



รายงานฉบับที่ วพ. 322

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง

REPORT NO. RD. 322 BUREAU OF ROAD RESEARCH AND DEVELOPMENT

---

## โครงการวิเคราะห์สมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างทางหลวง

โดย

อรรถพล หายทุกข์

ดร.หฤทัศน์ พ้อบาล

และ

ดร.อัคคพัฒน์ สว่างสุริย์

---

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

DEPARTMENT OF HIGHWAYS, MINISTRY OF TRANSPORT

RATCHATHEWI, BANGKOK 10400, THAILAND

---

# โครงการวิเคราะห์สมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างทางหลวง

โดย

อรรถพล หายทุกข์

ดร.หฤทส์ถ์ พ้อบาล

และ

ดร.อัคคพัฒน์ สว่างสุริย์

รายงานฉบับที่ วพ. 322

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง

กรมทางหลวง

กันยายน 2566

ISSN 0125-8044

รายงานนี้เป็นแนวความคิดของผู้เขียนเท่านั้น กรมทางหลวงไม่มีส่วนผูกพันแต่อย่างใด

## คำนำ

รายงานการศึกษานี้แนะนำเสนอการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างทางหลวง โดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) บนทางหลวงสายหลักของประเทศไทย ได้แก่ (1) การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวหรือ Normalized Deflection กับตัวแปรการออกแบบความหนาของโครงสร้างถนนประกอบด้วย  $T_A$ , SN และ  $h_e$  ตามวิธีของ Asphalt Institute (AI), American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) และ Odemark's Method of Equivalent Thickness (MET) (2) การวิเคราะห์ค่าดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนนหรือ Structural Capacity Index ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Rohde (1994) และ AASHTO (1993) และ (3) การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนโมดูลัสหรือ Modulus Ratio ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Wimsatt (1999) และวิธีการ Backcalculation ด้วยโปรแกรม Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (ELMOD) เพื่อพัฒนาดัชนีชี้วัดคุณภาพด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในความรับผิดชอบของกรมทางหลวง

จึงหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานฉบับนี้จะสามารถนำไปพัฒนาและขยายผลเพื่อเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างทางหลวงอย่างมีประสิทธิภาพสอดคล้องกับสภาพการใช้งานในประเทศไทย

  
(นายสรารุท ทองคีไล)

อธิบดีกรมทางหลวง

## สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญรูป	ง
สารบัญตาราง	ต
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 การศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 สมรรถนะของโครงสร้างถนน	3
2.2 เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)	4
2.3 การวิเคราะห์ความหนาของโครงสร้างถนนลาดยาง	10
2.4 การประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนน	18
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน</b>	<b>28</b>
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)	28
3.2 แผนดำเนินการศึกษา	29
3.3 การรวบรวมข้อมูล	29
3.4 ขั้นตอนการทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD	31
3.5 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวกับความหนาของโครงสร้างถนน	33
3.6 การวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษา</b>	<b>38</b>
4.1 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection ( $d_o/d_o, DOH$ ) ของโครงสร้างถนนที่ได้จากเครื่องมือ FWD กับวิธีการออกแบบทั้ง 3 วิธี	38
4.2 การเปรียบเทียบค่าดัชนีชี้วัด	45
4.2.1 ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection ( $d_o/d_o, DOH$ )	45
4.2.2 ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index, SCI)	46
4.2.3 ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR)	48
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>50</b>
5.1 สรุปผล	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	51
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>53</b>
ภาคผนวก ก แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง	55
ภาคผนวก ข ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT)	115
ภาคผนวก ค ค่าการแอ่นตัว Normalized Deflection ( $d_o/d_o, DOH$ ) ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index , SCI) และค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR)	119

## สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2.1	วงจรกิจต์ด้านสมรรถนะของโครงสร้างถนน	3
รูปที่ 2.2	การทำงานของเครื่องมือสำรวจสภาพโครงสร้างชั้นทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก	4
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างการกำหนดค่าเซ็นเซอร์คงที่สำหรับการทดสอบ	8
รูปที่ 2.4	เครื่องมือ FWD	8
รูปที่ 2.5	การทดสอบผิวทางคอนกรีตแบบ Joint approach testing (Schmalzer 2006)	9
รูปที่ 2.6	การทดสอบผิวทางคอนกรีตแบบ Joint approach-leave testing (Schmalzer 2006)	9
รูปที่ 2.7	เส้นกราฟการออกแบบจากการคำนวณออกแบบโครงสร้างชั้นทาง Full-Depth Asphalt (TA) Sawangsurinya et al. (2023)	11
รูปที่ 2.8	เส้นกราฟการออกแบบจากการคำนวณออกแบบโครงสร้างชั้นทาง Structural Number (SN) Sawangsurinya et al. (2023)	11
รูปที่ 2.9	เส้นกราฟการออกแบบจากการคำนวณออกแบบโครงสร้างชั้นทาง Equivalent Thickness (he) Sawangsurinya et al. (2023)	11
รูปที่ 2.10	การแปลงความหนา $T_A$ ตามวิธีของ AI (1970)	13
รูปที่ 2.11	ค่า Structural Number (SN) ของโครงสร้างชั้นทาง (AASHTO 1993)	13
รูปที่ 2.12	แผนภูมิประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของผิวทาง ( $a_1$ )	15
รูปที่ 2.13	แผนภูมิประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของพื้นทาง ( $a_2$ )	16
รูปที่ 2.14	แผนภูมิประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของรองพื้นทาง ( $a_3$ )	16
รูปที่ 2.15	การแปลงความหนา $h_e$ โดยหลักการ Odemark's Method of Equivalent Thickness (Ulitzd 1987)	17
รูปที่ 2.16	รูปตัดทั่วไปของโครงสร้างถนนลาดยาง	19
รูปที่ 2.17	การแอนตัวของผิวทางภายใต้แรงกระแทกจากเครื่องมือ FWD	21
รูปที่ 2.18	ค่าการแอนตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD บนโครงสร้างถนน (Zhang et al. 2003)	23
รูปที่ 2.19	โครงสร้างถนนลาดยางที่ใช้ออกแบบก่อสร้างกับโครงสร้างถนนลาดยางทั่วไปของกรมทางหลวง	27
รูปที่ 3.1	เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)	28
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนแผนงานการศึกษา	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.3	พื้นที่ศึกษา	30
รูปที่ 3.4	การทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD	32
รูปที่ 3.5	การวัดอุณหภูมิชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตและการเจาะสำรวจชั้นทางเบื้องต้น	32
รูปที่ 3.6	โครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป (Conventional Pavement)	33
รูปที่ 3.7	โครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว (Semi-Rigid Pavement)	34
รูปที่ 4.1	ค่า $d_o/d_{o,DOH}$ กับ Structural Number (SN)	43
รูปที่ 4.2	ค่า $d_o/d_{o,DOH}$ กับ Equivalent Thickness ( $h_e$ )	44
รูปที่ 4.3	ค่า $d_o/d_{o,DOH}$ กับ Full-Depth Asphalt ( $T_A$ )	44
รูปที่ 4.4	แสดงค่า $d_o/d_{o,DOH}$ ที่ได้จากการเก็บข้อมูล FWD ของทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103	46
รูปที่ 4.5	แสดงค่า $d_o/d_{o,DOH}$ ที่ได้จากการเก็บข้อมูล FWD ของทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300	46
รูปที่ 4.6	ค่า SCI ของโครงสร้างถนนบนทางหลวงหมายเลข 344 ฝั่ง LT	47
รูปที่ 4.7	ค่า SCI ของโครงสร้างถนนบนทางหลวงหมายเลข 210 ฝั่ง RT	48
รูปที่ 4.8	ค่า MR ของโครงสร้างถนนบนทางหลวงหมายเลข 344 ฝั่ง LT	49
รูปที่ 4.9	ค่า MR บนทางหลวงหมายเลข 210 ฝั่ง RT	49
รูปที่ ก1	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 32 กม.49+087 - 66+800	56
รูปที่ ก2	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก กม.459+945 - กม.465+295	56
รูปที่ ก3	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก กม.484+795 - 484+295, กม.472+715 - 473+195, กม.469+195 - 470+795	57
รูปที่ ก4	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก กม.472+288 - 472+715	57

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ก5	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง – หนองแก กม.480+395 – 480+995	58
รูปที่ ก6	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง – หนองแก กม.480+995 – 484+295, กม.479+995 – 480+395, กม.474+295 – 474+995, กม.473+195 – 474+295, กม.465+745 – 465+195	58
รูปที่ ก7	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง – หนองแก กม.491+570 – 492+095, กม.486+745 – 487+070, กม.484+795 – 485+970, กม.479+570 – 479+995, กม.478+070 – 478+295, กม.476+645 – 476+845, กม.474+995 – 475+520	59
รูปที่ ก8	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหิน – ผานกเค้า กม.234+052 – กม.234+182	59
รูปที่ ก9	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหิน – ผานกเค้า กม.234+182 – 235+696, กม.235+736 – 236+407	60
รูปที่ ก10	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหิน – ผานกเค้า กม.235+696 – 235+736	60
รูปที่ ก11	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหิน – ผานกเค้า กม.236+407 – 238+657	61
รูปที่ ก12	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหิน – ผานกเค้า กม.244+436 – 244+561, กม.244+641 – 245+072	61
รูปที่ ก13	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหิน – ผานกเค้า กม.244+561 – 244+641	62
รูปที่ ก14	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหิน – ผานกเค้า กม.238+657 – 244+436, กม.245+072 – 266+456	62
รูปที่ ก15	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำดุก – ห้วยข่ามะคาว กม.363+989 – 365+539, กม.366+214 – 408+889	63
รูปที่ ก16	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำดุก – ห้วยข่ามะคาว กม.365+539 – กม.366+214	63
รูปที่ ก17	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำดุก – ห้วยข่ามะคาว กม.408+989 – กม.420+345	63

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ก18	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก – ห้วยข่ามะคาว กม.363+989 – กม.365+300, กม.366+150 – 366+550	64
รูปที่ ก19	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก – ห้วยข่ามะคาว กม.365+300 – กม.366+150	64
รูปที่ ก20	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก – ห้วยข่ามะคาว กม.366+550 – 371+825, กม.373+000 – 374+700, กม. 377+300 – 391+400, กม.373303+100 – 401+550, กม.402+100 – 416+370, กม.420+050 – 420+345	65
รูปที่ ก21	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก – ห้วยข่ามะคาว กม.371+825 – 373+000, กม.374+700 – 377+300, กม.391+400 – 393+100,	65
รูปที่ ก22	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก – ห้วยข่ามะคาว กม.401+550 – 402+100, กม.416+370 – 420+050	65
รูปที่ ก23	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก – ห้วยข่ามะคาว กม.363+960 – 365+530, กม.366+214 – 408+980	66
รูปที่ ก24	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก – ห้วยข่ามะคาว กม.408+980 – 420+345	66
รูปที่ ก25	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง – หนองนา กม.70+000 – กม.74+105	67
รูปที่ ก26	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง – หนองนา กม.74+105 – กม.74+175	67
รูปที่ ก27	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง – หนองนา กม.74+175 – กม.78+687	68
รูปที่ ก28	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง – หนองนา กม.78+687 – กม.78+717	68
รูปที่ ก29	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง – หนองนา กม.78+717 – กม.86+512	69
รูปที่ ก30	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง – หนองนา กม.86+512 – กม.86+562	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ก31	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง – หนองนา กม.86+562 – กม.88+900	70
รูปที่ ก32	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง – หนองนา กม.88+900 – กม.92+778	70
รูปที่ ก33	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว – คลองโนน กม.56+215 – กม.80+000	71
รูปที่ ก34	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว – คลองโนน กม.57+570 – กม.65+800	71
รูปที่ ก35	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว – คลองโนน กม.65+800 – กม.67+287	72
รูปที่ ก36	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว – คลองโนน กม.67+287 – 69+826.5, กม.69+871.5 – 72+933.5, กม.72+978.5 – 74+250, กม.74+370 – 75+315, กม.75+341 – 76+128, กม.76+154 – 78+675, กม.78+731 – 79+390, กม.79+400 – 80.000	72
รูปที่ ก37	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว – คลองโนน กม.69+826.5 – 69+871.5, กม.72+933.5 – 72+978.5, กม.75+315 – 75+341, กม.76+128 – 76+154 กม.78+675 – 78+731, กม.79+390 – 79+400	73
รูปที่ ก38	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว – คลองโนน กม.74+250 – 74+370	73
รูปที่ ก39	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ – ภูเงิน กม.4+770 – 5+500	74
รูปที่ ก40	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ – ภูเงิน กม.2+000 – 4+820	74
รูปที่ ก41	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ – ภูเงิน กม.5+500 – 6+300	75
รูปที่ ก42	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ – ภูเงิน กม.5+769 – 6+152	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ก43	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.6+300 - 8+400	76
รูปที่ ก44	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.8+400 - 9+512, กม.10+284 - 11+344	76
รูปที่ ก45	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.9+512 - 9+789, กม.10+018 - 10+284	77
รูปที่ ก46	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.9+789 - 10+018	77
รูปที่ ก47	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.17+230 - 18+000	78
รูปที่ ก48	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.18+500 - 19+400	78
รูปที่ ก49	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.19+400 - 19+600	79
รูปที่ ก50	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.21+375 - 21+870	79
รูปที่ ก51	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.23+700 - 30+100	80
รูปที่ ก52	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.26+615 - 42+540	80
รูปที่ ก53	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.30+118 - 41+500	81
รูปที่ ก54	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.37+200 - 38+450	81
รูปที่ ก55	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.37+200 - 38+450	82
รูปที่ ก56	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.43+300 - 45+932	82

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ก57	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 2 ตอนที่ 602 อุตรธานี – น้ำสวย กม.457+355 – 466+455, กม.468+155 – 471+455, กม.485+055 – 486+306	83
รูปที่ ก58	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.94+048 – 96+748	83
รูปที่ ก59	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.96+748 – 97+162	83
รูปที่ ก60	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.97+162 – 100+248	84
รูปที่ ก61	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.100+248 – กม.102+775	84
รูปที่ ก62	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.102+775 – กม.104+070	84
รูปที่ ก63	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.104+070 – กม.104+600	85
รูปที่ ก64	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.104+600 – กม.110+300	85
รูปที่ ก65	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.110+300 – กม.110+900	85
รูปที่ ก66	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.110+900 – กม.111+500	86
รูปที่ ก67	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.111+500 – กม.112+200	86
รูปที่ ก68	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.112+200 – กม.113+840	86
รูปที่ ก69	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.113+840 – กม.116+048	87
รูปที่ ก70	แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.116+048 – กม.118+500	87

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ก71	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง กม.118+500 – กม.118+908	87
รูปที่ ก72	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.194+769 – 196+480	88
รูปที่ ก73	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.196+480 – กม.199+900	88
รูปที่ ก74	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.199+900 – 201+360	89
รูปที่ ก75	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.201+360 – กม.202+425	89
รูปที่ ก76	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.202+425 – กม.202+645	90
รูปที่ ก77	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.202+645 – กม.204+800	90
รูปที่ ก78	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม. 204+800 – 208+087	91
รูปที่ ก79	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.208+087 – กม.209+618	91
รูปที่ ก80	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.209+618 – 209+645	92
รูปที่ ก81	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.209+645 – กม.209+853	92
รูปที่ ก82	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.209+853 – กม.212+173	93
รูปที่ ก83	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.212+173 – กม.213+082	93
รูปที่ ก84	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง – พิษณุโลก กม.213+082 – กม.213+870	94

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ก85	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.213+870 – กม.215+266	94
รูปที่ ก86	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.215+266 – กม.216+042	95
รูปที่ ก87	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.216+042 – กม.217+600	95
รูปที่ ก88	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.217+600 – กม.218+442	96
รูปที่ ก89	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.218+442 – กม.219+569	96
รูปที่ ก90	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.219+569 – 219+730	97
รูปที่ ก91	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.219+730 – กม.219+865	97
รูปที่ ก92	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.219+865 – กม.220+085	98
รูปที่ ก93	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.220+085 – กม.220+270	99
รูปที่ ก94	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.220+270 – 220+360	99
รูปที่ ก95	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.220+360 – กม.220+851	99
รูปที่ ก96	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.220+851 – กม.220+970	100
รูปที่ ก97	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.220+970 – กม.222+050	100
รูปที่ ก98	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.222+050 – กม.222+570	101

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ก99	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.222+750 – 222+854	101
รูปที่ ก100	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.222+854 – 223+117	102
รูปที่ ก101	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.223+117 – 223+170	102
รูปที่ ก102	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.224+545 – 224+845	103
รูปที่ ก103	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.223+170 – 224+540	103
รูปที่ ก104	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.224+845 – 224+969	104
รูปที่ ก105	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง – พิษณุโลก กม.224+969 – 225+119	104
รูปที่ ก106	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 30+203 - 31+045	105
รูปที่ ก107	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 31+045 - 32+608, กม.36+223 – 38+700, กม.40+300 – 40+715, กม.49+275 – 49+354, กม.50+660 – กม.50+700	105
รูปที่ ก108	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 32+000 - 32+608	106
รูปที่ ก109	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 32+608 - 35+030	106
รูปที่ ก110	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 33+645 - 35+668	107
รูปที่ ก111	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 35+668 - 36+223	107

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ก112	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 40+715 - 40+855	108
รูปที่ ก113	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 40+855 - 41+005	108
รูปที่ ก114	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+005 - 41+150	109
รูปที่ ก115	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวน รอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+150 - 41+240, กม.41+604 - 41+675	109
รูปที่ ก116	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+240 - 41+373, กม.41+604 - 41+675	110
รูปที่ ก117	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+675 - 41+820, กม.47+373 - 47+621.481, กม.47+931.481 - 48+175	110
รูปที่ ก118	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+820 - 41+970, กม.47+252 - 47+375, กม.48+175 - 48+325	111
รูปที่ ก119	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+970 - 42+110	111
รูปที่ ก120	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 42+125 - 42+146	112
รูปที่ ก121	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 42+146 - 43+928	112
รูปที่ ก122	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 43+928 - 44+686	113
รูปที่ ก123	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 45+032 - 46+330	113
รูปที่ ก124	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 46+330.929 - 46+500	114

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ก125	แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 46+500 – 46+900, กม.48+625 – 48+685, กม.50+700 – 51+053	114
รูปที่ ค1	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 102 หนองรี – หนองปรือ แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.25+000 – กม.31+000 (LT)	120
รูปที่ ค2	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 102 หนองรี – หนองปรือ แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.25+000 – กม.31+000 (RT)	121
รูปที่ ค3	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103 หนองปรือ - คลองเขต แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.32+000 - กม.62+000 (LT)	122
รูปที่ ค4	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103 หนองปรือ - คลองเขต แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.32+000 - กม.62+000 (RT)	123
รูปที่ ค5	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 32 ตอนที่ 202 อ่างทอง – ไชโย แขวงทางหลวงอ่างทอง กม.49+087 - กม.66+800 (LT)	124
รูปที่ ค6	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 32 ตอนที่ 202 อ่างทอง - ไชโย แขวงทางหลวงอ่างทอง กม.49+087 - กม.66+800 (RT)	125
รูปที่ ค7	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก แขวงทางหลวงขอนแก่นที่ 2 (ชุมแพ) กม.460+595 - กม.492+269 (LT)	126
รูปที่ ค8	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหัน - ผานกเค้า แขวงทางหลวงขอนแก่นที่ 2 (ชุม แพ) กม.234+052 - กม.266+500 (LT)	127

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ค9	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำดุก - ห้วยข่ามะคาว แขวงทางหลวงเพชรบูรณ์ที่ 1 กม.363+959 - กม.374+000 (LT)	128
รูปที่ ค10	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา แขวงทางหลวงพิจิตร กม.70+000- กม.90+000 (LT)	129
รูปที่ ค11	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา แขวงทางหลวงพิจิตร กม.70+000- กม.90+000 (RT)	130
รูปที่ ค12	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว - คลองโนน แขวงทางหลวงพิจิตร กม.56+215 - กม.80+000 (LT)	131
รูปที่ ค13	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน แขวงทางหลวงศรีสะเกษที่ 2 กม.0+462+000 - กม.47+000 (LT)	132
รูปที่ ค14	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 2 ตอนที่ 602 อุดรธานี - น้ำสวย แขวงทางอุดรธานีที่ 1 กม.457+306 - กม.486+306 (LT)	133
รูปที่ ค15	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง แขวงทางหลวงเลยที่ 1 กม.94+048 - กม.118+908 (LT)	134
รูปที่ ค16	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง แขวงทางหลวงเลยที่ 1 กม.94+048 - กม.118+908 (RT)	135
รูปที่ ค17	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก แขวงทางหลวงพิษณุโลกที่ 1 กม.194+769 - กม.225+119 (LT)	136

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
<b>รูปที่ ค18</b>	
แสดงความสัมพันธ์ของค่า $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ของทางหลวง หมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ แขวงทางหลวงพิษณุโลกที่ กม.30+203 – กม.46+906 (LT)	137

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ตำแหน่งของ Geophone เครื่องมือ FWD สำหรับผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีต	7
ตารางที่ 2.2	กลุ่มรูปแบบโครงสร้างถนนลาดยาง (อัคคัพฒน์และคณะ 2566)	10
ตารางที่ 2.3	แสดงค่า Substitution Ratio ของวัสดุชนิดต่างๆ (AI 1970)	12
ตารางที่ 2.4	ข้อเสนอแนะสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมน้ำ ( $m_i$ ) ของวัสดุชั้น ทางแบบยึดหยุ่น (AASHTO 1993)	14
ตารางที่ 2.5	คุณสมบัติของวัสดุชั้นทางสำหรับโครงสร้างถนนลาดยาง ของกรมทางหลวง (อัคคัพฒน์และคณะ 2566)	18
ตารางที่ 2.6	แฟกเตอร์ทิศทางจราจร (AI 1970)	20
ตารางที่ 2.7	ค่าความแข็งเบนมาตรฐานที่กำหนดโดยค่าระดับความเชื่อมั่น (AASHTO 1993)	20
ตารางที่ 2.8	ค่า Regression Coefficient สำหรับคำนวณค่า $SN_{eff}$ ตามวิธีของ Rohde (1994)	24
ตารางที่ 2.9	ค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางที่ใช้ออกแบบโครงสร้างถนนลาดยาง ของกรมทางหลวง	25
ตารางที่ 3.1	พื้นที่ศึกษา	31
ตารางที่ 3.2	สายทางศึกษาโครงสร้างชั้นทางทั่วไป	34
ตารางที่ 3.3	สายทางศึกษาโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว	35
ตารางที่ 3.4	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาค่า $SN_{req}$	36
ตารางที่ 4.1	ข้อมูลโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป (Convention Flexible Pavement)	40
ตารางที่ 4.2	ข้อมูลโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว (Semi-Rigid Pavement)	41
ตารางที่ ข1	ข้อมูลปริมาณจราจร - รถบรรทุกรายวันเฉลี่ยต่อปี	116
ตารางที่ ค1	ค่า $d_o$ ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 102 หนองรี – หนองปรือ กม.25+000 – กม.31+000 (LT)	138

## สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ ค2	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 102 หนองรี – หนองปรือ กม.25+000 – กม.31+000 (LT)	139
ตารางที่ ค3	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 102 หนองรี – หนองปรือ กม.25+000 – กม.31+000 (RT)	140
ตารางที่ ค4	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 102 หนองรี – หนองปรือ กม.25+000 – กม.31+000 (RT)	141
ตารางที่ ค5	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103 หนองปรือ – คลองเขต กม.32+000 – กม.62+000 (LT)	142
ตารางที่ ค6	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103 หนองปรือ – คลองเขต กม.32+000 – กม.62+000 (LT)	143
ตารางที่ ค7	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103 หนองปรือ – คลองเขต กม.32+000 – กม.62+000 (RT)	144
ตารางที่ ค8	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103 หนองปรือ – คลองเขต กม.32+000 – กม.62+000 (RT)	157
ตารางที่ ค9	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 32 ตอนที่ 202 อ่าทอง – ไชโย กม.49+087 - กม.66+800 (LT)	162
ตารางที่ ค10	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 32 ตอนที่ 202 อ่าทอง – ไชโย กม.49+087 - กม.66+800 (LT)	165
ตารางที่ ค11	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 32 ตอนที่ 202 อ่าทอง – ไชโย กม.49+087 - กม.66+800 (RT)	168
ตารางที่ ค12	ค่า SCI และค่า MR ทางหลวงหมายเลข 32 ตอนที่ 202 อ่าทอง – ไชโย กม.49+087 - กม.66+800 (RT)	171
ตารางที่ ค13	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง – หนองแก กม.460+595 - กม.492+269 (LT)	174
ตารางที่ ค14	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง – หนองแก กม.460+595 - กม.492+269 (LT)	179
ตารางที่ ค15	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหัน - ผานกเค้า กม.234+052 - กม.266+500 (LT)	184

## สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ ค16	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหัน - ผานกเค้า กม.234+052 - กม.266+500 (LT)	187
ตารางที่ ค17	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำดุก - ห้วยข่ามะคาว กม.363+959 - กม.374+000 (LT)	192
ตารางที่ ค18	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำดุก - ห้วยข่ามะคาว กม.363+959 - กม.374+000 (LT)	193
ตารางที่ ค19	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - นหนองนา กม.70+000 - กม.90+000 (LT)	195
ตารางที่ ค20	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - นหนองนา กม.70+000 - กม.90+000 (LT)	198
ตารางที่ ค21	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - นหนองนา กม.70+000 - กม.90+000 (RT)	202
ตารางที่ ค22	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - นหนองนา กม.70+000 - กม.90+000 (RT)	205
ตารางที่ ค23	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว - คลองโนน กม.56+215 - กม.80+000 (LT)	209
ตารางที่ ค24	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว - คลองโนน กม.56+215 - กม.80+000 (LT)	213
ตารางที่ ค25	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.0+462 - กม.47+000 (LT)	217
ตารางที่ ค26	ค่า SCI และ MR การแอนตัวของทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.0+462 - กม.47+000 (LT)	224
ตารางที่ ค27	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 2 ตอนที่ 602 อุตรธานี - น้ำสวย กม.457+306 - กม.486+306 (LT)	232
ตารางที่ ค28	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 2 ตอนที่ 602 อุตรธานี - น้ำสวย กม.457+306 - กม.486+306 (LT)	234
ตารางที่ ค29	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง กม.94+048 - กม.118+908 (LT)	236

## สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ ค30	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง กม.94+048 - กม.118+908 (LT)	239
ตารางที่ ค31	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง กม.94+048 - กม.118+908 (RT)	243
ตารางที่ ค32	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง กม.94+048 - กม.118+908 (RT)	249
ตารางที่ ค33	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก กม.194+769 - กม.225+119 (LT)	251
ตารางที่ ค34	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก กม.194+769 - กม.225+119 (LT)	256
ตารางที่ ค35	ค่า d <sub>o</sub> ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ กม.30+203 - กม.46+906 (LT)	261
ตารางที่ ค36	ค่า SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ กม.30+203 - กม.46+906 (LT)	264

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างถนนมีความสำคัญในงานก่อสร้างและบำรุงรักษาทางหลวง การทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) เป็นวิธีการทดสอบตามมาตรฐานสากลและเป็นหนึ่งในเครื่องมือที่นิยมในปัจจุบัน ทั้งนี้ในการออกแบบถนนลาดยางเสนอโดย Asphalt Institute (AI) เป็นวิธีเชิงประสบการณ์ ที่นิยมเนื่องจากเป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวกไม่ยุ่งยากซับซ้อน แต่เนื่องจากตัวแปรและข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวพัฒนาจากต่างประเทศ จึงมีตัวแปรและข้อกำหนดที่แตกต่างกัน อาจไม่สะท้อนสภาพข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างถนนลาดยางของประเทศไทย จึงมีแนวคิดในการใช้เครื่องมือ FWD เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาเกณฑ์และแบบจำลองทำนายสมรรถนะทางหลวง

คณะผู้ศึกษาได้ตระหนักถึงปัญหา ความสำคัญและความเป็นไปได้ในการนำผลของข้อมูล FWD มาศึกษาพัฒนา จึงมีแนวคิดในการนำค่าการแอ่นตัวที่ได้จากเครื่องมือ FWD มาใช้ในการทำนายสมรรถนะทางหลวง ภายใต้เงื่อนไขสภาพแวดล้อม ข้อกำหนด วัสดุและปริมาณการจราจรของประเทศไทย โดยนำผลที่ได้มาใช้วิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว (Normalized Deflection) ค่า Modulus Ratio และค่า Structural Capacity Index ผลการศึกษาสามารถนำไปพัฒนาดัชนีชี้วัดสมรรถนะทางหลวงสำหรับงานบริหารบำรุงทางของกรมทางหลวงต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสำรวจและเก็บข้อมูลสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนน
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างทางหลวงสายหลัก ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาดัชนีชี้วัดคุณภาพด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนนของกรมทางหลวง

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาข้อกำหนด ข้อมูลคุณสมบัติที่เหมาะสม แนวทางการใช้งาน หลักการ ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)

1.3.2 รวบรวมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ค่า Design Modulus และค่า Required Structural Number ได้แก่ ความหนาของโครงสร้างชั้นทางแต่ละชั้น ปริมาณจราจร ปริมาณรถบรรทุกหนัก และอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณจราจรในแต่ละพื้นที่

1.3.3 ทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของโครงสร้างถนนด้วยเครื่องมือ FWD ในพื้นที่ศึกษา

1.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อคำนวณค่า Normalized Deflection ค่า Modulus Ratio และค่า Structural Capacity Index โดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back Calculation) วิธีการคำนวณโดยสมการเชิงประจักษ์ (Empirical Equation) เป็นต้น

1.3.5 เปรียบเทียบค่า Normalized Deflection ค่า Modulus Ratio และค่า Structural Capacity Index

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 กรมทางหลวงนำไปใช้เป็นแนวทางออกแบบก่อสร้างและบูรณะโครงสร้างทางหลวงอย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับสภาพการใช้งานในประเทศไทย

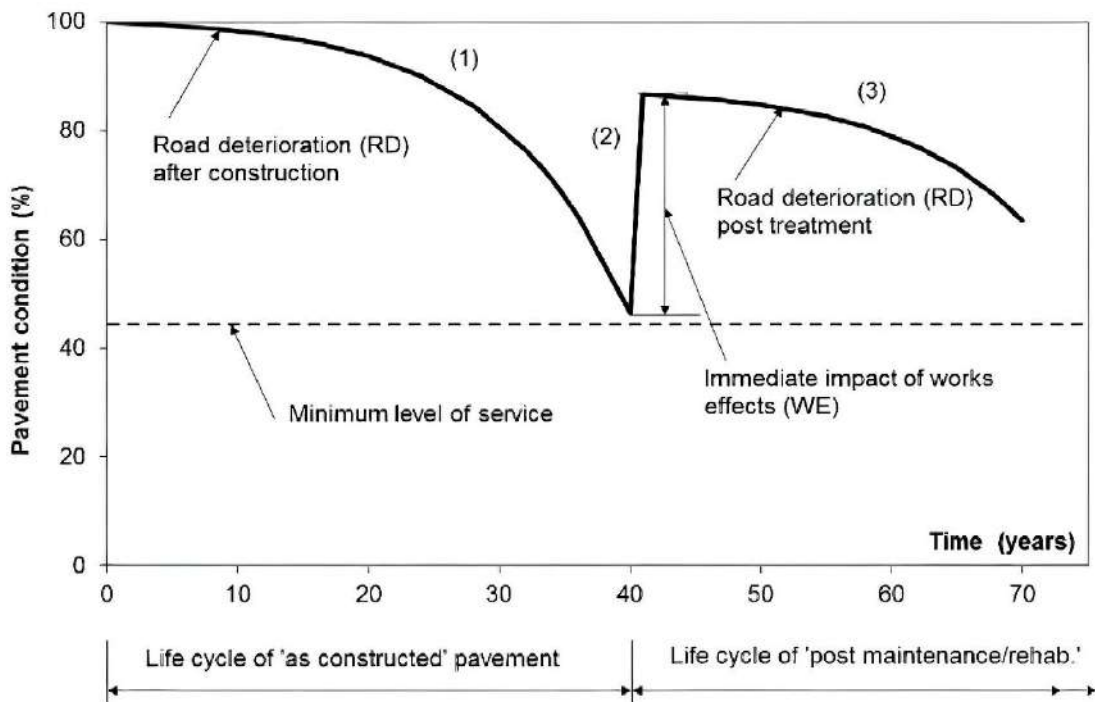
1.4.2 วิศวกรและนายช่างผู้ควบคุมงานสามารถประยุกต์ใช้ค่า Normalized Deflection ค่า Modulus Ratio และค่า Structural Capacity Index ของโครงสร้างถนน เพื่อประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างทางหลวง

## บทที่ 2

### การศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สมรรถนะของโครงสร้างถนน

วงจรชีวิตสมรรถนะของโครงสร้างถนน (Pavement Performance Life Cycle) สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงที่ 1 แสดงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างถนนหลังการก่อสร้าง ช่วงที่ 2 แสดงการซ่อมบำรุงปกติ เมื่อโครงสร้างถนนเกิดการเสื่อมสภาพจนถึงระดับการให้บริการที่ผู้ใช้ทางจะยอมรับได้ วิธีการซ่อมบำรุงปกตินี้มีหลายวิธี ซึ่งไม่ใช่การก่อสร้างถนนใหม่ หลังจากการซ่อมบำรุงสมรรถนะของโครงสร้างถนนจะเพิ่มขึ้นแต่สภาพอาจไม่เต็มร้อยเปอร์เซ็นต์ขึ้นกับวิธีการบำรุงรักษาและช่วงที่ 3 แสดงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างถนนตามระยะเวลาการใช้งานคล้ายกับช่วงที่ 1 แต่อัตราการเสื่อมสภาพ อาจเกิดเร็วกว่าช่วงแรก (Martin and Choummanivong 2018)

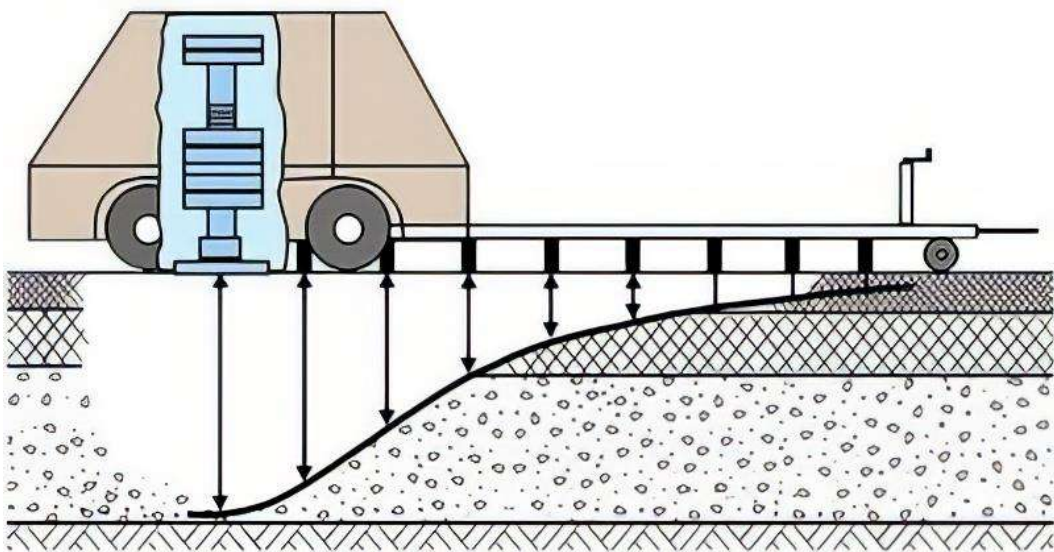


รูปที่ 2.1 วงจรชีวิตด้านสมรรถนะของโครงสร้างถนน (Martin and Choummanivong, 2018)

ในการประเมินทางหลวงสายใดสายหนึ่งว่ามีสมรรถนะของโครงสร้างถนนเพียงพอต่อการรองรับปริมาณจราจร และสภาพแวดล้อมในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง รวมถึงการทำนายการเสื่อมสภาพของโครงสร้างถนนที่จะเกิดขึ้นในอนาคต จำเป็นต้องทำการสำรวจ ประเมิน และตรวจวัดสภาพถนนอย่างต่อเนื่องซึ่งหนึ่งในสมรรถนะที่ใช้ประเมินนั้นคือความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

## 2.2 เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)

ในการสำรวจความแข็งแรงของโครงสร้างทางด้วยเครื่องมือสำรวจสภาพโครงสร้างชั้นทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) มีหลักการทำงานโดยการปล่อยตุ้มน้ำหนักตกกระแทกลงบนผิวทาง แล้วทำการวัดค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นและคำนวณย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยค่าการแอ่นตัวนั้นจะสามารถนำมาหาค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางแต่ละชั้นซึ่งค่าโมดูลัสเหล่านี้จะเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการคำนวณอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของถนน และสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบการเสริมผิวทางต่อไปได้ ซึ่งการทดสอบสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D4694-96



รูปที่ 2.2 การทำงานของเครื่องมือสำรวจสภาพโครงสร้างชั้นทางด้วยตุ้มน้ำหนักกระแทก

([https://www.bast.de/EN/Highway\\_Construction/Technology/FWD.html](https://www.bast.de/EN/Highway_Construction/Technology/FWD.html))

สำหรับมาตรฐาน ASTM D4694-96 นั้น ได้ให้ข้อกำหนดในเรื่องของอุปกรณ์ทดสอบและกระบวนการทดสอบไว้ ดังนี้

### 1) อุปกรณ์ทดสอบ

1.1) อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายนอกตัวรถ จะต้องสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิ -10 ถึง 50 องศาเซลเซียส และสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่มี

ความชื้นสัมพัทธ์สูงได้ เช่น ในสภาพที่มีฝนตก หรือมีละอองน้ำนอกจากนี้ ยังต้องทนต่อสภาพอื่น ๆ เช่น ฝุ่นละออง ไฟฟ้าสถิตหรือการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้นได้เป็นปกติ

1.2) อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในตัวรถ จะต้องสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 5 ถึง 40 องศาเซลเซียส

1.3) อุปกรณ์สร้างแรงกระแทก (Falling “Weight”) พร้อมระบบนำวิถี (Guide System) จะต้องสามารถกำหนดความสูงในการสร้างแรงกระแทกได้อย่างน้อย 1 ระดับ หรือมากกว่า ทั้งนี้ แรงกระแทกที่กระทบกับผิวทางจะต้องผ่านการปรับเทียบ โดยใช้วิธีน้ำหนักกระแทกไม่น้อยกว่า 5 ครั้ง และในแต่ละครั้งอนุญาตให้ผลของแรงลัพธ์สามารถคลาดเคลื่อนกันได้ไม่เกินร้อยละ 3 ค่าที่อ่านได้จากเครื่องจะถูกแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟแฮเวอร์ไซน์ (Haversine) หรือกราฟไซน์แบบครึ่งคลื่น (Half-Sine Wave) ทั้งนี้แอมพลิจูดของคลื่นหรือค่าของแรงที่อ่านได้สูงสุดจากกราฟ ควรมีค่าประมาณ 50 กิโลนิวตัน

1.4) ระบบนำวิถี (Guide System) จะต้องถูกออกแบบให้สามารถทำงานภายใต้แรงเสียดทาน หรือความต้านทานเล็กน้อยได้ และยังต้องออกแบบมาเพื่อนำหนักที่ตกกระทบในแนวตั้งฉากกับผิวทางอีกด้วย

1.5) แผ่นกดทดสอบ (Loading Plate) สามารถทนต่อแรงกระจายที่กระทำต่อผิวทางได้ โดยชนิดของแผ่นกดทดสอบมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 300 และ 450 มิลลิเมตร (วัดภายใต้เงื่อนไขในสนามทดสอบหรือคล้ายคลึง) โดยแผ่นกดทดสอบต้องถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถวัดค่าการแอ่นตัวของผิวทาง ณ จุดศูนย์กลางของแผ่นกดทดสอบได้

1.6) เซ็นเซอร์วัดค่าการแอ่นตัว (Deflection Sensor) สามารถวัดค่าการแอ่นตัวที่ระยะกระแทกสูงสุดได้ โดยอย่างน้อยต้องรองรับการเคลื่อนที่เชิงมุมที่อาจเกิดขึ้นได้เล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแผ่นกระแทก ทั้งนี้ ไม่กำหนดจำนวนหรือระยะห่างของเซ็นเซอร์ แต่ให้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการทดสอบ และสภาพของชั้นผิวทาง ทั้งนี้ระยะห่างของเซ็นเซอร์ที่ 300 มิลลิเมตรเป็นระยะห่างที่ถูกใช้บ่อย และเซ็นเซอร์อาจมีหลายชนิด เช่น เซ็นเซอร์แปลงค่าระยะการกระจัด (Displacement Transducers) เซ็นเซอร์จับสัญญาณการสั่นสะเทือน (Velocity Transducers) และเครื่องวัดความเร่งในการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Accelerometers)

