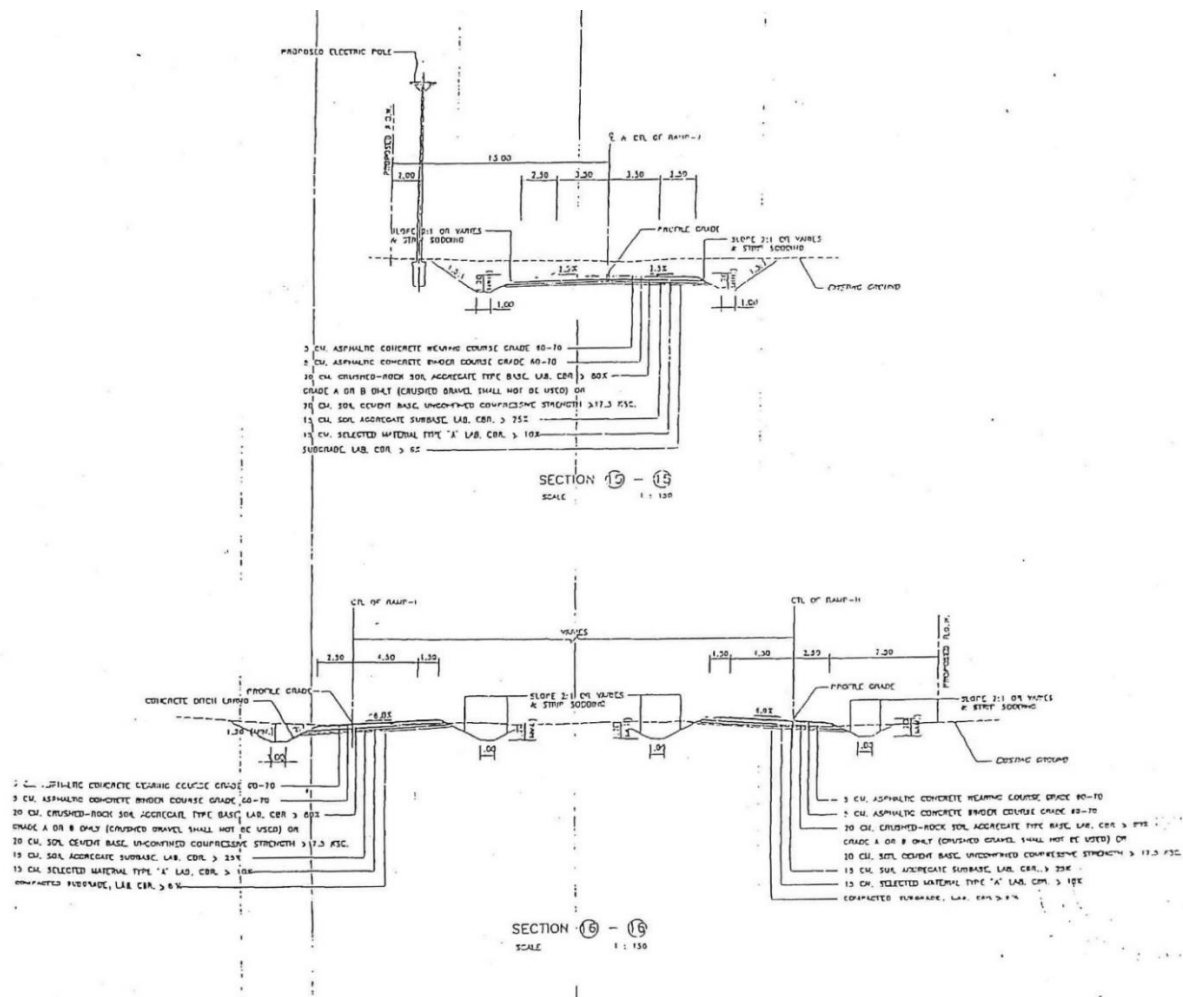
รหัส 25200 งานขยายทางจราจร (โครงการพัฒนาและปรับปรุงทางหลวง)  
 ในทางหลวงหมายเลข 3 ตอนบางตำรุ - คลองด่าน ระหว่าง กม.54+000 กม.57+000



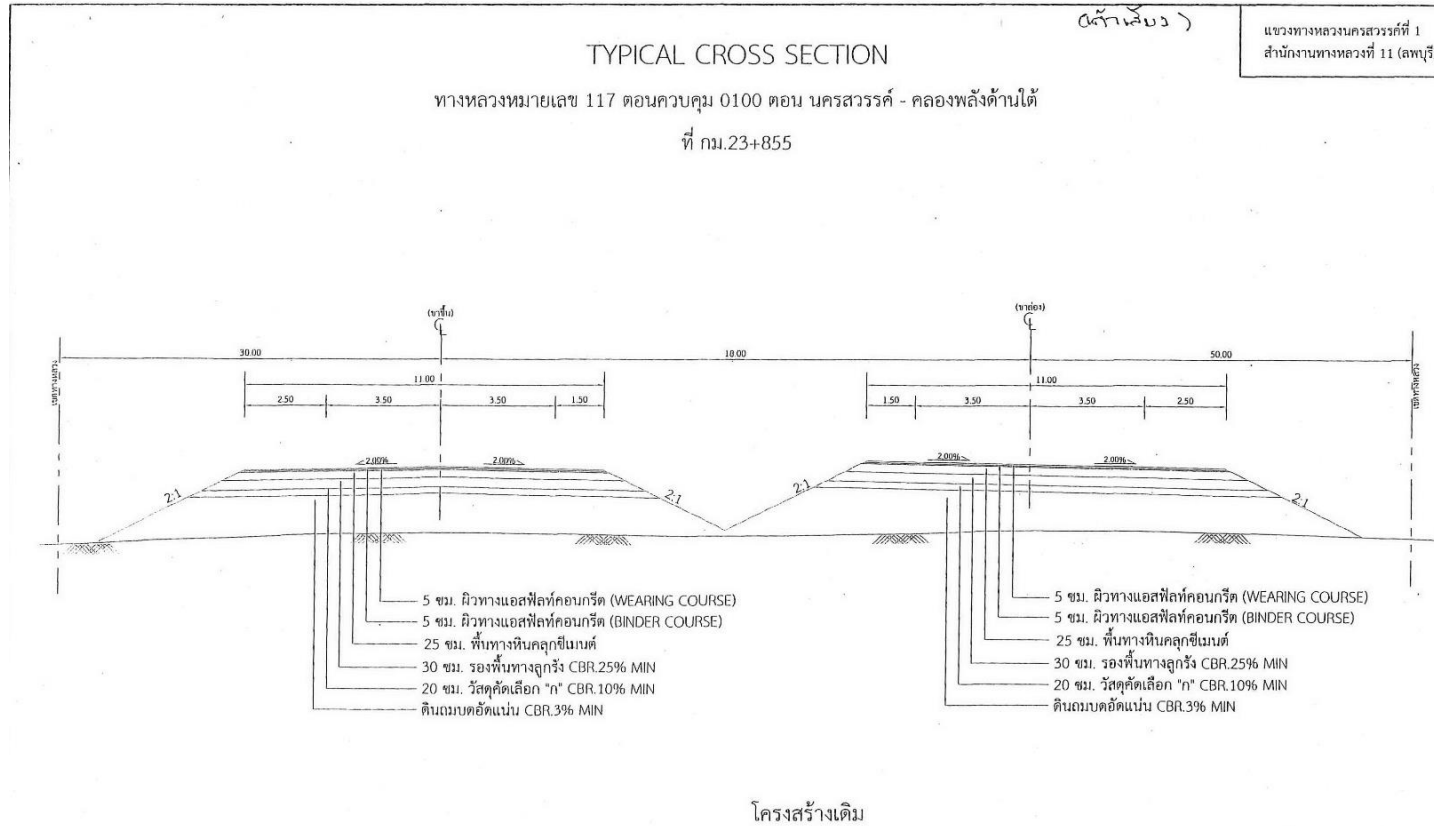
ภาพผนวกที่ ก2แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.3 ตอน 104 ซี่ดถนน  
 บางตำรุ - คลองด่าน บริเวณ กม.54+250 - กม. 54+500 (บริเวณสถานีชลบุรี)



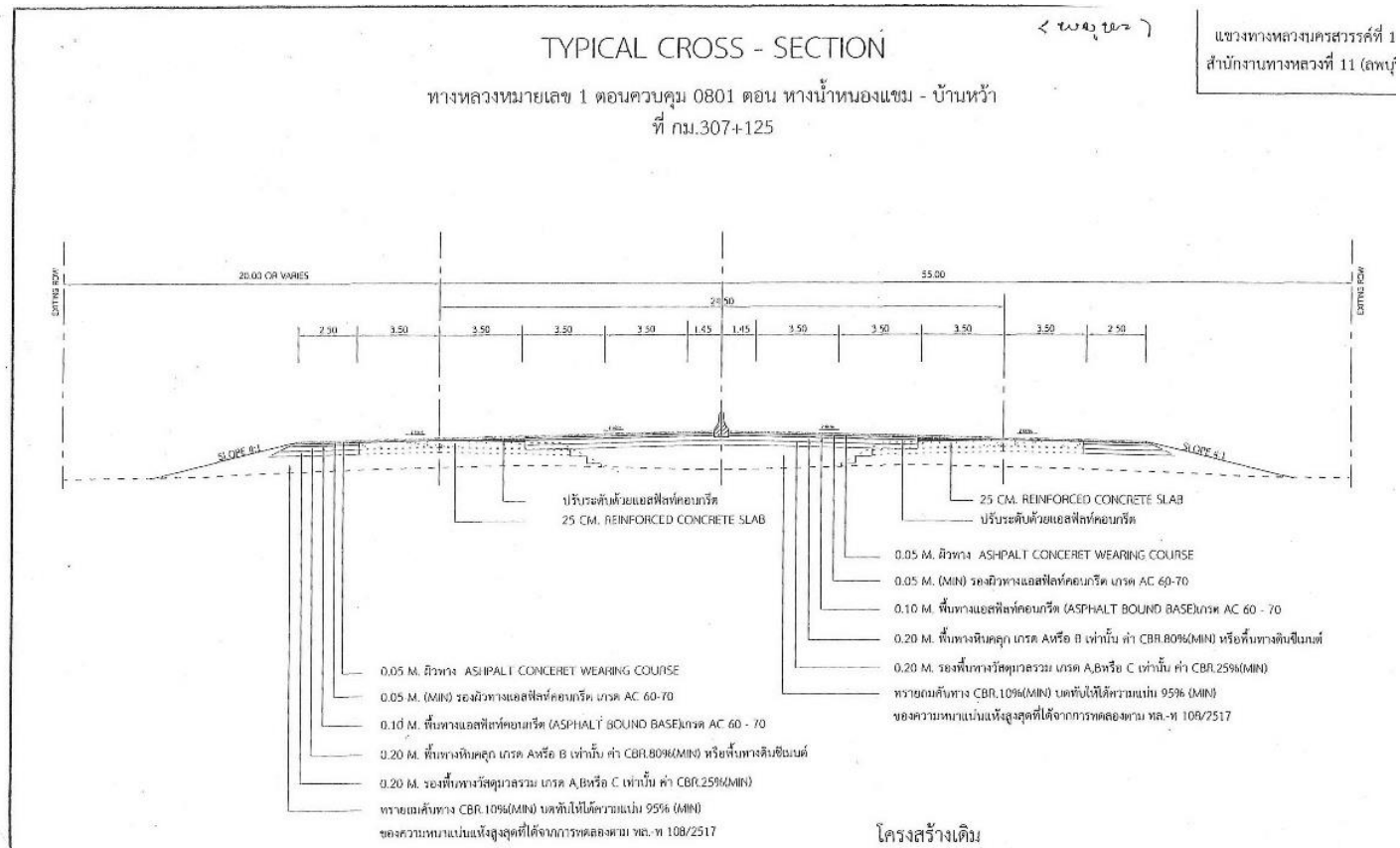
ภาพผนวกที่ ก3แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.36 ตอน 201 ซี่ต่อน  
มะขามคู่ - ฆาบข่า บริเวณ กม.28+575 - กม. 28+825 (บริเวณสถานีระยอง)