1.7) ระบบการประมวลผล และจัดเก็บข้อมูล (Data Processing and Storage System) ผลการทดสอบแรง และการแอ่นตัว ทั้งหมดจะต้องถูกบันทึกลงในอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลแบบแม่เหล็ก หรือเครื่องเคาะสัญญาณกระดาษ รวมไปถึงข้อมูลอย่างเช่น อุณหภูมิของพื้นผิวถนน ระยะทาง และข้อมูลแต่ละจุดจะต้องระบุให้ชัดเจนว่าเป็นข้อมูลจากจุดใด

1.8) โหลดเซลล์ (Load Cell) เพื่อวัดแรงที่กระทำลงไปในแต่ละครั้ง ตัวอุปกรณ์จะต้องถูกติดตั้งไว้ในจุดที่เหมาะสม และไม่ขัดขวางประสิทธิภาพการทดสอบค่าการแอ่นตัว

ณ จุดศูนย์กลางของแผ่นกดทดสอบ ทั้งนี้ ตัวโหลดเซลล์จะต้องหนา ทนแรงสั่นสะเทือน เนื่องจากแรงกระแทกระหว่างการทดสอบหรือการเคลื่อนที่ของรถสำรวจตลอดระยะเวลาทางการสำรวจ

## 2) ขั้นตอนการทดสอบ

2.1) เคลื่อนย้ายอุปกรณ์ไปยังจุดสำรวจ และติดตั้งแผ่นกดทดสอบให้อยู่เหนือจุดทดสอบ ทั้งนี้ ควรทำความสะอาดจุดทดสอบให้ปราศจากเศษหินเท่าที่จะเป็นไปได้

2.2) ทดลองวางแผ่นกดทดสอบพร้อมทั้งเซ็นเซอร์ เพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์ทั้งหมดได้ระดับ

2.3) ยกอุปกรณ์สร้างแรงกระแทกขึ้นให้อยู่ในระดับที่จะทำการทดสอบบันทึกค่าการแอ่นตัวสูงสุด และแรงกระแทกสูงสุด

2.4) ทำการทดสอบอย่างน้อย 2 ครั้ง และเปรียบเทียบผลการทดสอบของแต่ละเซ็นเซอร์ ถ้าคลาดเคลื่อนกันเกินร้อยละ 3 ให้บันทึกผลความคลาดเคลื่อนนั้นลงในรายงาน นอกจากนี้อาจทดสอบแรงกระแทกในหลายระดับรวมด้วย

เครื่องมือ FWD ได้รับการออกแบบมาเพื่อปล่อยตุ้มน้ำหนักกระทำไปยังพื้นผิวถนน เป็นการจำลองน้ำหนักและแรงกระแทกที่ถูกสร้างขึ้นจากการบรรทุกโดยการทิ้งน้ำหนักส่งไปยังถนนผ่านแผ่นถ่าน้ำหนักแบบวงกลมและระบบลูกยางพิเศษเพื่อให้น้ำหนักที่เกิดขึ้นได้แผ่นถ่าน้ำหนักสามารถแผ่กระจายได้อย่างสม่ำเสมอ โดยทั่วไปแผ่นถ่าน้ำหนักแบบวงกลมจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ 300 มม. น้ำหนักที่กระทำนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความสูงของการยกตุ้มน้ำหนักจากนั้น โหลดเซลล์ ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนของแผ่นถ่าน้ำหนักจะทำการตรวจวัดค่าที่เกิดขึ้น ช่วงเวลาของแรงที่กระทำระหว่าง 25 – 30 มิลลิวินาที แรงนั้นจะมีลักษณะแบบจุดที่กระทำบนผิวทาง โดยทั่วไปแล้วแรงกระทำสำหรับการทดสอบบนถนนที่ค่าประมาณ 40 kN ให้แรงดันประมาณ 567 kPa ใต้แผ่นถ่าน้ำหนักแบบวงกลม (50 kN / 707 kPa ตามมาตรฐานยุโรป)

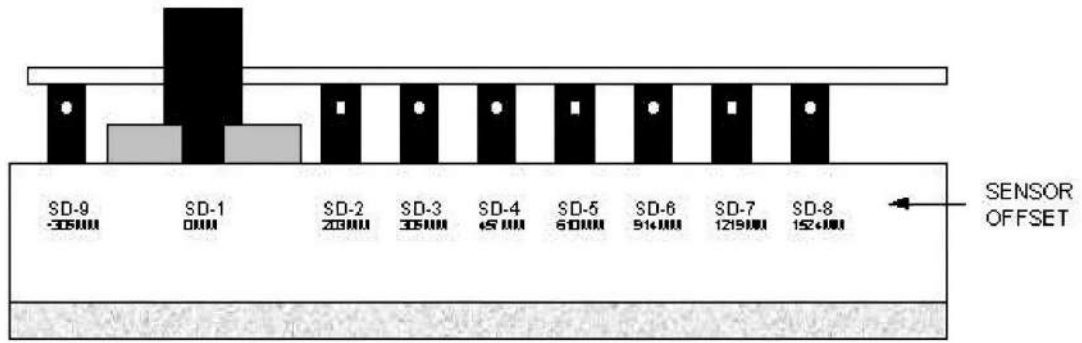
การแอ่นตัวของผิวทางเมื่อมีน้ำหนักกระทำนั้นสามารถวัดได้จากเซ็นเซอร์การโก่งตัว (Geophones หรือ Force-balance Seismometers) จำนวน 9 ตัว ที่ติดตั้งที่ตำแหน่งแตกต่างกันจากจุดกึ่งกลางแผ่นถ่าน้ำหนักแบบวงกลม โดยตัวแรกจะวัดจากจุดกึ่งกลางแผ่นถ่าน้ำหนักซึ่งบริเวณกึ่งกลางของแผ่นถ่าน้ำหนักจะมีรูขนาดเล็กเพื่อให้ Geophone สามารถลอดผ่านไปได้ สำหรับ Geophone ที่เหลือจะถูกติดตั้งอยู่บนคานที่สามารถยกขึ้นลงได้เพื่อให้ Geophone แนบชิดติดกับพื้นถนนในขณะที่ทดสอบ และจะถูกยกขึ้นเมื่อต้องการย้ายจุดทดสอบหรือเสร็จสิ้นการทดสอบแล้ว โดยตำแหน่งของ Geophones จะอยู่ที่ระยะ 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 และ 1800 มม. จากจุดศูนย์กลางของแผ่นถ่าน้ำหนักแบบวงกลม การโก่งตัวที่วัดด้วยเซ็นเซอร์เหล่านี้เราอาจเรียกว่า D0, D200, D300, D450, D600, D900, D1200, D1500 และ D1800 ตัวอย่างการวางเซ็นเซอร์ รูปที่ 2.3 ในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้วัดน้ำหนักที่กระทำ

บนแผ่นถ้ำน้ำหนักรจะมีอุปกรณ์ Load Transducer ทำหน้าที่เป็น Loadcell วัดขนาดน้ำหนักกระทำ รายละเอียดตามรายงานผลการศึกษาโครงการศึกษาวิเคราะห์สมรรถนะและประเมินวงจรชีวิต (Life Cycle Analysis) โครงสร้างถนนสำหรับโครงข่ายทางหลวง (2566) ค่าน้ำหนักกระทำวัดได้จาก Loadcell และการแอนตัวที่วัดได้จาก Geophone จะอยู่ในรูปของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันทางไฟฟ้าและแปลงผลเป็นข้อมูลซึ่งข้อมูลจะถูกเก็บบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการประมวลผล สำหรับการวางตำแหน่งของ Geophone ในการทดสอบการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD เพื่อต้องการวัดพฤติกรรมการส่งถ่ายแรงจากการให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบ มีรายละเอียดของตำแหน่งแสดงดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ตำแหน่งของ Geophone เครื่องมือ FWD สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

Geophone ตัวที่	ตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นงานโลหะ (มม.)
1	0
2	200
3	300
4	450
5	600
6	900
7	1200
8	1500
9	1800

หมายเหตุ : ขึ้นอยู่กับจำนวน Geophone และตำแหน่งระยะการติดตั้ง



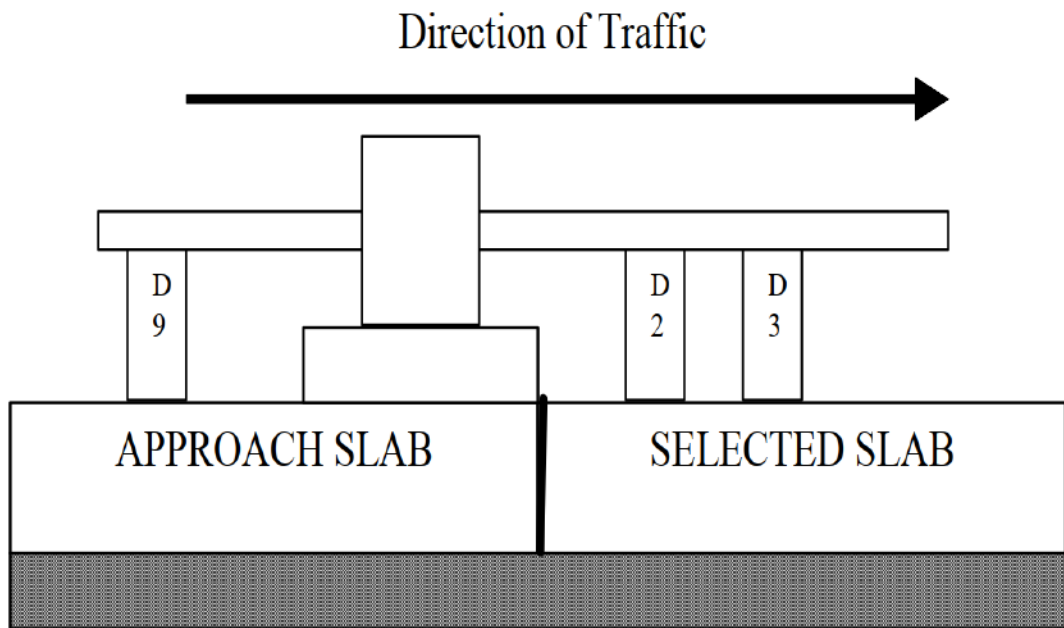
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการกำหนดค่าเซ็นเซอร์คงที่สำหรับการทดสอบ

(LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements Operational Field Guidelines V3.1)

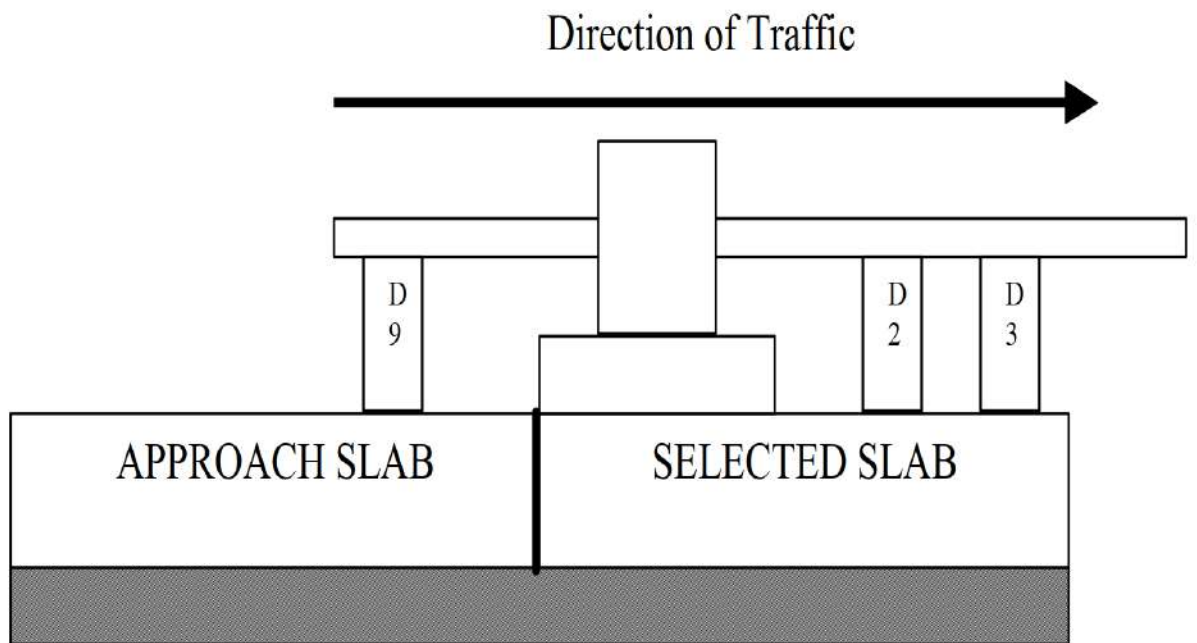
สำหรับกรณีของพื้นผิวทางคอนกรีต (Rigid Pavement) สามารถวิเคราะห์ ประสิทธิภาพของการถ่ายแรงที่ตำแหน่งรอยต่อ (Joint) ได้โดยกำหนดตำแหน่งของ Geophone ของเครื่องมือทดสอบรูปที่ 2.4 ให้คร่อมรอยต่อ (Joint) ของพื้นผิวทางคอนกรีตตัวอย่างแสดงดังในรูปที่ 2.5 และ 2.6 มาตรฐานจะวัดแรง (Load Cell) ที่ติดตั้งบนแผ่นเหล็กมาตรฐานจะวัดแรงที่กระทบบนแผ่นเหล็กมาตรฐานในขณะที่การยุบตัว (Deformation) ของพื้นผิวที่เกิดการกระแทกข้างต้นจะถูกวัดด้วย Geophones



รูปที่ 2.4 เครื่องมือ FWD



รูปที่ 2.5 การทดสอบผิวทางคอนกรีตแบบ Joint approach testing (Schmalzer 2006)



รูปที่ 2.6 การทดสอบผิวทางคอนกรีตแบบ Joint approach-leave testing (Schmalzer 2006)

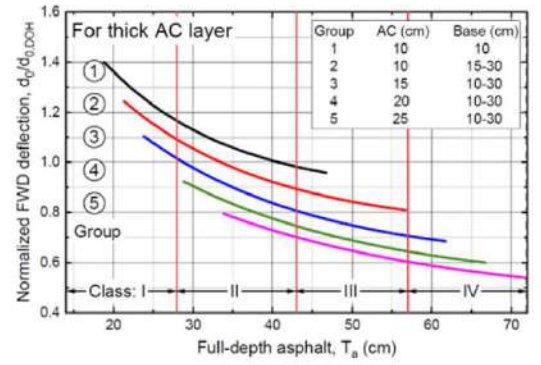
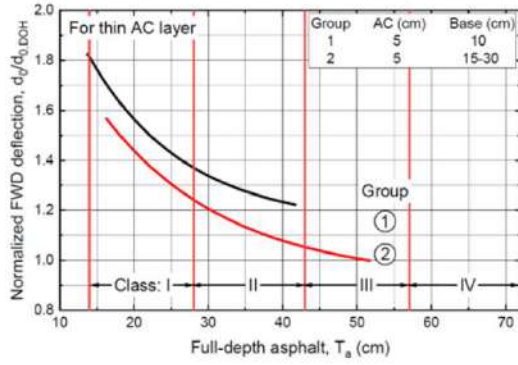
## 2.3 การวิเคราะห์ความหนาของโครงสร้างถนนลาดยาง

วิธีการออกแบบความหนาของโครงสร้างถนนลาดยางมีหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น Full-Depth Asphalt ( $T_A$ ) ตามวิธีการออกแบบของ AI (1970), Structural Number (SN) ตามวิธีการออกแบบของ AASHTO (1993) และ Equivalent Thickness ( $h_e$ ) ตามวิธีการออกแบบของ Odemark's (Ulitz 1987) เป็นต้น เพื่อนำมาคำนวณหาความหนาของโครงสร้างถนน จากรายงานผลการศึกษาของ อัครพัฒน์และคณะ (2566) ได้คำนวณความหนาและแบ่งกลุ่มรูปแบบโครงสร้างถนนลาดยางออกเป็น 4 ชั้น (Class) ตามในตารางที่ 2.2 ด้วย 3 วิธีดังต่อไปนี้ (1) Full-Depth Asphalt ( $T_A$ ) ตามวิธีการออกแบบของ AI (1970) (2) Structural Number (SN) ตามวิธีการออกแบบของ AASHTO (1993) และ (3) Equivalent Thickness ( $h_e$ ) ตามวิธีการออกแบบของ Odemark's รายละเอียดสรุปในรายงานฉบับที่ วพ.318 โครงการวิจัยเพื่อจัดทำข้อกำหนดและวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางสำหรับประเทศไทย (อัครพัฒน์และคณะ 2566)

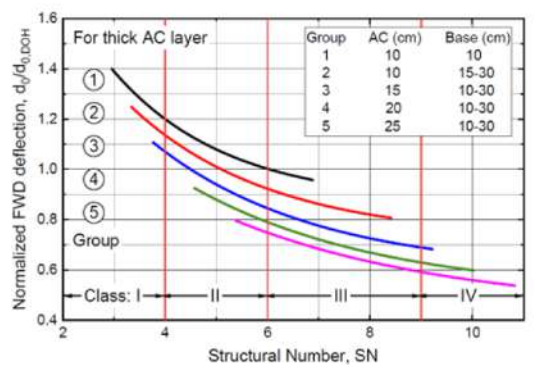
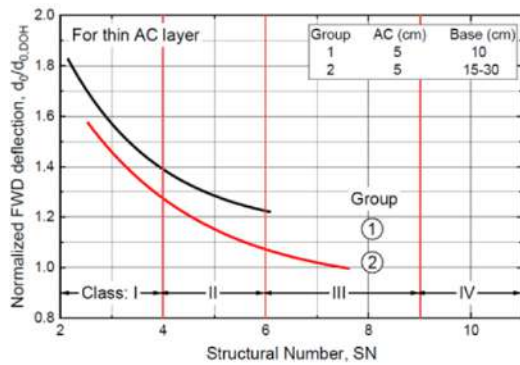
ตารางที่ 2.2 กลุ่มรูปแบบโครงสร้างถนนลาดยาง (อัครพัฒน์และคณะ 2566)

Class	$T_A$ (ซม.)		SN		$h_e$ (ซม.)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
I	14	28	2	4	31	70
II	28	43	4	6	70	107
III	43	57	6	9	107	144
IV	57	72	9	11	144	181

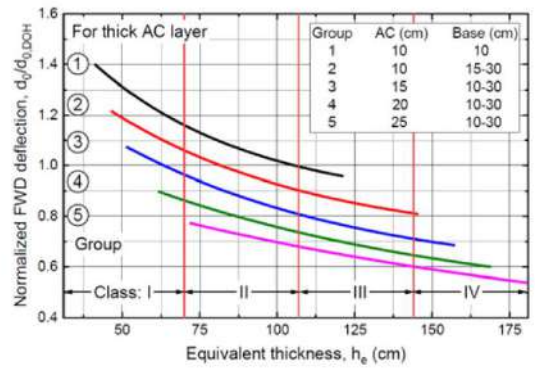
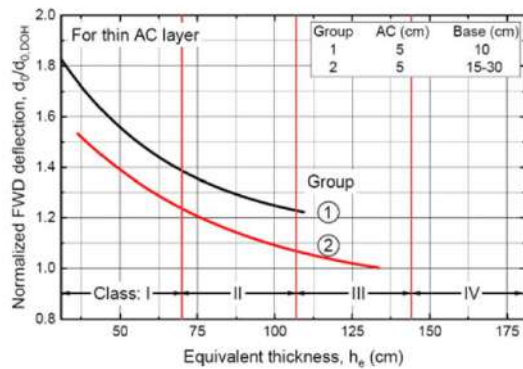
จากการศึกษาของ Sawangsuriya et al. (2023) ได้แบ่งประเภทของถนนเป็นชั้นต่างๆ และเส้นกราฟการออกแบบ (DOH Design Curve) ของโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไปของกรมทางหลวงตามวิธีการออกแบบทั้ง 3 วิธี ดังรูปที่ 2.7 – 2.9



รูปที่ 2.7 เส้นกราฟการออกแบบจากการคำนวณออกแบบโครงสร้างชั้นทาง Full-Depth Asphalt ( $T_a$ ) Sawangsuriya et al. (2023)



รูปที่ 2.8 เส้นกราฟการออกแบบจากการคำนวณออกแบบโครงสร้างชั้นทาง Structural Number (SN) Sawangsuriya et al. (2023)



รูปที่ 2.9 เส้นกราฟการออกแบบจากการคำนวณออกแบบโครงสร้างชั้นทาง Equivalent Thickness ( $h_e$ ) Sawangsuriya et al. (2023)

### 2.3.1 Full-Depth Asphalt ( $T_a$ )

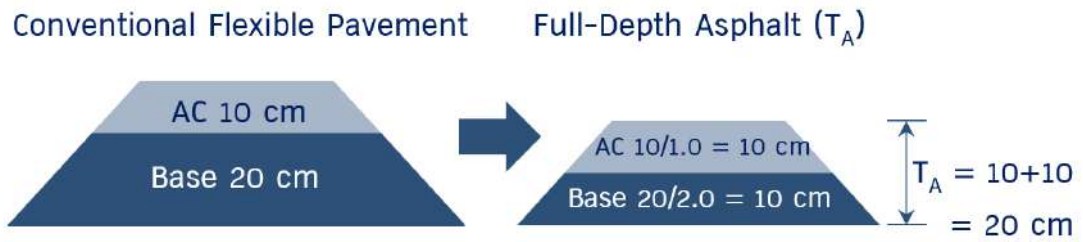
การแปลงความหนาของโครงสร้างถนนลาดยางแบบ Full-Depth Asphalt ( $T_a$ ) ตามวิธีการออกแบบของ AI (1970) สามารถทำได้โดยการใช้ค่า Substitution Ratio ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 2.3

ซึ่งค่า Substitution Ratio นี้เป็นอัตราส่วนตามที่ AI (The Asphalt Institute) แนะนำเพื่อใช้แปลงความหนา  $T_A$  เป็นความหนาของชั้นวัสดุสร้างทางชนิดต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการใช้วัสดุมวลรวมแทนแอสฟัลต์คอนกรีต โดยที่วัสดุมวลรวมมีความหนาเท่ากับ 30 เซนติเมตร จากตารางที่ 2.3 ค่า Substitution Ratio ของวัสดุชนิดนี้เท่ากับ 2.7 ดังนั้นวัสดุมวลรวมที่มีความหนาดังกล่าวจะสามารถทดแทนแอสฟัลต์คอนกรีตได้เท่ากับ  $30/2.7 = 11.11$  เซนติเมตร ซึ่งในทางปฏิบัติการใช้แอสฟัลต์คอนกรีตในการออกแบบทั้งโครงสร้างนั้นต้องใช้งบประมาณค่อนข้างมาก ดังนั้นหากสามารถสมมติความหนาของโครงสร้างชั้นทางที่เหมาะสม ซึ่งจะประกอบด้วยผิวทาง พื้นทาง รองพื้นทาง วัสดุคัดเลือก เป็นต้น แล้วแปลงเป็นความหนา  $T_A$  เพื่อตรวจสอบว่าเหมาะสมเพียงพอหรือไม่ การตรวจสอบดังกล่าวสามารถทำได้โดยการนำความหนาของชั้นโครงสร้างทางแต่ละชั้นที่ได้ออกแบบไว้หารด้วยค่า Substitution Ratio ตามชนิดของวัสดุ จากนั้นให้นำเอาผลรวมของความหนา  $T_A$  ที่ได้เปรียบเทียบกับค่า  $T_A$  ที่ได้จากสมการออกแบบ หรือ แผนภูมิออกแบบ (Nomograph) ของ AI (1970) หากผลรวมดังกล่าวมีค่ามากกว่าค่า  $T_A$  ที่ได้จากสมการออกแบบ แสดงว่าโครงสร้างถนนลาดยางที่ออกแบบนั้นมีความหนาเพียงพอ

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า Substitution Ratio ของวัสดุชนิดต่างๆ (AI 1970)

วัสดุ	Substitution Ratio
แอสฟัลต์คอนกรีต	1.0
Hot-mix Sand Asphalt Base	1.3
Emulsified Asphalt Base	1.4
หินคลุกผสมซีเมนต์ และ Pavement Recycling (UCS $\geq 24.5$ ksc)	1.5*
หินคลุก (CBR $\geq 80\%$ )	2.0
วัสดุมวลรวม (CBR $\geq 25\%$ )	2.7
วัสดุคัดเลือก ก (CBR $\geq 10\%$ )	3.0*
วัสดุคัดเลือก ข (CBR $\geq 6\%$ )	3.5*

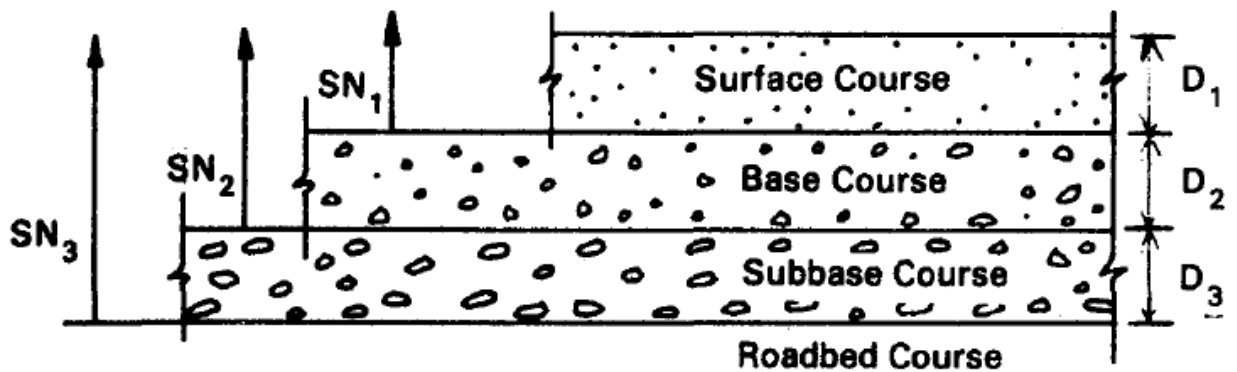
หมายเหตุ: AI (1970) มิได้แนะนำไว้ แต่เป็นค่าที่กรมทางหลวงเลือกใช้จากประสบการณ์



รูปที่ 2.10 การแปลงความหนา  $T_A$  ตามวิธีของ AI (1970)

### 2.3.2 Structural Number (SN)

การแปลงความหนาของโครงสร้างถนนลาดยางโดยใช้ค่า Structural Number (SN) ตามวิธีการออกแบบของ AASHTO (1993) สามารถทำได้โดยการกำหนดค่า Structural Number (SN) ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ (1) ความหนาของชั้นทาง (Layer Thickness) (2) ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของชั้นทาง (Layer Coefficient) และ (3) ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมน้ำของชั้นทาง (Drainage Coefficient) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.11 ค่า Structural Number (SN) ของโครงสร้างชั้นทาง (AASHTO 1993)

โดยค่า SN ของโครงสร้างชั้นทางเท่ากับผลรวมของค่า SN ของชั้นทางแต่ละชั้น ดังนี้

$$SN = [SN_1 + SN_2 + SN_3] = [a_1 D_1 m_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3] \quad (2.1)$$

เมื่อ  $a_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุชั้นทาง (Layer Coefficient)

$D_i$  คือ ความหนาของวัสดุชั้นทาง

$m_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมน้ำของวัสดุชั้นทาง (ดูตารางที่ 2.4)

( $i = 1$  หมายถึง ผิวทาง,  $i = 2$  หมายถึง พื้นทาง และ  $i = 3$  หมายถึง รองพื้นทาง)

ตารางที่ 2.4 ข้อเสนอแนะสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมน้ำ ( $m_i$ ) ของวัสดุชั้นทางแบบยึดหยุ่น (AASHTO 1993)

Quality of Drainage	Percent of Time Pavement Structure is Exposed to Moisture Levels Approaching Saturation			Greater Than 25%
	Less Than 1%	1-5%	5-25%	
Excellent	1 40-1 35	1 35-1 30	1 30-1 20	1 20
Good	1 35-1 25	1 25-1 15	1 15-1 00	1 00
Fair	1 25-1 15	1 15-1 05	1 00-0 80	0 80
Poor	1 15-1 05	1 05-0 80	0 80-0 60	0 60
Very poor	1 05-0 95	0 95-0 75	0 75-0 40	0 40

ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงและค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมน้ำของวัสดุชั้นทางมีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสยึดหยุ่น (Elastic Modulus) และคุณภาพการระบายน้ำของชั้นทาง AASHTO (1993) ได้แนะนำกราฟและแผนภูมิการออกแบบ ดังรูปที่ 2.12 ถึง 2.14 เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของผิวทาง พื้นทาง และรองพื้นทางจากค่าโมดูลัสยึดหยุ่นของวัสดุชั้นทาง ดังนี้

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete Surface):

$$a_1 = 0.44 + 0.4(\log E_{SF}/3000) \quad (2.2)$$

พื้นทางหินคลุก (Crushed Rock Base) และพื้นทางผสมซีเมนต์ (Cement Stabilized Base):

$$a_2 = 0.249(\log E_{BS}) - 0.977 \quad (2.3)$$

รองพื้นทางวัสดุมวลรวม (Soil Aggregate Subbase):

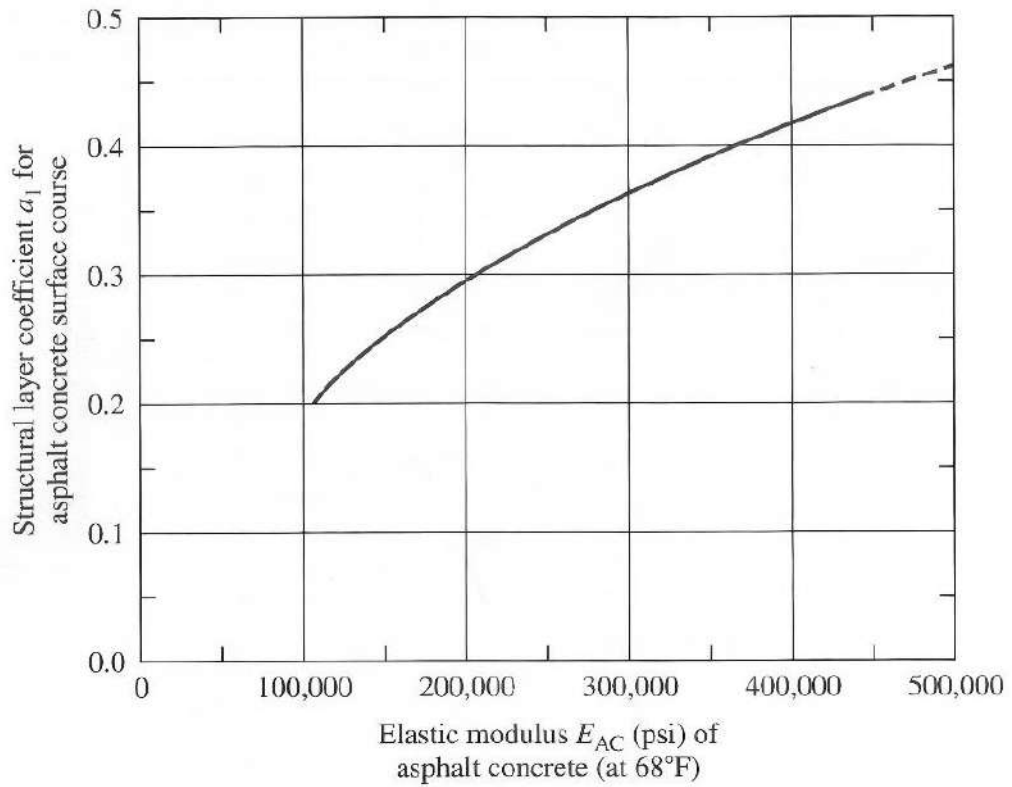
$$a_3 = 0.227(\log E_{SB}) - 0.839 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $a_1$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของผิวทาง  
 $a_2$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของพื้นทาง  
 $a_3$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของรองพื้นทาง

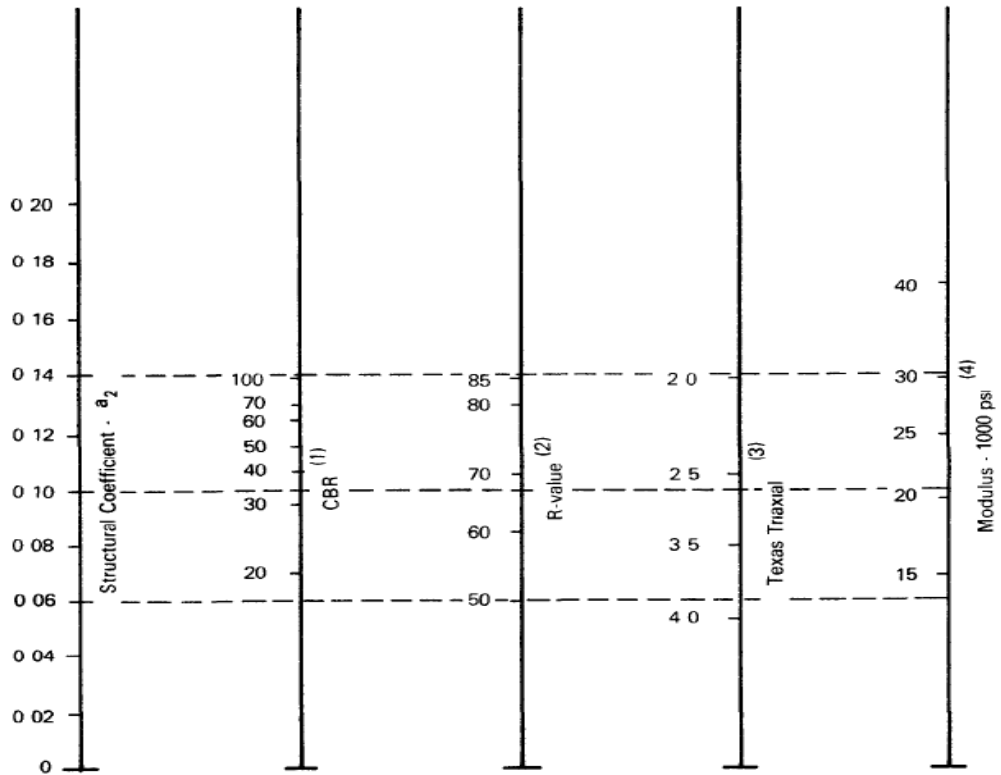
$E_{SF}$  = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (psi)

$E_{BS}$  = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพื้นทางหินคลุก (psi)

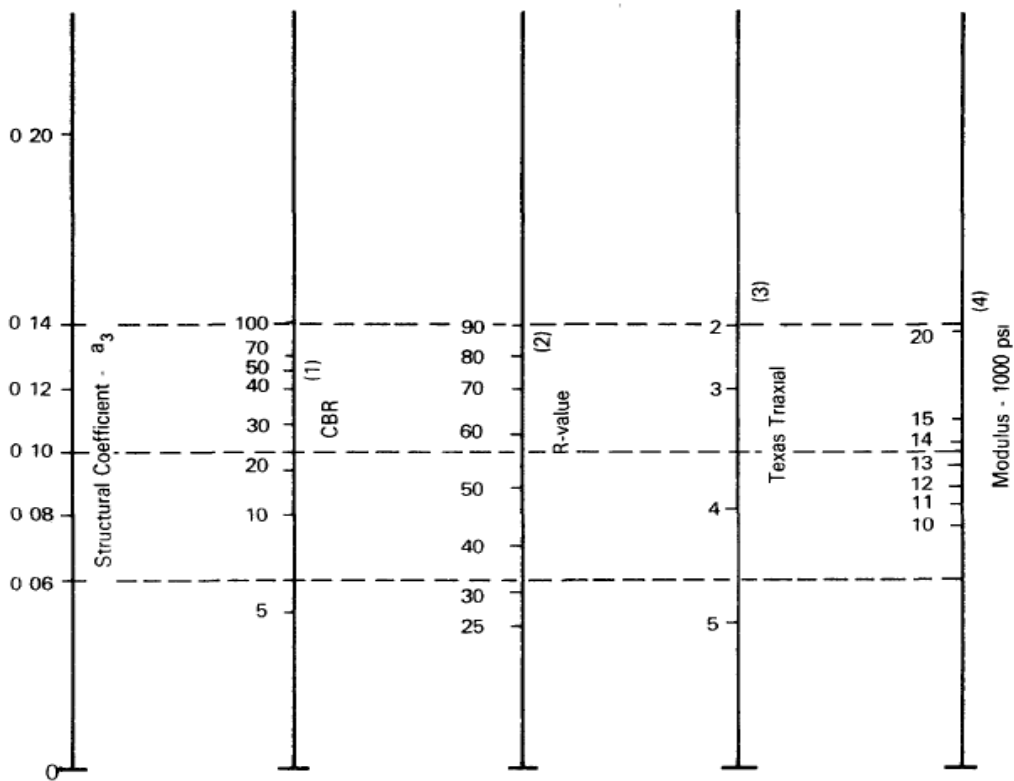
$E_{SB}$  = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรองพื้นทางวัสดุผสมรวม (psi)



รูปที่ 2.12 กราฟประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของผิวทาง ( $a_1$ )



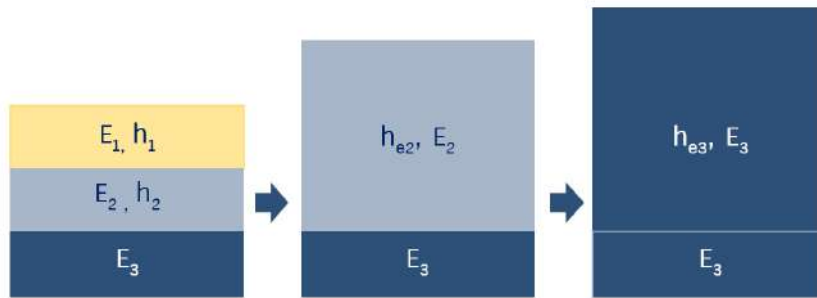
รูปที่ 2.13 แผนภูมิประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของพื้นทาง ( $a_2$ )



รูปที่ 2.14 แผนภูมิประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของรองพื้นทาง ( $a_3$ )

### 2.3.3 Equivalent Thickness ( $h_e$ )

การแปลงความหนาของโครงสร้างถนนลาดยางแบบ Equivalent Thickness ( $h_e$ ) ตามวิธีการออกแบบของ Odemark (Ulitzd 1987) มีหลักการแปลงระบบวัสดุที่เป็นชั้นๆ ให้เป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนความหนาของชั้นวัสดุต่างๆ ตามสัดส่วนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของวัสดุชั้นทาง ดังรูปที่ 2.15 ทั้งนี้วิธีการนี้เป็นเพียงการประมาณเท่านั้น



รูปที่ 2.15 การแปลงความหนา  $h_e$  โดยหลักการ Odemark's Method of Equivalent Thickness (Ulitzd 1987)

สมการแปลงความหนาตามวิธีการของ Odemark's Equivalent Thickness แสดงได้ดังนี้

$$h_e = f * h_1 * \sqrt[3]{\frac{E_1 * (1 - \nu_2^2)}{E_2 * (1 - \nu_1^2)}} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $f$  = ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ (โดยที่ ยกเว้นในวัสดุชั้นบนสุด, 0.8 ในชั้นวัสดุทั่วไป, 0.9 ถ้าในระบบมีวัสดุมากกว่า 2 ชั้น, 1.0 ถ้าในระบบมีวัสดุมากกว่า 3 ชั้น)

$h_1$  = ความหนาของวัสดุชั้นบน

$E_1$  = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุชั้นบน (ดูตารางที่ 2.5)

$E_2$  = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุชั้นล่าง (ดูตารางที่ 2.5)

$\nu_1$  = ค่าอัตราส่วนปัวซองของวัสดุชั้นบน

$\nu_2$  = ค่าอัตราส่วนปัวซองของวัสดุชั้นล่าง

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของวัสดุชั้นทางสำหรับโครงสร้างถนนลาดยางของกรมทางหลวง  
(อัคคพัตน์และคณะ 2566)

วัสดุชั้นทาง	โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	อัตราส่วนปูนของ
ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต	2,500	0.35
พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ และพื้นทาง Pavement Recycling (UCS $\geq$ 24.5 ksc)	850	0.20
พื้นทางหินคลุก (CBR $\geq$ 80%)	350	0.35
รองพื้นทางวัสดุมวลรวม (CBR $\geq$ 25%)	150	0.35
วัสดุคัดเลือก (CBR $\geq$ 10%)	100	0.35
ดินเดิม Subgrade (CBR = 4%)	40	0.40

#### 2.4 การประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

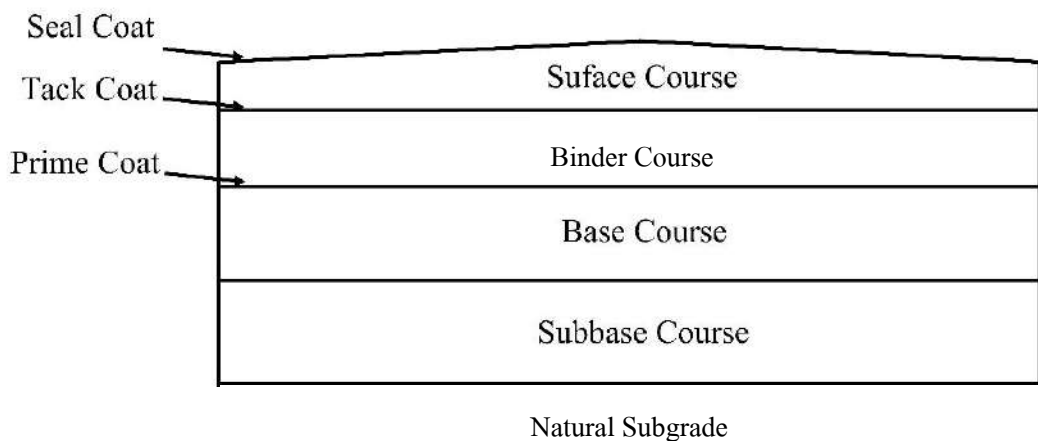
AASHTO (1993) ได้เสนอวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยาง ดังรูปที่ 2.16  
เชิงประจักษ์ (Empirical Design Method) โดยใช้สมการที่อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความ  
แข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง โมดูลัสยืดหยุ่นของดินเดิม จำนวนเที่ยวของเพลาดเดี่ยวมาตรฐาน (18 kips)  
ระดับการให้บริการ ความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ และระดับความเชื่อมั่น ดังนี้

$$\log(W_{18}) = Z_R S_0 + 9.36 \log(SN_{req} + 1) - 0.20 + \frac{\log[\Delta PSI / (4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094 / (SN_{req} + 1)^{5.19}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07 \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} W_{18} &= \text{จำนวนเที่ยวของเพลาดเดี่ยวมาตรฐาน (Equivalent Single Axle Load, ESAL) ในระยะเวลาออกแบบที่กำหนดไว้ เช่น AASHTO กำหนดระยะเวลาออกแบบไว้ที่ 20 ปี (AASHTO) กรมทางหลวง กำหนดระยะเวลาออกแบบไว้ที่ 15 ปี เป็นต้น} \\ &= ADT \times T \times T_F \times G \times Y \times D \times L \times 365 \\ ADT &= \text{ปริมาณจราจรเฉลี่ยรายวัน} \\ T &= \text{เปอร์เซ็นต์รถบรรทุกทุกหน้ก} \\ T_F &= \text{แฟกเตอร์รถบรรทุกทุกมาตรฐาน (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.0)} \\ G &= \text{แฟกเตอร์การเติบโตของปริมาณจราจร} \\ &= \frac{(1+r)^Y - 1}{r} \end{aligned}$$

Y	=	อายุการออกแบบ
D	=	แฟกเตอร์ทิศทางจราจร (ดูตาราง 2.6)
L	=	แฟกเตอร์ช่องจราจรในแต่ละทิศทาง (กำหนดให้มีค่ามีค่า 0.9)
r	=	อัตราการเติบโตของปริมาณจราจรเฉลี่ยรายปี
$Z_R$	=	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Normal Deviation) (ดูตาราง 2.7) กำหนดโดยระดับความเชื่อมั่น (Reliability) เช่น ถ้าระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะใช้ค่า $Z_R = -1.645$ หรือถ้าระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 85 จะใช้ค่า $Z_R = -1.037$
$S_o$	=	ความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ปริมาณจราจรและทำนายการเสื่อมสภาพโครงสร้างถนน (Standard Error) สำหรับโครงสร้างชั้นทางแบบยึดหยุ่น AASHTO (1993) ให้ค่าแนะนำที่ 0.4 - 0.5
$\Delta PSI$	=	ความสูญเสียระดับการให้บริการ (Design Serviceability Loss) คำนวณได้จากค่า PSI เริ่มเปิดใช้งาน (โดยทั่วไปเท่ากับ 4.2) ถึงค่า PSI สิ้นสุดอายุใช้งาน (ประมาณ 2.7)
SN	=	ความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง (Structural Number)
$M_R$	=	โมดูลัสยึดหยุ่นของดินเดิม (หน่วย psi) อาจประมาณโดยใช้ความสัมพันธ์ $M_R = 1500CBR(\%)$



รูปที่ 2.16 รูปตัดทั่วไปของโครงสร้างถนนลาดยาง

ตารางที่ 2.6 แฟกเตอร์ทิศทางการจราจร (AI 1970)

Number of Traffic Lanes (Two Directions)	Percentage of Trucks in Design Lane
2	50
4	45 (35-48) <sup>1</sup>
6 or more	40 (25-48) <sup>1</sup>

ตารางที่ 2.7 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่กำหนดโดยค่าระดับความเชื่อมั่น (AASHTO 1993)

Reliability, R (percent)	Standard Normal Deviate, Z <sub>R</sub>
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

จากสมการที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าความสามารถในการรับน้ำหนักจราจรของโครงสร้างถนนขึ้นอยู่กับค่า SN ของโครงสร้างชั้นทางแต่ละชั้นและค่า M<sub>R</sub> ของดินเดิม เมื่อถนนเปิดใช้งานโดยตัวค่า SN เป็นตัวแปรที่แปรผันตามความแข็งแรงของโครงสร้างถนน จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

#### 2.4.1 ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน Structural Condition Index (SCI)

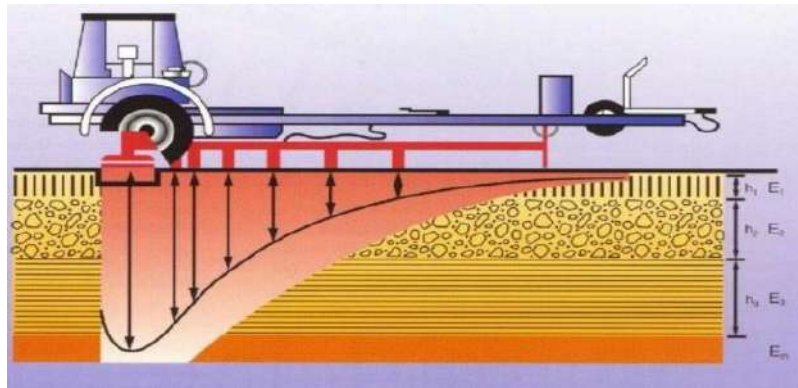
ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน Structural Condition Index (SCI) เป็นดัชนีชี้วัดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการจราจร ซึ่ง SCI มีสมการดังนี้

$$SCI = \frac{SN_{eff}}{SN_{req}} \quad (2.7)$$

เมื่อ

- SCI = ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน  
(Structural Condition Index)
- SN<sub>eff</sub> = ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบัน  
(Effective Structural Number)
- SN<sub>req</sub> = ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ต้องการ (Required Structural Number) ตามปริมาณจราจร ESALs ภายในระยะเวลาออกแบบที่กำหนดไว้ เช่น 15 ปี หรือ 20 ปี เป็นต้น

ในการประเมินค่า SN<sub>eff</sub> ของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบันนิยมใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ซึ่งให้ค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งค่าการแอ่นตัวนี้มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของโครงสร้างถนน จึงทำให้นักวิจัยหลายท่านได้เสนอวิธีการประเมินค่า SN<sub>eff</sub> จากผลการทดสอบ FWD



รูปที่ 2.17 การแอ่นตัวของผิวทางภายใต้แรงกระแทกจากเครื่องมือ FWD

วิธีประเมินค่า SN<sub>eff</sub> ที่เสนอโดย AASHTO (1993) เป็นดังนี้

$$SN_{eff} = 0.0045 * D * E_p^{0.333} \quad (2.8)$$

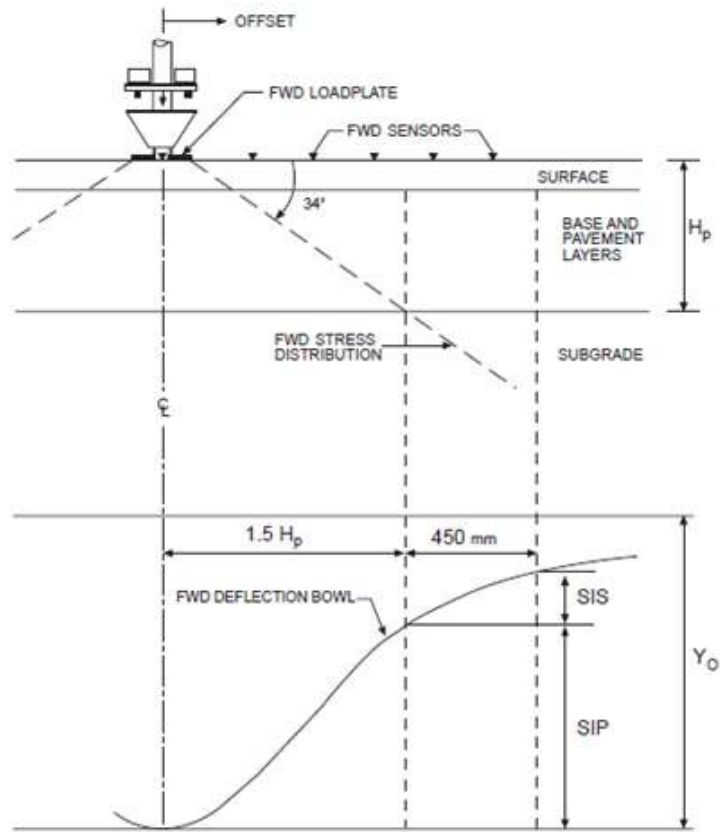
$$d_o = 1.5 * P * a * \left( \frac{1}{E_{SG} * \sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \right)^3 * \frac{E_p}{E_{SG}}}} + \frac{\left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \right)^2}} \right)}{E_p} \right) \quad (2.9)$$

$$E_{SG} = 0.24 * P / (d_7 * 72) \quad (2.10)$$

เมื่อ

$E_p$	=	ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนทั้งหมดเหนือดินเดิม Subgrade หน่วยเป็น psi
$E_{SG}$	=	ค่าโมดูลัสของดินเดิม Subgrade หน่วยเป็น psi
$D$	=	ความหนารวมของโครงสร้างถนน (Total Pavement Thickness) หน่วยเป็น นิ้ว
$a$	=	รัศมีของแผ่นจานโลหะทดสอบ FWD หน่วยเป็น นิ้ว
$d_0, d_7$	=	ค่าการแอ่นตัวของ Sensor ตัวที่ 1 (ตำแหน่งที่น้ำหนักตกกระทบบน) และค่าการแอ่นตัวของ Sensor ตัวที่ 7 (ห่างจาก Sensor ตัวที่ 1 เป็นระยะทาง 72 นิ้ว) ตามลำดับ หน่วยเป็น นิ้ว
$P$	=	น้ำหนักตกกระทบบน (Applied Load) หน่วยเป็น ปอนด์
$SN_{eff}$	=	ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบัน

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  $1.5H_p$  ( $d_{1.5H_p}$ ) ซึ่งเป็นค่าตัวแทนการแอ่นตัวของดินเดิม Subgrade แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD บนโครงสร้างถนน  
(Zhang et al. 2003)

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

$$SN_{eff} = k_1 SIP^{k_2} H_p^{k_3} \quad (2.11)$$

$$SIP = d_o - d_{1.5H_p} \quad (2.12)$$

เมื่อ

- $k_1, k_2, k_3$  = ค่าสัมประสิทธิ์ (Regression Coefficient) ของแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งมีค่าแสดงในตารางที่ 2.8
- SIP = ค่าดัชนีการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน หน่วยเป็น ไมโครเมตร
- $d_o$  = ค่าการแอ่นตัวสูงสุดภายใต้น้ำหนักตกกระทมามาตรฐาน (9,000 lbs) หน่วยเป็น ไมโครเมตร
- $d_{1.5H_p}$  = ค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งห่างจากตำแหน่งน้ำหนักตกกระทมามาตรฐานเป็นระยะทาง 1.5 เท่าของ  $H_p$  หน่วยเป็น ไมโครเมตร
- $H_p$  = ความหนารวมของโครงสร้างถนน (Total Pavement Thickness) หน่วยเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.8 ค่า Regression Coefficient สำหรับคำนวณค่า  $SN_{eff}$  ตามวิธีของ Rohde (1994)

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

#### 2.4.2 ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR)

การหาค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) สามารถทำได้ดังสมการที่ 2.13

$$MR = E_p/E_{design} \quad (2.13)$$

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 2.9)
$H_{AC}$	=	ความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)
$H_{BS}$	=	ความหนาของพื้นทาง (Base)
$H_{SB}$	=	ความหนาของรองพื้นทาง (Subbase)
$H_{SL}$	=	ความหนาของวัสดุคัดเลือก (Selected Material)
$H_{Total}$	=	ความหนารวมของโครงสร้างถนน = $H_{AC} + H_{BS} + H_{SB} + H_{SL}$

ตารางที่ 2.9 ค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางที่ใช้ออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางของกรมทางหลวง

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

Wimsatt (1999) ได้เสนอสมการที่ 2.14 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 2.15 ส่วนค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน (Pavement Modulus,  $E_{P,Eq}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

$$E_{P,Eq} / E_{SG} = 331.37(d_{1800}/d_0)^{5/2} - 158.63(d_{1800}/d_0)^2 + 100.05(d_{1800}/d_0)^{3/2} + 18.39(d_{1800}/d_0) + 0.53(d_{1800}/d_0)^{1/2} \quad (2.14)$$

$$E_{SG} = 0.24P / (d_{1800} * 1800) \quad (2.15)$$

$$E_{P,Eq} = (E_{P,Eq} / E_{SG}) * E_{SG} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$E_{P,Eq}$  = ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (MPa)

$E_{SG}$  = ค่าโมดูลัสของดินเดิม (MPa)

$P$  = น้ำหนักตกกระแทกจากการทดสอบ FWD (สำหรับการศึกษานี้ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50 kN)

$d_0$	=	ค่าการแอ่นตัวสูงสุดหรือที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร (ไมครอน)
$d_{1800}$	=	ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ 1,800 มิลลิเมตร (ไมครอน)

ในการคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation) ขั้นตอนแรกจะสมมติค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชั้น โดยสมมติว่าค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของวัสดุทุกชั้นเท่ากันแล้ว นำค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ วิเคราะห์ได้ตามทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ ที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ FWD ขั้นตอนที่สองจะเฉลี่ยค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางที่คำนวณได้จากขั้นตอนแรกกับค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ FWD แล้ววิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ ทำการคำนวณเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset ต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้ตามทฤษฎีกับที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ FWD ใกล้เคียงกันมากที่สุด จะได้ค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชั้น (แสงชัยและคณะ 2534) ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนคำนวณได้จากการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) ของค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชั้นตามสมการที่ 3.17 สำหรับการศึกษาชั้นและผู้ศึกษา ได้ใช้โปรแกรม Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (ELMOD) ในการคำนวณย้อนกลับ รายละเอียดสรุปไว้ใน แสงชัยและคณะ (2534)

$$E_{p, \text{Back}} = \sum_i^n E_i h_i / H_T \quad (2.17)$$

เมื่อ

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

### 2.4.3 อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวของถนนลาดยาง Normalized Deflection ( $d_o/d_{o, DOH}$ )

อัตราส่วนค่าการแอ่นตัว เป็นดัชนีแสดงค่าการแอ่นตัวที่เปลี่ยนไปของโครงสร้างชั้นทางตามสภาพการใช้งาน โดยจะคำนวณเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยาง ( $d_o$ ) ต่อค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางทั่วไปของกรมทางหลวง ( $d_{o, DOH}$ )

สมการค่า Normalized Deflection ที่เสนอโดย Sawangsurriya et al. (2023) เป็นดังนี้

$$\frac{d_o}{d_{o, DOH}} = \frac{\text{ค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางที่ออกแบบก่อสร้าง} (d_o)}{\text{ค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางทั่วไปของกรมทางหลวง} (d_{o, DOH})}$$

ค่า  $d_o$  เป็นค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางที่มีโครงสร้างถนนใด ๆ ดังรูปซ้ายมือของรูปที่ 2.19 และ ค่า  $d_{o, DOH}$  เป็นค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางที่มีโครงสร้างถนนประกอบด้วย ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 100 มิลลิเมตร พื้นทางหินคลุกหนา 200 มิลลิเมตร รองพื้นทางวัสดุผสมรวมหนา 200 มิลลิเมตร และวัสดุคัดเลือกหนา 200 มิลลิเมตร (Sawangsurriya et al. 2023) ดังรูปขวามือของรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โครงสร้างถนนลาดยางที่ใช้ออกแบบก่อสร้างกับโครงสร้างถนนลาดยางทั่วไปของกรมทางหลวง

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงาน

#### 3.1 อุปกรณ์เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)

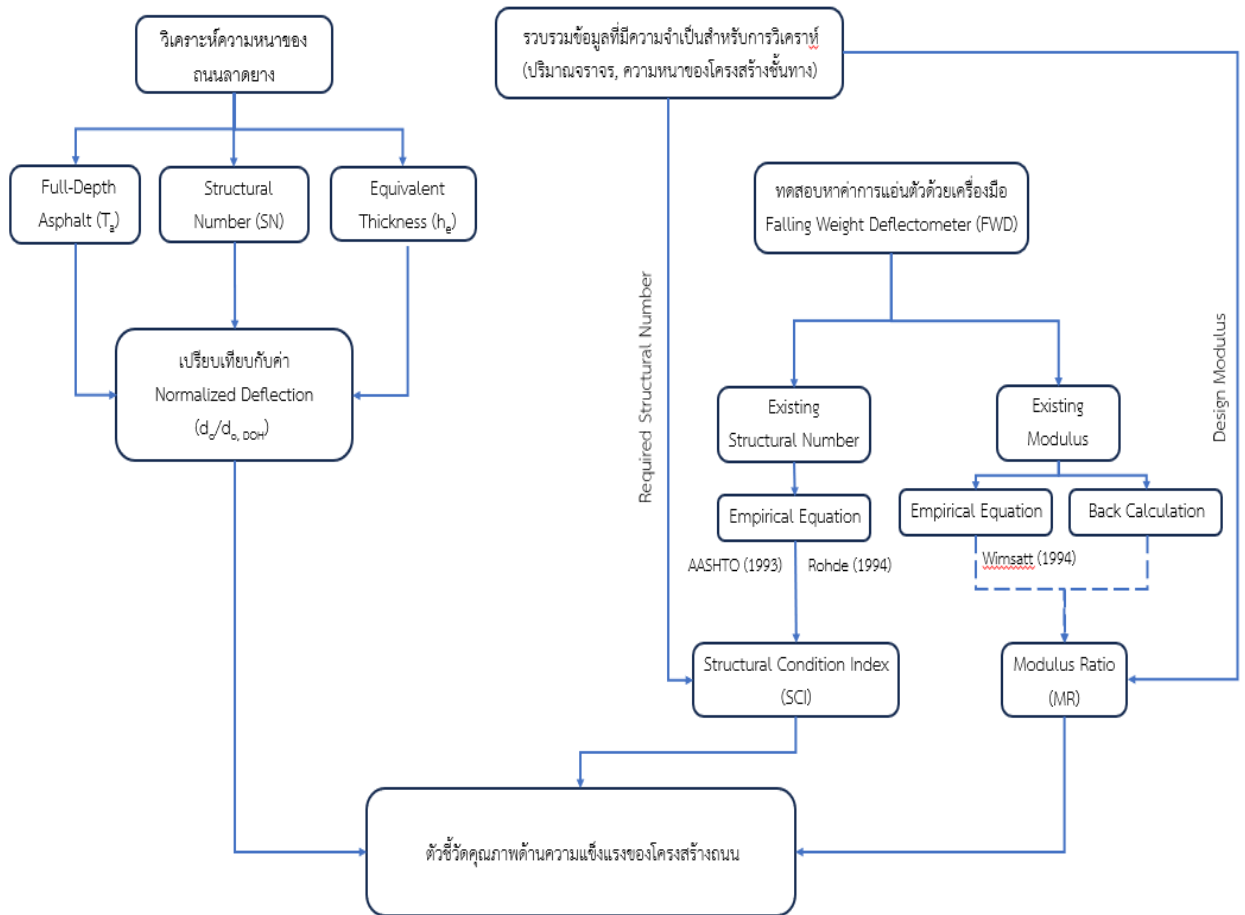
เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) แสดงดังรูปที่ 3.1 เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายที่นิยมทดสอบอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างถนน เป็นเทคโนโลยีที่สามารถทดสอบได้รวดเร็ว โดยให้น้ำหนักกระทำต่อผิวทางและติดตั้งอุปกรณ์เพื่อตรวจวัดค่าการแอ่นตัว (Deflection) ที่ตำแหน่งต่างๆ ห่างจากศูนย์กลางของน้ำหนักกระทำ การทดสอบ FWD สามารถทดสอบได้ทั้งบนถนนลาดยางและถนนคอนกรีต รายงานผลการศึกษาของ ดนัยณัฐ และคณะ (2561) พบว่าการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ใช้หน่วยแรงกระทำเสมือนน้ำหนักบรรทุกทุกจริง โดยการปล่อยน้ำหนักตกกระแทกขนาด 50 kN ลงบนแผ่นจานโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร ผ่านลูกยางชนิดพิเศษเพื่อให้น้ำหนักที่เกิดขึ้นใต้แผ่นจานโลหะมีการแผ่กระจายสม่ำเสมอ แผ่นถ่วงน้ำหนักดังกล่าวสามารถใช้ได้กับพื้นผิวลาดเอียงได้ถึง 6 องศา ขนาดของน้ำหนักกระทำสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามระดับความสูงของการยกตุ้มน้ำหนักที่ปล่อยตกลงมา ซึ่งมีขนาดชั่งน้ำหนักตั้งแต่ 7 ถึง 120 kN ช่วงเวลาของน้ำหนักกระทำประมาณ 25 ถึง 30 มิลลิวินาที เครื่องมือ FWD ประกอบด้วย มาตรวัดการแอ่นตัว (Geophone) จำนวน 9 ตัว ติดตั้งบนคานที่สามารถยกขึ้นลงได้ มีความยาวประมาณ 3,000 มิลลิเมตร โดยค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่สามารถวัดได้ประมาณ 2 มิลลิเมตรแล้วทำการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่ระยะ 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1,200, 1,500 และ 1,800 มิลลิเมตร ห่างจากจุดศูนย์กลางของแผ่นจานโลหะรถสำรวจ การเก็บรวบรวมของผลการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางจะเก็บในช่องจราจรทางซ้ายหรือช่องจราจรที่รถบรรทุกทุกหนักใช้เดินรถ โดยเก็บข้อมูลเป็นจุด ระยะห่างต่อจุดที่ 100 เมตร ข้อมูลที่ได้ประกอบไปด้วยค่าการแอ่นตัวและพารามิเตอร์ต่างๆ จะถูกเก็บบันทึกไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ และประมวลผล ซึ่งสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D4694



รูปที่ 3.1 เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)

### 3.2 แผนดำเนินการศึกษา

รายละเอียดขั้นตอนแผนงานศึกษามีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนแผนงานศึกษา

### 3.3 การรวบรวมข้อมูล

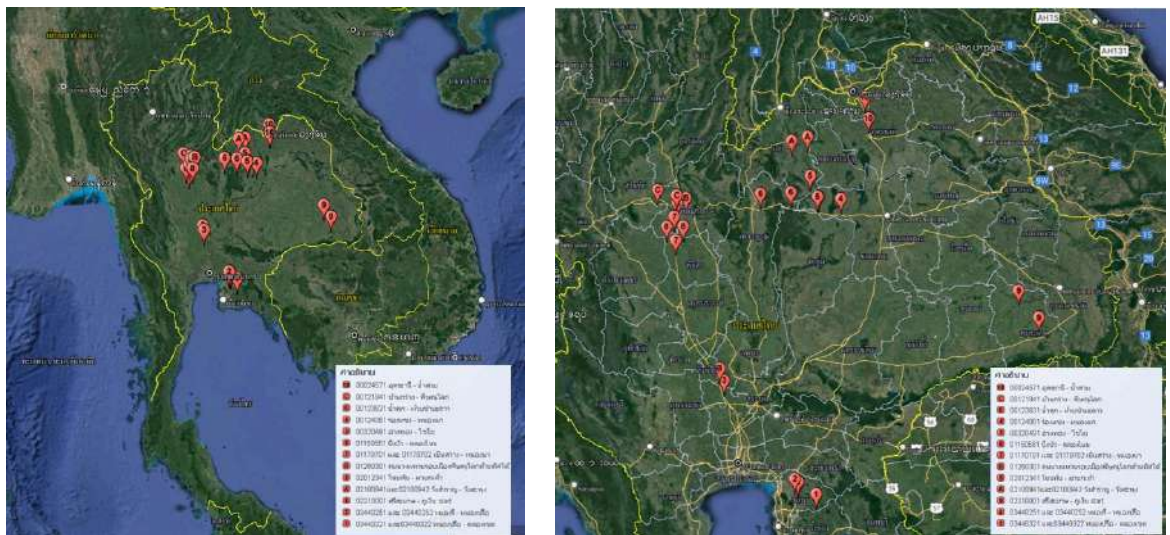
การเก็บรวบรวมข้อมูลที่สำคัญมีความสำคัญ โดยเฉพาะค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่นำมาใช้สำหรับวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน (Design Modulus) และค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในการออกแบบ (Required Structural Number) ได้แก่ ความหนาของโครงสร้างถนนแต่ละชั้น (Layer Thickness) ปริมาณจราจรรายวัน (Average Daily Traffic) เปอร์เซ็นต์รถบรรทุกหนัก (Percent of Heavy Truck) และอัตราการเติบโตของปริมาณจราจร (Growth Rate) โดยรายละเอียดของข้อมูลมีดังนี้

### 1) รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง (Cross-Section)

การวิเคราะห์ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนนจำเป็นต้องทราบข้อมูลลักษณะของชั้นโครงสร้างทาง ได้แก่ ความหนาและชนิดของวัสดุที่นำมาก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง ข้อมูลแบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง (Cross-Section) ทางหลวงของสายทางศึกษารวบรวมไว้ในภาคผนวก ก

2) ปริมาณจราจรรายวัน (Average Daily Traffic) เป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลของกรมทางหลวงบริเวณแปลงที่ได้เก็บข้อมูล ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้จากเว็บไซต์สำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง หรือจากศูนย์กลางข้อมูลเปิดภาครัฐ สำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล (องค์การมหาชน) ซึ่งเป็นข้อมูลที่เปิดเผยและเผยแพร่ให้แก่ประชาชนทั่วไป ในการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะของโครงสร้างถนน คณะผู้ศึกษาจำเป็นต้องทราบข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (Average Daily Traffic) ของสายทางที่คัดเลือก เพื่อใช้คำนวณจำนวนเที่ยวของเพลมาเดี่ยวมาตรฐาน 18,000 ปอนด์ตลอดอายุการออกแบบ ( $W_{18}$ ) ข้อมูลปริมาณจราจรรายวันของสายทางศึกษาสรุปไว้ในภาคผนวก ข

คณะผู้ศึกษาได้คัดเลือกพื้นที่ศึกษาจำนวนทั้งสิ้น 10 สายทาง 13 ตอนควบคุมสรุปไว้ในภาคผนวก ก และตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 พื้นที่ศึกษา

### 3.4 ขั้นตอนการทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD

ในการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD คณะผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาในพื้นที่รับผิดชอบของกรมทางหลวงจำนวนทั้งสิ้น 10 สายทาง 13 ตอนควบคุม เพื่อหาค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน โดยดำเนินการเก็บข้อมูลในช่องจราจรซ้ายสุดซึ่งเป็นช่องจราจรของรถบรรทุกหนัก ทุกระยะ 100 เมตร ด้วยการปล่อยน้ำหนักตกกระทบบนขนาด 50 kN ลงบนแผ่นจานโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร ตารางที่ 3.1 สรุปรายละเอียดของพื้นที่ศึกษา การทดสอบค่าการแอ่นตัวของเครื่องมือ FWD แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยเริ่มจากการวัดอุณหภูมิของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้มาตรวัดอุณหภูมิติดตัวอยู่กับเครื่องมือ FWD ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร รอจนกระทั่งอุณหภูมิที่ทำการวัดคงที่ค่าอุณหภูมิที่ได้จะถูกบันทึกโดยคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังทำการเจาะสำรวจความหนาของโครงสร้างชั้นทางโดย Borescope ดังรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 พื้นที่ศึกษา

ลำดับที่	ทางหลวง หมายเลข	แขวงทางหลวง	ช่วงการเก็บข้อมูล	ทิศทาง
1	344	ชลบุรีที่ 1	กม.25+000 – กม.31+000	LT และ RT
2	344	ชลบุรีที่ 1	กม.32+000 - กม.62+000	LT และ RT
3	32	อ่างทอง	กม.49+087 - กม.66+800	LT และ RT
4	12	ขอนแก่นที่ 2	กม.460+595 - กม.492+269	LT
5	201	ขอนแก่นที่ 2	กม.234+052 - กม.266+500	LT
6	12	เพชรบูรณ์ที่ 1	กม.363+959 - กม.374+000	LT
7	117	พิจิตร	กม.70+000- กม.90+000	LT
8	115	พิจิตร	กม.56+215 - กม.80+000	LT
9	221	ศรีสะเกษที่ 2	กม.0+462 - กม.47+000	LT
10	2	อุดรธานีที่ 1	กม.457+306 – กม.486+306	LT
11	210	เลยที่ 1	กม.94+048 - กม.118+908	LT และ RT
12	12	พิษณุโลกที่ 1	กม.194+769 - กม.225+119	LT
13	126	พิษณุโลกที่ 1	กม.30+203 – กม.46+906	LT



รูปที่ 3.4 การทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD



รูปที่ 3.5 การวัดอุณหภูมิชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตและการเจาะสำรวจชั้นทางเบื้องต้น

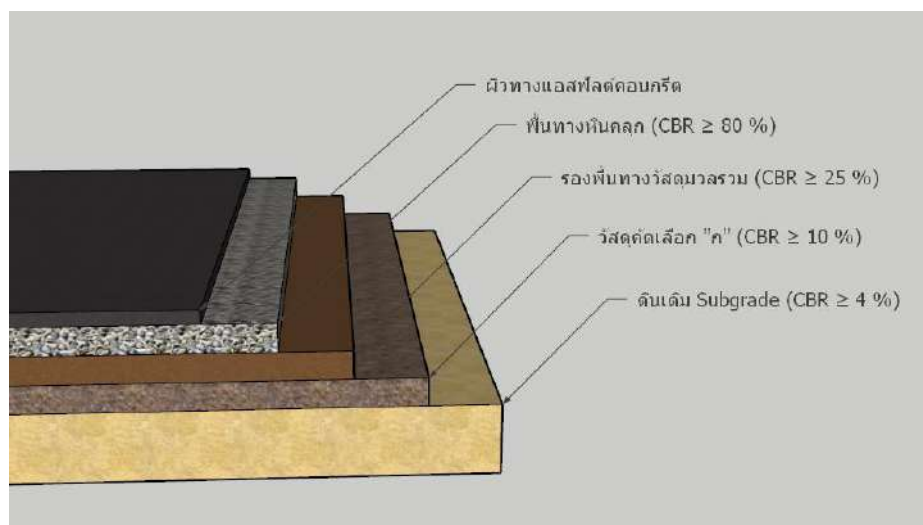
จากนั้นทำการสำรวจค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น โดยทุกครั้งก่อนทำการสำรวจต้องสอบเทียบแรงกระทำที่ใช้ในการทดสอบด้วยการปล่อยตุ้มน้ำหนักที่ความสูงต่างๆ โดยโปรแกรมจะทำการสอบเทียบและบันทึกผล จากนั้นจึงทำการทดสอบโดยการปล่อยตุ้มน้ำหนักของเครื่องมือ FWD เพื่อตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนโดยการปล่อยตุ้มน้ำหนักจำนวน 4 ครั้ง และทำการวัดอุณหภูมิอากาศและพื้นผิวแอสฟัลต์คอนกรีต รองนกระทั่งเครื่องมือดำเนินการเรียบร้อยแล้วจึงบันทึกผลและเคลื่อนย้ายเครื่องมือไปยังจุดทดสอบถัดไป โดยทำการทดสอบทุกๆ ระยะ 100 เมตร

ในการศึกษานี้ คณะผู้ศึกษาได้กำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นงานโลหะ (Loading Plate) ของเครื่องมือ FWD ที่ 300 มิลลิเมตร และหน่วยแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือ FWD ที่ 50 kN หรือประมาณ 707 kPa

### 3.5 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการแอ่นตัวกับความหนาของโครงสร้างถนน

จากข้อมูลที่รวบรวมได้ อาทิ ข้อมูลความหนาของโครงสร้างชั้นทาง (Layer Thickness) ปริมาณจราจร (Average Daily Traffic) เปอร์เซ็นต์รถบรรทุกหนัก (Percent of Heavy Truck) อัตราการเติบโตของปริมาณจราจร (Growth Rate) และค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD นำมาใช้ในการวิเคราะห์ คณะผู้ศึกษาได้จัดประเภทตามลักษณะของโครงสร้างชั้นทาง ออกเป็น 2 ประเภท คือ

**3.5.1 โครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป (Conventional Pavement)** ประกอบด้วยผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีต พื้นทางหินคลก รongพื้นทางวัสดุผสมรวม วัสดุคัดเลือก และดินเดิม ดังรูปที่ 3.6 รายละเอียดของสายทาง ศึกษาสรุปในตารางที่ 3.2

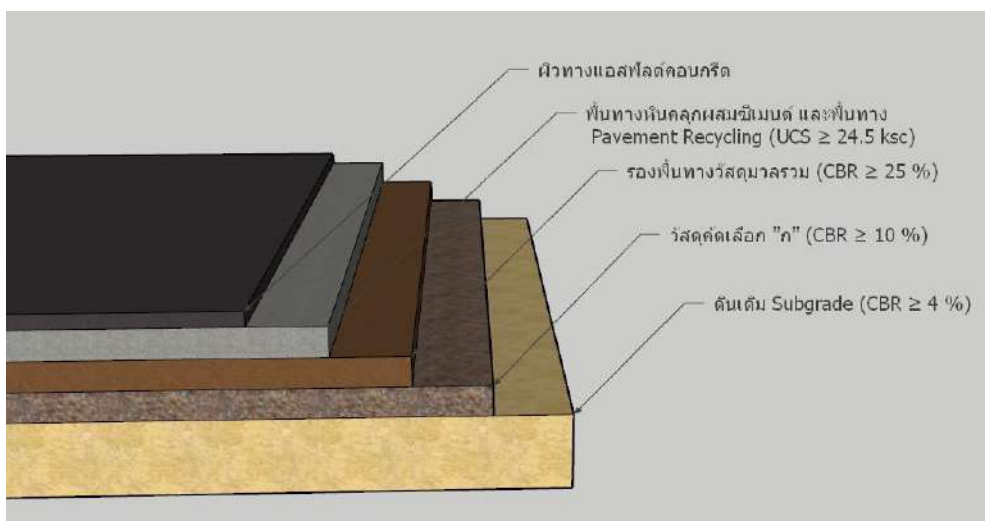


รูปที่ 3.6 โครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป (Conventional Pavement)

ตารางที่ 3.2 สายทางศึกษาโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป

ลำดับ ที่	ทางหลวง หมายเลข	แขวงทางหลวง	ชื่อตอน	ช่วงข้อมูล	ทิศทาง
1	32	อ่างทอง	อ่างทอง - ไซโย	49+087 - 66+800	LT
2	32	อ่างทอง	อ่างทอง - ไซโย	49+087 - 66+800	RT
3	201	ขอนแก่นที่ 2	โนนหัน - สนามเค้า	238+700 - 244+400, 245+100 - 265+100	LT
4	12	ขอนแก่นที่ 2	ร่องแซง - ทนองแก	460+600 - 470+600, 472+600 - 492+267	LT
5	115	พิจิตร	บึงบัว - คลองโนน	57+600 - 65+800	LT
6	210	เลยที่ 1	วังสำราญ - วังสะพุง	97+200 - 102+700	LT
7	2	อุดรธานีที่ 1	อุดรธานี - น้ำสวย	450+000 - 486+300	LT
8	12	พิษณุโลกที่ 1	บ้านกร่าง - พิษณุโลก	194+700 - 196+300, 200+000 - 200+400 204+900 - 208+000	LT
9	12	พิษณุโลกที่ 1	บ้านกร่าง - พิษณุโลก	196+500 - 199+900, 202+500 - 202+600 208+100 - 209+800	LT
10	12	พิษณุโลกที่ 1	บ้านกร่าง - พิษณุโลก	202+700 - 204+800	LT
11	12	พิษณุโลกที่ 1	บ้านกร่าง - พิษณุโลก	217+700 - 220+900	LT
12	126	พิษณุโลกที่ 1	วงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้	40+400 - 41+000	LT

3.5.2 โครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว (Semi-Rigid Pavement) ประกอบไปด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ แล่งพื้นทางวัสดุคัดเลือกและดินเดิม โดยลักษณะของโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัวมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไปแต่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น มีอายุการใช้งานยาวนาน และมีความแข็งแรงสูงกว่าโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไปดังรูปที่ 3.7 รายละเอียดสายทางศึกษาสรุปในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.7 โครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว (Semi-Rigid Pavement)

ตารางที่ 3.3 สายทางศึกษาโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแครงตัว

ลำดับ ที่	ทางหลวง หมายเลข	แขวงทางหลวง	ชื่อตอน	ช่วงข้อมูล	ทิศทาง
1	344	ชลบุรีที่ 1	หนองรี - หนองปรือ	25+900 - 26+800, 27+300 - 27+600, 32+200 - 32+400	LT
2	344	ชลบุรีที่ 1	หนองรี - หนองปรือ หนองปรือ - คลองเขต	25+000 - 25+800, 26+900 - 27+200, 28+700 - 30+900, 32+500 - 34+000, 36+300 - 46+400, 47+100 - 48+600, 49+700 - 61+990	LT
3	344	ชลบุรีที่ 1	หนองปรือ - คลองเขต	34+100 - 36+200	LT
4	344	ชลบุรีที่ 1	หนองรี - หนองปรือ	25+900 - 26+800, 27+300 - 27+600, 32+200 - 32+400	RT
5	344	ชลบุรีที่ 1	หนองรี - หนองปรือ หนองปรือ - คลองเขต	25+000 - 25+800, 26+900 - 27+200, 28+700 - 30+990, 32+500 - 34+000, 36+300 - 46+000, 47+100 - 48+800, 49+700 - 61+990	RT
6	344	ชลบุรีที่ 1	หนองปรือ - คลองเขต	34+100 - 36+200	RT
7	201	ขอนแก่นที่ 2	โนนหัน - ผานกเค๊า	234+400 - 236+400	LT
8	201	ขอนแก่นที่ 2	โนนหัน - ผานกเค๊า	236+500 - 238+600, 244+500 - 245+000	LT
9	117	พิจิตร	เนินสว่าง - หนองนา	70+000 - 88+900	LT
10	117	พิจิตร	เนินสว่าง - หนองนา	70+000 - 88+900	RT
11	221	ศรีสะเกษที่ 2	ศรีสะเกษ - ภูเงิน	0+700 - 20+300	LT
12	221	ศรีสะเกษที่ 2	ศรีสะเกษ - ภูเงิน	21+000 - 26+600, 37+300 - 38+400	LT
13	210	เลขที่ 1	วังสำราญ - วังสะพุง	110+400 - 111+500	LT
14	210	เลขที่ 1	วังสำราญ - วังสะพุง	110+400 - 111+500	RT
15	12	พิษณุโลกที่ 1	บ้านกร่าง - พิษณุโลก	209+900 - 212+100, 221+000 - 222+050	LT
16	12	พิษณุโลกที่ 1	บ้านกร่าง - พิษณุโลก	212+200 - 215+200	LT
17	12	พิษณุโลกที่ 1	บ้านกร่าง - พิษณุโลก	215+300 - 217+600	LT
18	12	พิษณุโลกที่ 1	บ้านกร่าง - พิษณุโลก	222+870 - 225+000	LT
19	126	พิษณุโลกที่ 1	วงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้	32+000 - 32+600, 35+700 - 36+200	LT
20	126	พิษณุโลกที่ 1	วงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้	32+700 - 35+600, 38+800 - 40+300 42+200 - 44+600	LT
21	126	พิษณุโลกที่ 1	วงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้	42+000 - 42+100, 44+700 - 46+300	LT

คณะผู้ศึกษาได้พิจารณาเลือกใช้ค่า Normalized Deflection ( $d_o/d_o, DOH$ ) รายละเอียดของการศึกษาค่า Normalized Deflection ( $d_o/d_o, DOH$ ) รวบรวมใน วพ.318 โครงการวิจัยเพื่อจัดทำข้อกำหนดและวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางสำหรับประเทศไทย (อัครพัฒน์และคณะ 2566) เพื่อสามารถเปรียบเทียบกับข้อมูลค่าการอ่อนตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD

ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง และได้นำข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์มาพัฒนากราฟการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยาง

### 3.6 การวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

คณะผู้ศึกษาได้หาดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนนจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD โดยพิจารณาจากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ทดสอบในสนาม ณ ช่วงเวลาต่างๆ (Existing Index) กับค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ใช้ในการออกแบบ (Design Index) ที่ได้จากการคำนวณ ดังสมการที่ 2.6 และนำมาวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน 3 วิธี ได้แก่ (1) การหาค่า  $d_o/d_o, DOH$  (2) การหาค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index, SCI) โดยวิธีของ Rohde (1994) และ AASHTO (1993) ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.11 ถึง 2.12 ตามลำดับ และ (3) การหาค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) โดยวิธีของ Wimsatt (1999) และวิธีการ Backcalculation ดังสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.13 ตามลำดับ