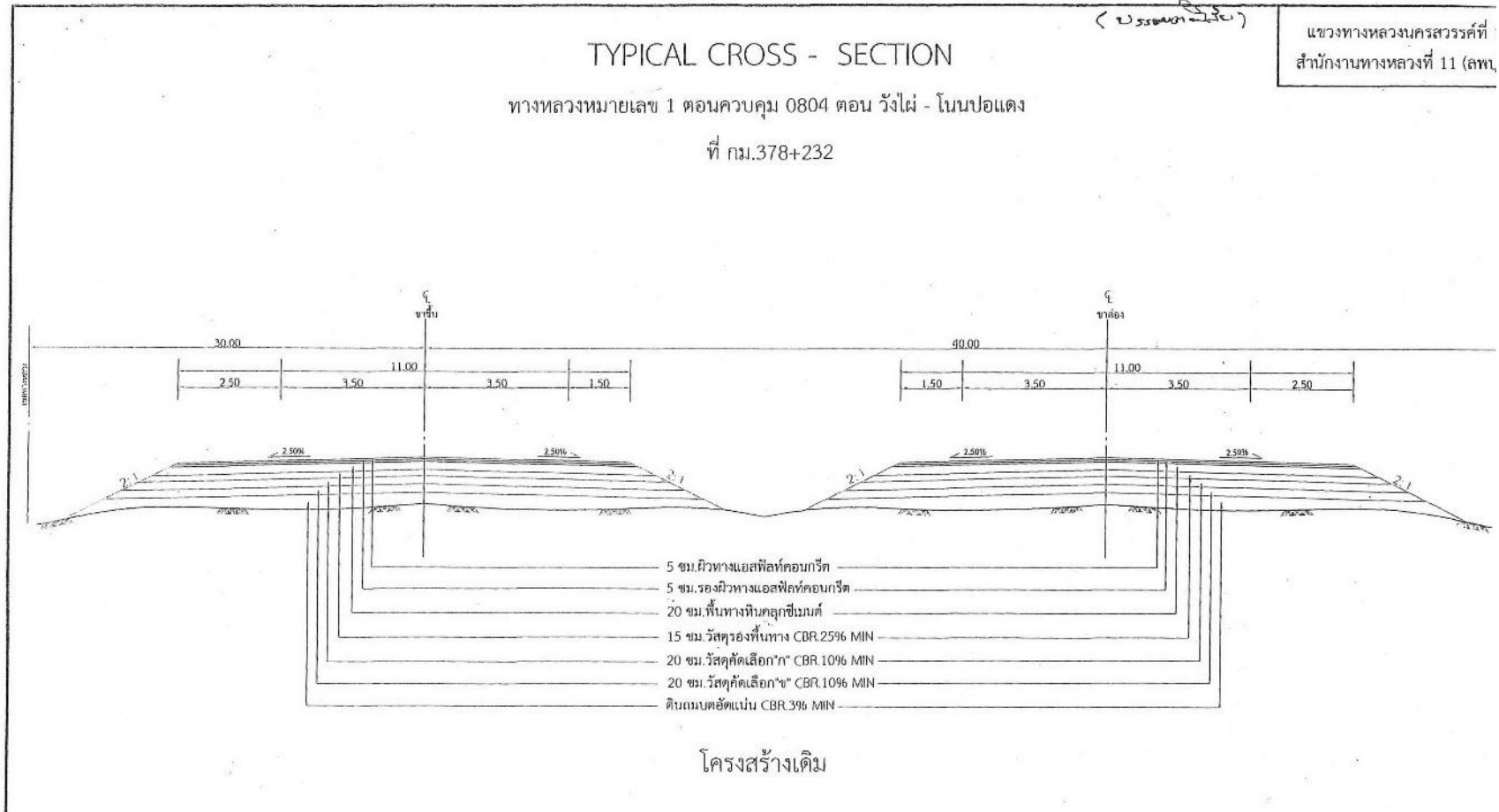
ภาพผนวกที่ ก4แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.331 ตอน 103 ซี่ตอน  
 พันเสด็จนอก - หนองปรือ บริเวณ กม.47+050 - กม. 47+300 (บริเวณสถานีศรีราชา)



ภาพผนวกที่ ก5แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.117 ตอน 100 ซี่อตอน  
นครสวรรค์ - คลองปลั่งด้านใต้ บริเวณ กม.24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีเก้าเอี้ยว)



ภาพผนวกที่ ก6แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 801 ซี่ดตอน  
ทางน้ำหนองแวม - บ้านหว้า บริเวณ กม.308+300 - กม. 308+550 (บริเวณสถานีพยุหะคีรี)



ภาพผนวกที่ ก7แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 804 ซี่อตอน  
วังไผ่ - โนนปอแดง บริเวณ กม.379+950 - กม. 380+200 (บริเวณสถานีบรรพตพิสัย)

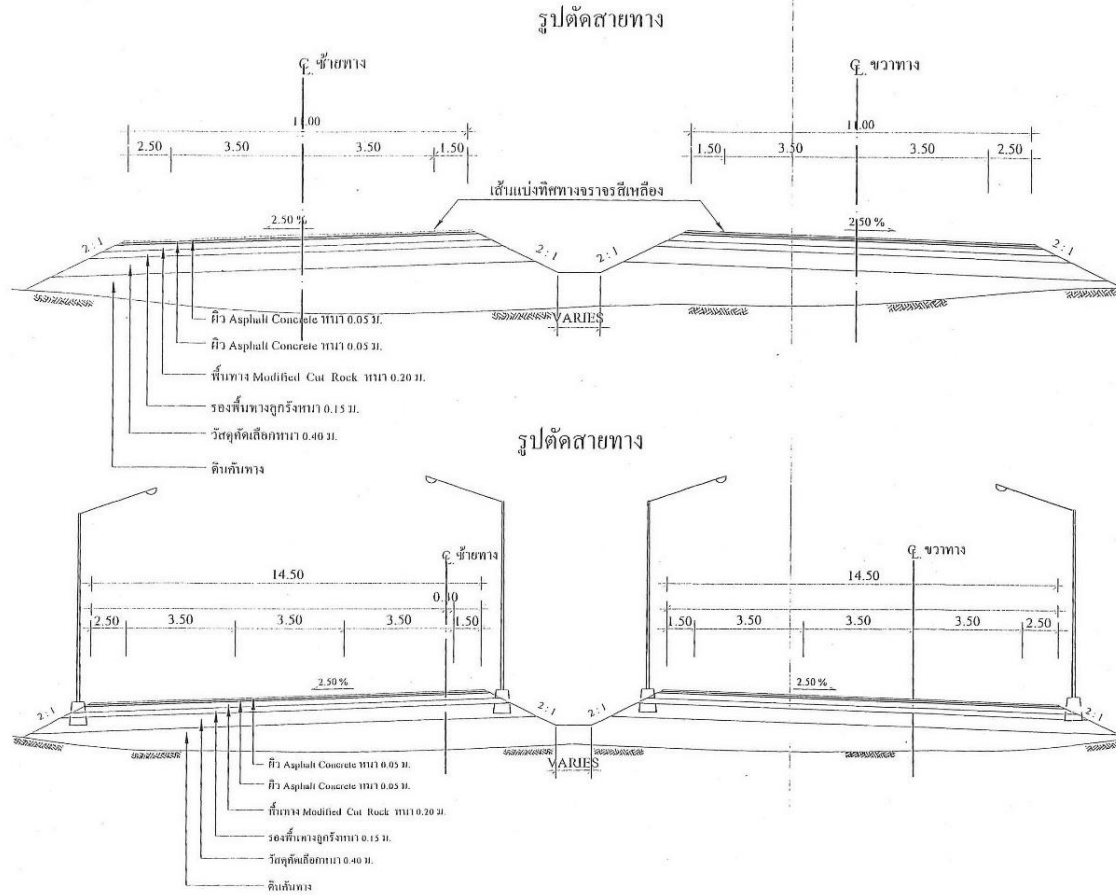
ทางหลวงหมายเลข 1 หมายเลขควบคุม 0901,0902 ตอน โนนโปแตง-ปากดง-นครชุม

ประวัติงานบำรุงทาง

ทางหลวงหมายเลข 1 AC 1300 - 1400  
 ตอน 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  
 ตอน ปากดง-นครชุม  
 กม. 439+400 - กม. 441+600  
 เขตทาง ค้ำซ้าย 30 ม. , ค้ำขวา 40 ม.  
 ADT: 14,998 มาตรฐานทางขึ้น - (10.50/14.50)



ภาพผนวกที่ ก8แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.1 ตอน 902 ซี่ดตอน

ปากดง - นครชุม บริเวณ กม.440+750 - กม. 441+000 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร)