#### 3.6.1 ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ใช้ในการออกแบบ ( $SN_{req}$ )

จากข้อมูลที่รวบรวมได้ คณะผู้ศึกษาได้ใช้ สมการที่ 2.6 ในการคำนวณหาค่า  $SN_{req}$  และกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาค่า  $SN_{req}$

$W_{18}$	จำนวนเที่ยวของเพลลาเดี่ยวมาตรฐาน ใช้ระยะเวลาออกแบบที่ 10 ปี
$Z_R$	ความเบี่ยงเบนมาตรฐานร้อยละ 85 ใช้ค่า $Z_R = -1.037$
$S_o$	ความคลาดเคลื่อนใช้ที่ 0.5
$\Delta PSI$	ความสูญเสียระดับการให้บริการใช้ที่ 1.5
$M_R$	ใช้ความสัมพันธ์ $M_R = 1500 CBR$ (%)

#### 3.6.2 ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบัน ( $SN_{eff}$ )

คณะผู้ศึกษาได้ใช้วิธีประเมินค่า  $SN_{eff}$  ที่เสนอโดย AASHTO (1993) ดังสมการที่ 2.8 และวิธีประเมินค่า  $SN_{eff}$  ที่เสนอโดย Rohde (1994) ดังสมการที่ 2.11 ถึง 2.12 มาใช้ในการวิเคราะห์ค่า  $SN_{eff}$  เพื่อวิเคราะห์ ค่า SCI ดังสมการที่ 2.7

### 3.6.3 ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนที่ใช้ในการออกแบบ ( $E_{design}$ )

จากข้อมูลที่รวบรวมได้ คณะผู้ศึกษาได้ใช้ความหนาของโครงสร้างถนนและค่าโมดูลัสของวัสดุตามรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง (Cross -Section) ของสายทางศึกษา เพื่อนำความหนาและชนิดของวัสดุมาใช้ประกอบในการหาค่า  $E_{design}$  ดังที่ปรากฏในสมการที่ 2.13

### 3.6.4 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนนทดสอบในสนาม ณ ช่วงเวลาต่างๆ

คณะผู้ศึกษาได้ใช้ค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบ FWD ณ ตำแหน่งของแรงกระทำหรือที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร ( $d_0$ ) แทนดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน ในขณะที่ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ 1,800 มิลลิเมตร ( $d_{1800}$ ) แทนดัชนีความแข็งแรงของดินเดิม (Subgrade) ค่าโมดูลัสของดินเดิม (Subgrade Modulus,  $E_{SG}$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15 ส่วนค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน (Pavement Modulus,  $E_p, E_q$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.16 (Wimsatt 1999)

คณะผู้ศึกษาได้คำนวณ ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนทดสอบในสนาม ณ ช่วงเวลาต่างๆ ด้วยวิธีการ Backcalculation โดยใช้โปรแกรม ELMOD (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design)

### 3.6.5 ค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยาง ( $d_0$ )

จากข้อมูลจากการทดสอบ คณะผู้ศึกษาได้ใช้ค่าการแอ่นตัวสูงสุด ณ ตำแหน่งของแรงกระทำที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร เป็นค่าของ  $d_0$

### 3.6.6 ค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางทั่วไปของกรมทางหลวง ( $d_{0,DOH}$ )

จากข้อมูลจากการทดสอบ คณะผู้ศึกษาได้ใช้ค่าการแอ่นตัวสูงสุด ณ ตำแหน่งของแรงกระทำที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร ของสายทางที่มีโครงสร้างถนนประกอบด้วย ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 100 มิลลิเมตร พื้นทางหินคลุกหนา 200 มิลลิเมตร รองพื้นทางวัสดุมวลรวมหนา 200 มิลลิเมตร และวัสดุคัดเลือกหนา 200 มิลลิเมตร เป็นตัวแทนของค่า  $d_{0,DOH}$

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

#### 4.1 การเปรียบเทียบอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection ( $d_o/d_{o, DOH}$ ) ของโครงสร้างถนนที่ได้จากเครื่องมือ FWD กับวิธีการออกแบบทั้ง 3 วิธี

คณะผู้ศึกษาทำการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่ได้จากเครื่องมือ FWD โดยจะเลือกใช้ค่า Normalized Deflection ( $d_o/d_{o, DOH}$ ) หรืออัตราส่วนของค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยาง ( $d_o$ ) และค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางตามมาตรฐานทั่วไปของกรมทางหลวง ( $d_{o, DOH}$ ) ซึ่งเป็นโครงสร้างถนนที่ประกอบด้วย ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 100 มิลลิเมตร พื้นทางหินคลุกหนา 200 มิลลิเมตร รองพื้นทางวัสดุมวลรวมหนา 200 มิลลิเมตร และวัสดุคัตเลือกหนา 200 มิลลิเมตร ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนลาดยางที่ได้จากการสำรวจในโครงการนี้มีค่า  $d_{o, DOH}$  เฉลี่ยอยู่ที่ 251.3 ไมครอน ซึ่งได้จากทางหลวงหมายเลข 126 ช่วง กม.40+400 – 41+000 และนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง โดยเป็นข้อมูลสำรวจในปี 2566 จำนวนทั้งสิ้น 10 สายทาง 13 ตอนควบคุม ดังนี้ (1) ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 102 หนองรี – หนองปรือ แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.25+000 – กม.31+000 (LT และ RT) (2) ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103 หนองปรือ - คลองเขต แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.32+000 - กม.62+000 (LT และ RT) (3) ทางหลวงหมายเลข 32 ตอนที่ 202 อ่างทอง - ไชโย แขวงทางหลวง อ่างทอง กม.49+087 - กม.66+800 (LT และ RT) (4) ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก แขวงทางหลวงขอนแก่นที่ 2 (ชุมแพ) กม.460+595 - กม.492+269 (LT) (5) ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหัน - ผานกเค้า แขวงทางหลวงขอนแก่นที่ 2 (ชุมแพ) กม.234+052 - กม.266+500 (LT) (6) ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำดุก - ห้วยข่ามะควา แขวงทางหลวง เพชรบูรณ์ที่ 1 กม.363+959 - กม.374+000 (LT) (7) ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา แขวงทางหลวงพิจิตร กม.70+000- กม.90+000 (LT) (8) ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว – คลองโนน แขวงทางหลวงพิจิตร กม.56+215 - กม.80+000 (LT) (9) ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ – ภูเงิน แขวงทางหลวงศรีสะเกษที่ 2 กม.0+462+000 - กม.47+000 (LT) (10) ทางหลวงหมายเลข 2 ตอนที่ 602 อุดรธานี – น้ำสวยแขวงทางอุดรธานีที่ 1 กม.457+306 – กม.486+306 (LT) (11) ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300วังสำราญ – วังสะพุง แขวง

ทางหลวงเลขที่ 1 กม.94+048 - กม.118+908 (LT และ RT) (12) ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก แยกทางหลวงพิษณุโลกที่ 1 กม.194+769 - กม.225+119 (LT) และ(13) ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ แยกทางหลวงพิษณุโลกที่ กม.30+203 - กม.46+906 (LT) เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างถนนมีผลต่อค่าการแอ่นตัวอย่างมีนัยสำคัญ คณะผู้ศึกษาจึงได้ทำการแยกข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ (1) ชุดข้อมูลโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป (Conventional Pavement) และ (2) ชุดข้อมูลโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งเกร็งตัว (Semi-Rigid Pavement) ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป (Conventional Pavement)

ID	Highway No.	Section	Direction	Pavement Structure						AC Type	SN	T <sub>a</sub>	h <sub>e</sub>	Average d <sub>o</sub>	d <sub>o, DOH</sub>	d <sub>o</sub> /d <sub>o, DOH</sub>
				AC (cm.)	Base (cm.)	Subbase (cm.)	Selected Material (cm.)	Subgrade (cm.)	Base Type							
1	32	49+087 - 66+800	LT	25	20	20	-	-	Crushed Rock Base	Thick AC	6.70	42.41	92.31	291.49	251.26	1.16
2	32	49+087 - 66+800	RT	25	20	20	-	-	Crushed Rock Base	Thick AC	6.70	42.41	92.31	278.41	251.26	1.11
3	201	238+700 - 244+400, 245+100 - 265+100	LT	10	20	15	15	-	Crushed Rock Base	Thick AC	4.62	30.56	76.42	309.38	251.26	1.23
4	12	460+600 - 470+600, 472+600 - 492+267	LT	10	20	15	15	-	Crushed Rock Base	Thick AC	4.62	30.56	76.42	319.88	251.26	1.27
5	115	57+600 - 65+800	LT	10	15	15	15	-	Crushed Rock Base	Thick AC	4.24	28.06	70.35	464.40	251.26	1.85
6	210	97+200 - 102+700	LT	10	20	15	15	-	Crushed Rock Base	Thick AC	4.62	30.56	76.42	448.56	251.26	1.79
7	2	460+000 - 486+300	LT	10	25	30	-	-	Crushed Rock Base	Thick AC	5.24	33.61	76.96	354.96	251.26	1.41
8	12	194+700 - 196+300, 200+000 - 200+400 204+900 - 208+000	LT	15	20	20	20	-	Crushed Rock Base	Thick AC	5.92	39.07	97.70	483.54	251.26	1.92
9	12	196+500 - 199+900, 202+500 - 202+600 208+100 - 209+800	LT	10	20	20	20	-	Crushed Rock Base	Thick AC	5.12	34.07	86.00	696.52	251.26	2.77
10	12	202+700 - 204+800	LT	14	20	20	20	-	Crushed Rock Base	Thick AC	5.76	38.07	95.36	660.42	251.26	2.63
11	12	217+700 - 220+900	LT	14	20	20	20	-	Crushed Rock Base	Thick AC	5.76	38.07	94.64	682.60	251.26	2.72
12	126	40+400 - 41+000	LT	10	20	20	20	-	Crushed Rock Base	Thick AC	5.12	34.07	86.00	251.26	251.26	1.00

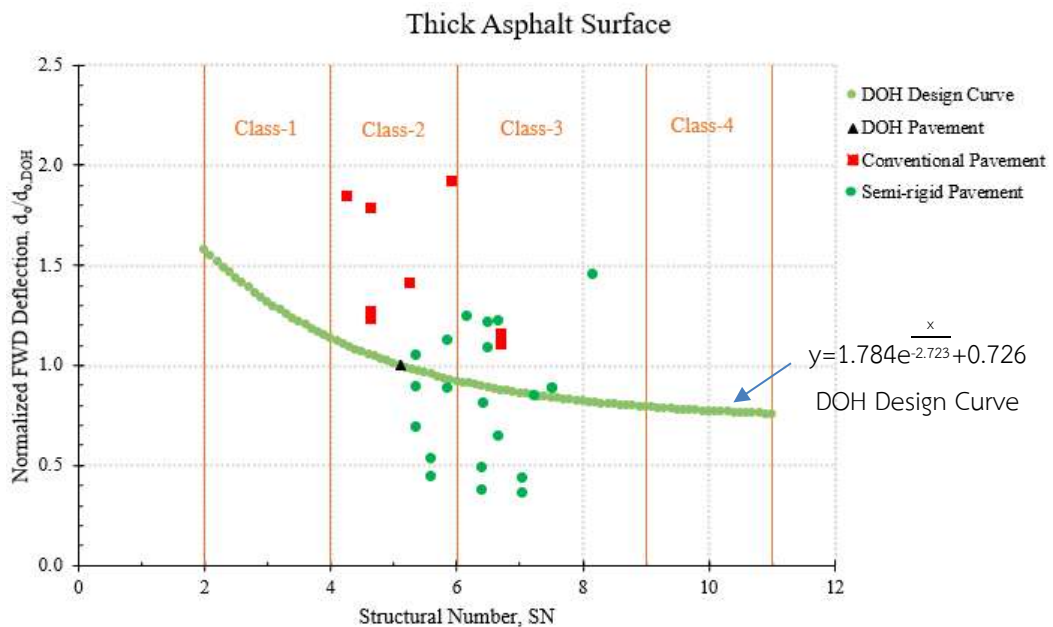
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว (Semi-Rigid Pavement)

ID	Highway No.	Section	Direction	Pavement Structure						AC Type	SN	T <sub>a</sub>	h <sub>e</sub>	Average d <sub>o</sub>	d <sub>o,DOH</sub>	d <sub>o</sub> /d <sub>o,DOH</sub>
				AC (cm.)	Base (cm.)	Subbase (cm.)	Selected Material (cm.)	Subgrade (cm.)	Base Type							
1	344	25+900 - 26+800, 27+300 - 27+600, 32+200 - 32+400	LT	10	20	30	-	-	Recycling Base	Thick AC	5.62	34.44	78.12	110.88	251.26	0.44
2	344	25+000 - 25+800, 26+900 - 27+200, 28+700 - 30+900, 32+500 - 34+000, 36+300 - 46+400, 47+100 - 48+600, 49+700 - 61+990	LT	15	20	30	-	-	Recycling Base	Thick AC	6.42	39.44	88.34	121.56	251.26	0.48
3	344	34+100 - 36+200	LT	19	20	30	-	-	Recycling Base	Thick AC	7.06	43.44	96.51	108.40	251.26	0.43
4	344	25+900 - 26+800, 27+300 - 27+600, 32+200 - 32+400	RT	10	20	30	-	-	Recycling Base	Thick AC	6.42	39.44	88.34	93.92	251.26	0.37
5	344	25+000 - 25+800, 26+900 - 27+200, 28+700 - 30+990, 32+500 - 34+000, 36+300 - 46+000, 47+100 - 48+800, 49+700 - 61+990	RT	15	20	30	-	-	Recycling Base	Thick AC	5.62	34.44	78.12	133.63	251.26	0.53
6	344	34+100 - 36+200	RT	19	20	30	-	-	Recycling Base	Thick AC	7.06	43.44	96.51	89.46	251.26	0.36
7	201	234+400 - 236+400	LT	15	20	15	15	-	Pavement Recycling	Thick AC	6.18	38.89	96.48	311.41	251.26	1.24
8	201	236+500 - 238+600, 244+500 - 245+000	LT	10	20	15	15	-	Cement Modified Crushed Rock Base	Thick AC	5.38	33.89	84.78	223.25	251.26	0.89
9	117	70+000 - 88+900	LT	10	20	20	35	-	Recycling Base	Thick AC	6.50	42.41	108.40	271.67	251.26	1.08
10	117	70+000 - 88+900	RT	10	20	20	35	-	Recycling Base	Thick AC	6.50	42.41	108.40	304.97	251.26	1.21
11	221	0+700 - 20+300	LT	10	20	20	20	-	Soil Cement Base	Thick AC	5.87	37.41	93.40	222.24	251.26	0.88

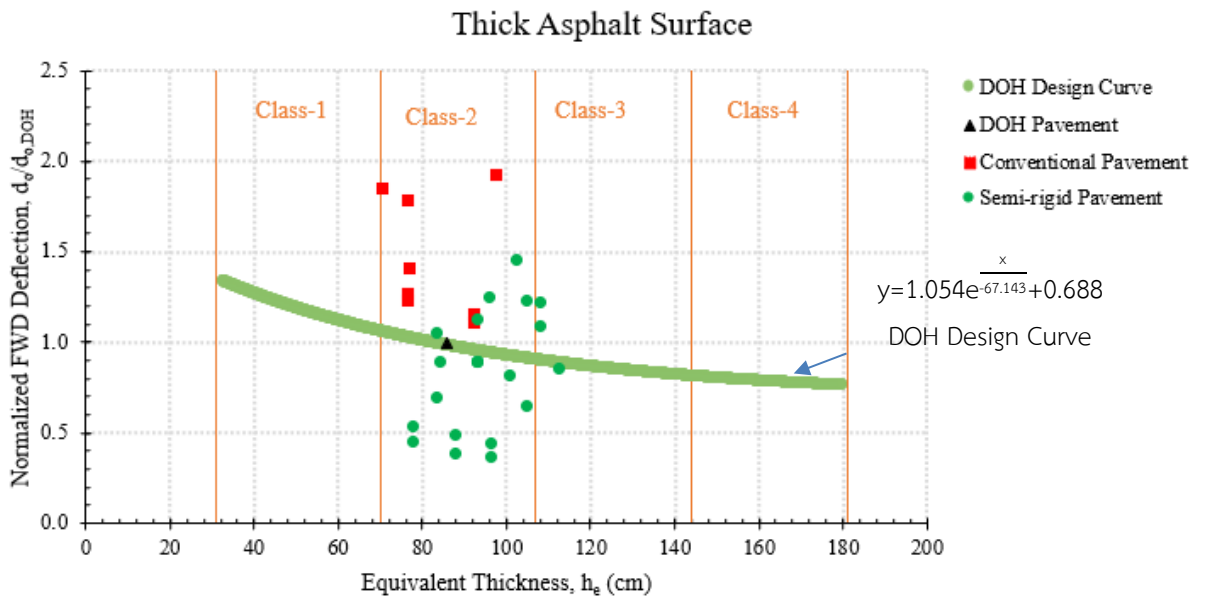
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ข้อมูลโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว (Semi-Rigid Pavement)

ID	Highway No.	Section	Direction	Pavement Structure						AC Type	SN	T <sub>a</sub>	h <sub>e</sub>	Average d <sub>o</sub>	d <sub>o,DOH</sub>	d <sub>o</sub> /d <sub>o,DOH</sub>
				AC (cm.)	Base (cm.)	Subbase (cm.)	Selected Material (cm.)	Subgrade (cm.)	Base Type							
12	221	21+000 - 26+600, 37+300 - 38+400	LT	10	20	20	20	-	Recycling Base	Thick AC	5.87	37.41	93.40	281.99	251.26	1.12
13	210	110+400 - 111+500	LT	10	20	15	15	-	Cement Modified Crushed Rock Base	Thick AC	5.38	33.89	83.82	171.91	251.26	0.68
14	210	110+400 - 111+500	RT	10	20	15	15	-	Cement Modified Crushed Rock Base	Thick AC	5.38	33.89	83.82	262.71	251.26	1.05
15	12	209+900 - 212+100, 221+000 - 222+050	LT	10	20	20	20	-	Cement Modified Crushed Rock Base	Thick AC	7.54	37.41	93.40	221.49	251.26	0.88
16	12	212+200 - 215+200	LT	10	20	20	20	-	Pavement Recycling	Thick AC	7.54	37.41	93.40	221.89	251.26	0.88
17	12	215+300 - 217+600	LT	15	20	20	20	-	Cement Modified Crushed Rock Base	Thick AC	6.68	42.41	105.09	306.98	251.26	1.22
18	12	222+870 - 225+000	LT	14	20	20	20	-	Cement Modified Crushed Rock Base	Thick AC	8.18	41.41	102.75	364.45	251.26	1.45
19	126	32+000 - 32+600, 35+700 - 36+200	LT	10	20	20	20		Cement Modified Crushed Rock Base	Thick AC	6.68	42.41	105.09	162.15	251.26	0.65
20	126	32+700 - 35+600, 38+800 - 40+300 42+200 - 44+600	LT	15	25	20	20		Cement Modified Crushed Rock Base	Thick AC	7.25	45.74	113.02	212.99	251.26	0.85
21	126	42+000 - 42+100, 44+700 - 46+300	LT	10	25	20	20		Cement Modified Crushed Rock Base	Thick AC	6.45	40.74	101.32	202.80	251.26	0.81

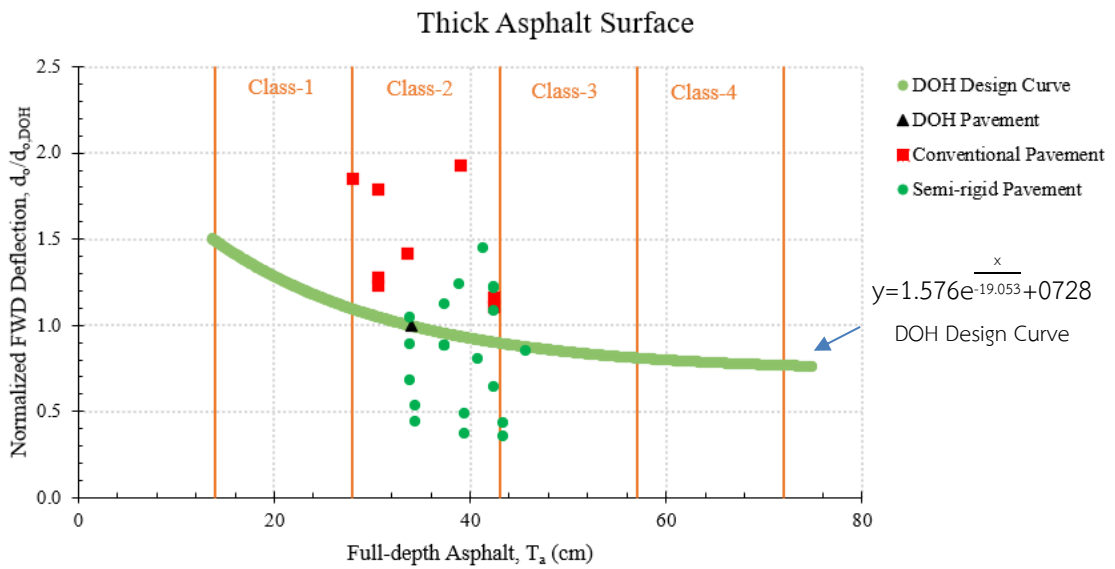
จากข้อมูลภาคสนามเมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบ ได้ดังรูปที่ 4.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Normalized Deflection ( $d_o/d_{o, DOH}$ ) กับ Structural Number (SN) รูปที่ 4.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า  $d_o/d_{o, DOH}$  กับ Equivalent Thickness ( $h_e$ ) และรูปที่ 4.3 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า  $d_o/d_{o, DOH}$  กับ Full-Depth Asphalt ( $T_A$ ) จากกราฟแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างถนนลาดยางของแปลงเก็บข้อมูลส่วนใหญ่จัดอยู่ในประเภทโครงสร้างลาดยางชั้น 2 (Class II) และ ชั้น 3 (Class III) โดยโครงสร้างถนนที่ถูกจัดเป็นโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไปมีค่า  $d_o/d_{o, DOH}$  อยู่เหนือเส้น DOH Design Curve Sawangsuriya et al. (2023) ที่เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีซึ่งแสดงว่าโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไปมีแนวโน้มอ่อนแอกว่าโครงสร้างถนนที่ออกแบบตามทฤษฎี ในขณะที่โครงสร้างถนนที่ถูกจัดเป็นโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัวมีค่า  $d_o/d_{o, doh}$  ค่อนข้างกระจายตัว โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 – 1.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัวมีแนวโน้มความแข็งแรงเป็นไปตามโครงสร้างถนนที่ออกแบบตามทฤษฎี อนึ่งการศึกษาได้ใช้เครื่องมือชนิดเดียวกัน ไม่ได้คำนึงถึงตัวแปรด้านเวลาและมีการสมมุติค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของดินเดิม Subgrade เท่ากับ 40 MPa (CBR = 4%) ทั้งนี้ค่า CBR ของดินเดิม Subgrade ที่ใช้ในการออกแบบถนนลาดยางของประเทศไทยมีค่าทั่วไปประมาณ 3 - 5 % อนึ่งการศึกษานี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเนื่องจากสายทางสำรวจมีจำนวนจำกัด หากมีการเก็บข้อมูลสายทางเพิ่มขึ้นรวมถึงจำนวนผลทดสอบ ณ จุดเดียวกันเพิ่มขึ้น ข้อมูลและผลการวิเคราะห์อาจเปลี่ยนแปลงได้



รูปที่ 4.1 ค่า  $d_o/d_{o, DOH}$  กับ Structural Number (SN)



รูปที่ 4.2 ค่า  $d_o/d_{o,DOH}$  กับ Equivalent Thickness ( $h_e$ )

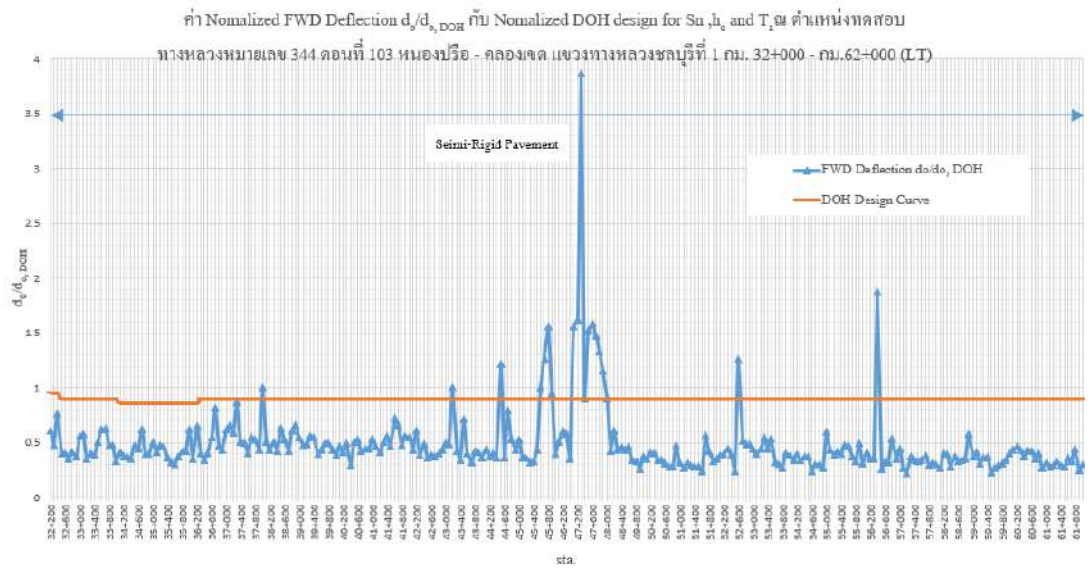


รูปที่ 4.3 ค่า  $d_o/d_{o,DOH}$  กับ Full-Depth Asphalt ( $T_A$ )

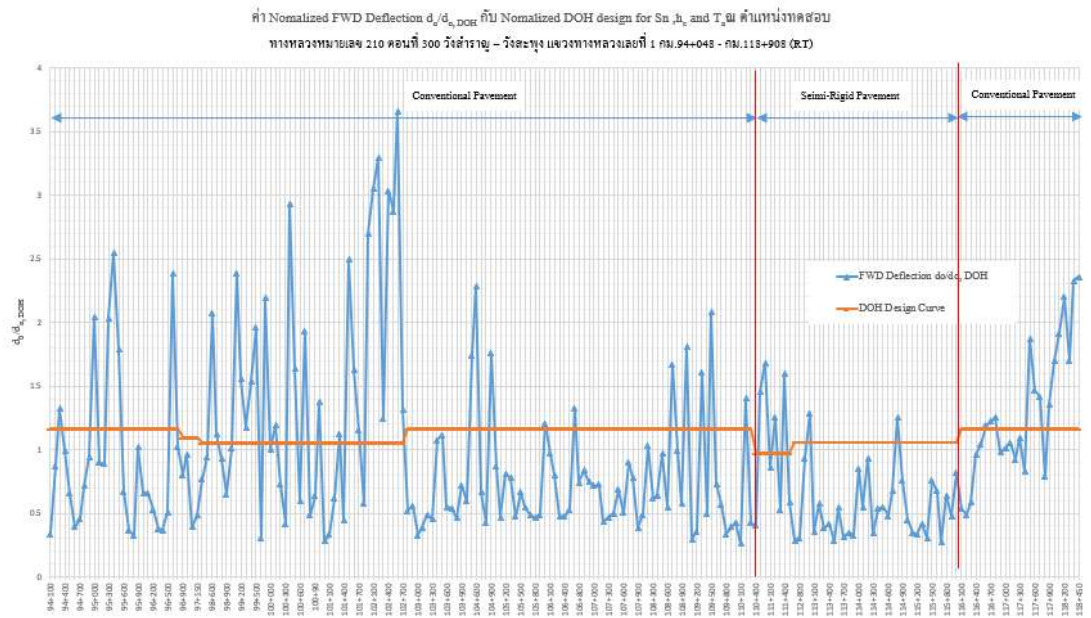
## 4.2 การเปรียบเทียบค่าดัชนีชี้วัด

### 4.2.1 ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection ( $d_o/d_o, DOH$ )

คณะผู้ศึกษาได้ทำการคำนวณค่า Normalized Deflection ( $d_o/d_o, DOH$ ) โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ FWD จำนวนทั้งสิ้น 10 สายทาง 13 ตอนควบคุม ดังนี้ (1) ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 102 หนองรี - หนองปรือ แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.25+000 - กม.31+000 (LTและRT) (2) ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103 หนองปรือ - คลองเขต แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.32+000 - กม.62+000 (LTและRT) (3) ทางหลวงหมายเลข 32 ตอนที่ 202 อ่างทอง - ไชโย แขวงทางหลวงอ่างทอง กม.49+087 - กม.66+800 (LTและRT) (4) ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก แขวงทางหลวงขอนแก่นที่ 2 (ชุมแพ) กม.460+595 - กม.492+269 (LT) (5) ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหัน - ผานกเค้า แขวงทางหลวงขอนแก่นที่ 2 (ชุมแพ) กม.234+052 - กม.266+500 (LT) (6) ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำดุก - ห้วยข่ามะควา แขวงทางหลวงเพชรบูรณ์ที่ 1 กม.363+959 - กม.374+000 (LT) (7) ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา แขวงทางหลวงพิจิตร กม.70+000- กม.90+000 (LT) (8) ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว - คลองโนน แขวงทางหลวงพิจิตร กม.56+215 - กม.80+000 (LT) (9) ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน แขวงทางหลวงศรีสะเกษที่ 2 กม.0+462+000 - กม.47+000 (LT) (10) ทางหลวงหมายเลข 2 ตอนที่ 602 อุดรธานี - น้ำสวย แขวงทางอุดรธานีที่ 1 กม.457+306 - กม.486+306 (LT) (11) ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง แขวงทางหลวงเลยที่ 1 กม.94+048 - กม.118+908 (LT และ RT) (12) ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก แขวงทางหลวงพิษณุโลกที่ 1 กม.194+769 - กม.225+119 (LT) และ (13) ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้แขวงทางหลวงพิษณุโลกที่ กม.30+203 - กม.46+906 (LT) มาพล็อตกราฟตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



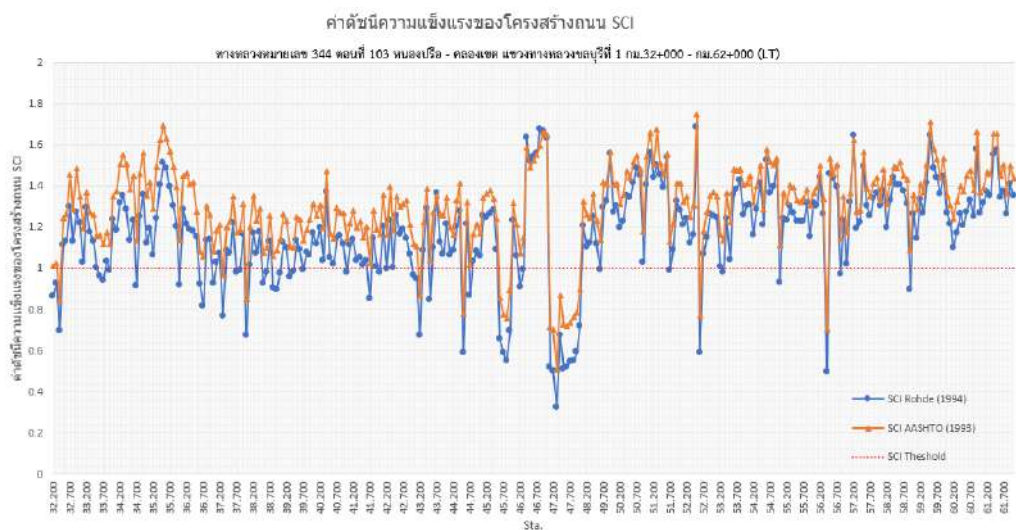
รูปที่ 4.4 แสดงค่า  $d_f/d_o, DOH$  ที่ได้จากการเก็บข้อมูล FWD ของทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103



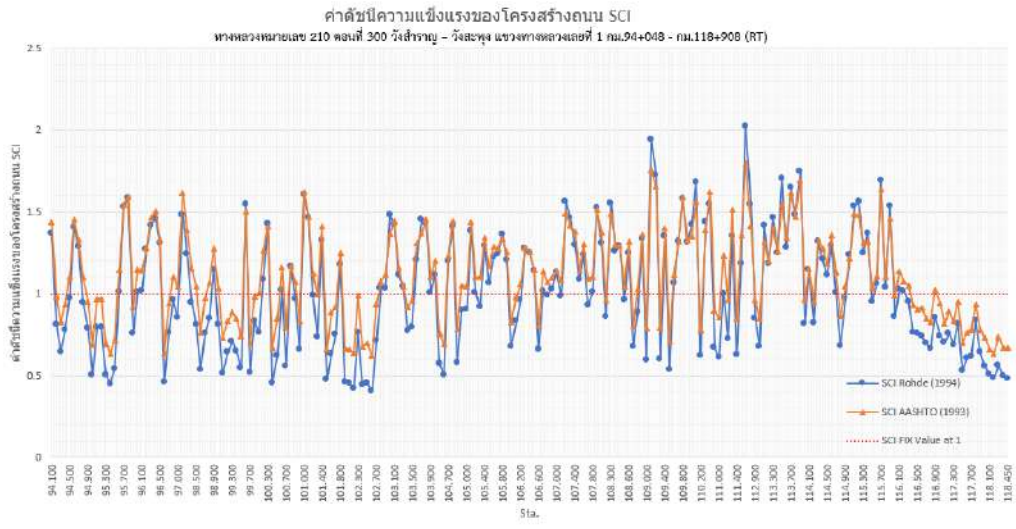
รูปที่ 4.5 แสดงค่า  $d_f/d_o, DOH$  ที่ได้จากการเก็บข้อมูล FWD ของทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300

#### 4.2.2 ค่าดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index, SCI)

คณะผู้ศึกษาได้ทำการคำนวณค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index, SCI) โดยนำผลที่ได้จากการทดสอบ FWD มาวิเคราะห์ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน รูปที่ 4.6 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรง (SCI) ที่ บนทางหลวงหมายเลข 344 อย่างไรก็ตามแนวโน้มของค่า SCI คำนวณโดยทั้งสองวิธีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้เส้นปะแสดงเกณฑ์ค่า SCI ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 1.0 (SCI Theshold) ค่า SCI ที่ต่ำกว่า 1.0 แสดงว่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนน ณ ปัจจุบัน ต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ออกแบบ และจากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวยังเกิดขึ้นบนสายทางอื่นเช่นกัน ค่า SCI ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Rohde (1994) ต่ำกว่าค่า SCI ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีของ AASHTO (1993) เนื่องจากการคำนวณค่า  $SN_{eff}$  ของ Rohde (1994) มีข้อแตกต่างกับวิธีของ AASHTO (1993) ในบางส่วน โดยวิธีของ Rohde (1994) เป็นการนำค่าการแอ่นตัวสูงสุด ( $d_o$ ) ค่าการแอ่นตัว  $d_{1.5HP}$  และความหนาของชั้นทางมาคำนวณ ซึ่งไม่ได้ใช้ค่าโมดูลัสของชั้นทางในการคำนวณดัชนีของโครงสร้างชั้นทาง จึงอาจเป็นหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่า SCI ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Rohde (1994) ส่วนใหญ่มีค่าที่ต่ำกว่า จากผลการวิเคราะห์ค่า SCI ของทั้งสองวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Rohde (1994) น่าจะเป็นตัวชี้วัดที่เหมาะสมในเชิงงานซ่อมบำรุงมีเนื่องจากค่า SCI ที่ได้มีค่าที่ต่ำกว่าซึ่งค่า SCI ยิ่งต่ำเท่าไร ยิ่งจำเป็นที่ต้องทำการซ่อมบำรุงให้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าโมดูลัสยึดหยุ่นของชั้นดินเดิมและโครงสร้างชั้นทางมีผลต่อค่า SCI เช่นกัน รายละเอียดกราฟผลการวิเคราะห์ค่า SCI ของทุกสายทางสรุปในภาคผนวก ค



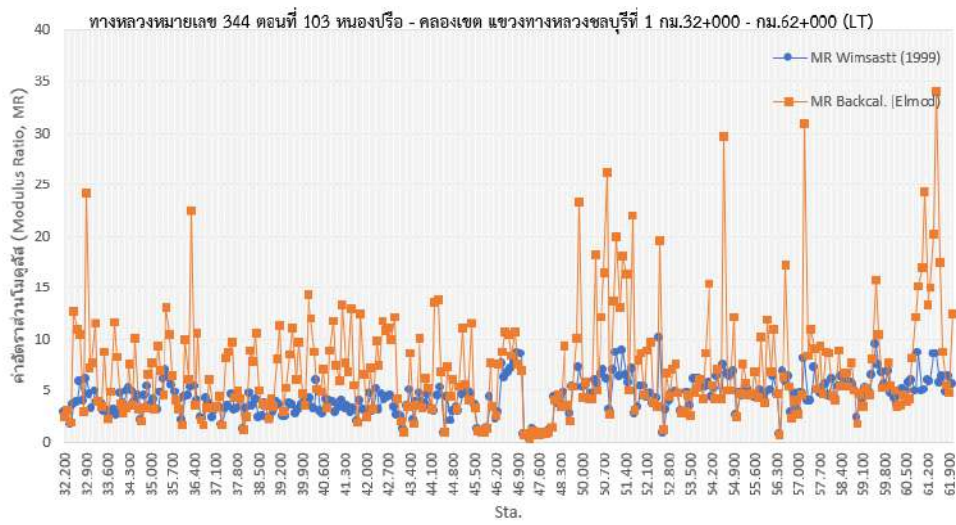
รูปที่ 4.6 ค่า SCI ของโครงสร้างถนนบนทางหลวงสาย 344 ฝั่ง LT



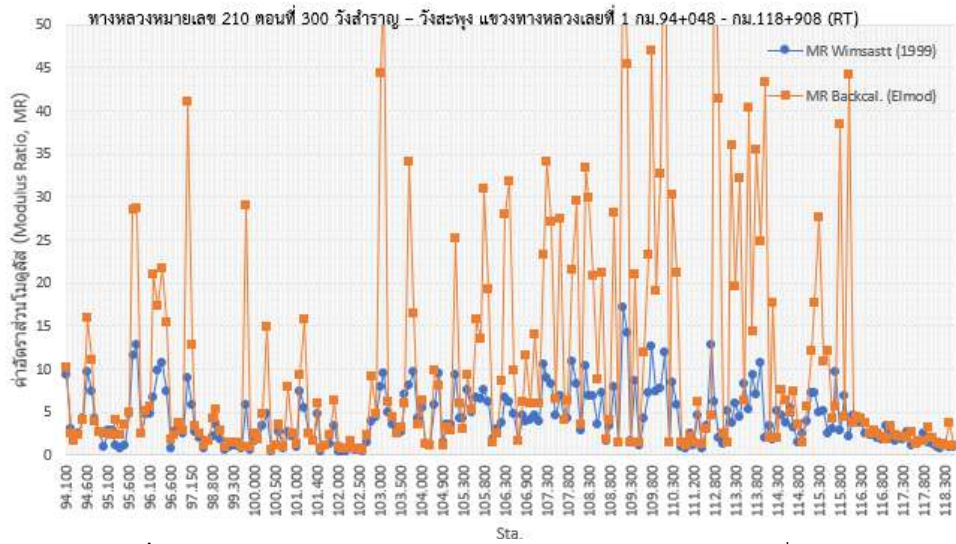
รูปที่ 4.7 ค่า SCI ของโครงสร้างถนนบนทางหลวงหมายเลข 210 ฝั่ง RT

#### 4.2.3 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR)

คณะผู้ศึกษาได้ทำการคำนวณค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) โดยนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือ FWD ที่ได้จากการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน รูปที่ 4.8 ค่า MR ของทางหลวงหมายเลข 344 นอกจากนี้ค่า MR ที่ได้จากการคำนวณตามวิธี Backcalculation ค่อนข้างแปรปรวนมากกว่าการคำนวณตามวิธีของ Wimsatt (1999) เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธี Backcalculation นำเอาข้อมูลค่าการแอ่นตัวของเซ็นเซอร์ทุกตัวมาคำนวณ ซึ่งระหว่างเซ็นเซอร์แต่ละตัวจะมีค่าการแอ่นตัวที่ ระยะห่างจากจุดปล่อยตุ้มน้ำหนักที่แตกต่างกัน ทำให้ความแปรปรวนมากขึ้นไม่เท่ากัน ในขณะที่วิธีของ Wimsatt (1999) ใช้ข้อมูลค่าการแอ่นตัวของเซ็นเซอร์ ณ ตำแหน่ง  $d_0$  และ  $d_{1800}$  เท่านั้น ทั้งนี้แนวโน้มของค่า MR ที่ได้จากทั้งสองวิธีมีทิศทางไปในทางเดียวกัน รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวยังเกิดขึ้นในจุดทดสอบในสายทางอื่นเช่นกัน รายละเอียดกราฟผลการวิเคราะห์ค่า MR ของทุกสายทาง สรุปในภาคผนวก ค



รูปที่ 4.8 ค่า MR ของโครงสร้างถนนบนทางหลวงหมายเลข 344 ฝั่ง LT



รูปที่ 4.9 ค่า MR ของโครงสร้างถนนบนทางหลวงหมายเลข 210 ฝั่ง RT

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

คณะผู้ศึกษาได้ทำการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างทางหลวง โดยใช้ผลการตรวจวัดค่าความแอ่นตัว (Deflection) ด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) บนแปลงทดสอบจำนวน 10 สายทาง 13 ตอนควบคุม โดยขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วย การทดสอบ FWD ซึ่งใช้แผ่นจานโลหะ (Loading Plate) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร และให้หน่วยแรงกระทำประมาณ 50 kN หรือ 706 kPa ทำการทดสอบทุกๆ ระยะ 100 เมตร โดยการศึกษารวมประกอบด้วย 1) วิเคราะห์อัตราส่วนค่าการแอ่นตัว (Normalized Deflection,  $d_o/d_{o,DOH}$ ) กับตัวแปรการออกแบบความหนาของโครงสร้างถนนลาดยางประกอบด้วย  $T_A$ , SN และ  $h_e$  ตามวิธีของ Asphalt Institute (AI), American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) และ Odemark's Method of Equivalent Thickness (MET) 2) วิเคราะห์ค่าดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน SCI ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Rohde (1994) และ AASHTO (1993) 3) วิเคราะห์ค่า Modulus Ratio (MR) ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Wimsatt (1999) และ วิธีการ Backcalculation ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ELMOD (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design) และ 4) เปรียบเทียบค่าดัชนีชี้วัดความแข็งแรง ผลการศึกษา สรุปได้ดังนี้

1. จากการวิเคราะห์อัตราส่วนการแอ่นตัว (Normalized Deflection,  $d_o/d_{o,DOH}$ ) กับตัวแปรการออกแบบความหนาของโครงสร้างถนนลาดยางทั้ง 3 วิธี คือ  $T_A$ , SN และ  $h_e$  ชุดข้อมูลที่จัดอยู่ในประเภทโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป (Conventional Pavement) มีค่า  $d_o/d_{o,DOH}$  อยู่เหนือเส้นกราฟออกแบบ (DOH Design Curve) ส่วนชุดข้อมูลที่จัดอยู่ในประเภทโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว (Semi-Rigid Pavement) มีค่า  $d_o/d_{o,DOH}$  กระจายตัวตามแนวเส้นกราฟออกแบบและมีแนวโน้มต่ำกว่าชุดข้อมูลของโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป ในทั้ง 3 วิธี

2. จากการวิเคราะห์ค่า  $d_o/d_{o,DOH}$  ของแต่ละสายทาง พบว่า ค่า  $d_o/d_{o,DOH}$  มีความสัมพันธ์กันกับค่า SCI ในรูปแบบที่แปรผกผัน ทั้งนี้ค่า  $d_o/d_{o,DOH}$  ที่จัดอยู่ในชั้นทางแบบทั่วไปส่วนใหญ่มีทิศทางที่สูงกว่าโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว และเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นกราฟออกแบบในแต่ละจุดทดสอบ

3. จากผลการวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนนหรือค่า SCI ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Rohde (1994) และ AASHTO (1993) พบว่าค่าดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนนแปรผกผันกับการอ่อนตัวของโครงสร้างถนน ทั้งนี้ค่า SCI ที่ได้จากทั้งสองวิธีมีทิศทางไปในทางเดียวกัน ค่า SCI ที่ได้จากวิธีของ AASHTO (1993) มีค่ามากกว่าวิธีของ Rohde (1994) เนื่องจาก AASHTO (1993) ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง  $E_p$  มาคำนวณในสมการโดยตรง

4. จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนโมดูลัสของโครงสร้างถนน (MR) ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Wimsatt (1999) และ วิธีการคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation) ด้วยโปรแกรม ELMOD พบว่า ค่า MR แปรผกผันกับการอ่อนตัวของโครงสร้างถนน ทั้งนี้ ค่า MR ทั้ง 2 วิธี มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้ค่า MR ที่ได้จากวิธีของ Wimsatt (1999) มีความแปรปรวนน้อยกว่าวิธี Backcalculation เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธี Backcalculation นำเอาข้อมูลค่าการอ่อนตัวของเซ็นเซอร์ทุกตัวมาคำนวณ ในขณะที่วิธีของ Wimsatt (1999) ใช้ข้อมูลค่าการอ่อนตัวของเซ็นเซอร์ ณ ตำแหน่ง  $d_0$  และ  $d_{1800}$  เท่านั้น

5. ผลการเปรียบเทียบ  $d_0/d_{0,DOH}$ , SCI, MR พบว่าการเปรียบเทียบนั้นสามารถแยกได้เป็นสองประเด็น ประเด็นแรกด้านความแข็งแรงและความปลอดภัยทางวิศวกรรม สำหรับ  $d_0/d_{0,DOH}$  ค่าที่ได้มีค่าน้อยเท่าไร ยิ่งมีความแข็งแรงและปลอดภัยทางวิศวกรรม ในส่วนของ SCI ยิ่งมีค่ามากเท่าไร ยิ่งมีความแข็งแรงและปลอดภัย สำหรับค่า MR มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่า SCI ซึ่งการคำนวณด้วยวิธี Backcalculation จะค่อนข้างอ่อนไหวกว่าวิธีของ Wimsatt (1999) ประเด็นที่สอง การประเมินดัชนีชี้วัดในงานซ่อมบำรุง สำหรับค่า  $d_0/d_{0,DOH}$  ยิ่งมีมากกว่าค่า DOH Design Curve เท่าไร ยิ่งจำเป็นต้องทำการพิจารณาในการซ่อมบำรุงให้เร็วขึ้นเท่านั้น ในส่วนของค่า SCI ค่าที่ได้จาก AASHTO (1993) ให้ค่า SCI สูงกว่า Rohde (1994) ดังนั้น การตรวจวัดค่า SCI คำนวณโดยวิธีของ Rohde (1994) น่าจะเป็นตัวชี้วัดที่เหมาะสมในเชิงงานซ่อมบำรุงเนื่องจากค่า SCI ยิ่งต่ำเท่าไร ยิ่งจำเป็นต้องทำการซ่อมบำรุงให้เร็วขึ้นเท่านั้น สำหรับค่า MR ยังไม่เด่นชัดในประเด็นนี้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้นำเสนอผลการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างถนน โดยใช้ค่าอัตราส่วนการอ่อนตัว ( $d_0/d_{0,DOH}$ ) ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index, SCI) และค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) มาเป็นทางเลือกในการ

พัฒนาดัชนีชี้วัดคุณภาพด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนน รวมถึงค่าความตัวแปรที่ใช้คำนวณ เพื่อเพิ่มทางเลือกในการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างทางหลวง

อนึ่ง การศึกษานี้ใช้เครื่องมือทดสอบชนิดเดียวกัน ไม่ได้คำนึงถึงตัวแปรทางด้านเวลาและเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเนื่องจากสายทางที่สำรวจในการศึกษาครั้งนี้ มีจำนวนเพียง 10 สายทาง 13 ตอนควบคุมเท่านั้น ทั้งนี้จำนวนสายทางที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้เปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน

## เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง (2550), คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง

ดุษฎี ภาว, ธีรภัทร์ ศิริรัตฉัตร, สุรนนท์ เข้อยงค์ และ อัครพัฒน์ สว่างสุรีย์ (2561), การศึกษาแนวทางประเมินสมรรถนะทางหลวงด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD , การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23 โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, นครนายก

แสงชัย เทพสิทธิทากรณ์, ประเสริฐ บุญรักษา และ ไพบุลย์ รัตวิริยะพงศ์ (2534), การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างชั้นทางโดยโปรแกรม ELMOD, ส่วนสำรวจและประเมินสภาพทาง สำนักวิเคราะห์ตรวจสอบ กรมทางหลวง

อัครพัฒน์ สว่างสุรีย์ และ ธนกฤต เผือกทอง (2555), การศึกษาประเมินความแข็งแรงและอายุการใช้งานของถนนลาดยางภายหลังก่อสร้าง, วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต, ปีที่ 2 ฉบับที่ 2, หน้า 1-17.

อัครพัฒน์ สว่างสุรีย์, ธันวิน สวัสดิศานต์ และ ปรมิก จิตต์อารีกุล (2566), วพ.318 โครงการวิจัยเพื่อจัดทำข้อกำหนดและวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางสำหรับประเทศไทย, สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง

AASHTO (1993), AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, Wahington, DC.

Asphalt Institute (1970), AI MS-1: Thickness Design- Full-Depth Asphalt Pavement Structures for Highways and Streets, Washington, D.C.

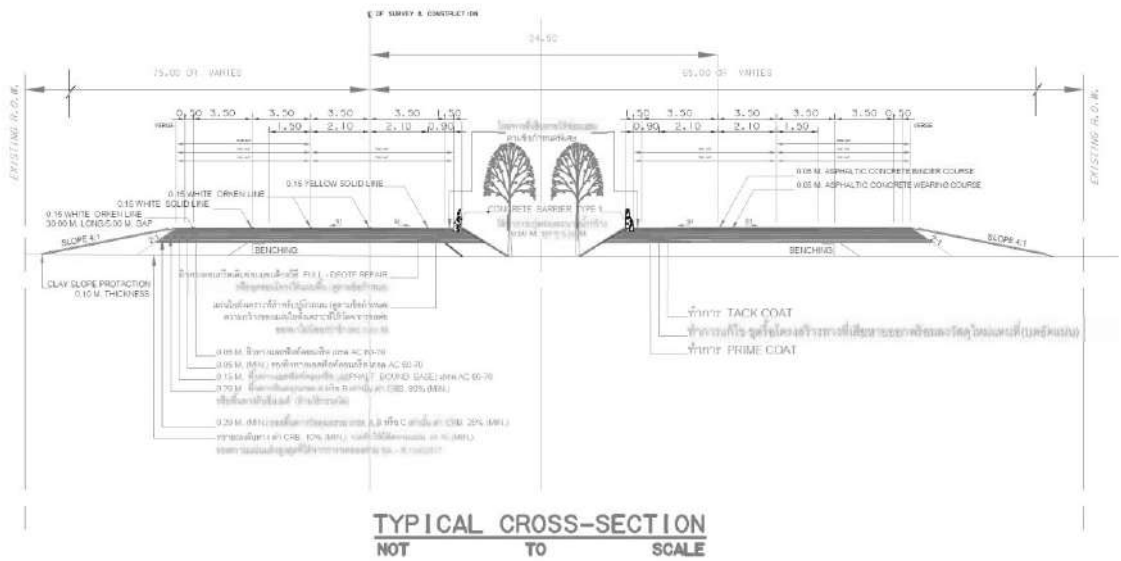
ASTM International (2015), D4694 – 09 Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Irwin, L.H. (1983), User's Guide to Modcomp2, Version 2.1., Local Roads Program, Cornell University, Ithaca, NY.

- Martin T. and Choummanivong L. (2018), Predicting the Performance of Australia's Arterial and Sealed Local Roads, ARR 390, ARRB Group, Vermont South, Vic.
- Peter N. Schmalzer. (2006), LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements, Version 4.1, FHWA, VA.
- Rohde, G.T. (1994), Determining Pavement Structural Number from FWD Testing, Transportation Research Record 1448, Washington, D.C., pp. 61-68.
- Sawangsurinya, A., Svasdisant, T. and Jitareekul, P. (2023), Deflection-Based Approach for Flexible Pavement Design in Thailand. Infrastructures, 8(7), 116. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8070116>
- Ulitz, P. (1987), Pavement Analysis, In Developments in Civil Engineering, Vol. 19, Elsevier, Amsterdam.
- Wimsatt, A. J. (1999), Direct Analysis Methods for Falling Weight Deflectometer Deflection Data, Transportation, Research Record 1655, Washington, D.C., pp. 135-144.
- Zhang, Z., Manuel, L., Damjanovic, 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.

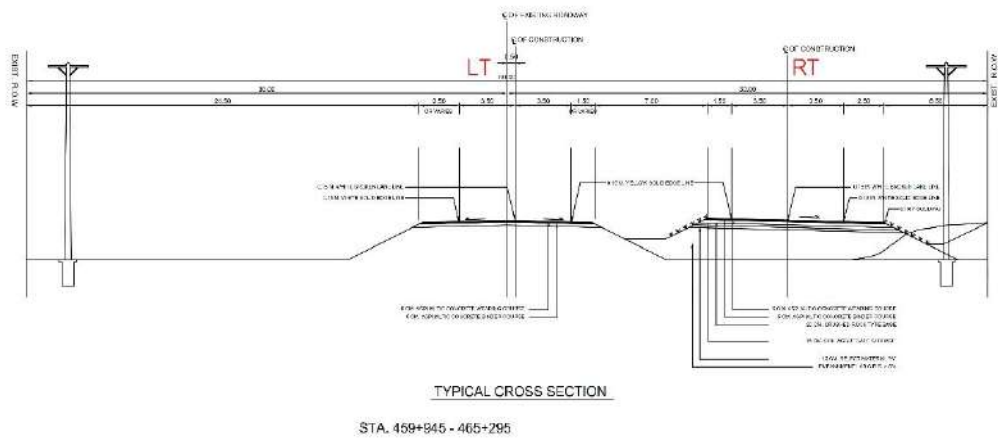
ภาคผนวก ก  
แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง

ทางหลวงหมายเลข 32  
 ตอนควบคุม 0201 ตอน นครหลวง - ทางแยกต่างระดับอ่างทอง  
 ระหว่างกม. 49+087 - กม. 66+800



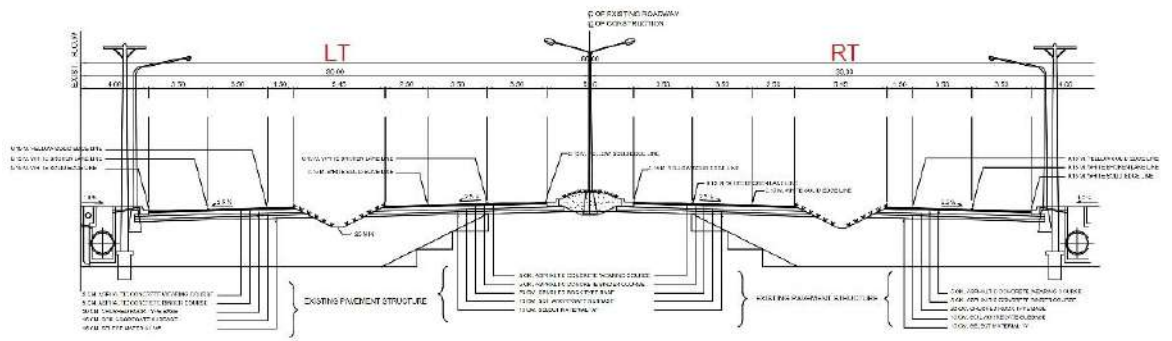
รูปที่ ก1 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 32 ระหว่าง กม. 49+087 - 66+800

ทางหลวงหมายเลข 12



รูปที่ ก2 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก  
 กม. 459+945 - กม. 465+295

## ทางหลวงหมายเลข 12

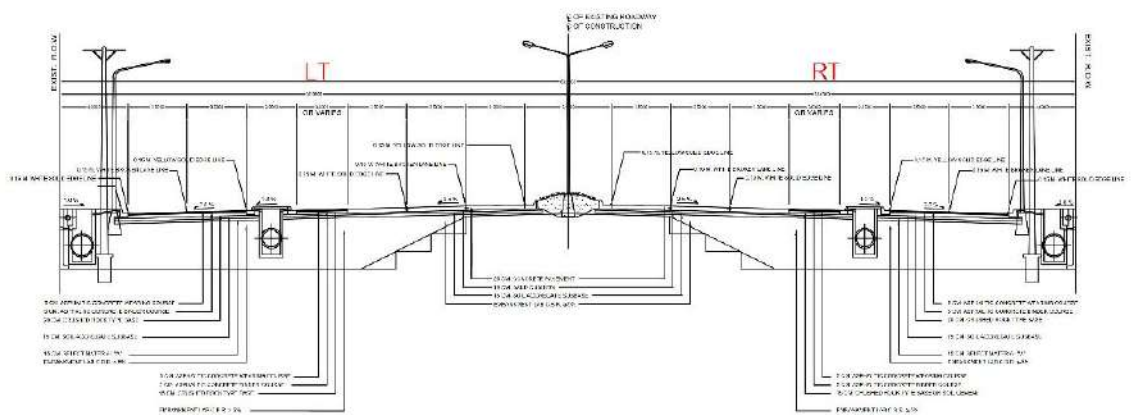


TYPICAL CROSS SECTION

STA. 484+795 - 484+295    STA. 472+715 - 473+195  
 STA. 469+195 - 470+795

รูปที่ ก3 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก  
 กม.484+795 - 484+295, กม.472+715 - 473+195, กม.469+195 - 470+795

## ทางหลวงหมายเลข 12

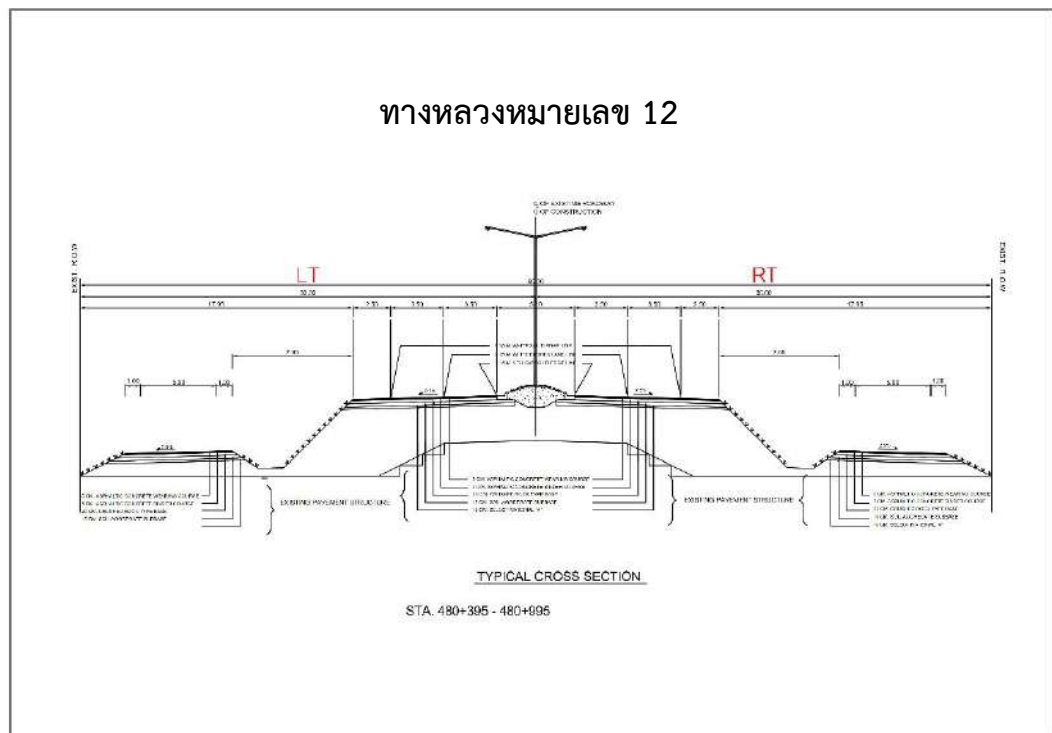


TYPICAL CROSS SECTION

STA. 472+288 - 472+715

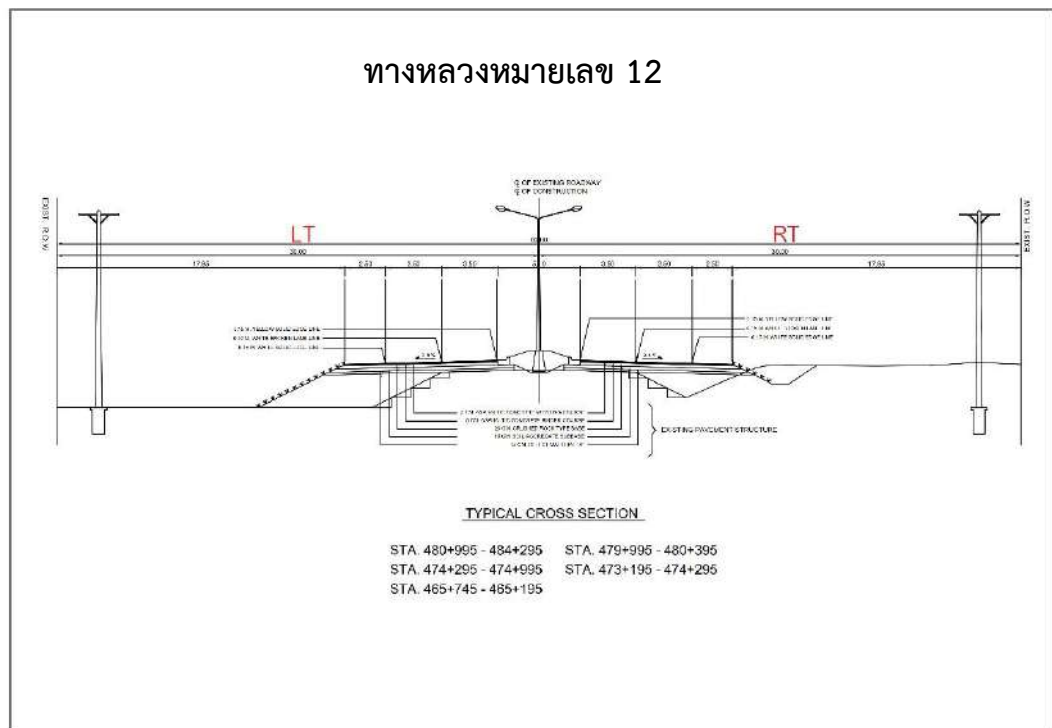
รูปที่ ก4 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก  
 กม.472+288 - 472+715

## ทางหลวงหมายเลข 12

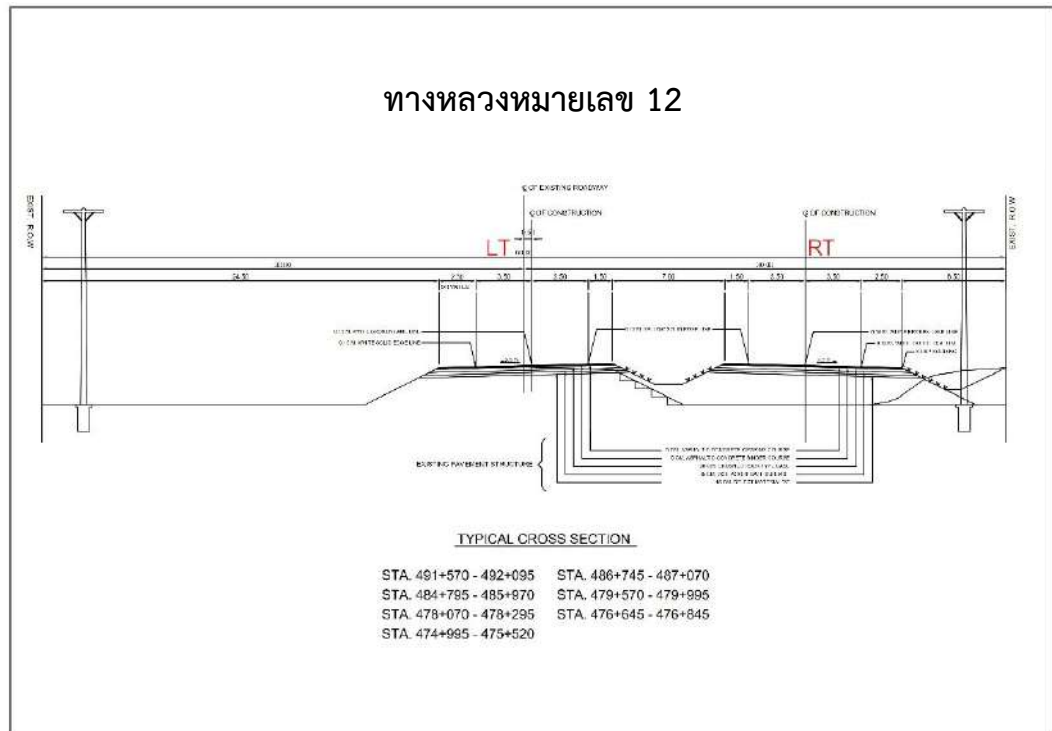


รูปที่ ก5 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก  
 กม.480+395 - 480+995

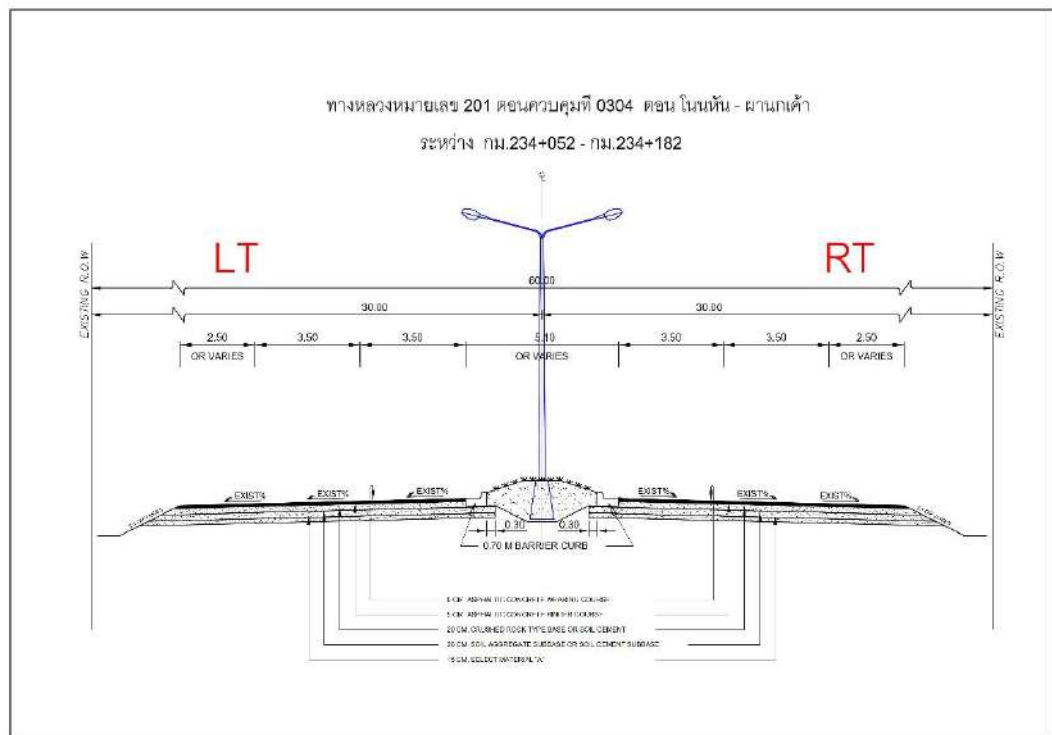
## ทางหลวงหมายเลข 12



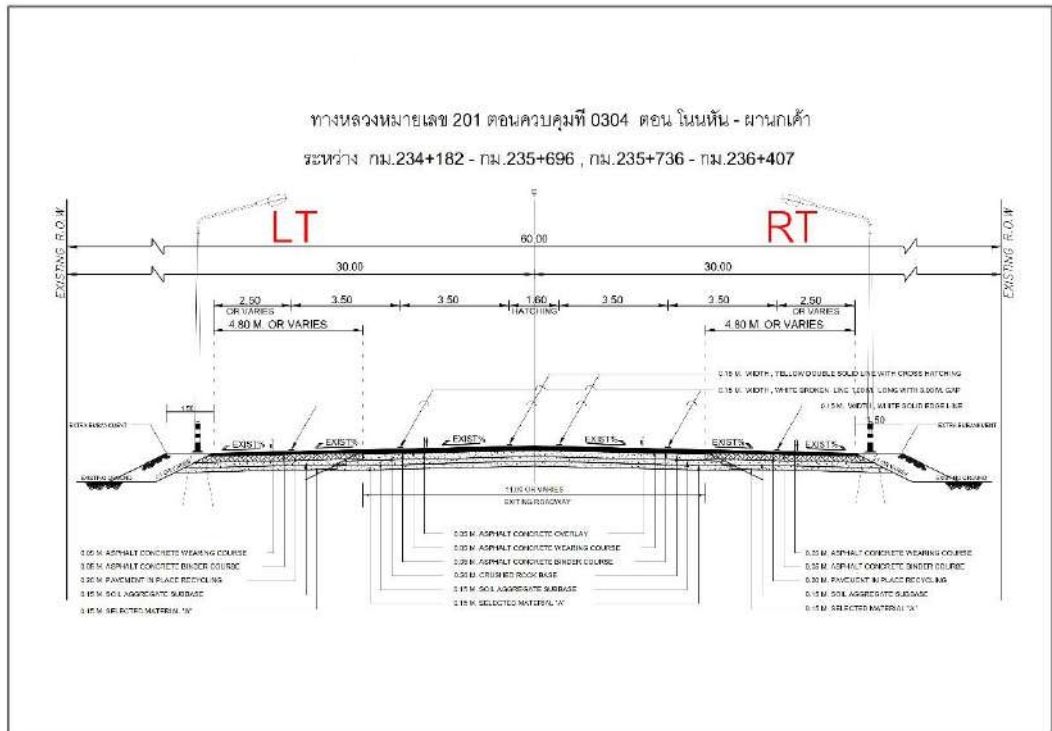
รูปที่ ก6 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก  
 กม.480+995 - 484+295, กม.479+995 - 480+395, กม.474+295 - 474+995,  
 กม.473+195 - 474+295, กม.465+745 - 465+195



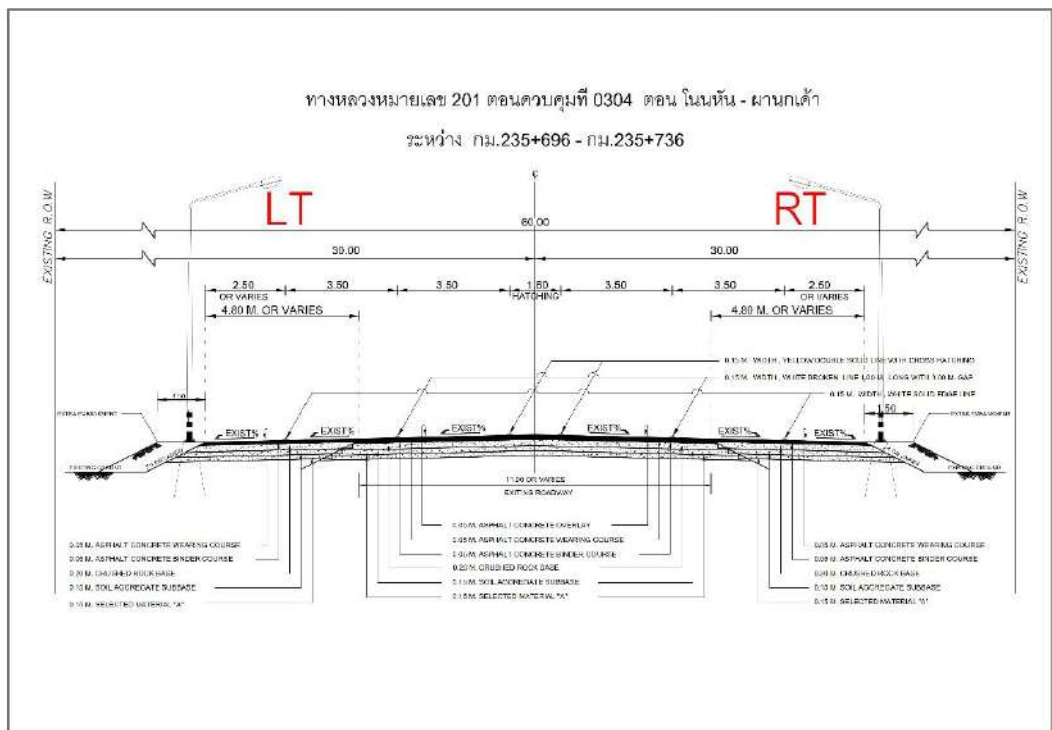
รูปที่ ก7 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแซง - หนองแก  
 กม.491+570 - 492+095, กม.486+745 - 487+070, กม.484+795 - 485+970,  
 กม.479+570 - 479+995, กม.478+070 - 478+295, กม.476+645 - 476+845, กม.474+995 - 475+520



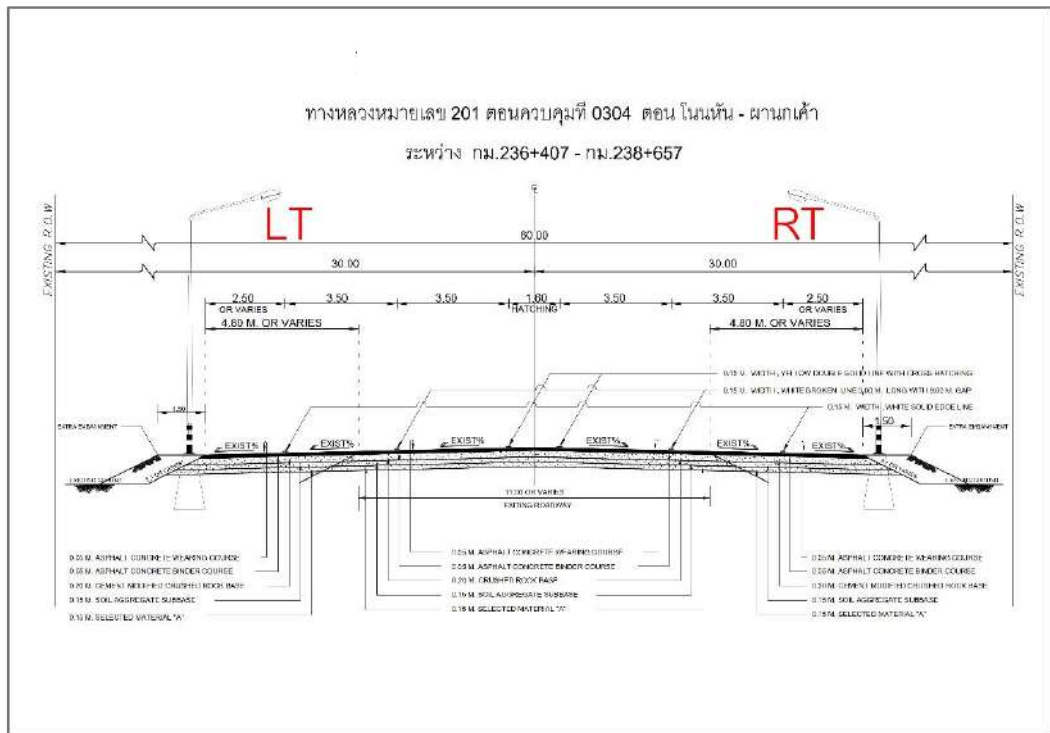
รูปที่ ก8 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหัน - ผานกเค้า  
 กม.234+052 - กม.234+182



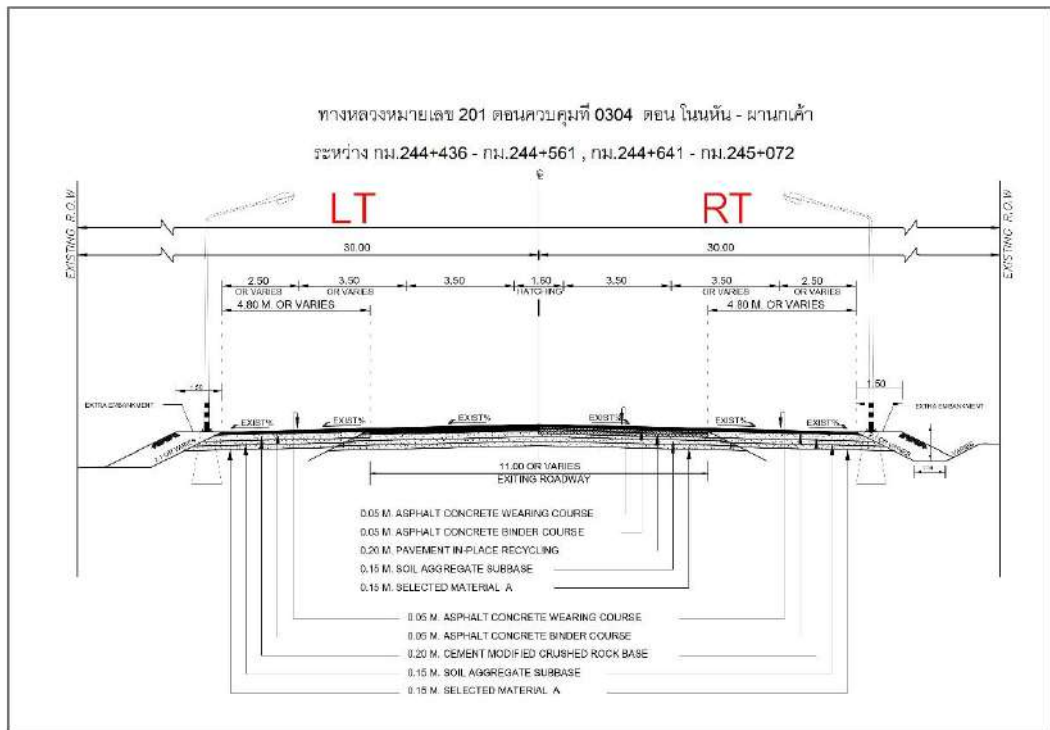
รูปที่ ก9 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหิน - ผานกเค้า  
กม.234+182 - 235+696, กม.235+736 - 236+407



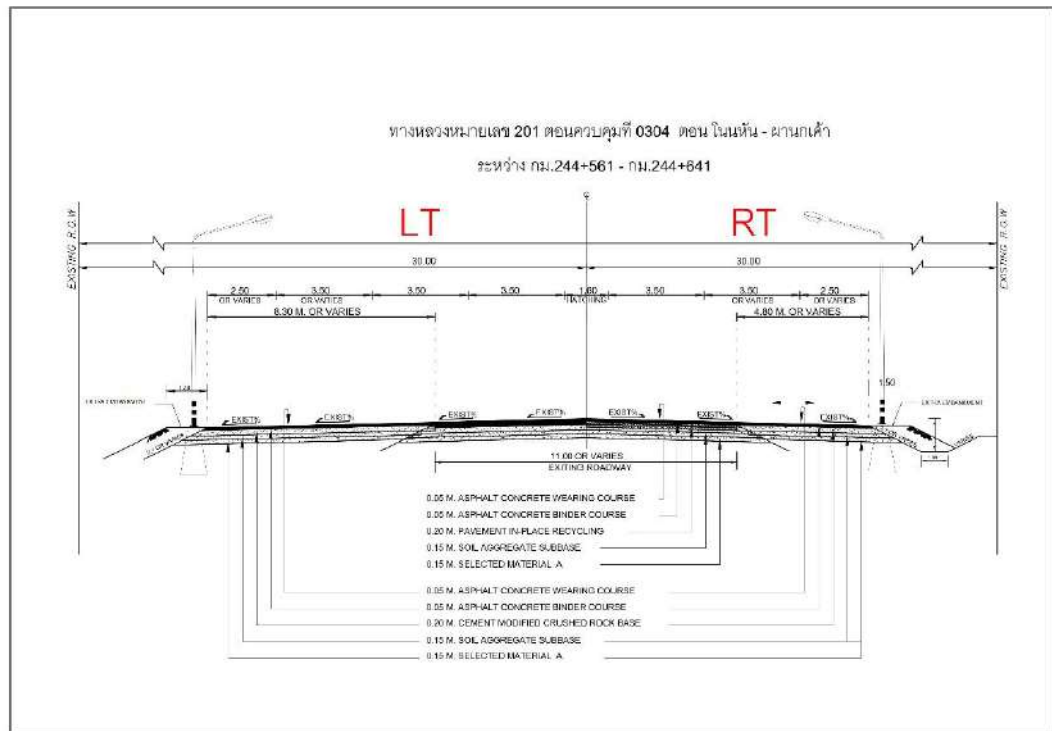
รูปที่ ก10 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหิน - ผานกเค้า  
กม.235+696 - 235+736



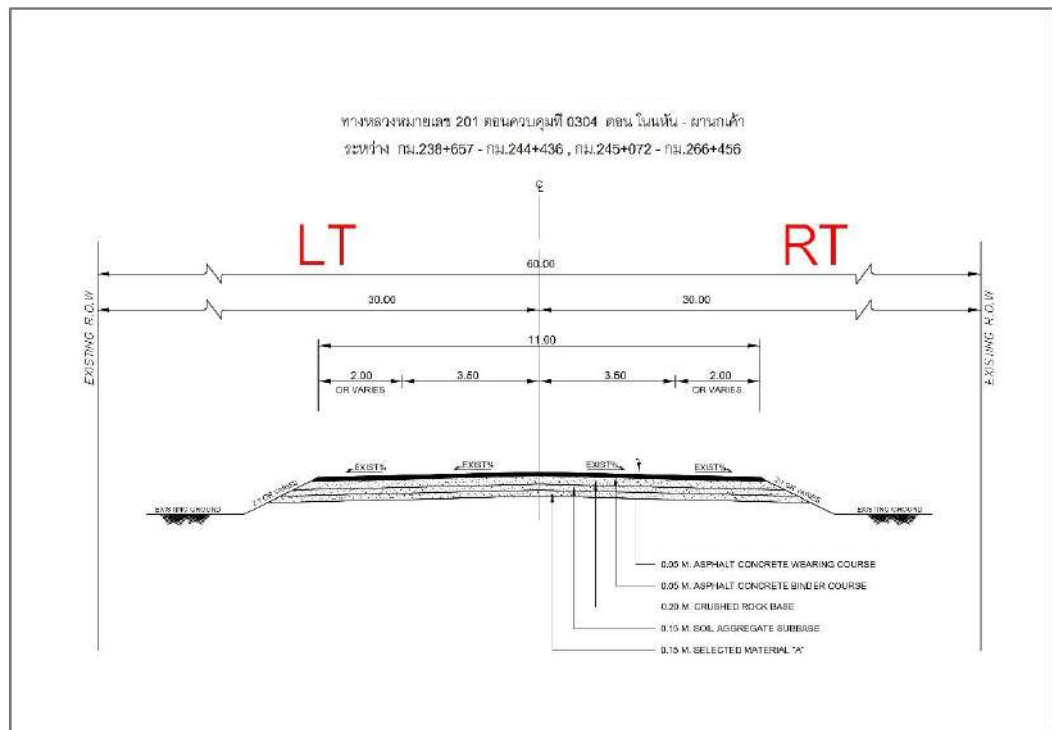
รูปที่ ก11 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหัน - ผานกเค้า  
กม.236+407 - 238+657