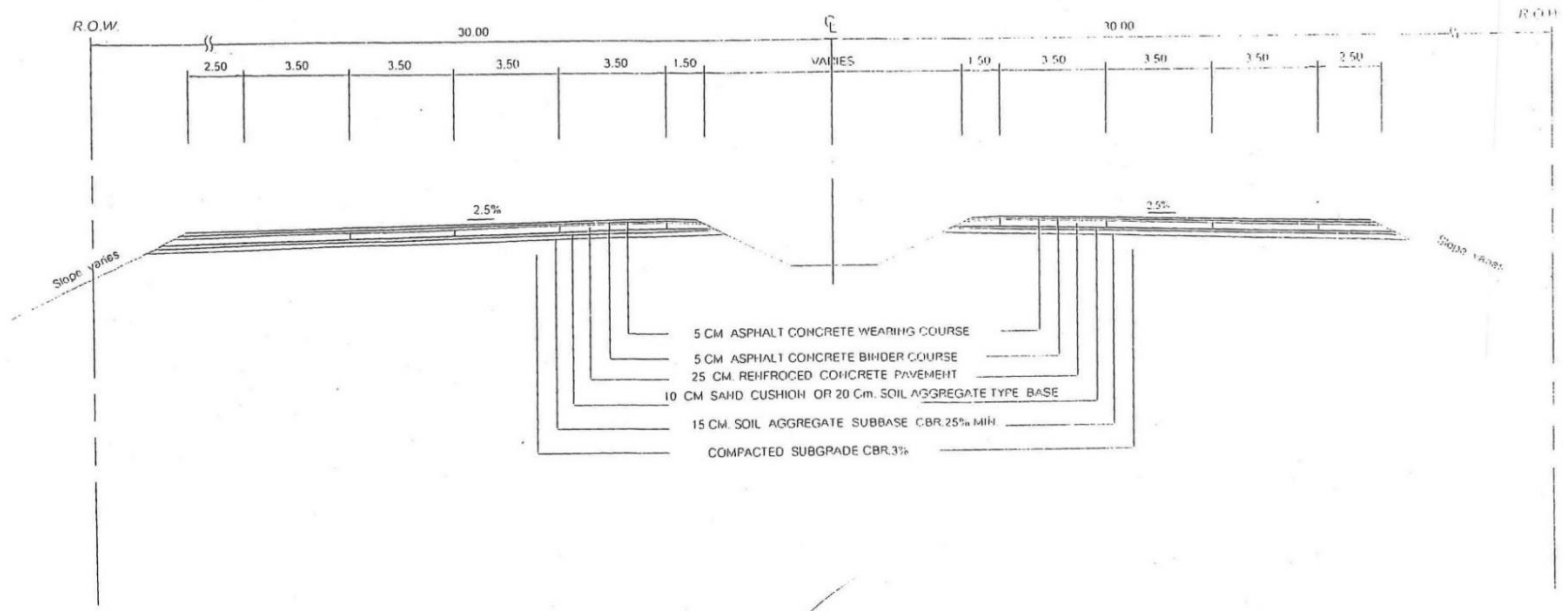
TYPICAL CROSS SECTION

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

แขวงทางหลวงสระบุรี

สำนักงานหลวงที่ 11 (ลพบุรี)

ก่อนปรับปรุง



*อดิศร สดใส*  
เขียน  
(นายอดิศร สดใส)

*สมชาย*  
ตรวจ  
(นายสมชาย สิทธิภาพ) รอ.ขท.(ว) สระบุรี

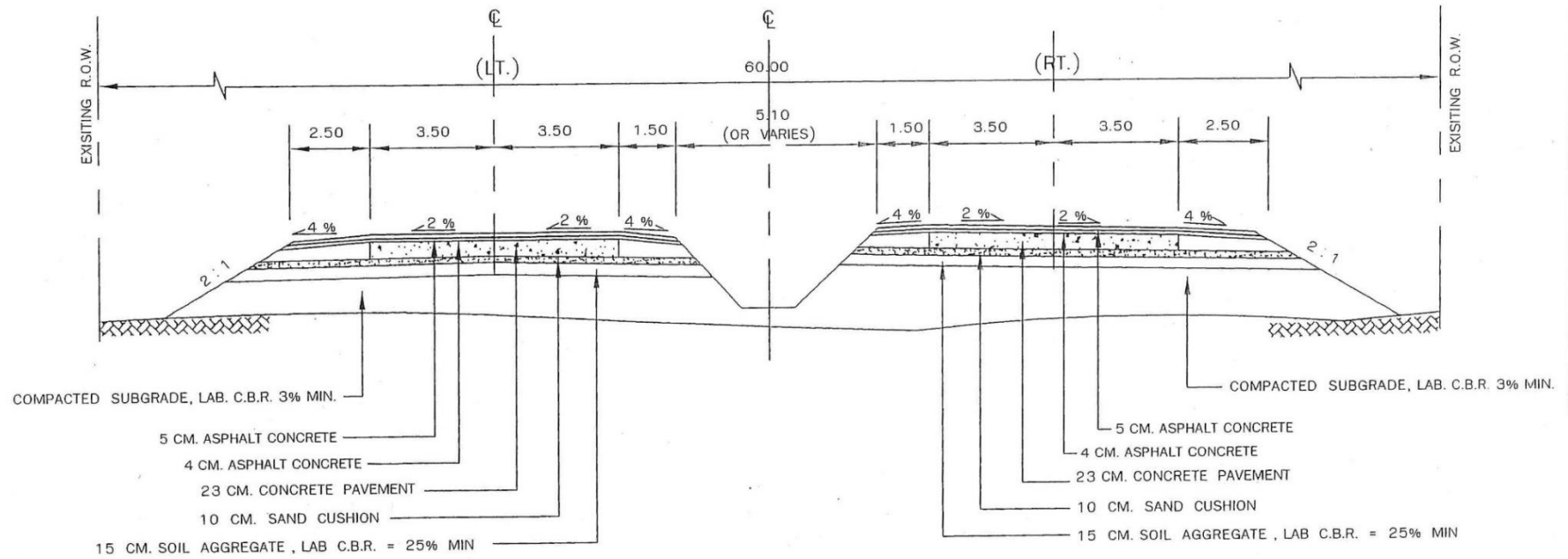
*สมชาย*  
เก็บมอบ  
(นายสมชาย สิทธิภาพ) รอ.ขท.(ว) สระบุรี

ภาพผนวกที่ 9 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

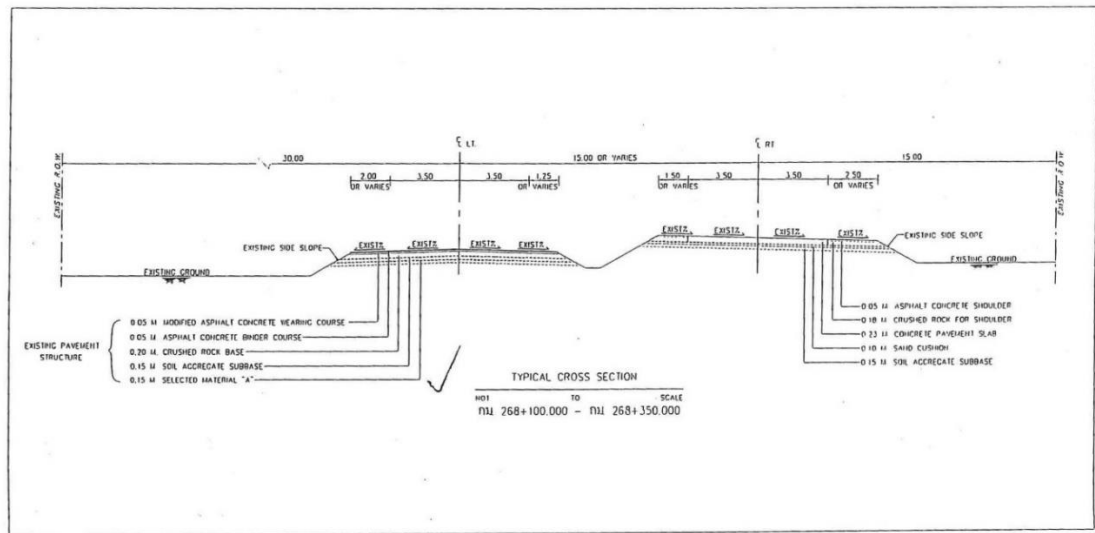


ภาพผนวกที่ ก10แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.2 ตอน 301 ซี่ดตอน

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	ซ้ายซึก	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

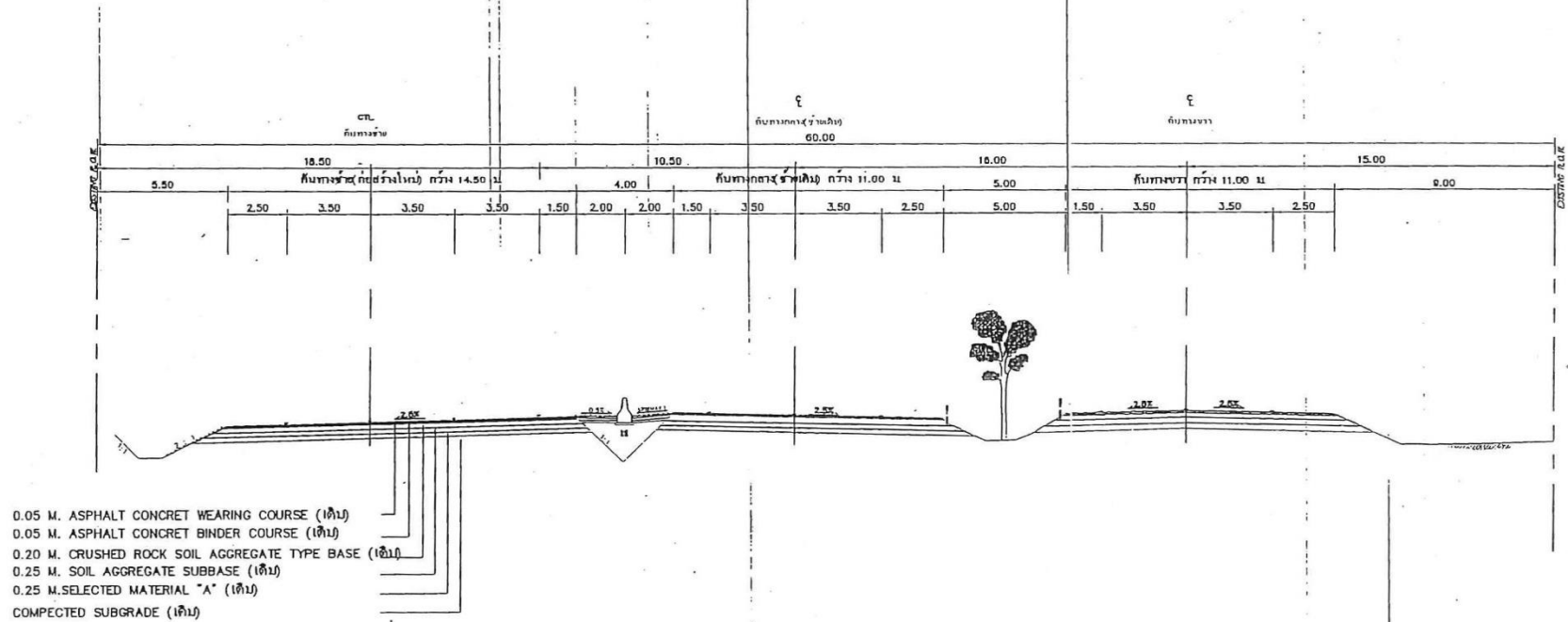


ภาพผนวกที่ ก11แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.2 ตอน 402 ชื่อตอน  
พล - บ้านไผ่ บริเวณ กม.268+100 - กม. 268+350 (บริเวณสถานีพล)