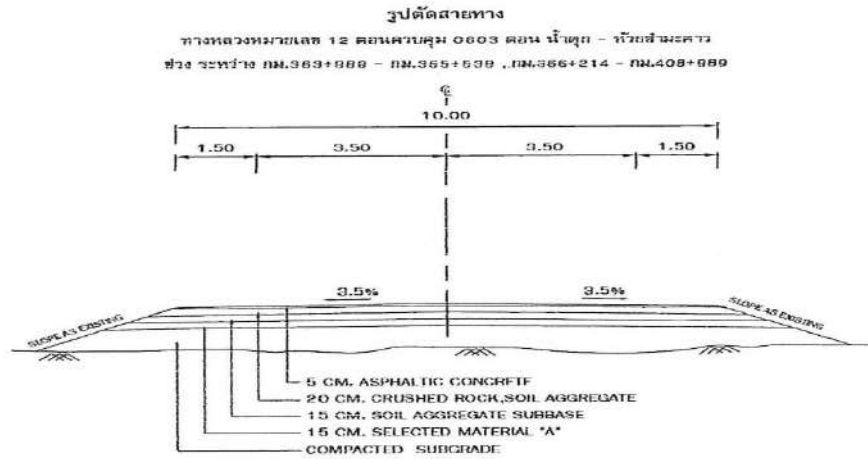
รูปที่ ก12 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหัน - ผานกเค้า  
กม.244+436 - 244+561, กม.244+641 - 245+072



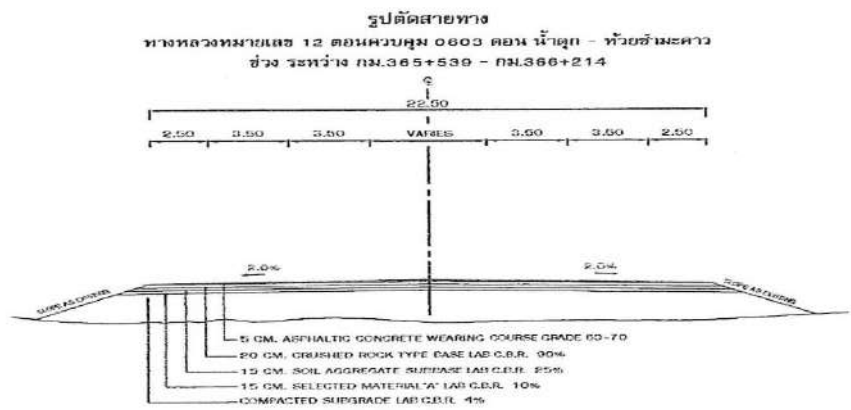
รูปที่ ก13 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหิน - ผานกเค้า  
กม.244+561 - 244+641



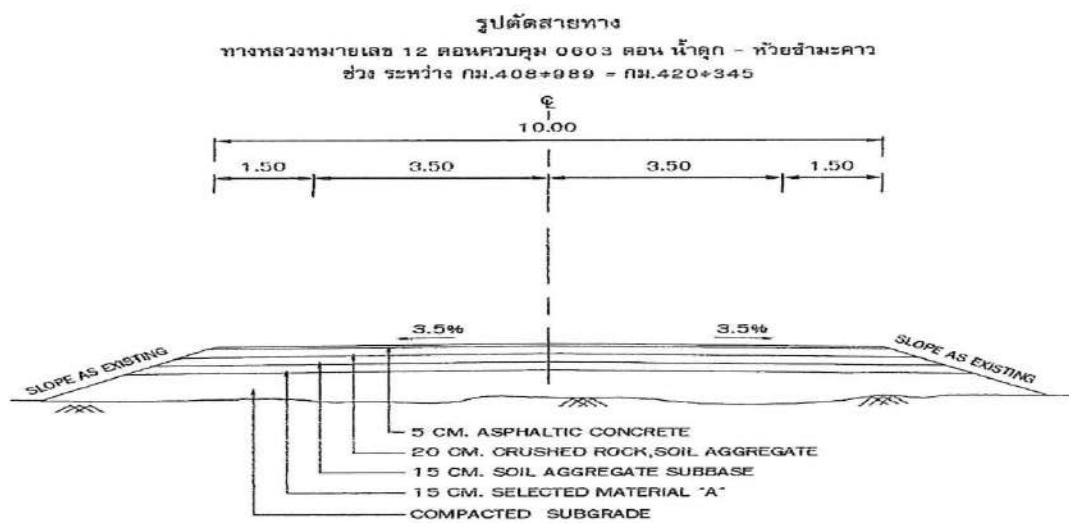
รูปที่ ก14 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหิน - ผานกเค้า  
กม.238+657 - 244+436, กม.245+072 - 266+456



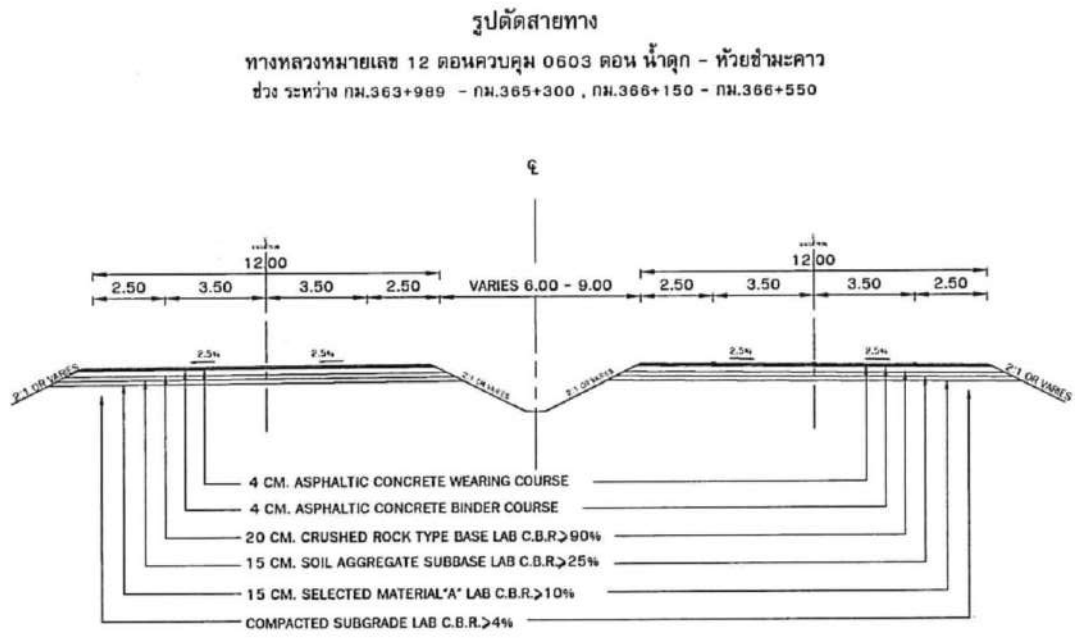
รูปที่ ก15 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก - ห้วยข่ามะคาว  
 กม.363+989 - 365+539, กม.366+214 - 408+889



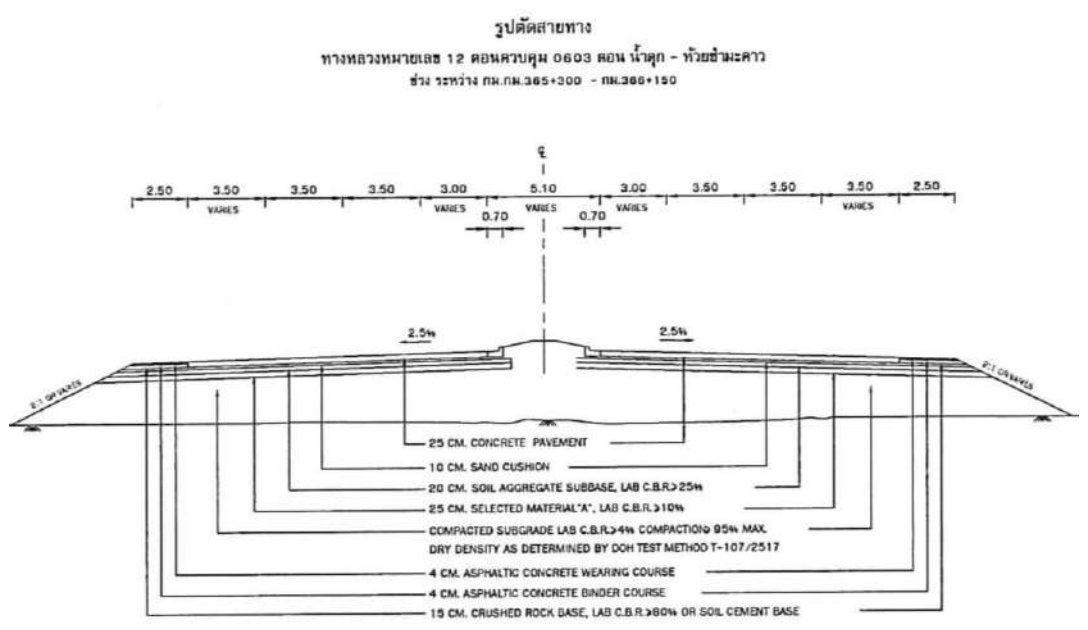
รูปที่ ก16 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก - ห้วยข่ามะคาว  
 กม.365+539 - กม.366+214



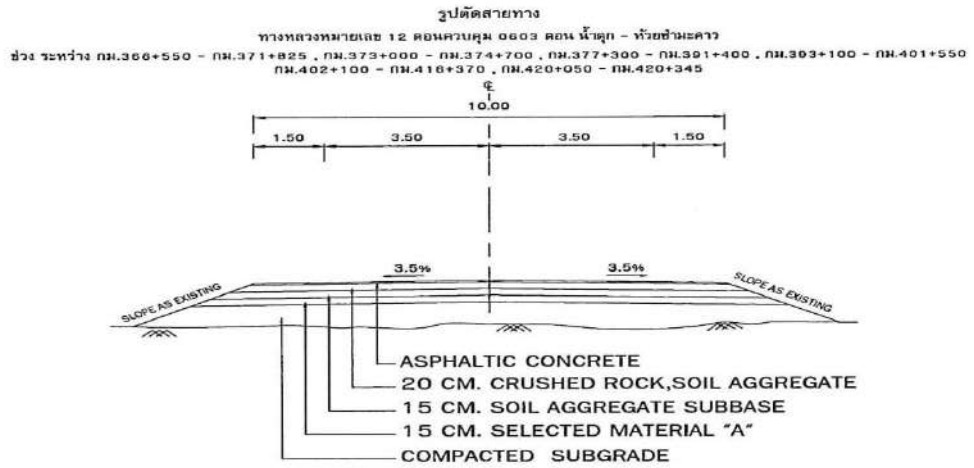
รูปที่ ก17 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก - ห้วยข่ามะคาว  
 กม.408+989 - กม.420+345



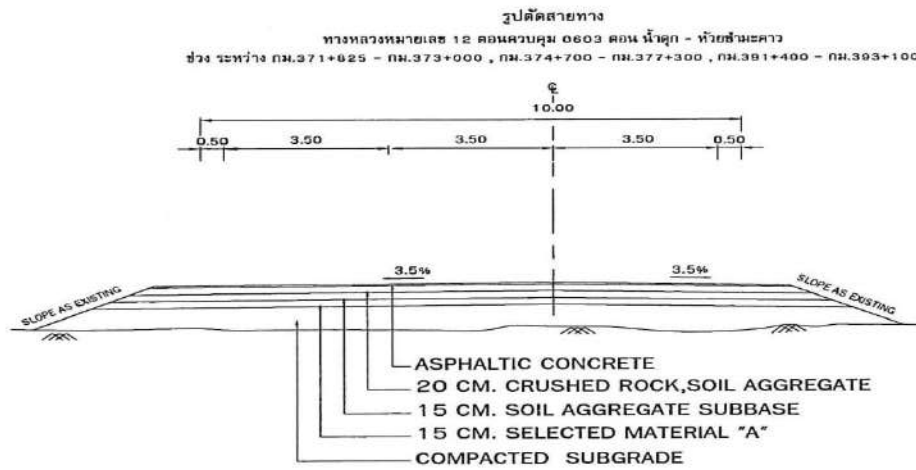
รูปที่ ก18 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก - ห้วยข่ามะคา  
 กม.363+989 - กม.365+300, กม.366+150 - 366+550



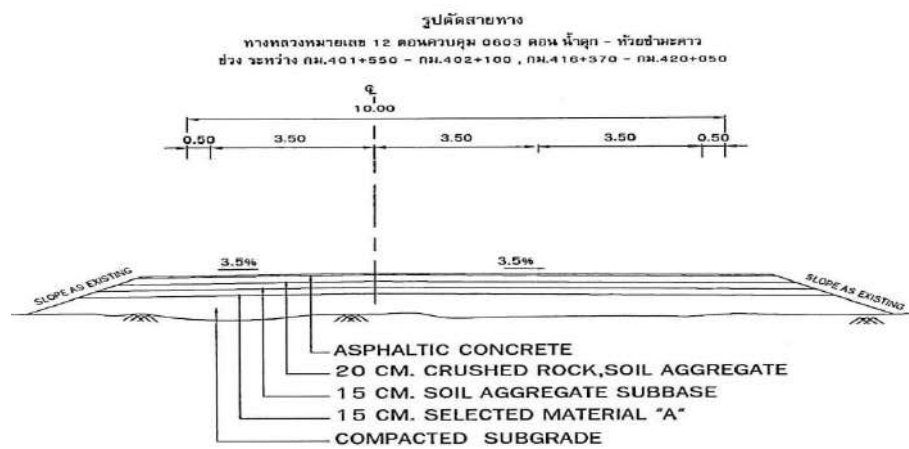
รูปที่ ก19 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก - ห้วยข่ามะคา  
 กม.365+300 - กม.366+150



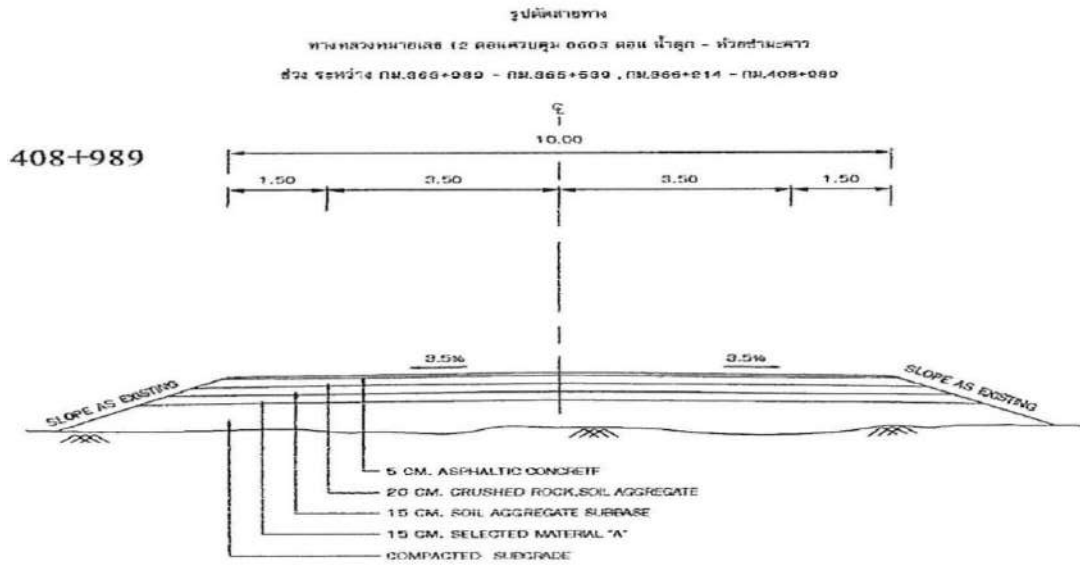
รูปที่ ก20 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก - ห้วยข้ามะควา  
 กม.๓๖๖+๕๕๐ - ๓๗๑+๘๒๕, กม.๓๗๓+๐๐๐ - ๓๗๔+๗๐๐, กม.๓๗๗+๓๐๐ - ๓๙๑+๔๐๐,  
 กม.๓๙๓+๑๐๐ - ๔๐๑+๕๕๐, กม.๔๐๒+๑๐๐ - ๔๑๖+๓๗๐, กม.๔๒๐+๐๕๐ - ๔๒๐+๓๔๕



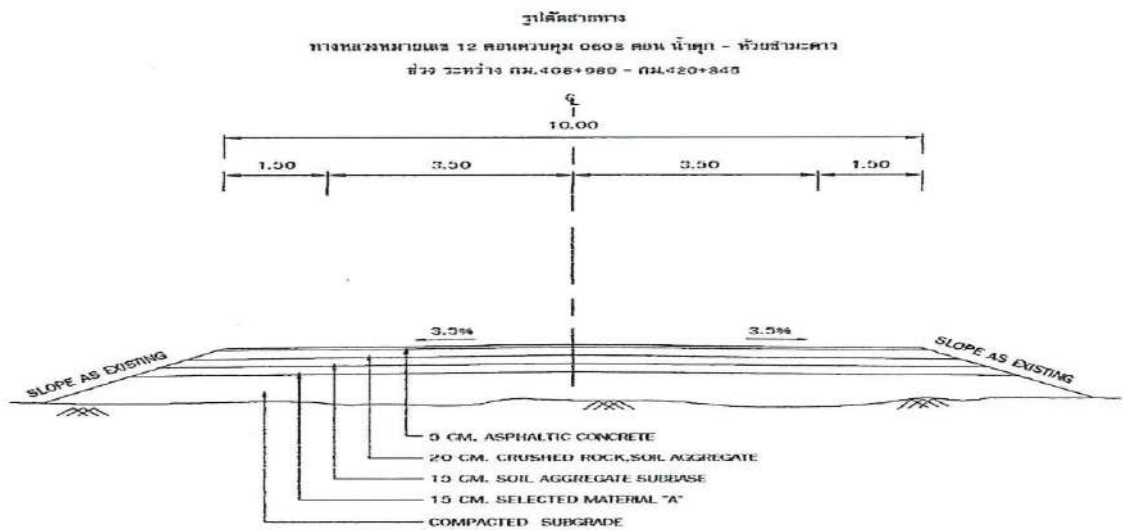
รูปที่ ก21 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก - ห้วยข้ามะควา  
 กม.๓๗๑+๘๒๕ - ๓๗๓+๐๐๐, กม.๓๗๔+๗๐๐ - ๓๗๗+๓๐๐, กม.๓๙๑+๔๐๐ - ๓๙๓+๑๐๐,



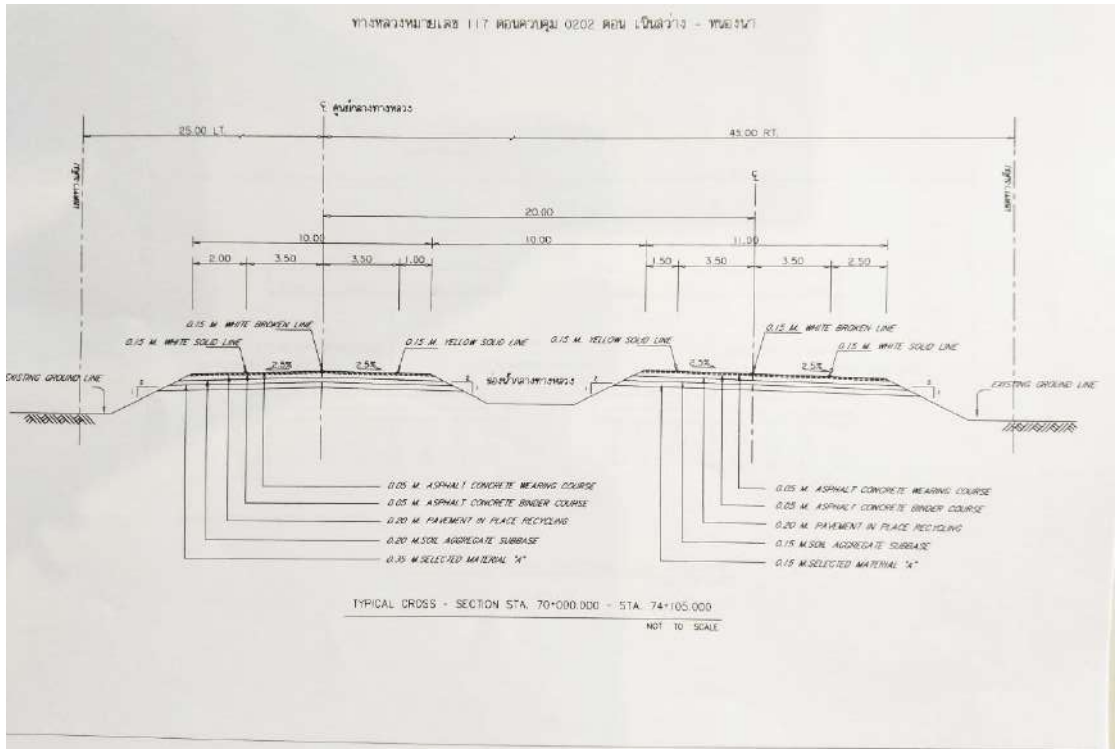
รูปที่ ก22 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก - ห้วยข้ามะควา  
 กม.๔๐๑+๕๕๐ - ๔๐๒+๑๐๐, กม.๔๑๖+๓๗๐ - ๔๒๐+๐๕๐



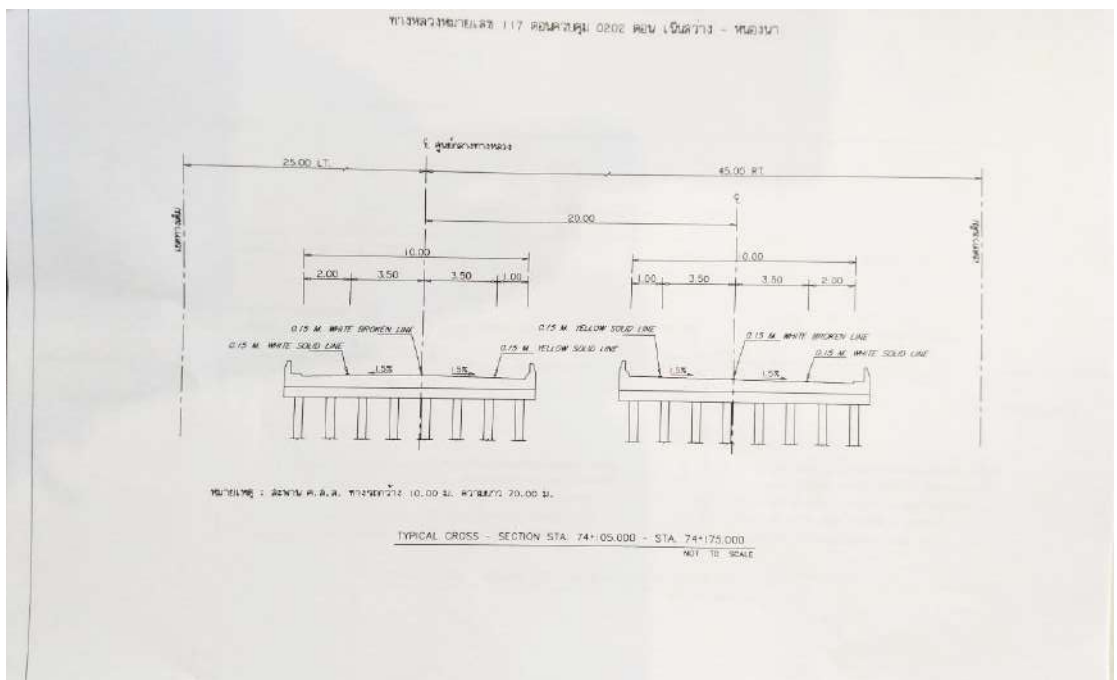
รูปที่ ก23 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก - ห้วยข้ามะควา  
กม.363+960 - 365+530, กม.366+214 - 408+980



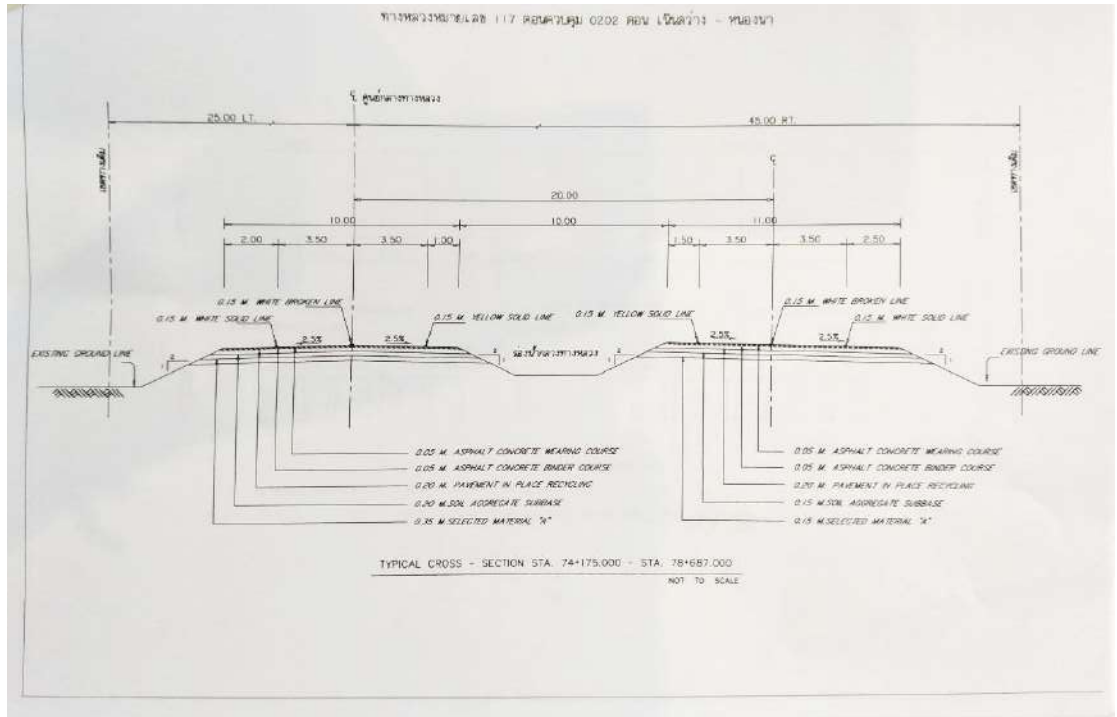
รูปที่ ก24 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 603 น้ำตุ๊ก - ห้วยข้ามะควา  
กม.408+980 - 420+345



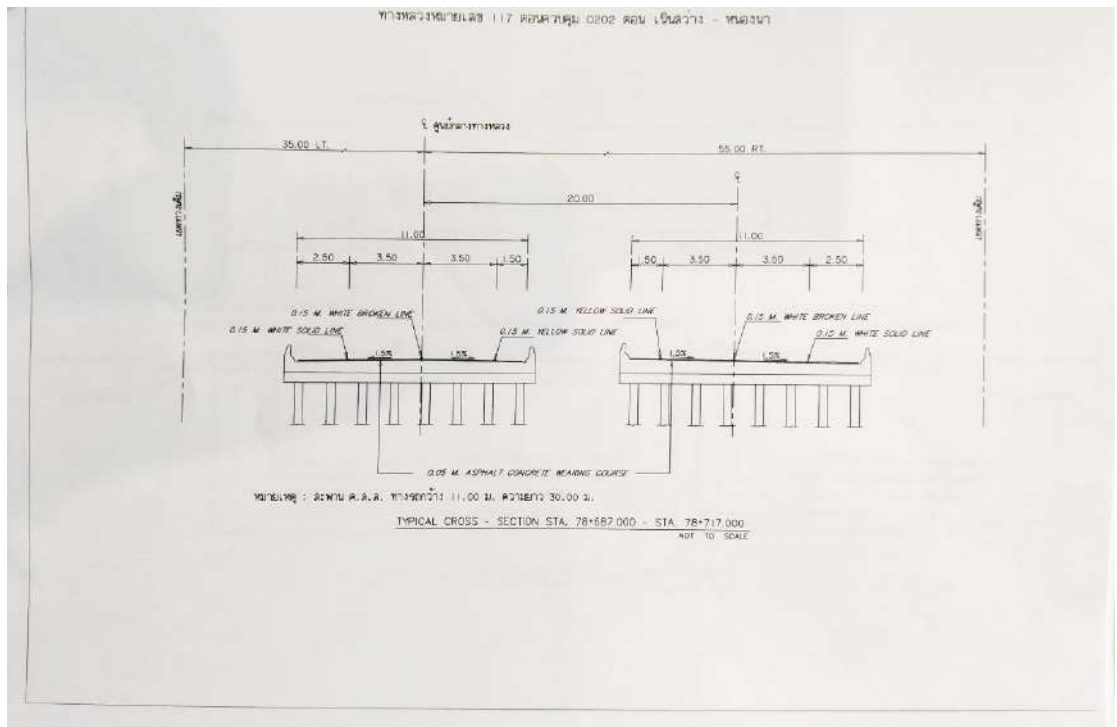
รูปที่ ก25 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา  
กม.70+000 - กม.74+105



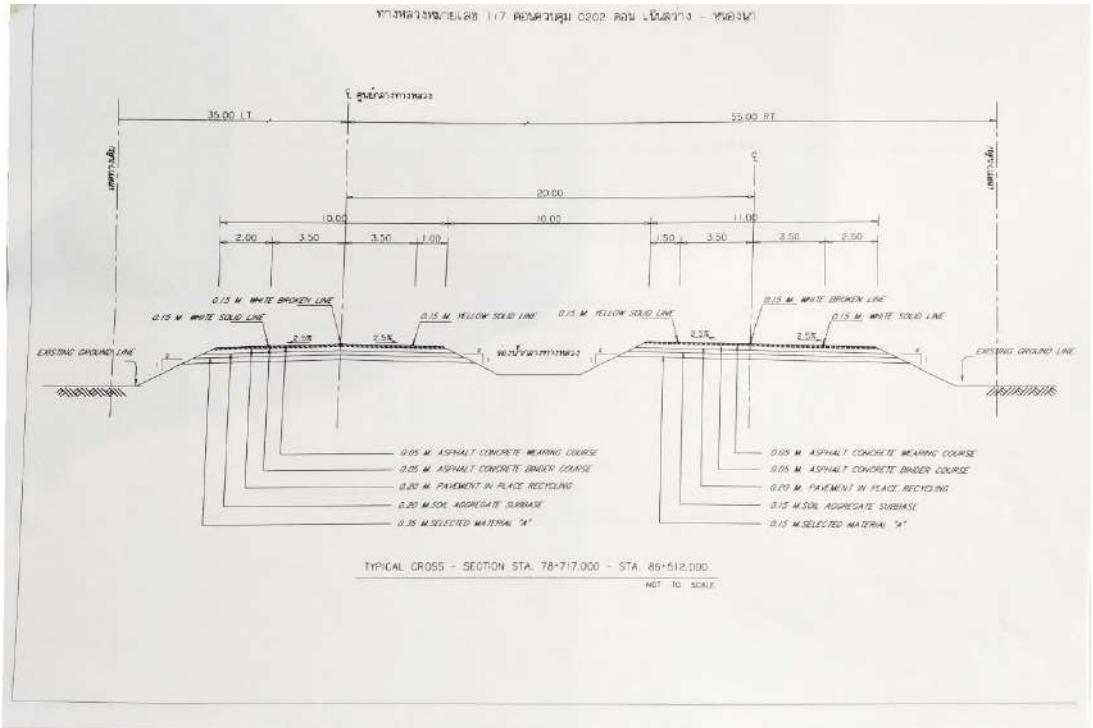
รูปที่ ก26 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา  
กม.74+105 - กม.74+175



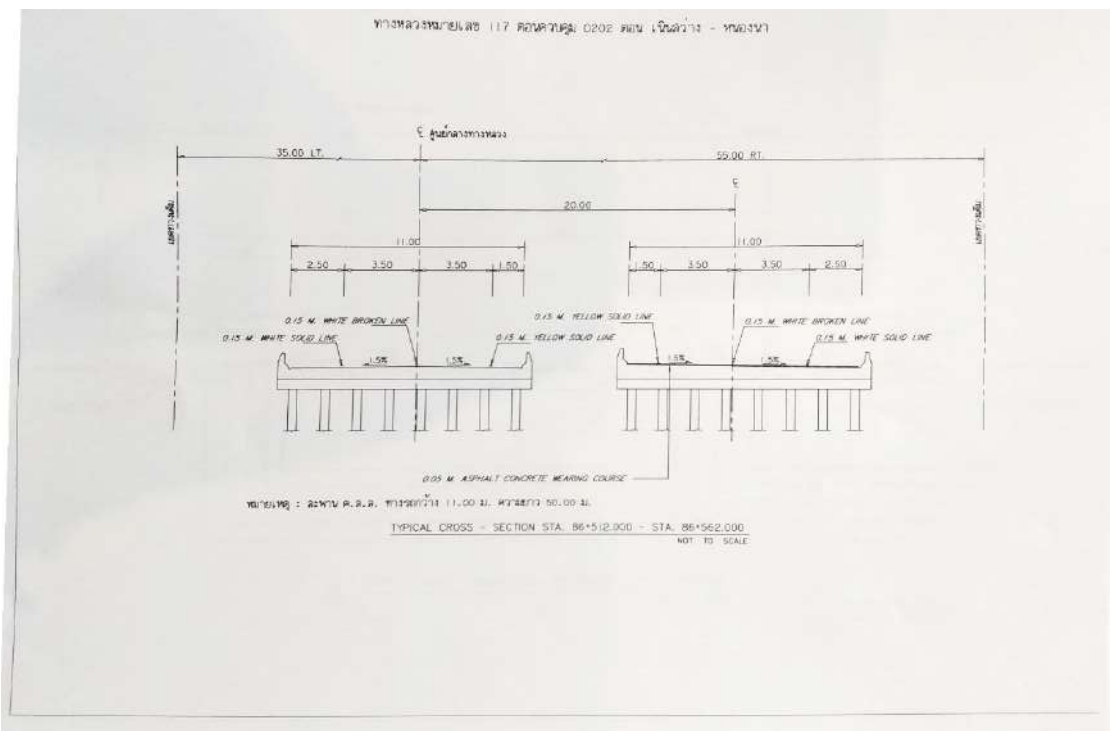
รูปที่ ก27 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา  
กม.74+175 - กม.78+687



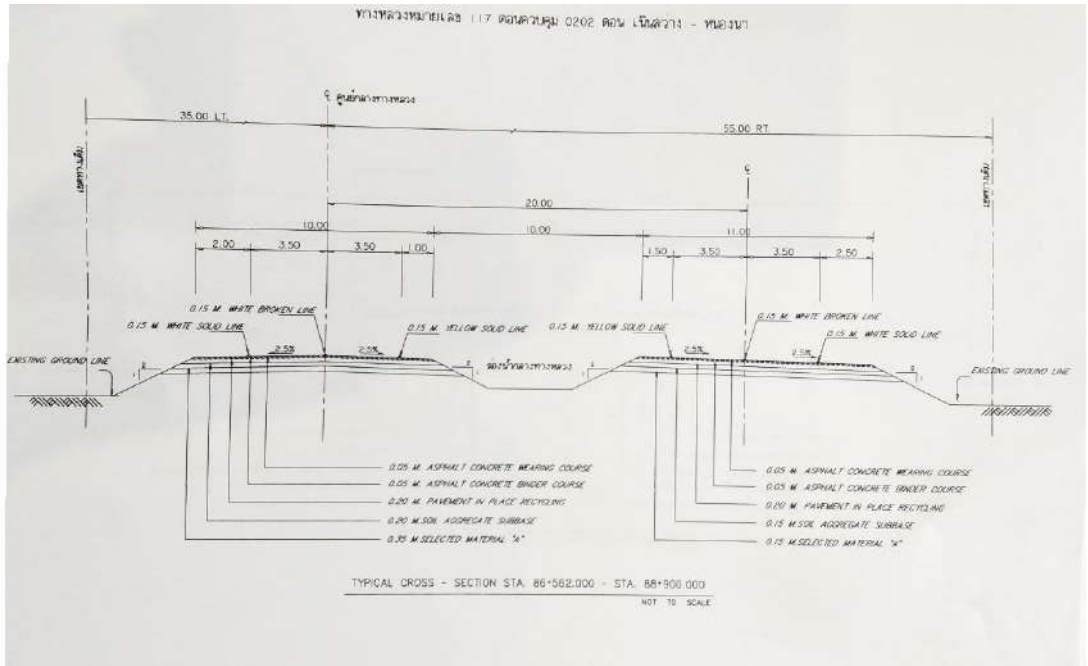
รูปที่ ก28 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา  
กม.78+687 - กม.78+717



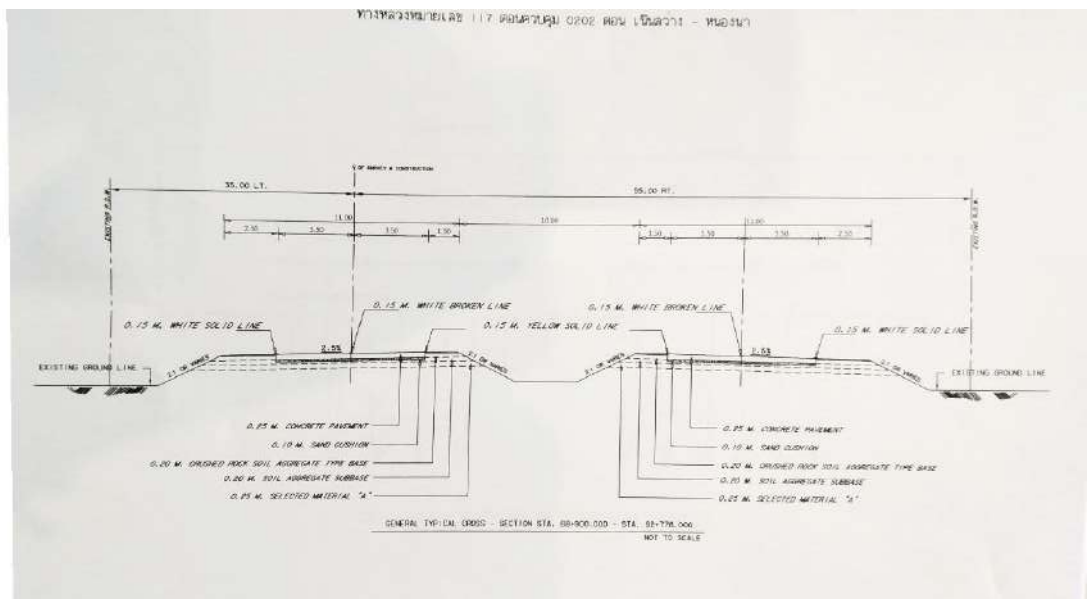
รูปที่ ก29 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา  
กม.78+717 - กม.86+512



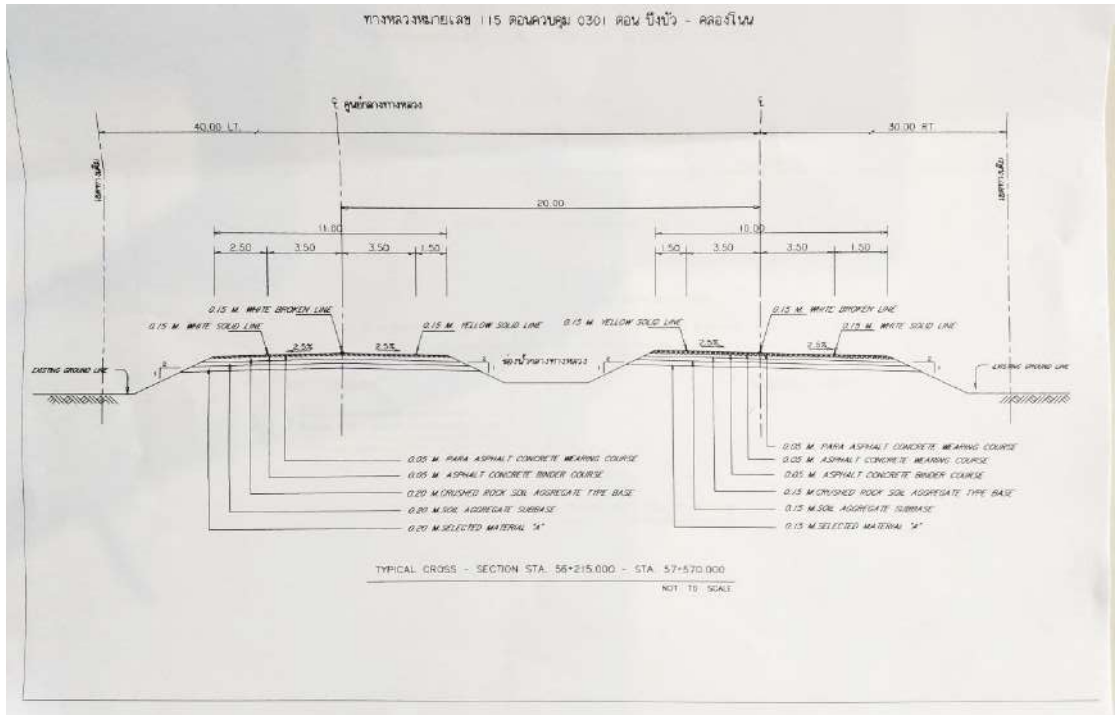
รูปที่ ก30 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา  
กม.86+512 - กม.86+562