TYPICAL CROSS - SECTION

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

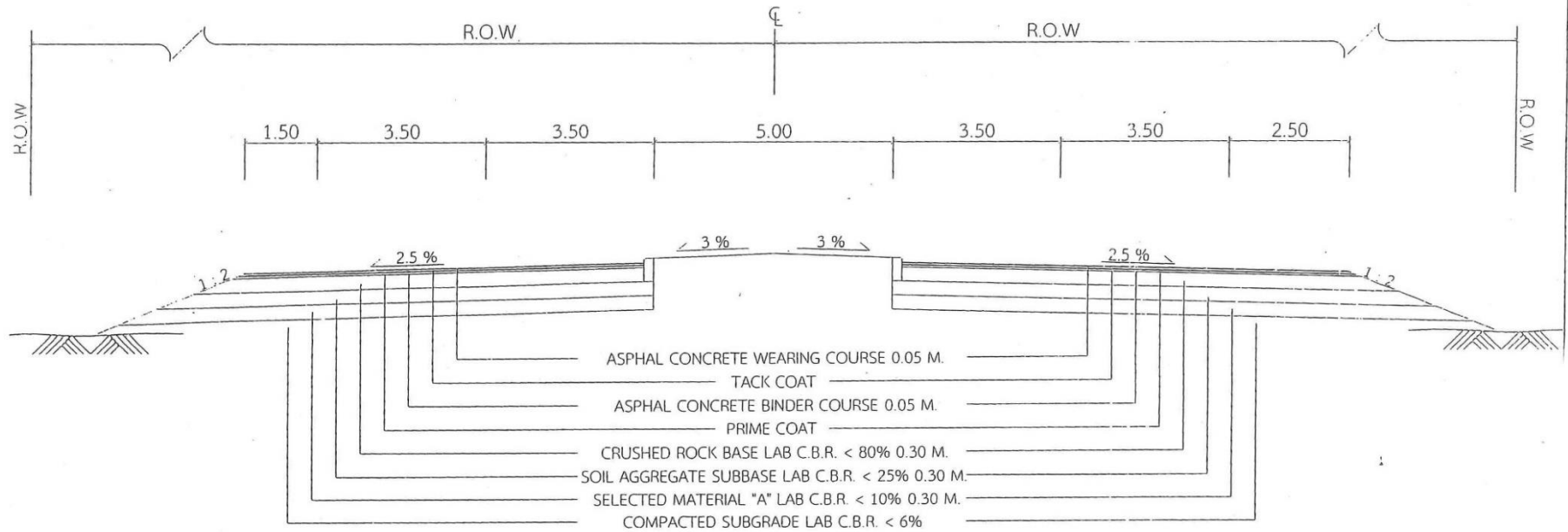


ภาพผนวกที่ ก13 แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.4 ตอน 502 ซี่ดตอน

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

TYPICAL CROSS SECTION

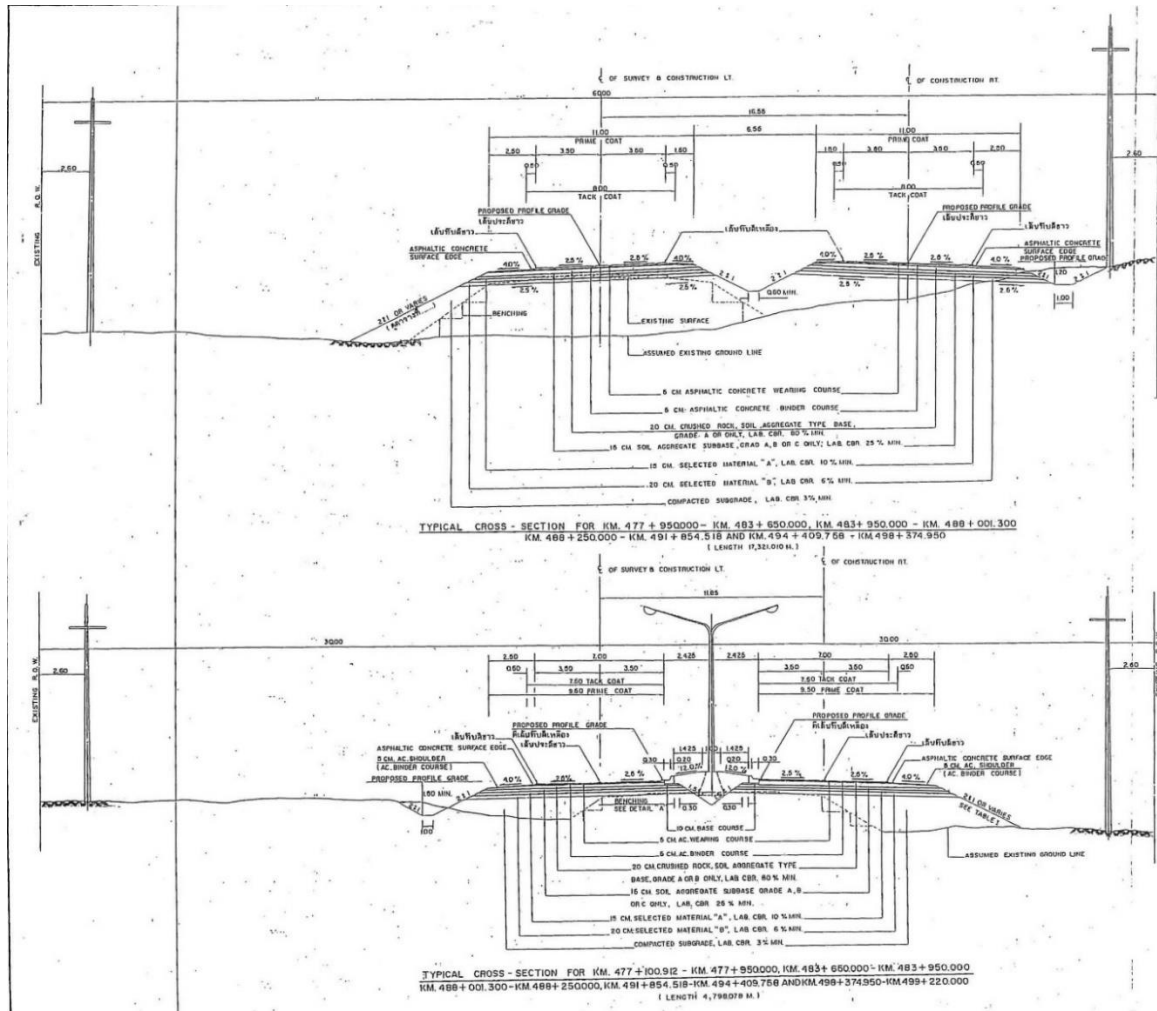
ทางหลวงหมายเลข 323 ตอนควบคุม 0100 ตอน หนองตะแครง - ลูกแก  
ระหว่าง กม.3+540 - 18+592



ภาพผนวกที่ ก14แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.323 ตอน 100 ซี่ดถนน

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





รูปพรรณสัณฐาน	
ชนิดงาน	รายละเอียด
TYPICAL CROSS-SECTION	
ขนาดหน้าตัดถนน 4 ช่องจราจร - 3 เมตรช่องทาง	

การตรวจทาน	
ชื่อ	ตำแหน่ง
นาย ก. ก.	นาย ข. ข.
นาย ค. ค.	นาย ง. ง.
นาย จ. จ.	นาย ฉ. ฉ.
นาย ช. ช.	นาย ซ. ซ.
นาย ฅ. ฅ.	นาย ฐ. ฐ.
นาย ด. ด.	นาย ต. ต.
นาย ถ. ถ.	นาย ท. ท.
นาย ธ. ธ.	นาย ด. ด.
นาย น. น.	นาย บ. บ.
นาย ป. ป.	นาย พ. พ.
นาย ฟ. ฟ.	นาย ภ. ภ.
นาย บ. บ.	นาย ปร. ปร.

ภาพผนวกที่ ก16แบบภาพตัดขวาง (Typical Cross-Section) ของ ทล.4 ตอน 703 ซี่ดถนน  
วังครก - เสียบญวน บริเวณ กม.473+500 - กม. 473+750 (บริเวณสถานีท่าแซะ)

ภาคผนวก  
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

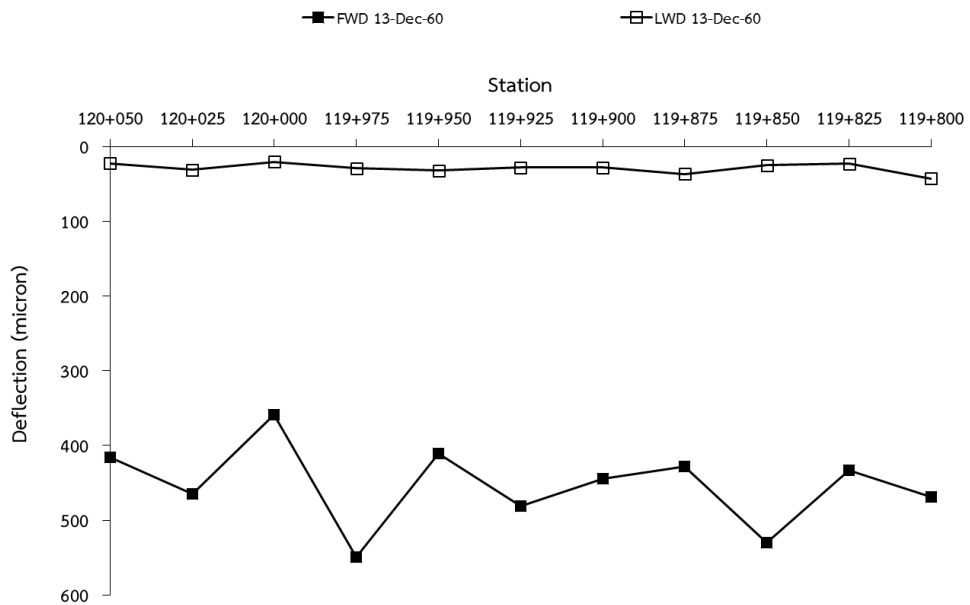
ตารางที่ ข5(ต่อ)

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

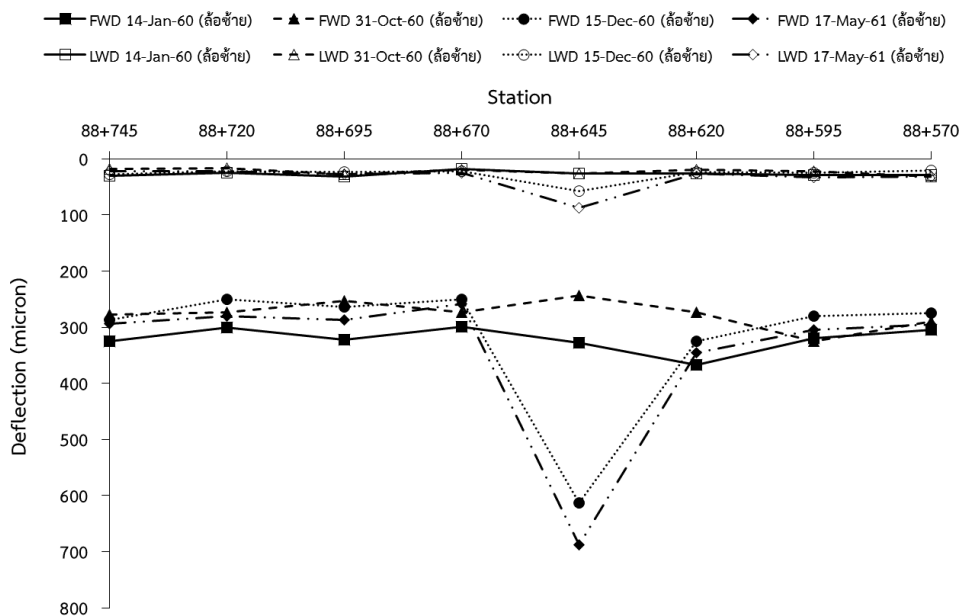
ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของชั้นโครงสร้างทางที่ได้จากการทดสอบ  
เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)  
และเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD)

# 1. ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของพื้นที่ศึกษาภาคกลาง

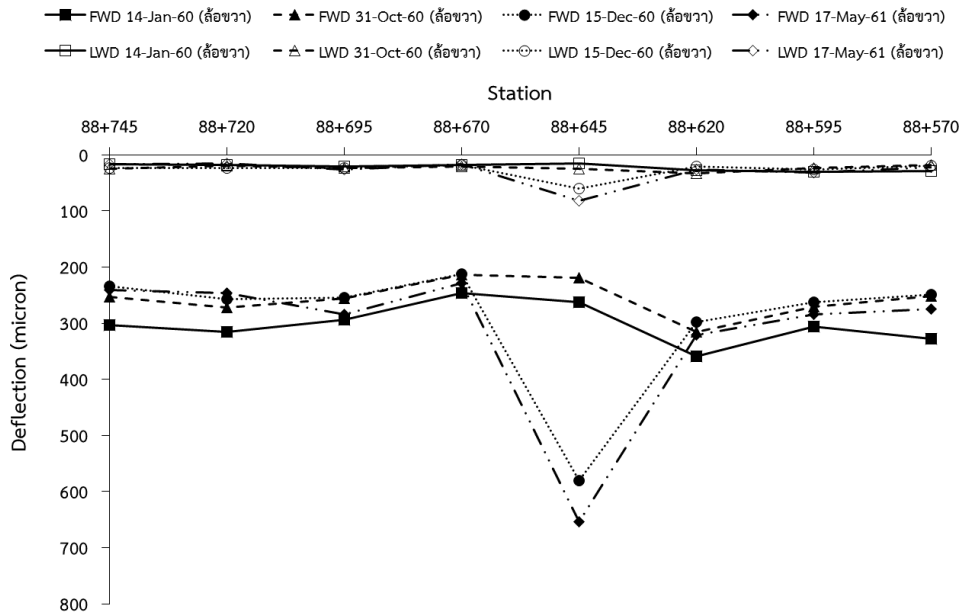


ภาพผนวกที่ ค

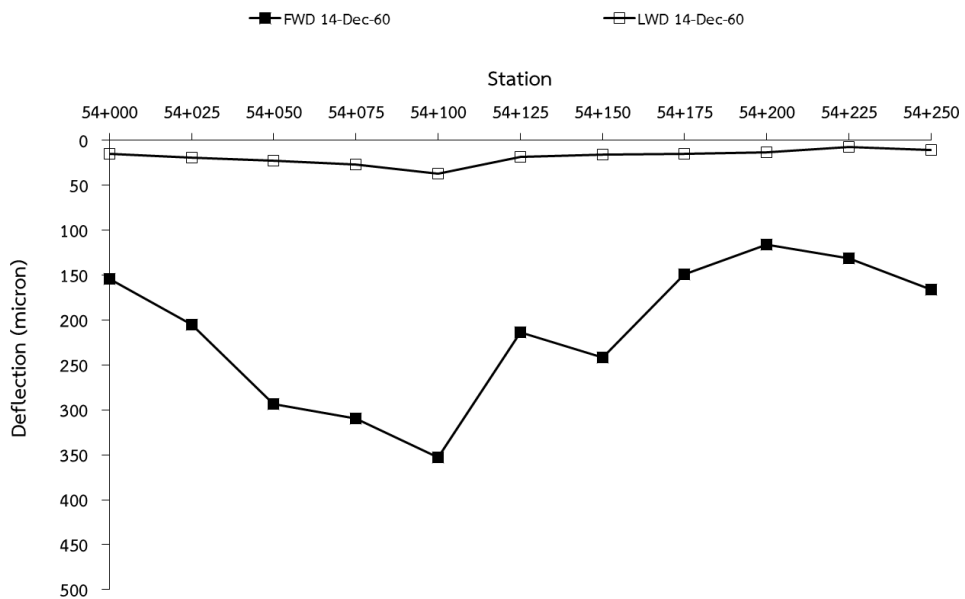
ภาพผนวกที่ ค1 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.32 ตอน 400 ซี่ตอน  
 โพนางด้าออก - ท่าฉนวน บริเวณ กม.119+800 - กม. 120+050 (บริเวณสถานีสรรรพยา)



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

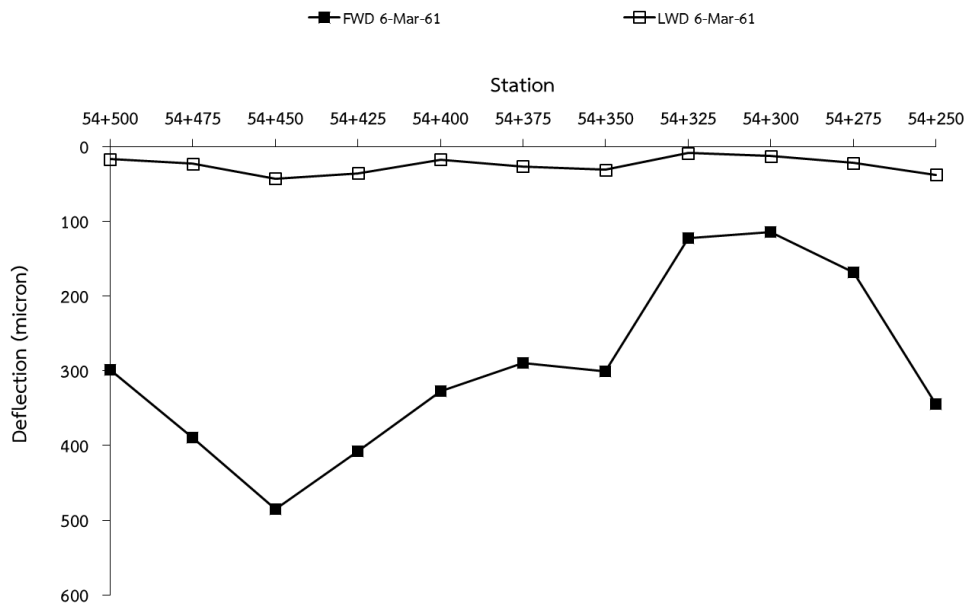


ภาพผนวกที่ ค3 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 302 ซี่งตอน  
คลองอี่จาง - หลุมดิน บริเวณ กม.88+570 - กม. 88+745 (บริเวณสถานีโพธาราม ล้อขวา)

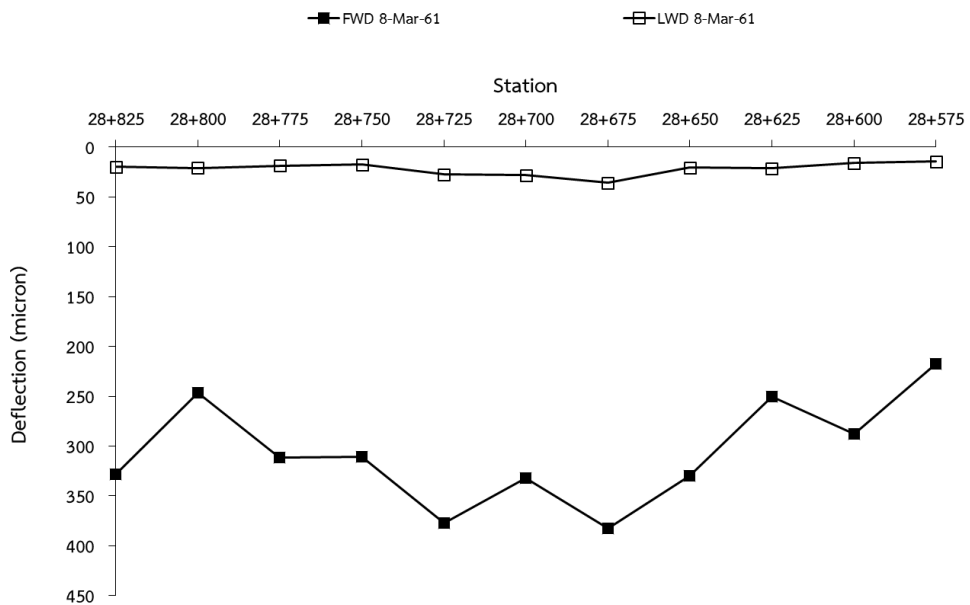


ภาพผนวกที่ ค4 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.35 ตอน 301 ซี่งตอน  
นาโคก - แพรกหนามแดง บริเวณ กม.54+000 - กม. 54+250 (บริเวณสถานีสมุทรสาคร)

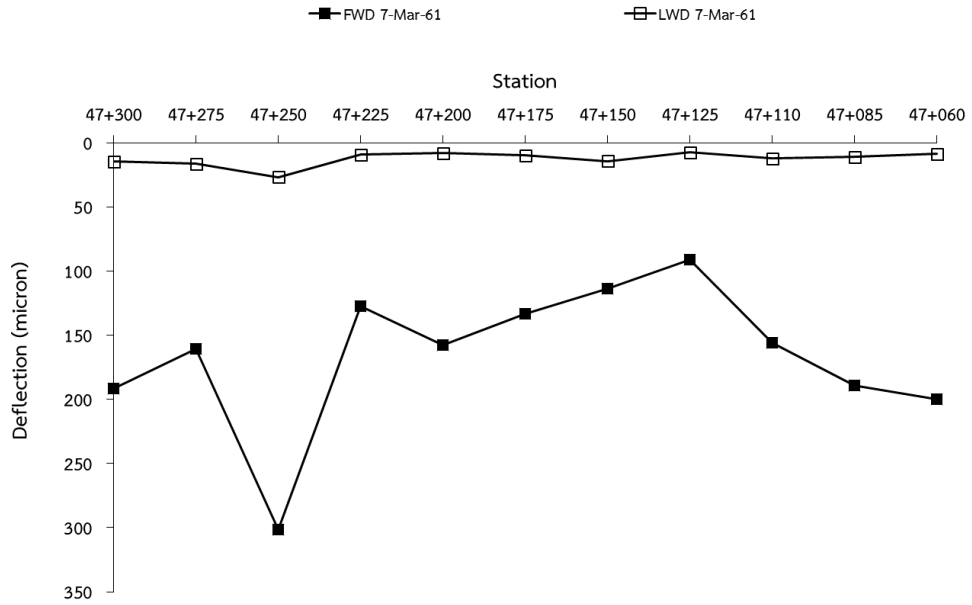
## 2. ค่าการแอ่นตัว (Deflection)ของพื้นที่ศึกษาภาคตะวันออก