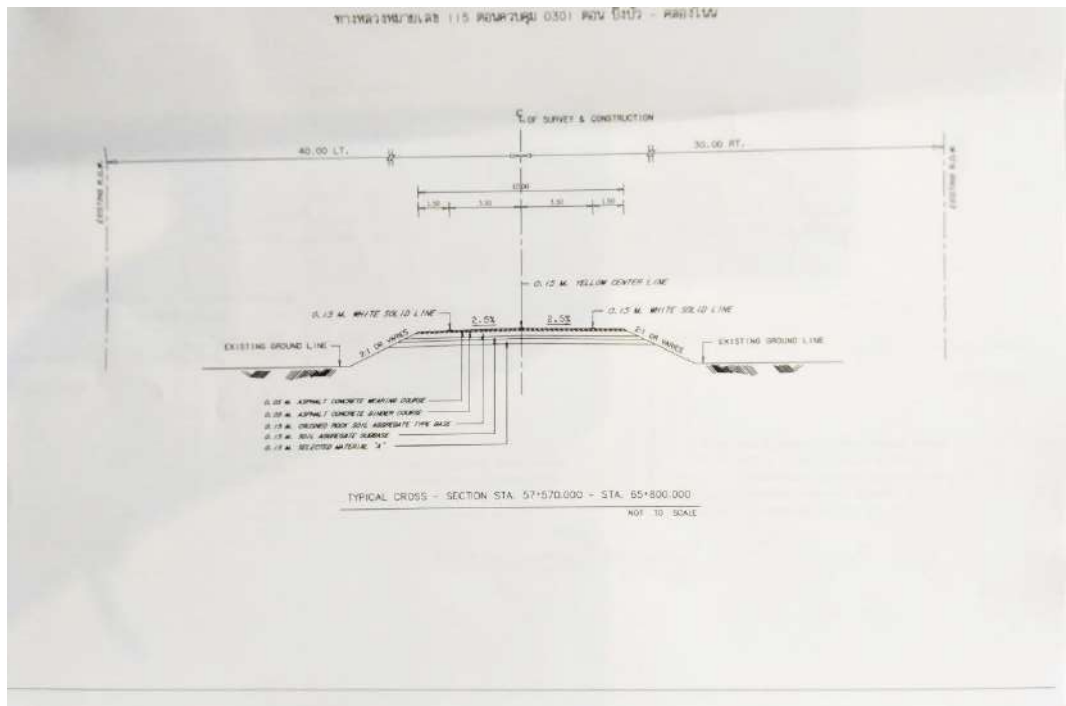
รูปที่ ก31 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา  
กม.86+562 - กม.88+900



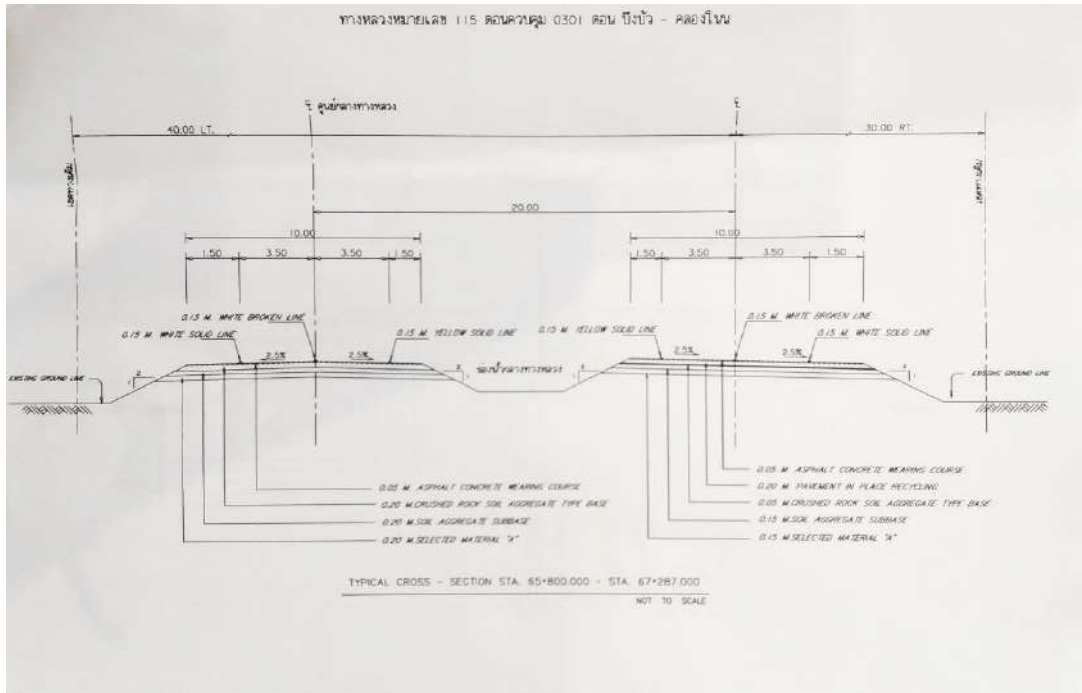
รูปที่ ก32 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนที่ 202 เนินสว่าง - หนองนา  
กม.88+900 - กม.92+778



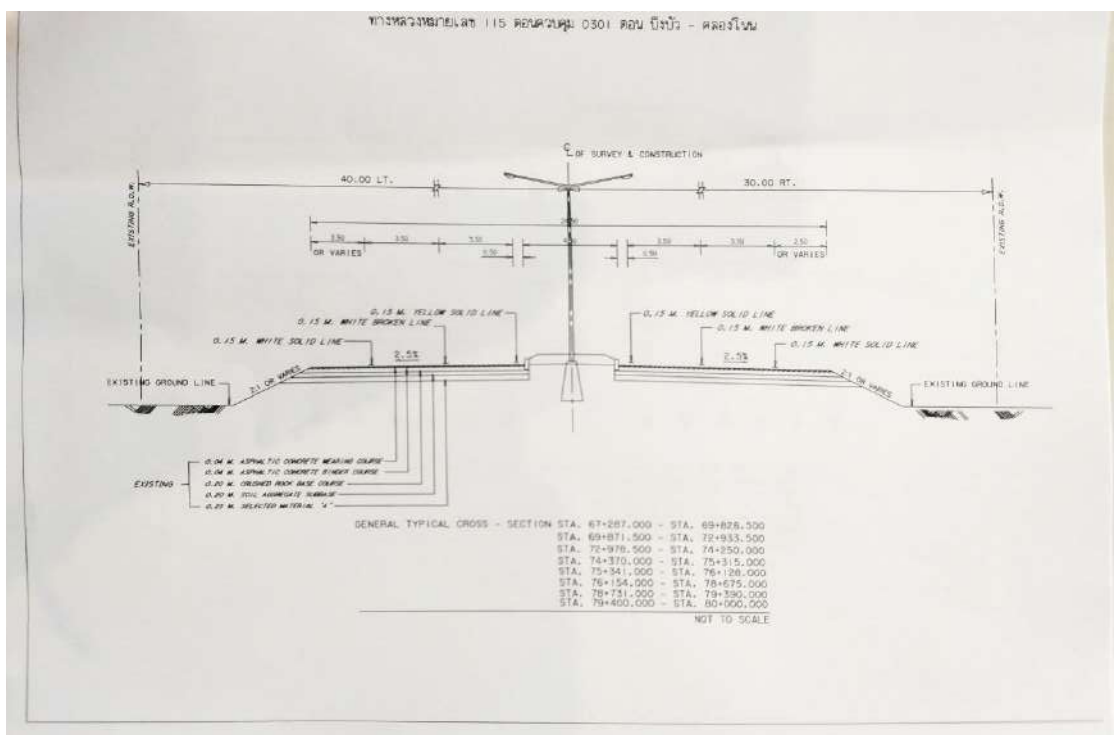
รูปที่ ก33 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว - คลองโนน  
กม.56+215 - กม.80+000



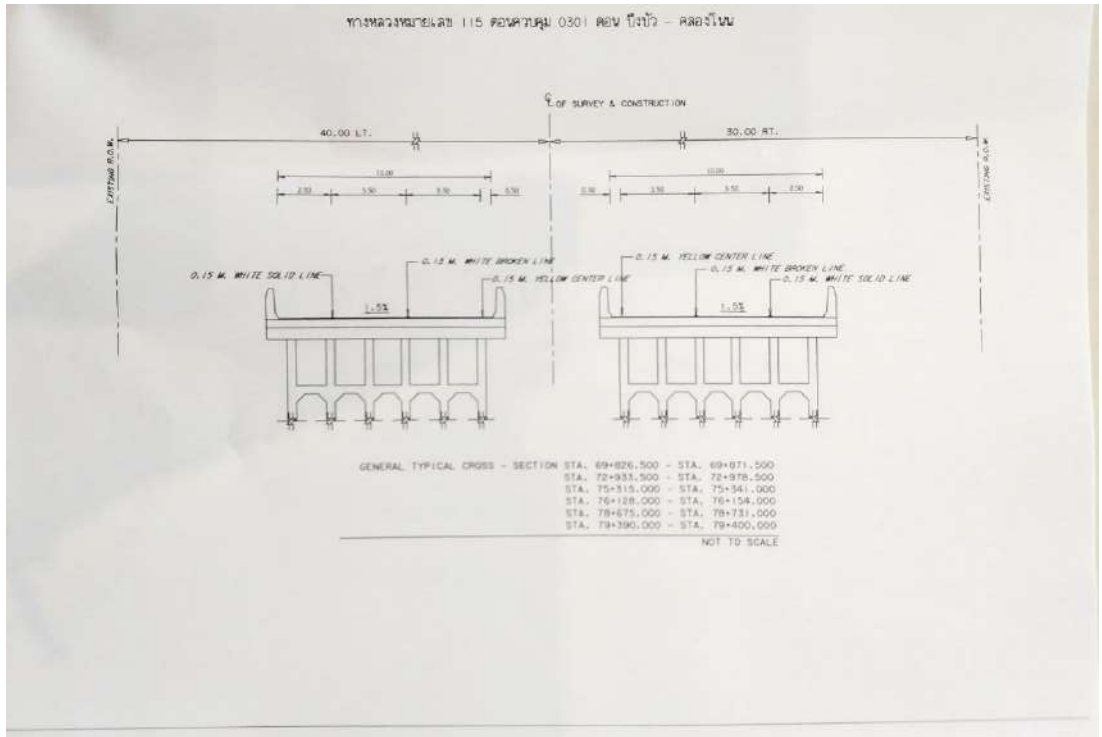
รูปที่ ก34 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว - คลองโนน  
กม.57+570 - กม.65+800



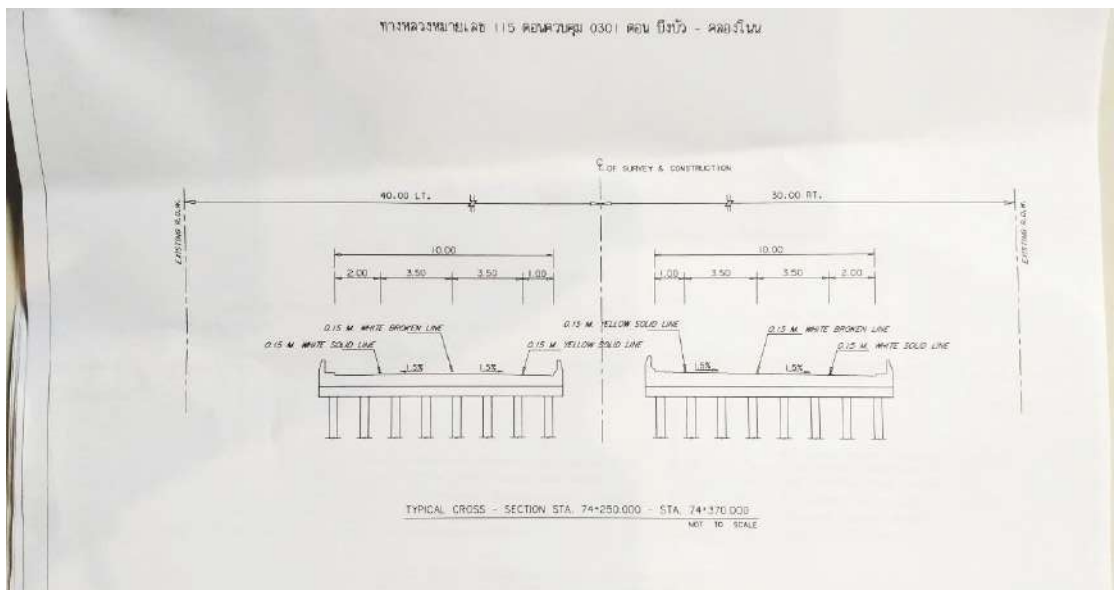
รูปที่ ก35 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว - คลองโนน  
กม.65+800 - กม.67+287



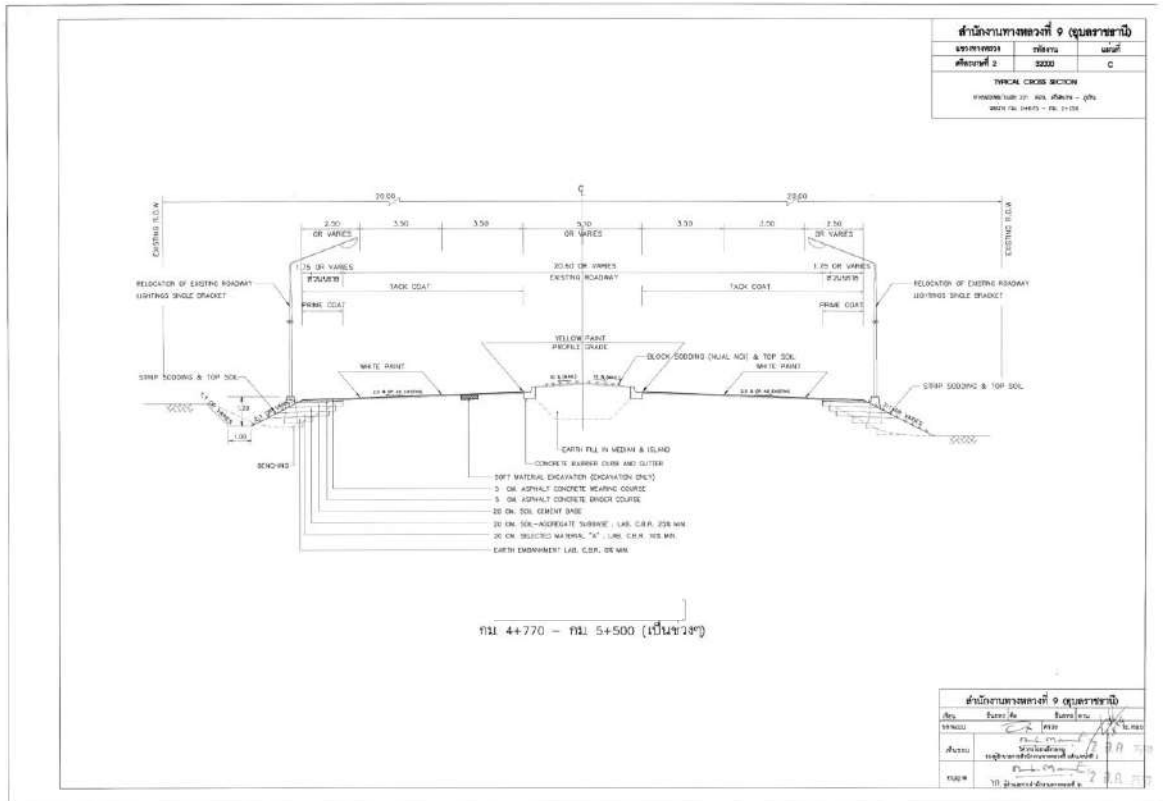
รูปที่ ก36 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว - คลองโนน  
กม.67+287 - 69+826.5, กม.69+871.5 - 72+933.5, กม.72+978.5 - 74+250, กม.74+370 - 75+315  
กม.75+341 - 76+128, กม.76+154 - 78+675, กม.78+731 - 79+390, กม.79+400 - 80.000



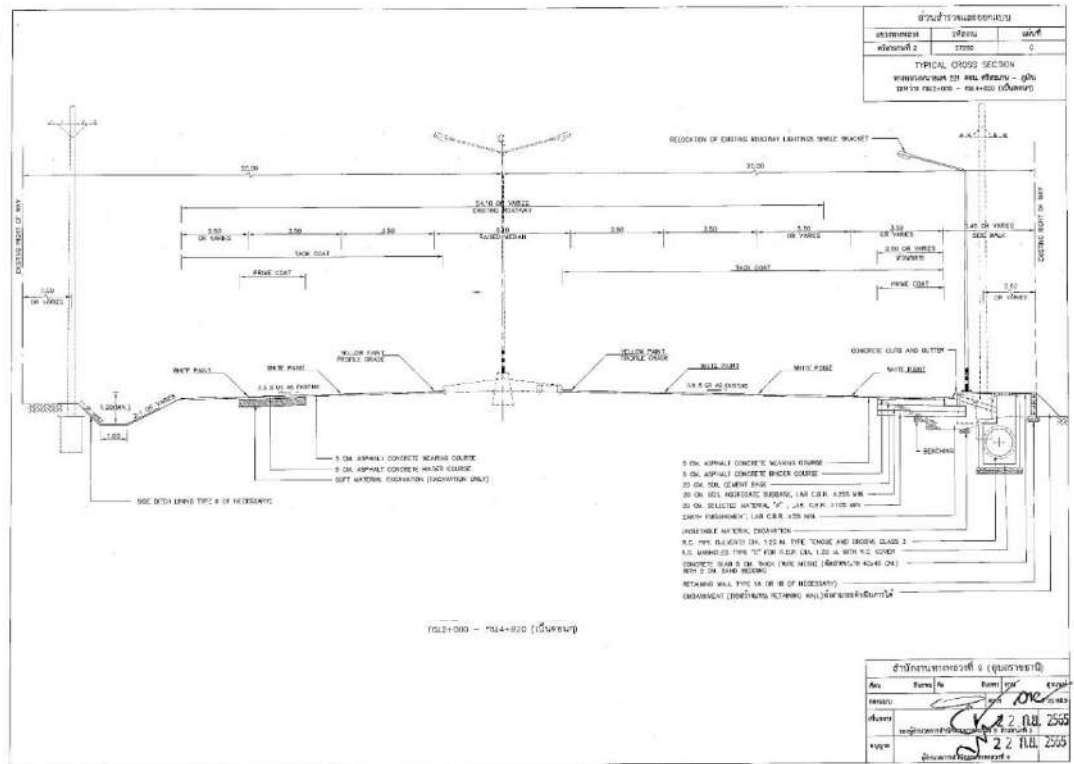
รูปที่ 37 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว - คลองโนน  
 กม.69+826.5 - 69+871.5, กม.72+933.5 - 72+978.5, กม.75+315 - 75+341, กม.76+128 - 76+154  
 กม.78+675 - 78+731, กม.79+390 - 79+400



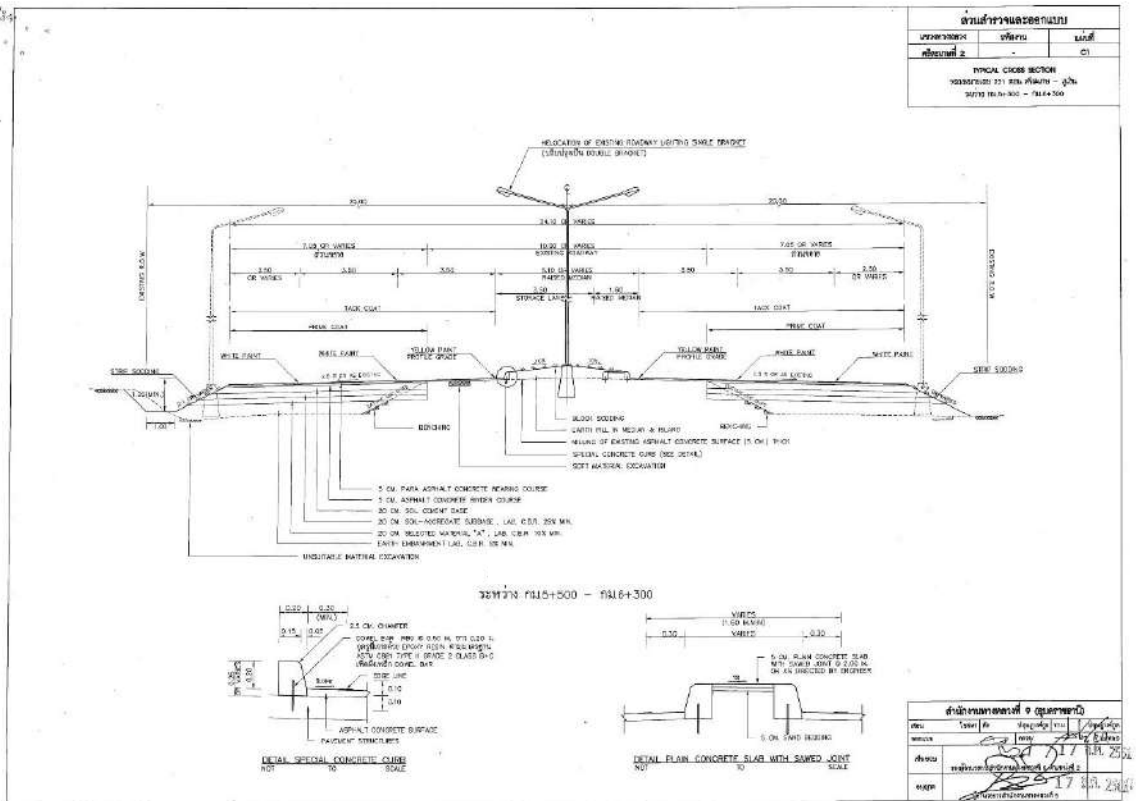
รูปที่ 38 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนที่ 301 บึงบัว - คลองโนน  
 กม.74+250 - 74+370



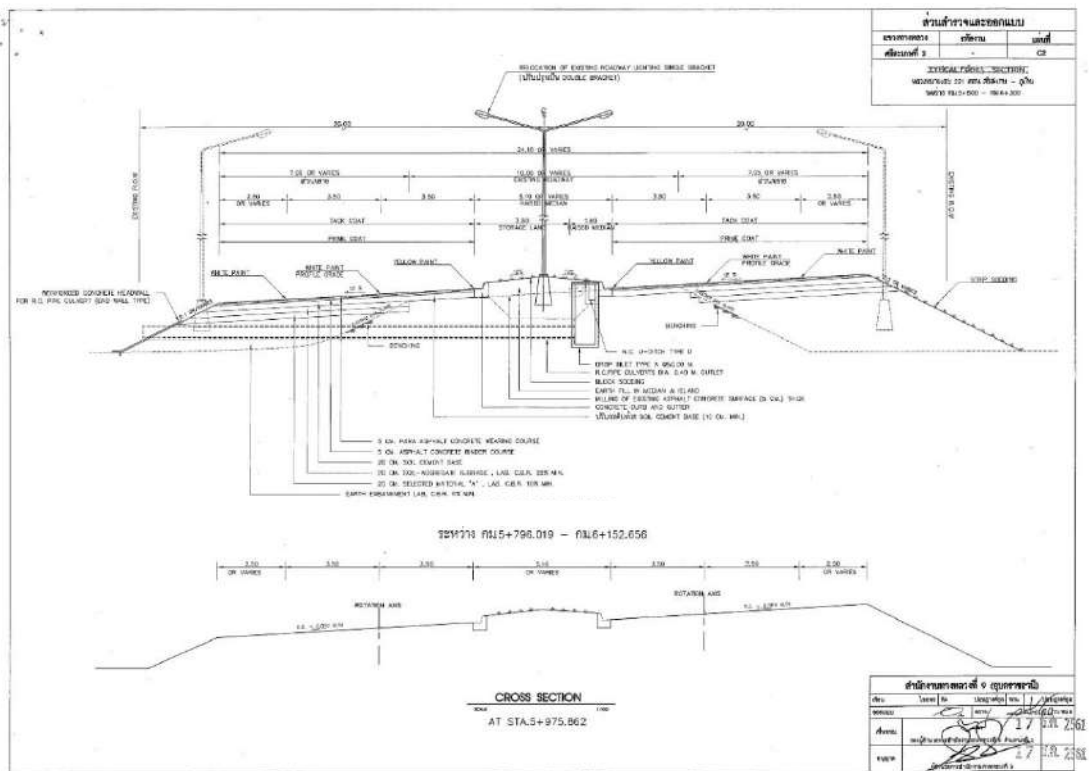
รูปที่ ก39 แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.4+770 - 5+500 (เป็นขวง)



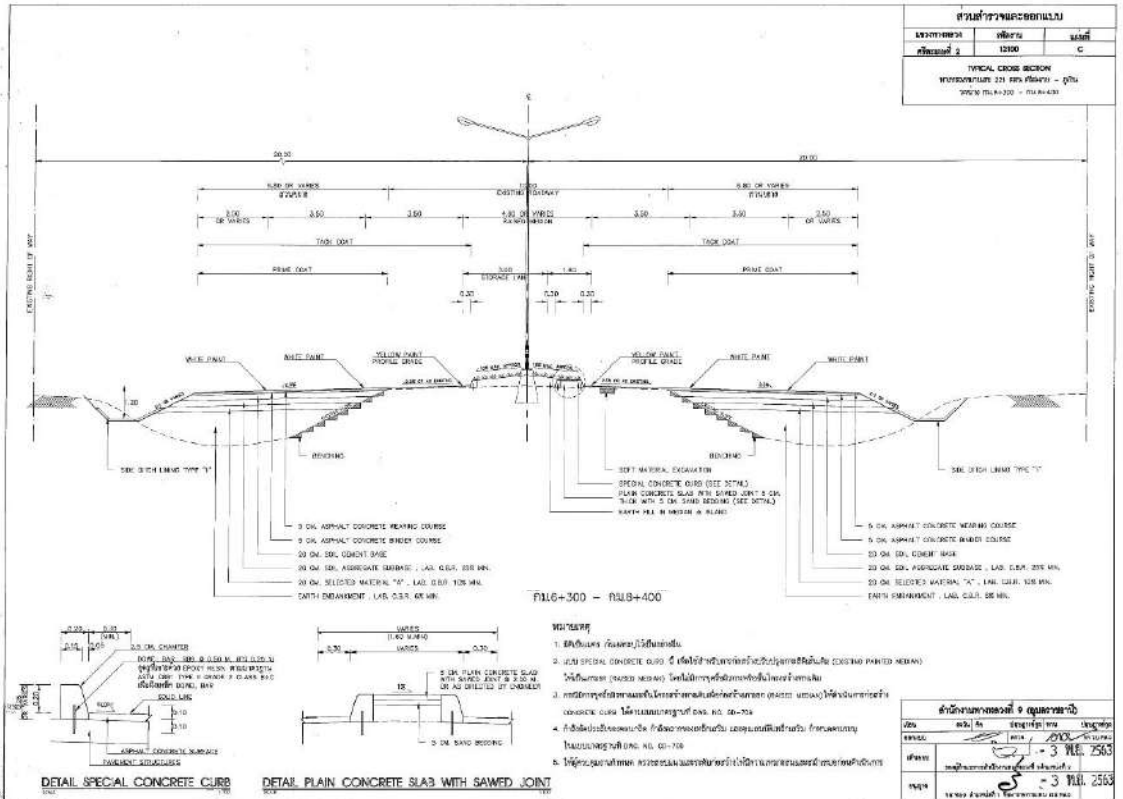
รูปที่ ก40 แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน กม.2+000 - 4+820



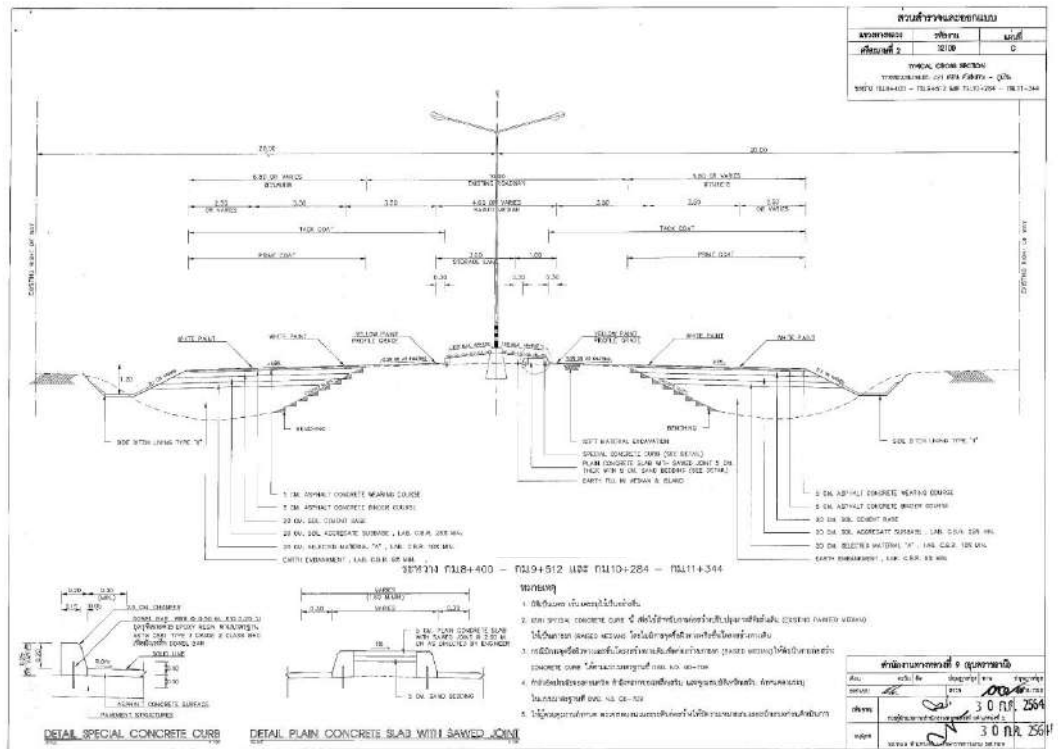
รูปที่ ก41 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูงีน  
กม.5+500 - 6+300



รูปที่ ก42 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูงีน  
กม.5+769 - 6+152

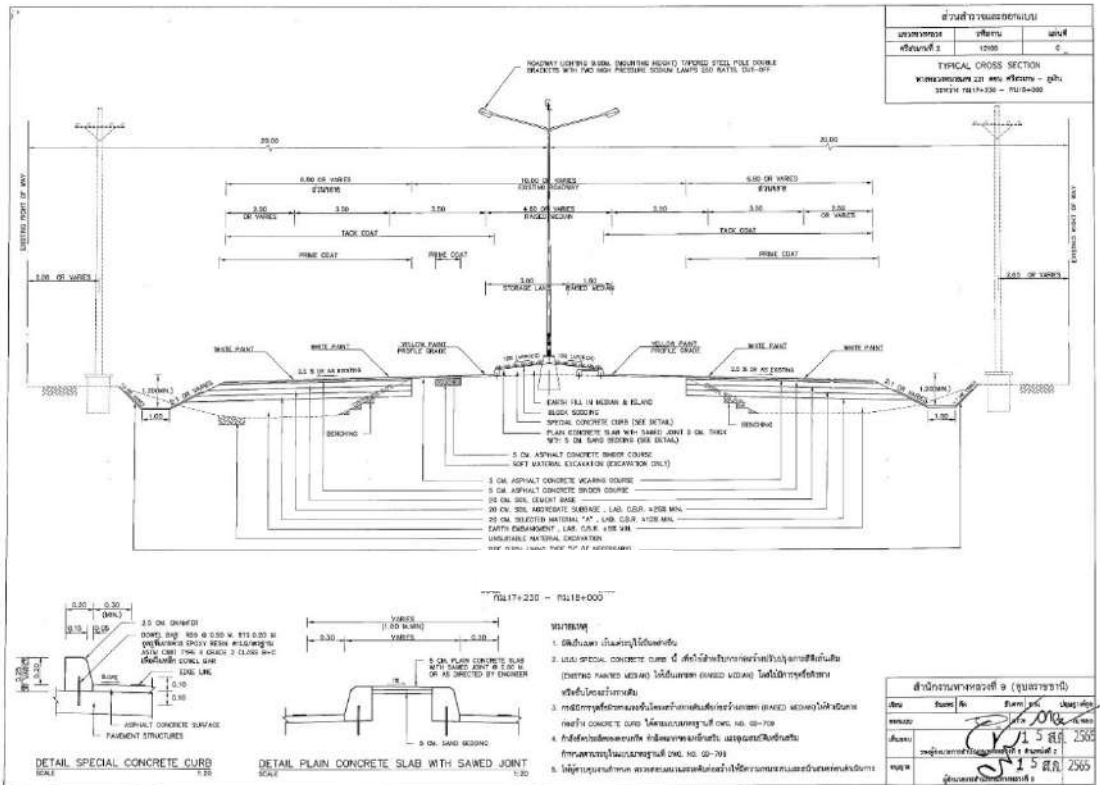


รูปที่ ก43 แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูงิน  
 กม.6+300 - 8+400

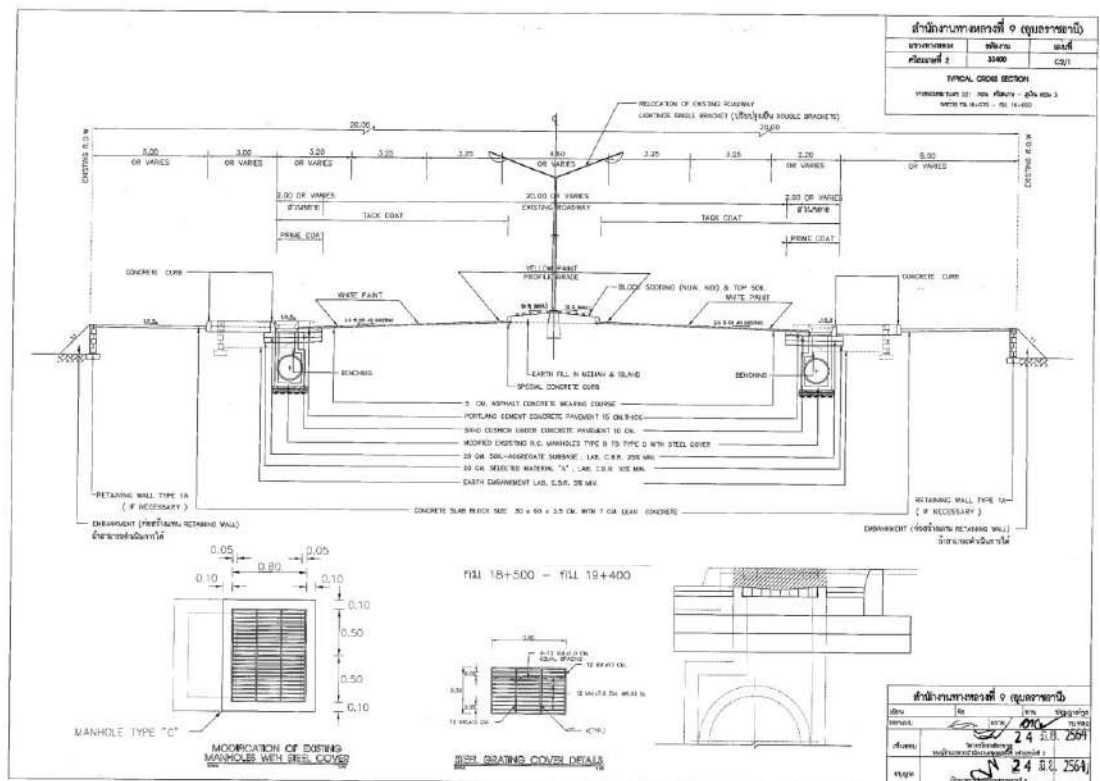


รูปที่ ก44 แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูงิน  
 กม.8+400 - 9+512, กม.10+284 - 11+344

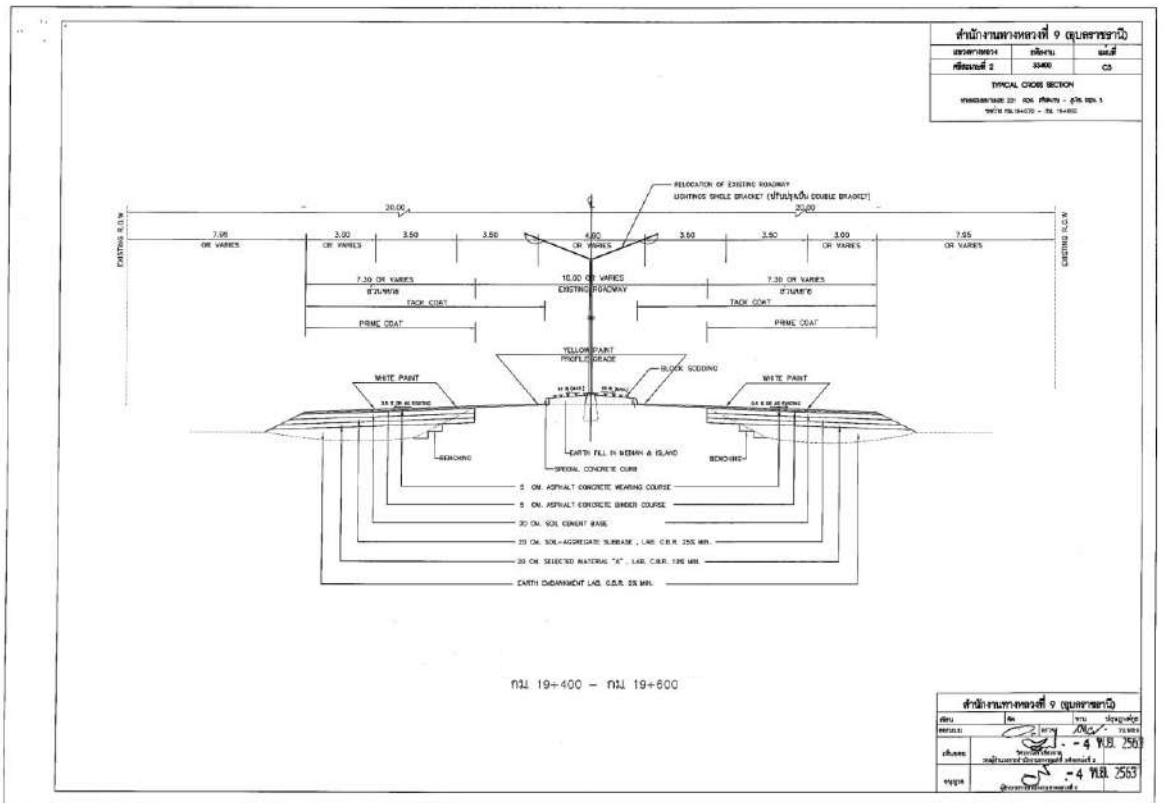




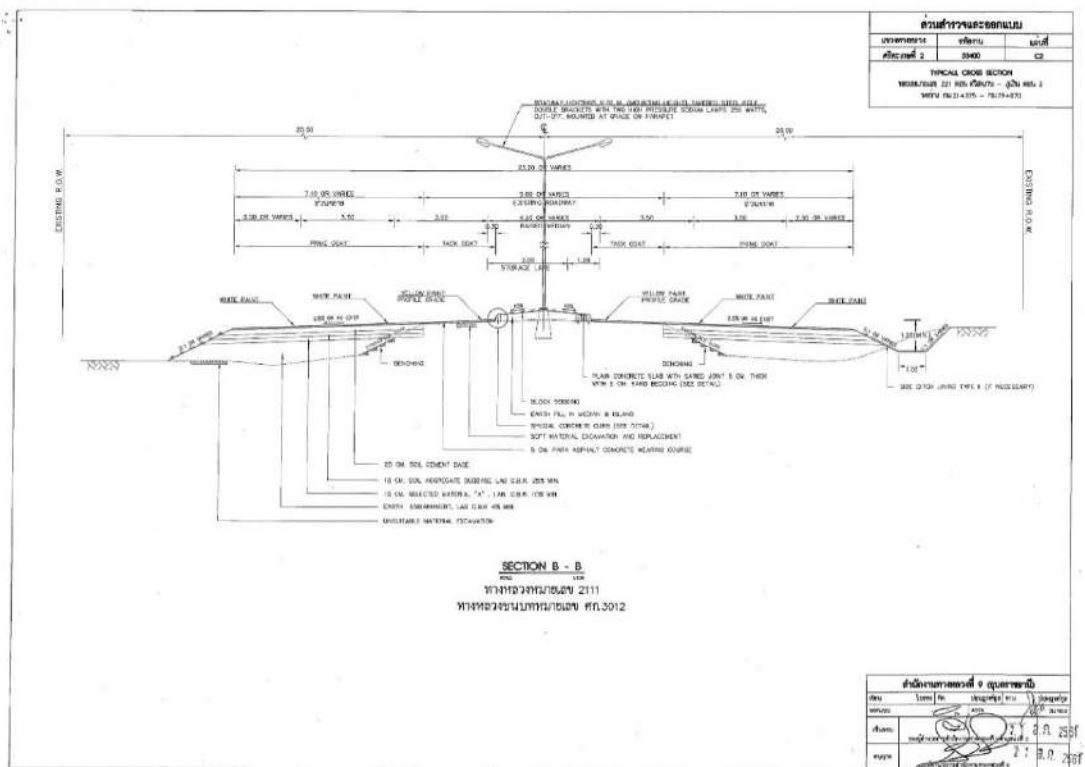
รูปที่ ก47 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน  
 กม.17+230 - 18+000