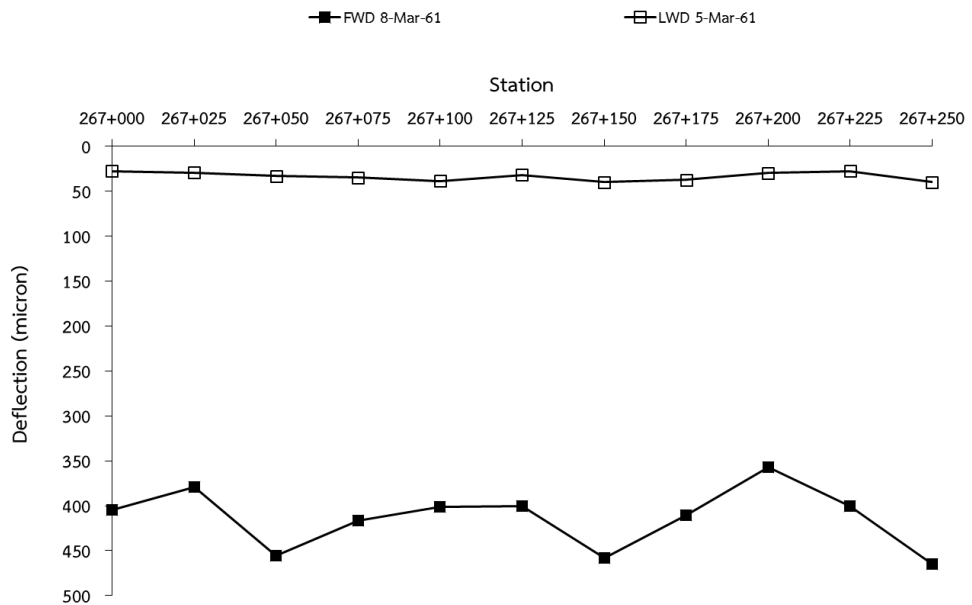
ภาพผนวกที่ ค5ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.3 ตอน 104 ซี่ตอน  
บางตำหรุ – คลองด่าน บริเวณ กม.54+250 - กม. 54+500 (บริเวณสถานีชลบุรี)



ภาพผนวกที่ ค6ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.36 ตอน 201 ซี่ตอน  
มะขามคู่ – มาบข่า บริเวณ กม.28+575 - กม. 28+825 (บริเวณสถานีระยอง)

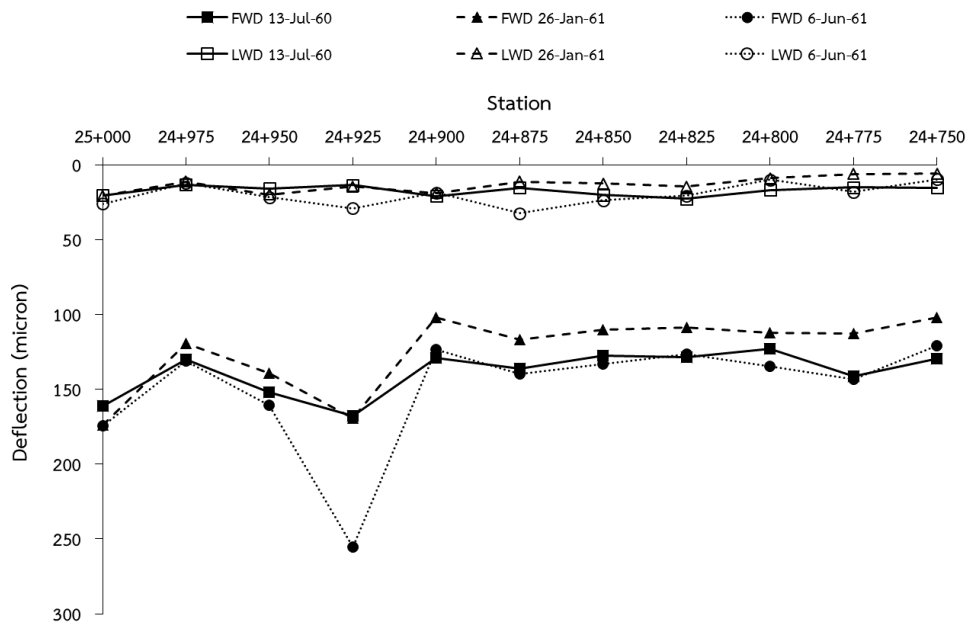


ภาพผนวกที่ ค7 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.331 ตอน 103 ซี่ตอ  
 พันเสด็จนอก - หนองปรือ บริเวณ กม.47+050 - กม. 47+300 (บริเวณสถานีศรีราชา)

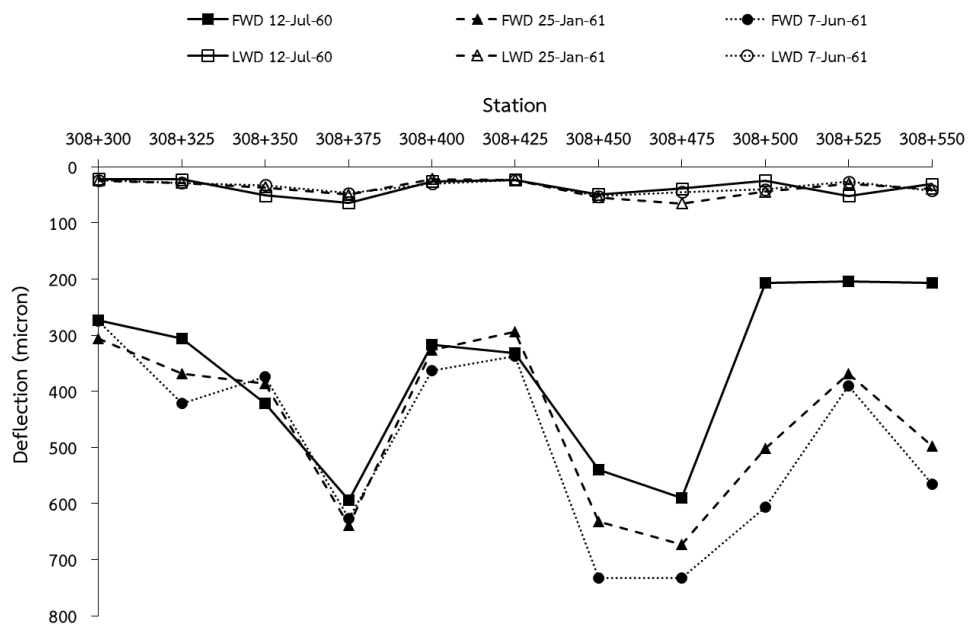


ภาพผนวกที่ ค8 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.33 ตอน 701 ซี่ตอ  
 พระปรัง - โนนจิก บริเวณ กม.267+000 - กม. 267+250 (บริเวณสถานีวัฒนานคร)

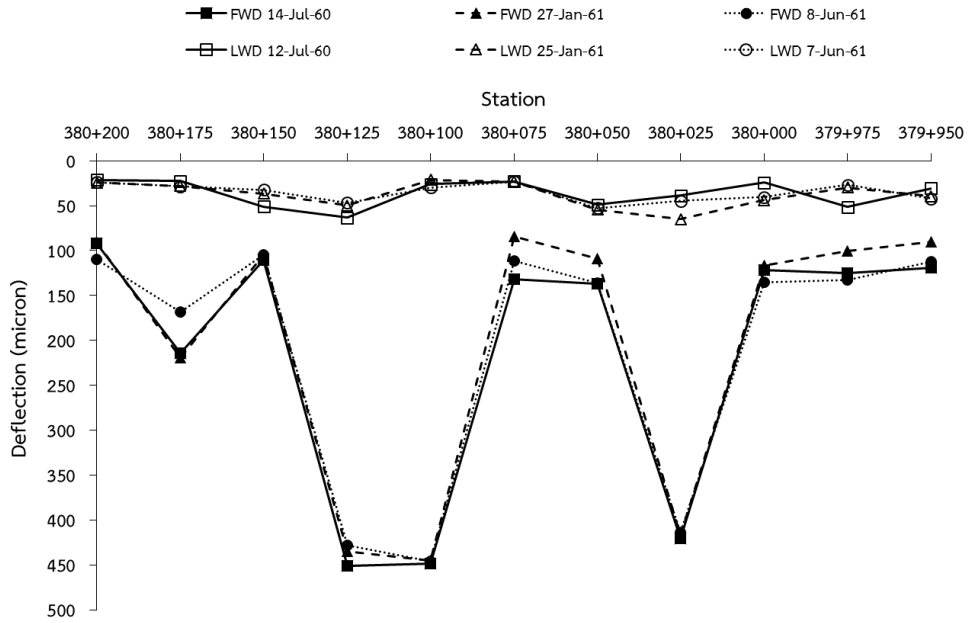
### 3. ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของพื้นที่ศึกษาภาคเหนือตอนล่าง



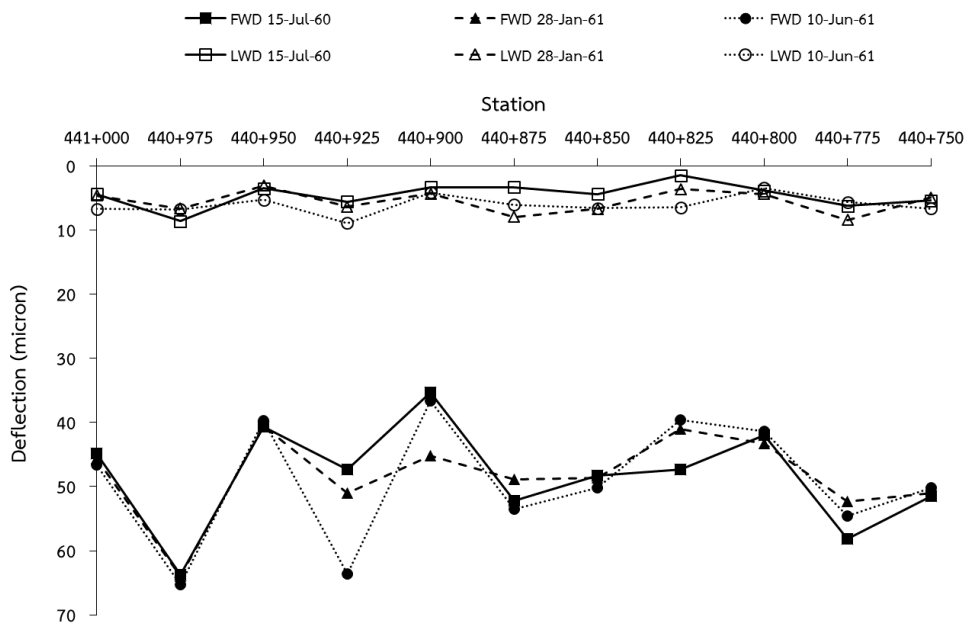
ภาพผนวกที่ ๙ ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.117 ตอน 100 ซี่ตอ  
นครสวรรค์ – คลองพลังด้านใต้ บริเวณ กม.24+750 - กม. 25+000 (บริเวณสถานีเก้าเสี้ยว)



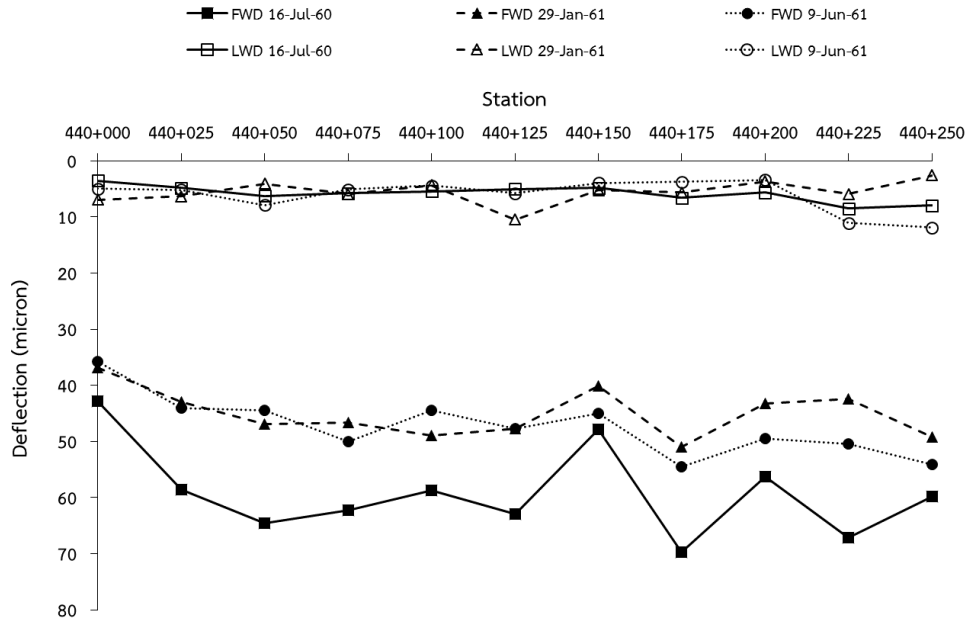
ภาพผนวกที่ ๑๐ ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 801 ซี่ตอ  
ทางน้ำหนองแวม – บ้านห้วย บริเวณ กม.308+300 - กม. 308+550 (บริเวณสถานีพยุหะคีรี)



ภาพผนวกที่ ค11ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 804 ซี่ตอม  
วังไผ่ - โนนปอแดง บริเวณ กม.379+950 - กม. 380+200 (บริเวณสถานีบรรพตพิสัย)

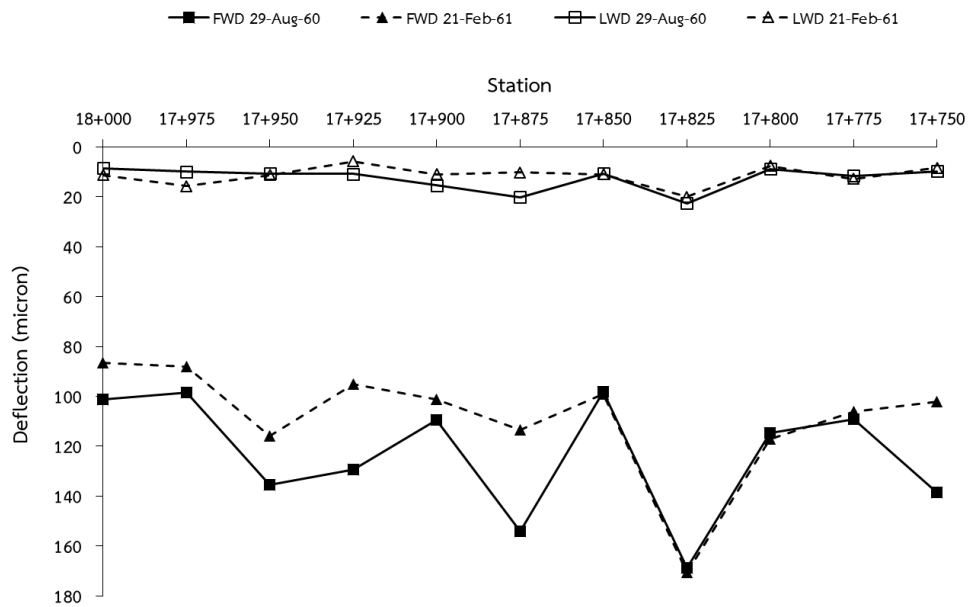


ภาพผนวกที่ ค12ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 902 ซี่ตอม  
ปากดง - นครชุม บริเวณ กม.440+750 - กม. 441+000 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร ขาเข้า)

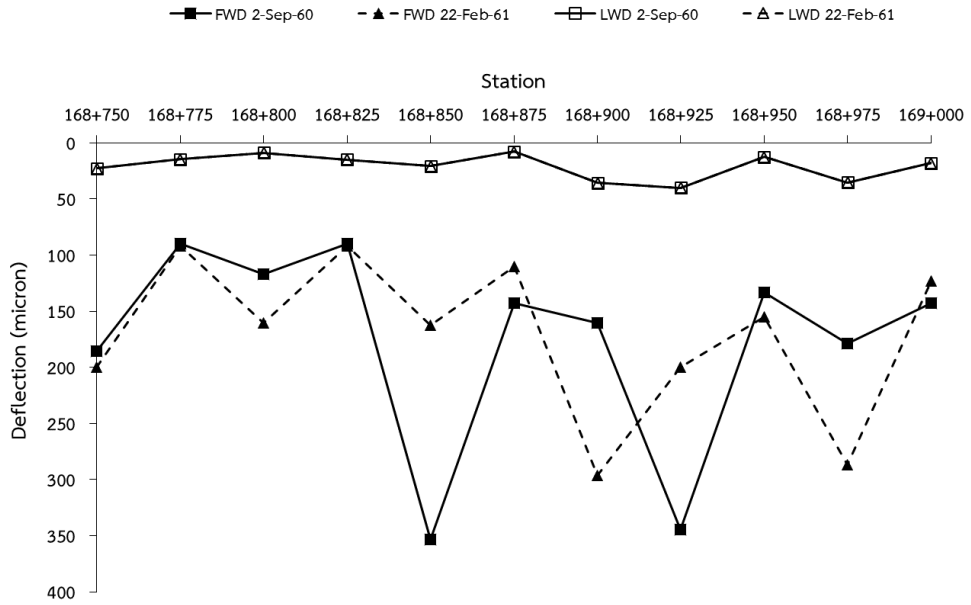


ภาพผนวกที่ ค13 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.1 ตอน 902 ซี่ต่อน  
ปากดง - นครชุม บริเวณ กม.440+000 - กม. 441+250 (บริเวณสถานีกำแพงเพชร ขาออก)

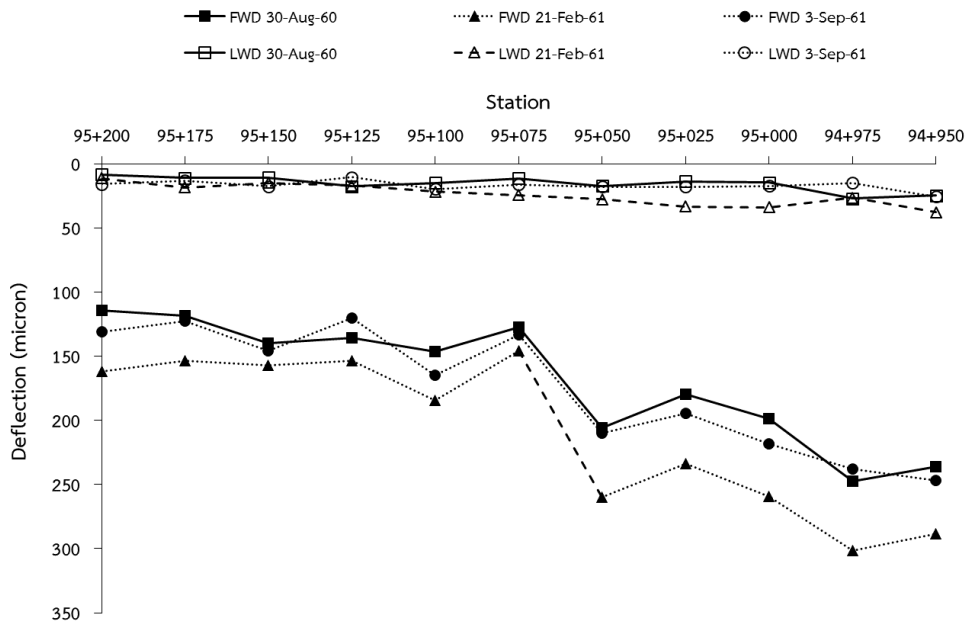
#### 4. ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของพื้นที่ศึกษาภาคอีสาน



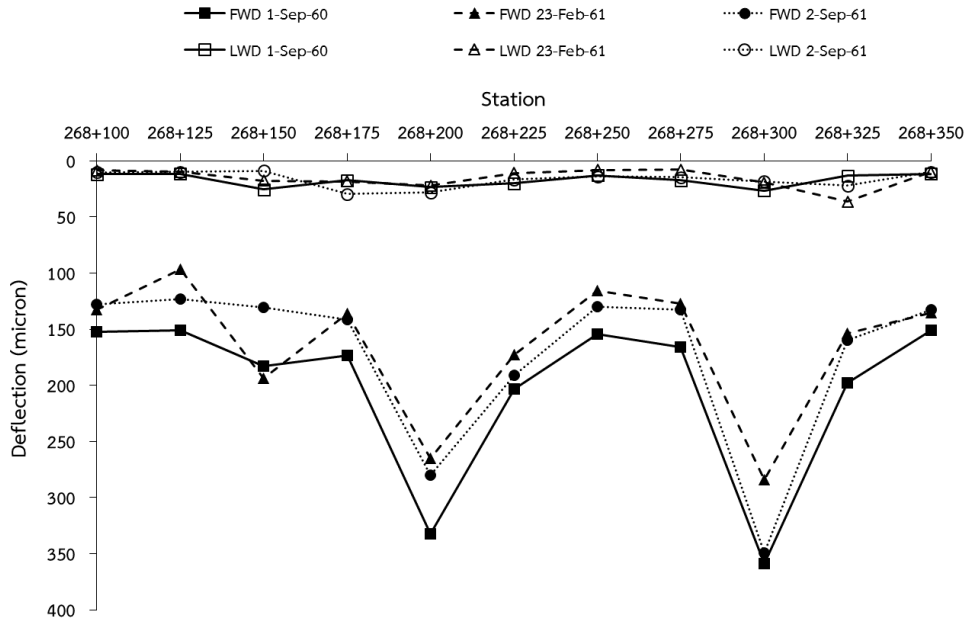
ภาพผนวกที่ ค14 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 102 ซี่ต่อน  
ตาลเดี่ยว - ชับบอน บริเวณ กม.17+750 - กม. 18+000 (บริเวณสถานีแก่งคอย)



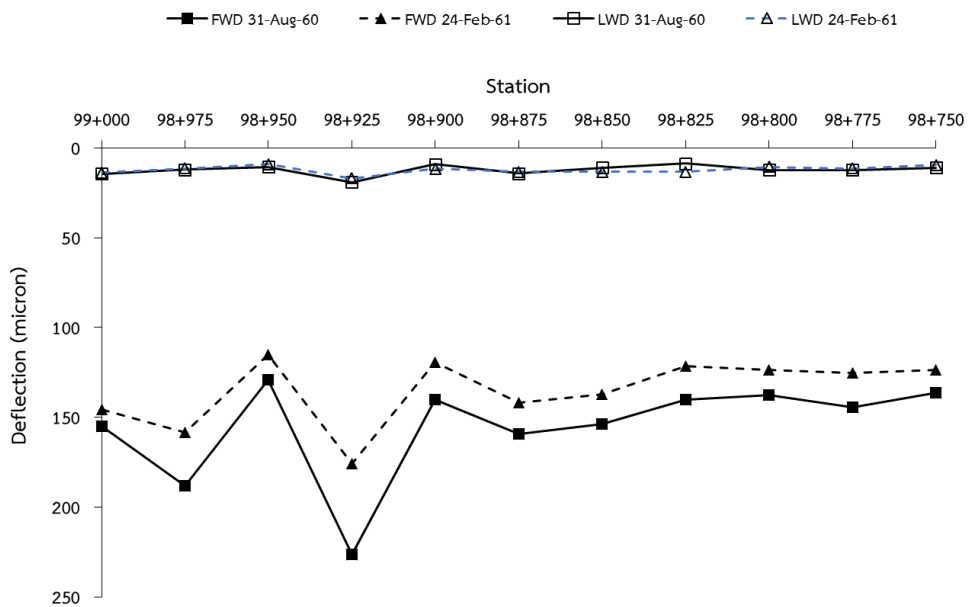
ภาพผนวกที่ ค15ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 301 ซี่ต่อน นครราชสีมา - ดอนหวาย บริเวณ กม.168+750 - กม. 169+000 (บริเวณสถานีโนนสูง)



ภาพผนวกที่ ค16ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 202 ซี่ต่อน บ่อทอง - มอจะบก บริเวณ กม.94+950 - กม. 95+200 (บริเวณสถานีสี่คิ้ว)

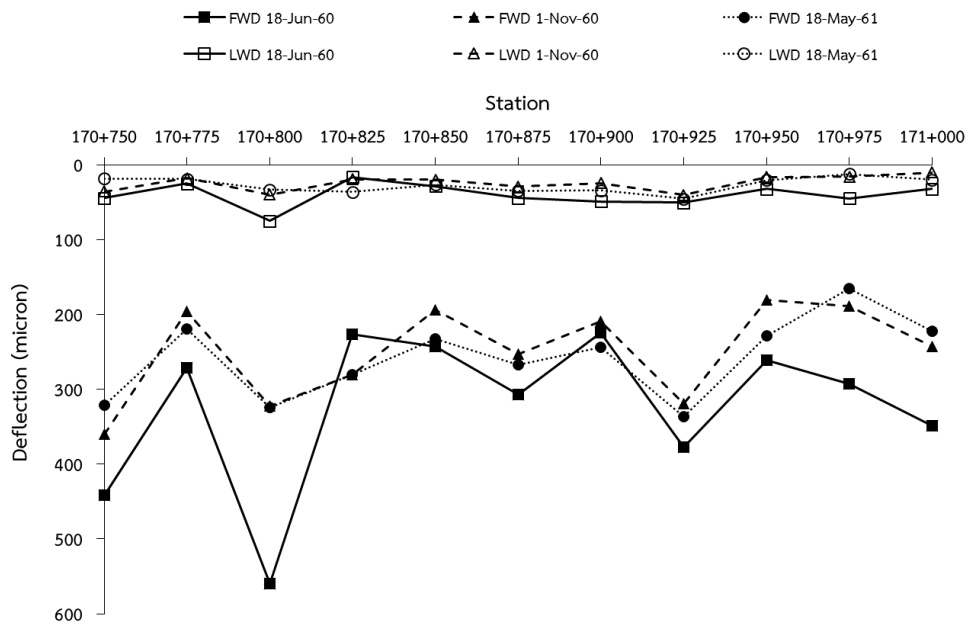


ภาพผนวกที่ ค17ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.2 ตอน 402 ซี่ดถนน  
พล - บ้านไผ่ บริเวณ กม.268+100 - กม. 268+350 (บริเวณสถานีพล)

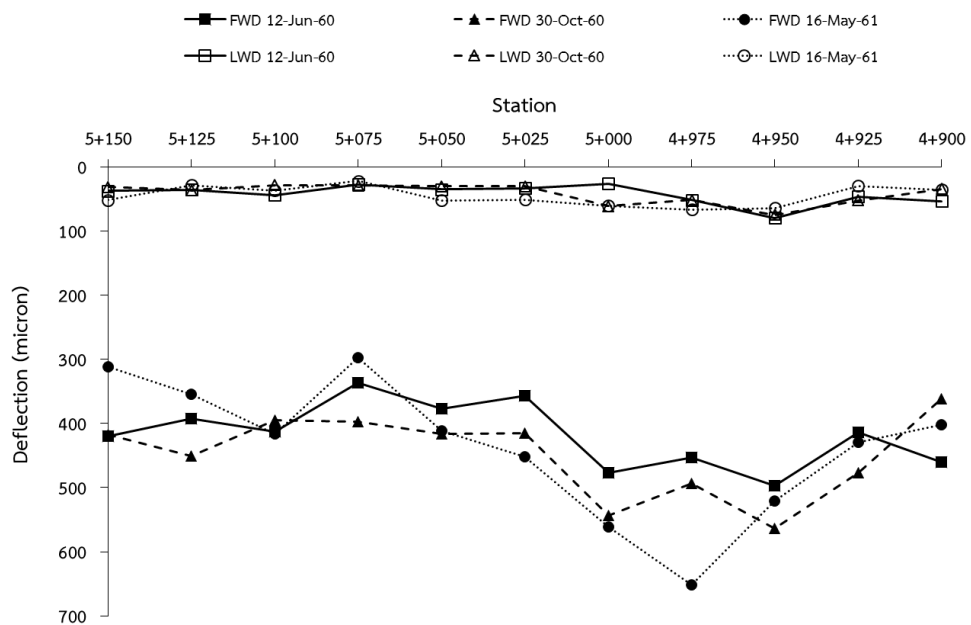


ภาพผนวกที่ ค18ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.24 ตอน 302 ซี่ดถนน  
หนองกี้ - นางรอง บริเวณ กม.98+750 - กม. 99+000 (บริเวณสถานีหนองกี้)

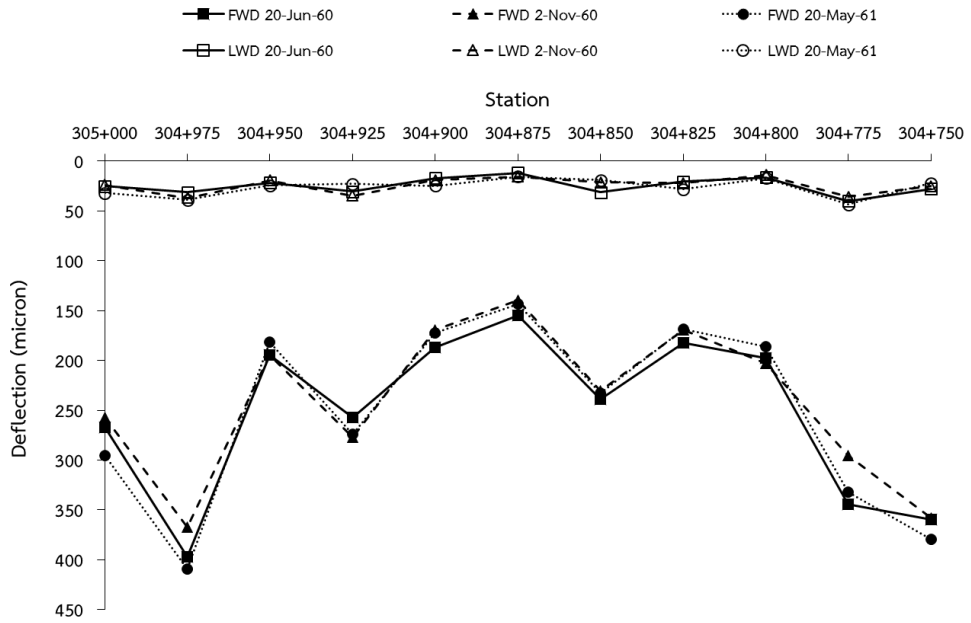
## 5. ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของพื้นที่ศึกษาภาคใต้



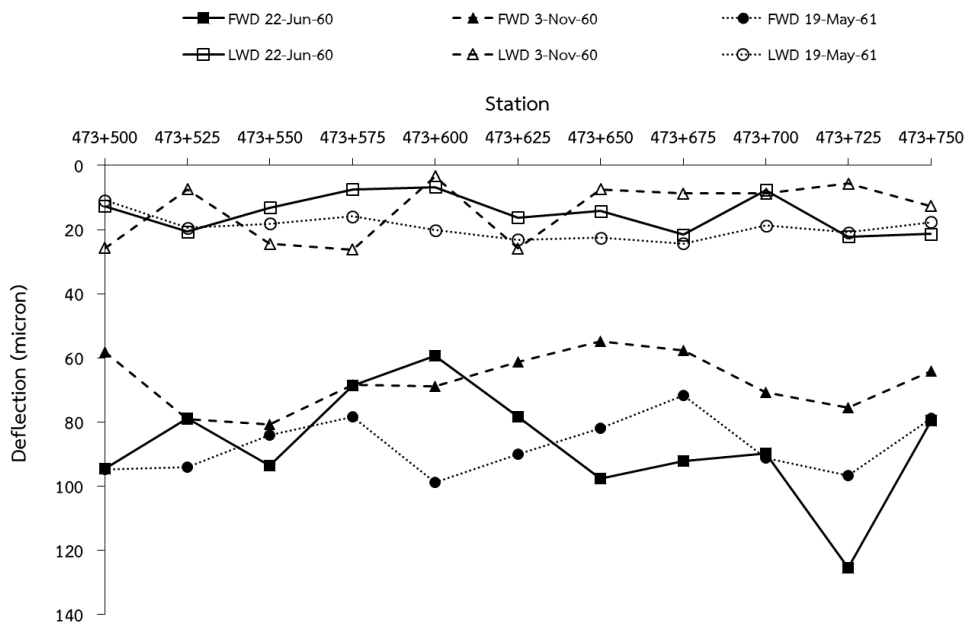
ภาพผนวกที่ ค19 ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของ ทล.4 ตอน 502 ซี่ดตอน  
 เขาวัง – สระพระ บริเวณ กม.170+750 - กม. 171+000 (บริเวณสถานีท่ามาย)



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



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



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

**SOLUTION**  
**MISSION**  
**ACTION**  
**RELATION**  
**TRUST** | **D**  **H** |  
**THROUGH**  
**RESEARCH** |