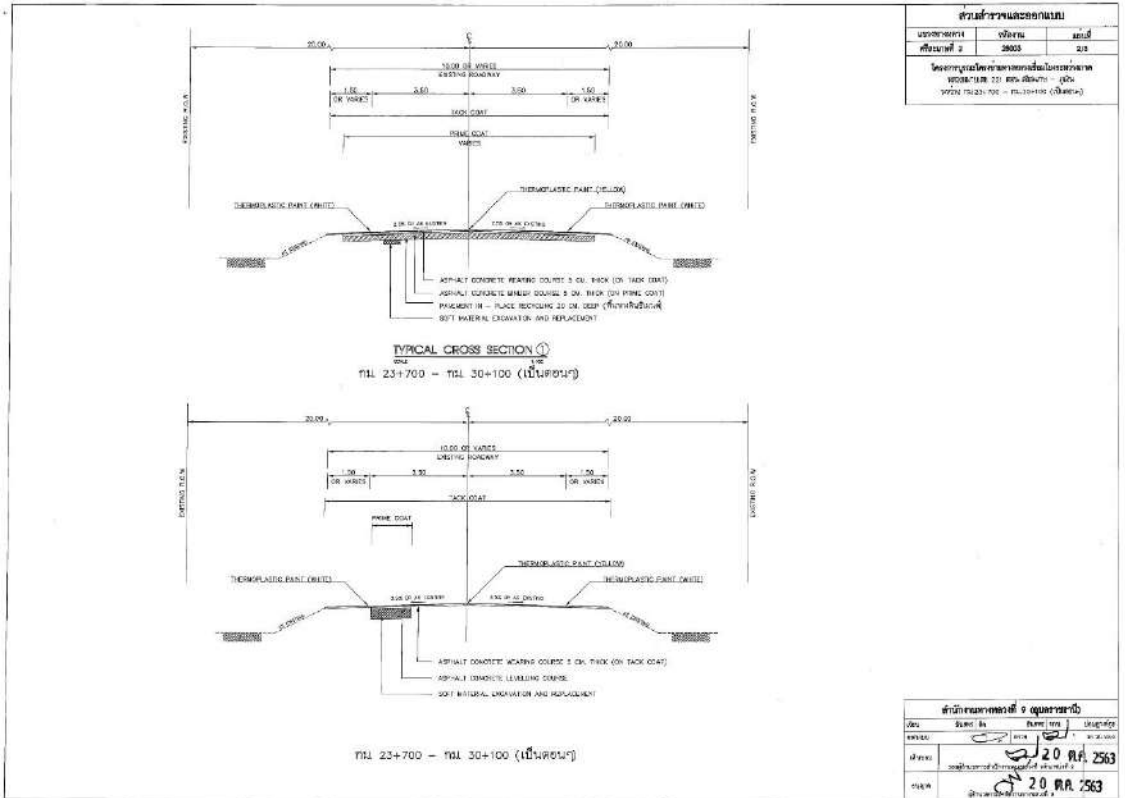
รูปที่ ก48 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูเงิน  
 กม.18+500 - 19+400



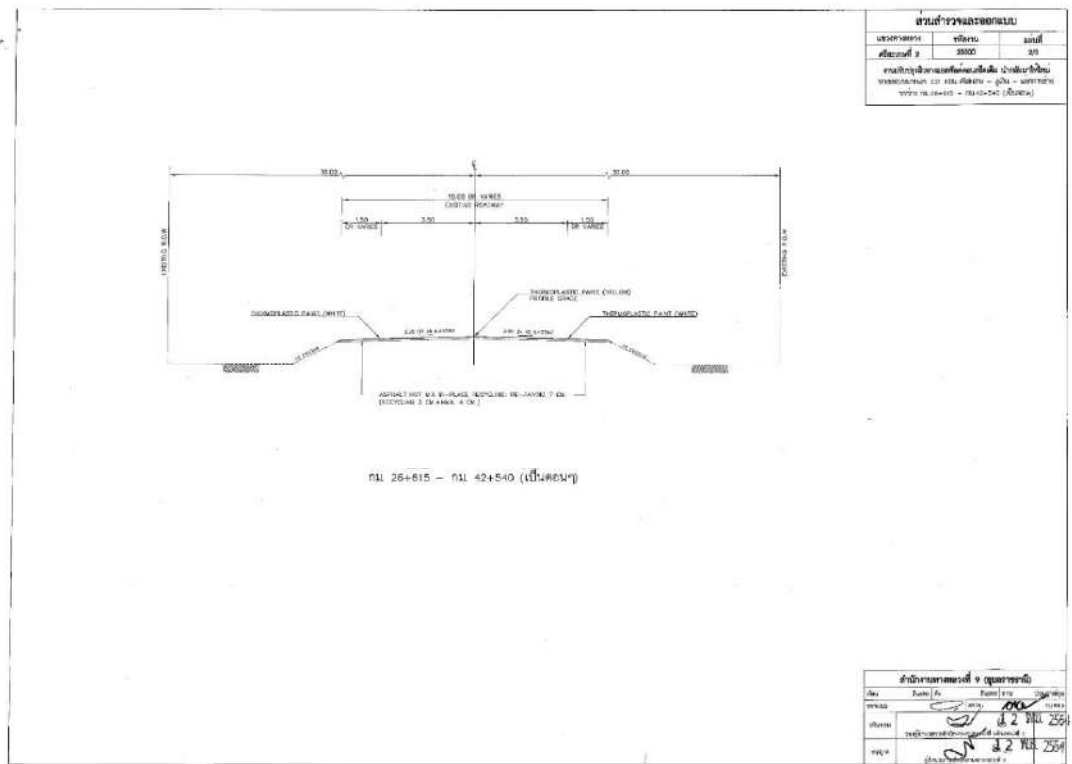
รูปที่ ก49 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูงาเงิน  
กม.19+400 - 19+600



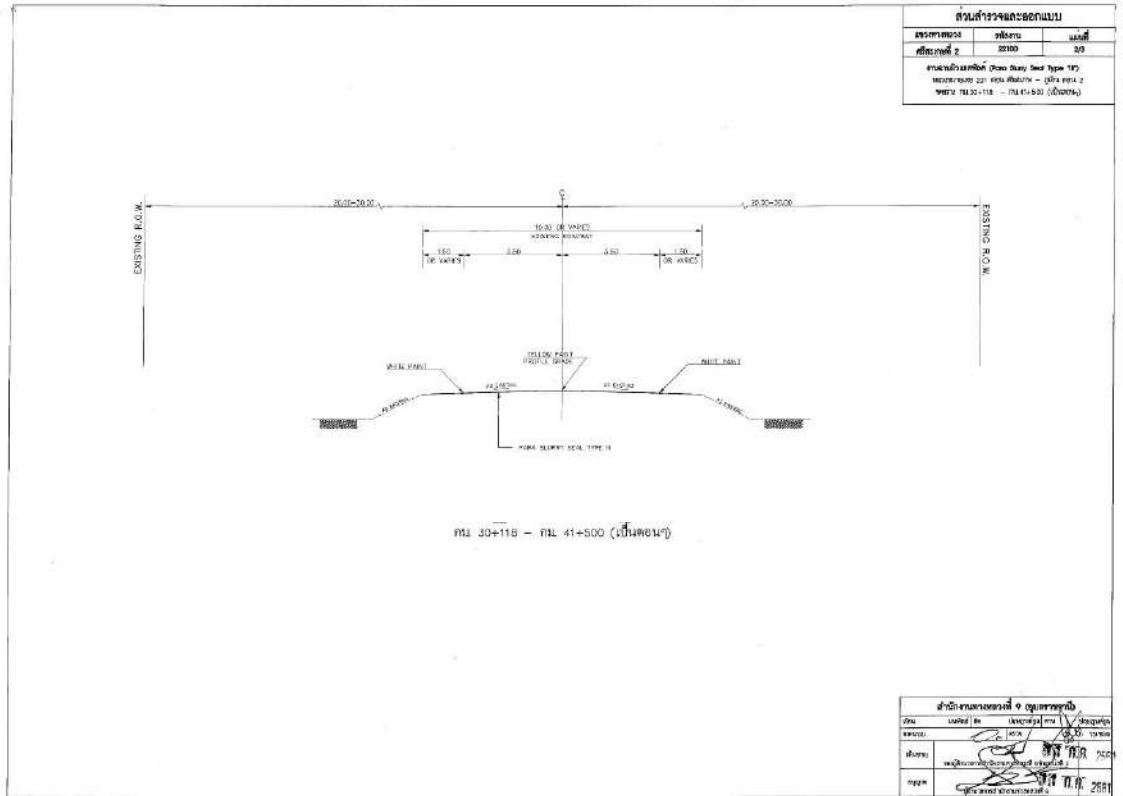
รูปที่ ก50 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูงาเงิน  
กม.21+375 - 21+870



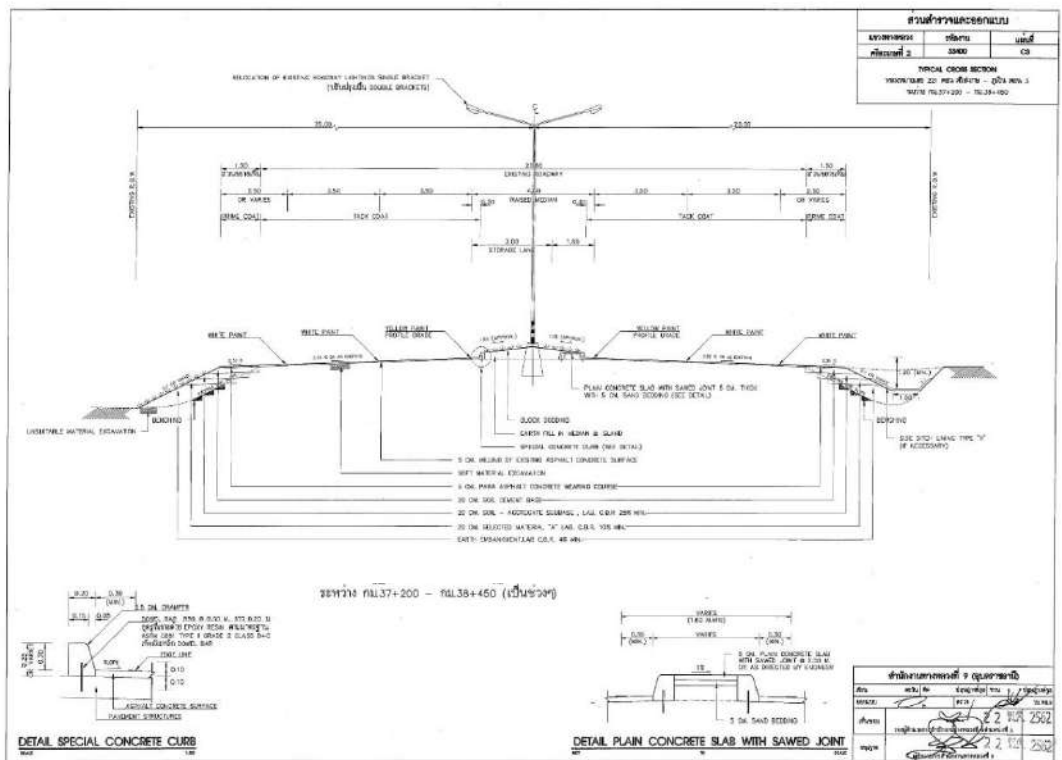
รูปที่ ก51 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูงิน  
กม.23+700 - 30+100



รูปที่ ก52 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูงิน  
กม.26+615 - 42+540

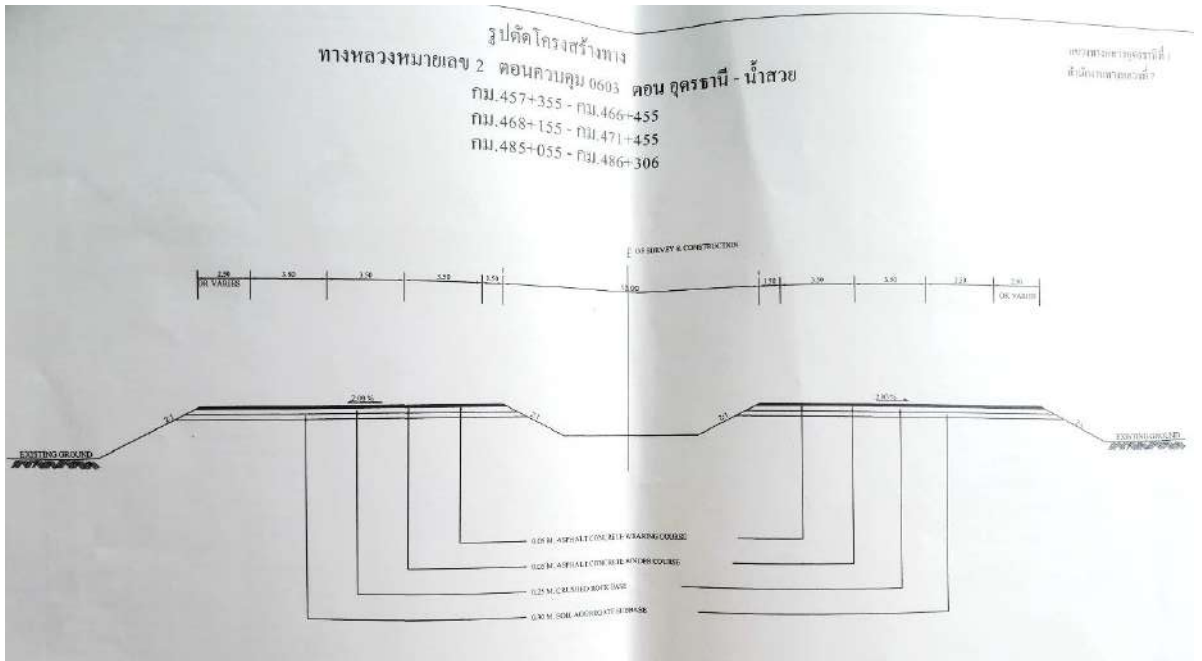


รูปที่ ก53 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูงิน  
กม.30+118 - 41+500

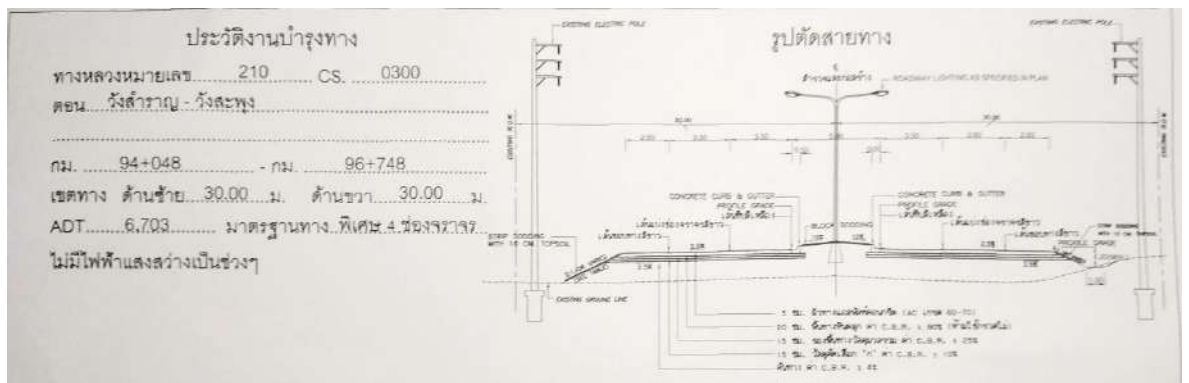


รูปที่ ก54 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนที่ 101 ศรีสะเกษ - ภูงิน  
กม.37+200 - 38+450

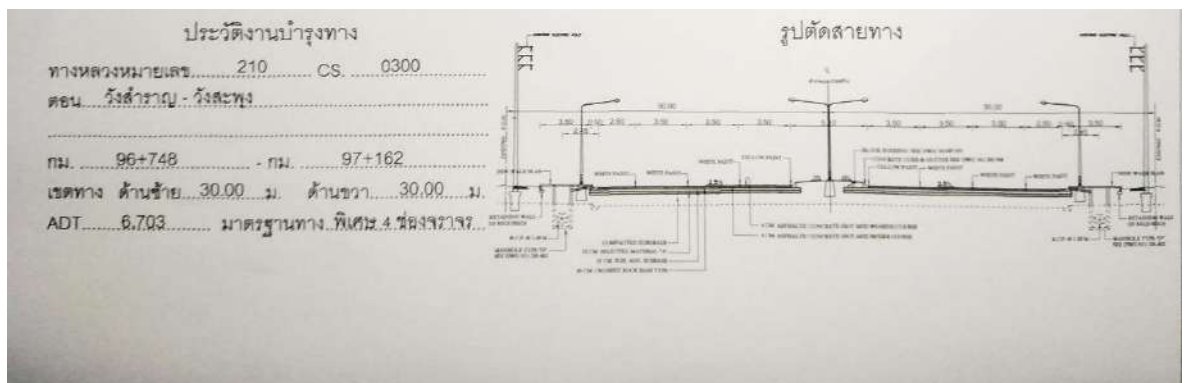




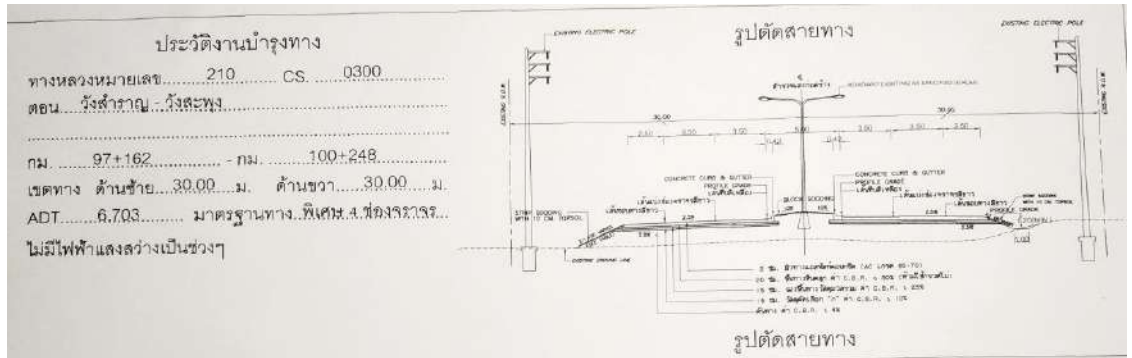
รูปที่ 57 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 2 ตอนที่ 602 อุดรธานี - น้ำสวย  
กม.457+355 - 466+455, กม.468+155 - 471+455, กม.485+055 - 486+306



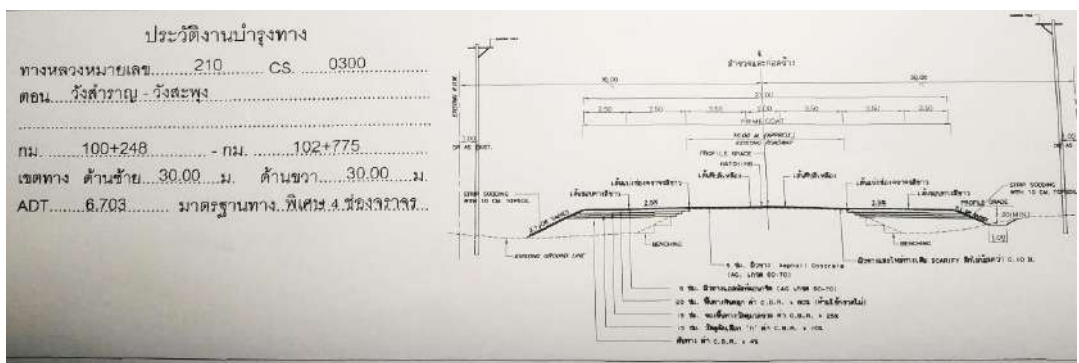
รูปที่ 58 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง  
กม.94+048 - 96+748



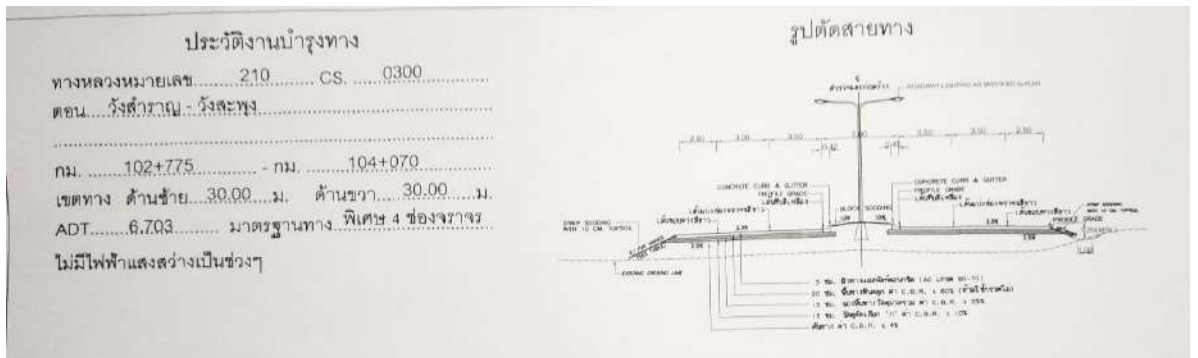
รูปที่ 59 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง  
กม.96+748 - 97+162



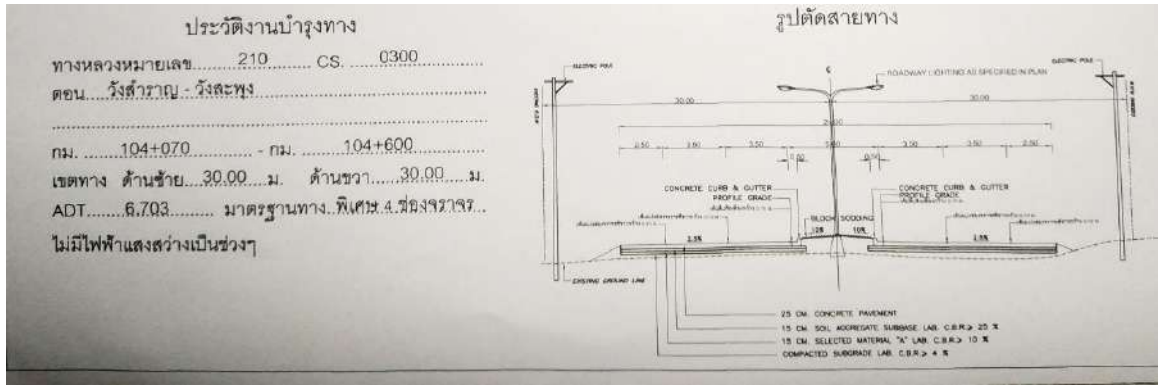
รูปที่ ก60 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง กม.97+162 - 100+248



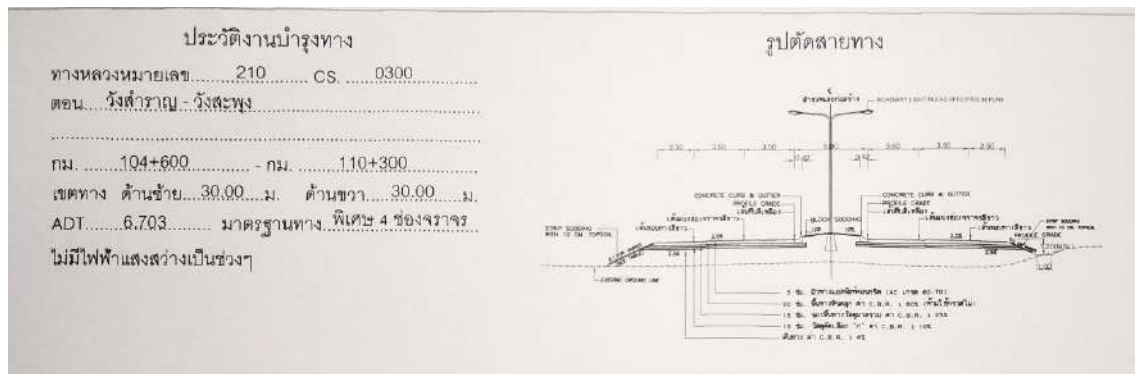
รูปที่ ก61 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง กม.100+248 - กม.102+775



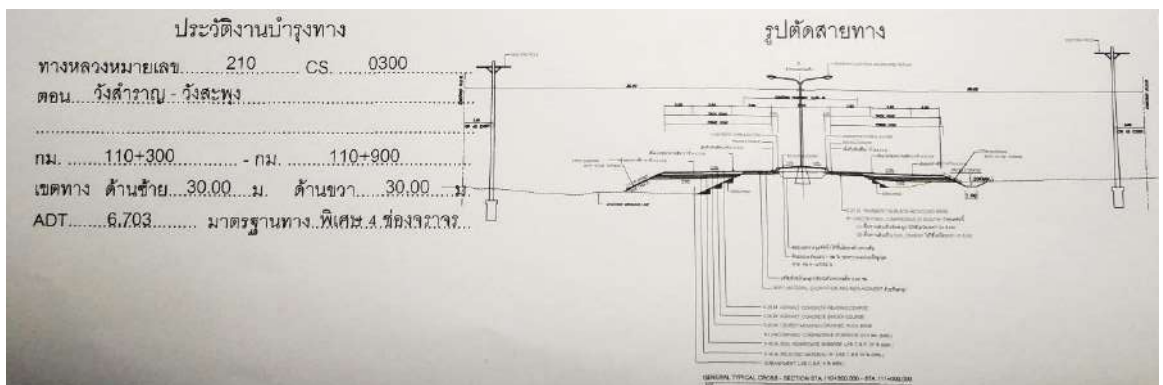
รูปที่ ก62 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง กม.102+775 - กม.104+070



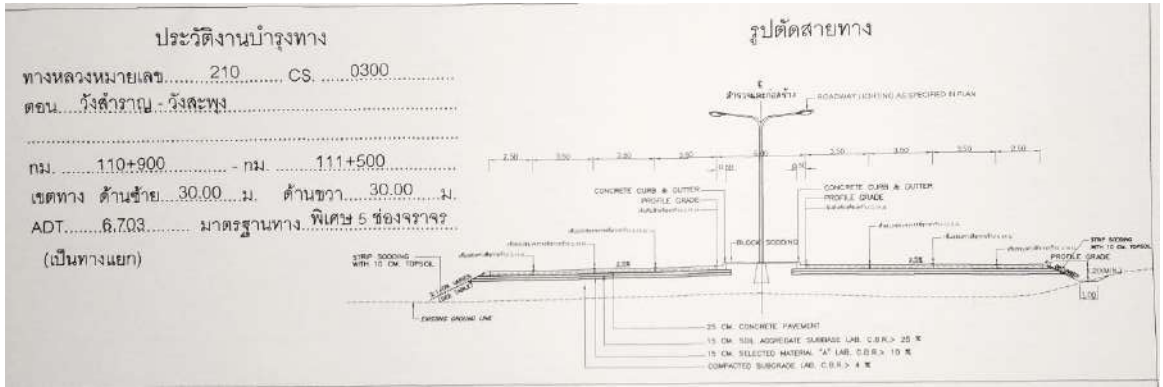
รูปที่ ก63 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง  
กม.104+070 - กม.104+600



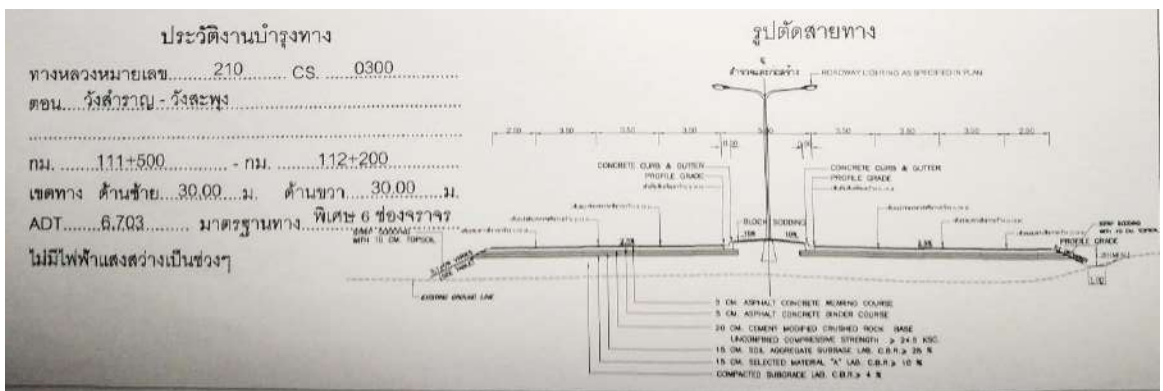
รูปที่ ก64 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง  
กม.104+600 - กม.110+300



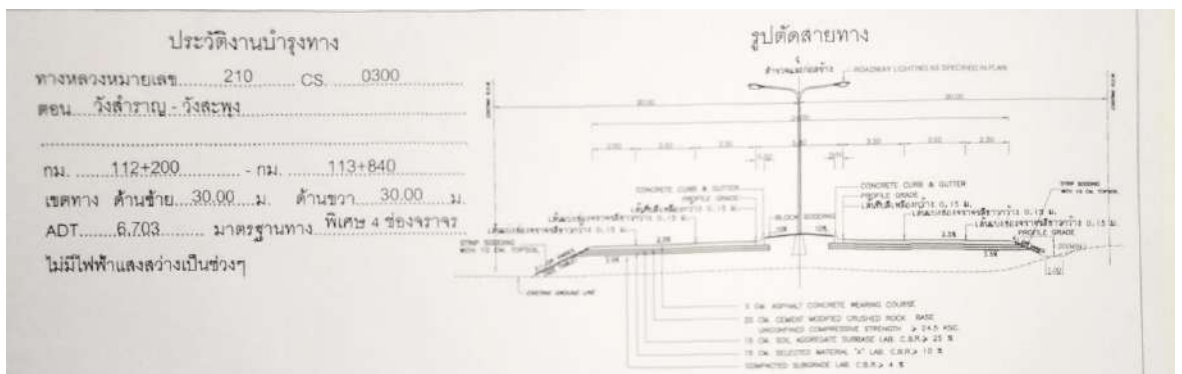
รูปที่ ก65 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง  
กม.110+300 - กม.110+900



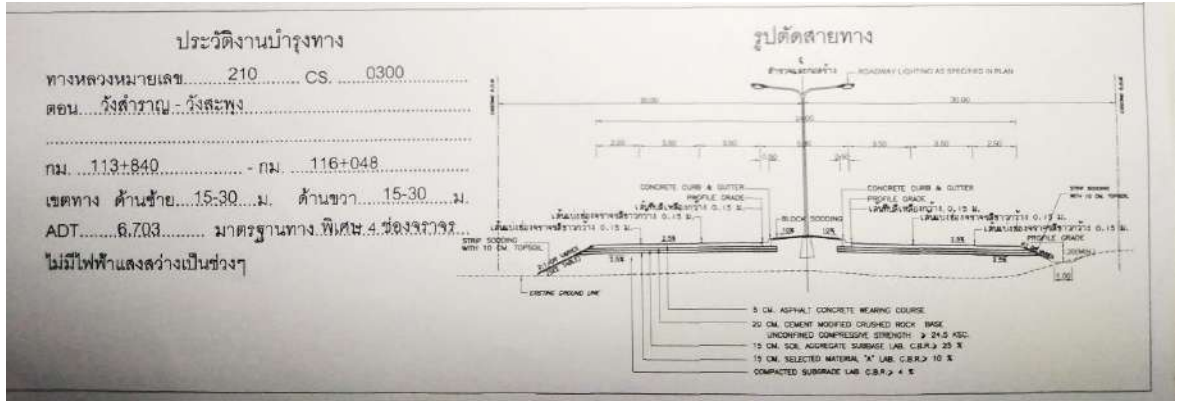
รูปที่ ก66 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง  
 กม.110+900 – กม.111+500



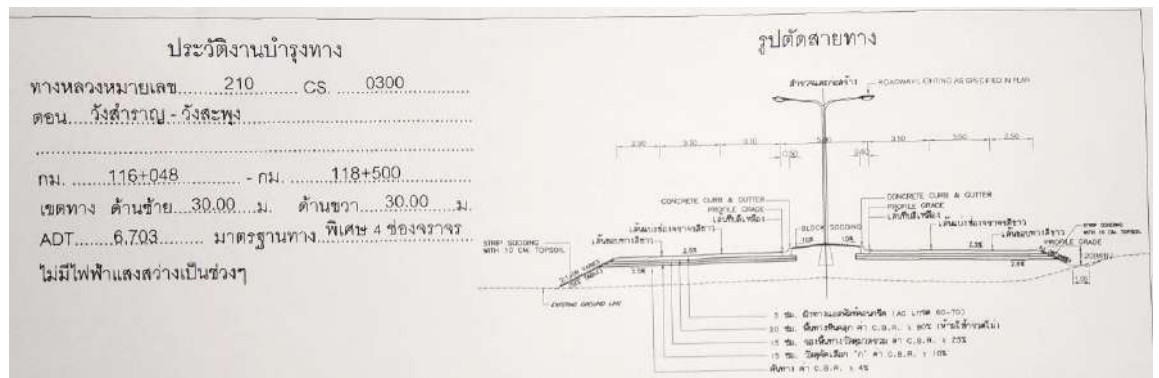
รูปที่ ก67 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง  
 กม.111+500 – กม.112+200



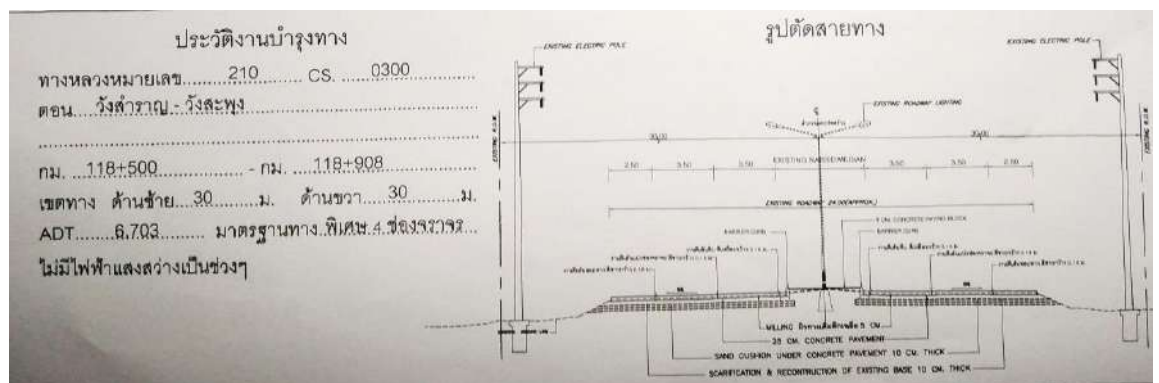
รูปที่ ก68 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ – วังสะพุง  
 กม.112+200 – กม.113+840



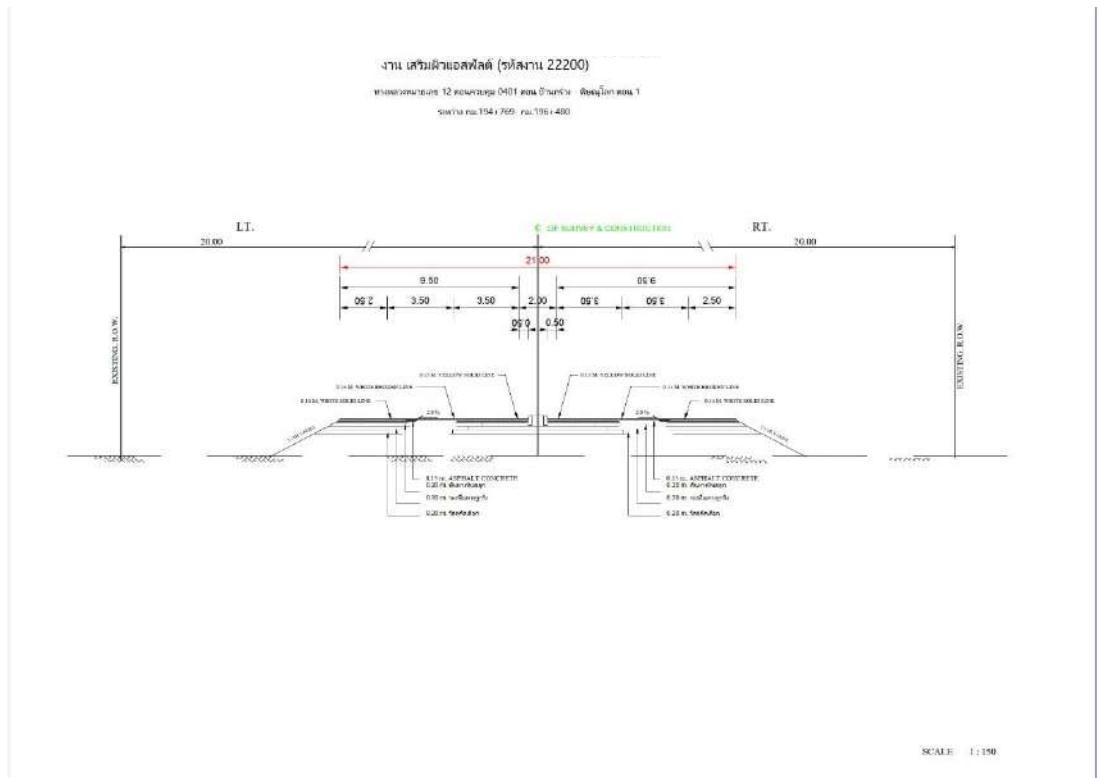
รูปที่ ก69 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง  
กม.113+840 - กม.116+048



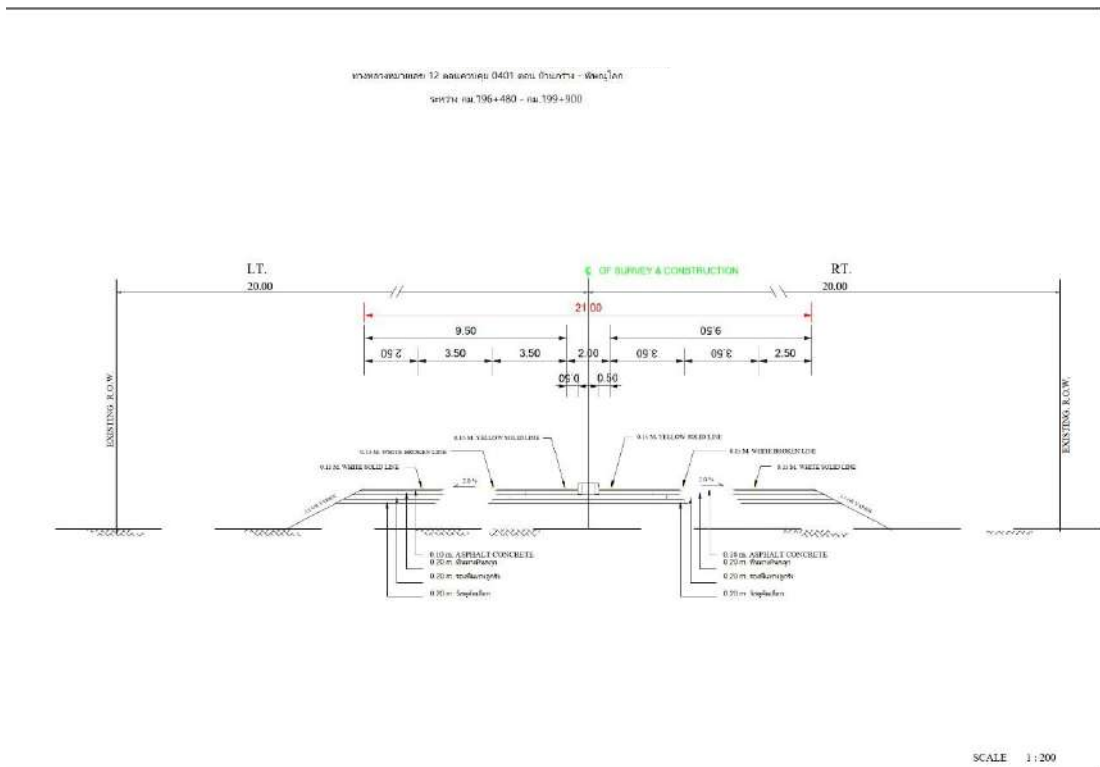
รูปที่ ก70 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง  
กม.116+048 - กม.118+500



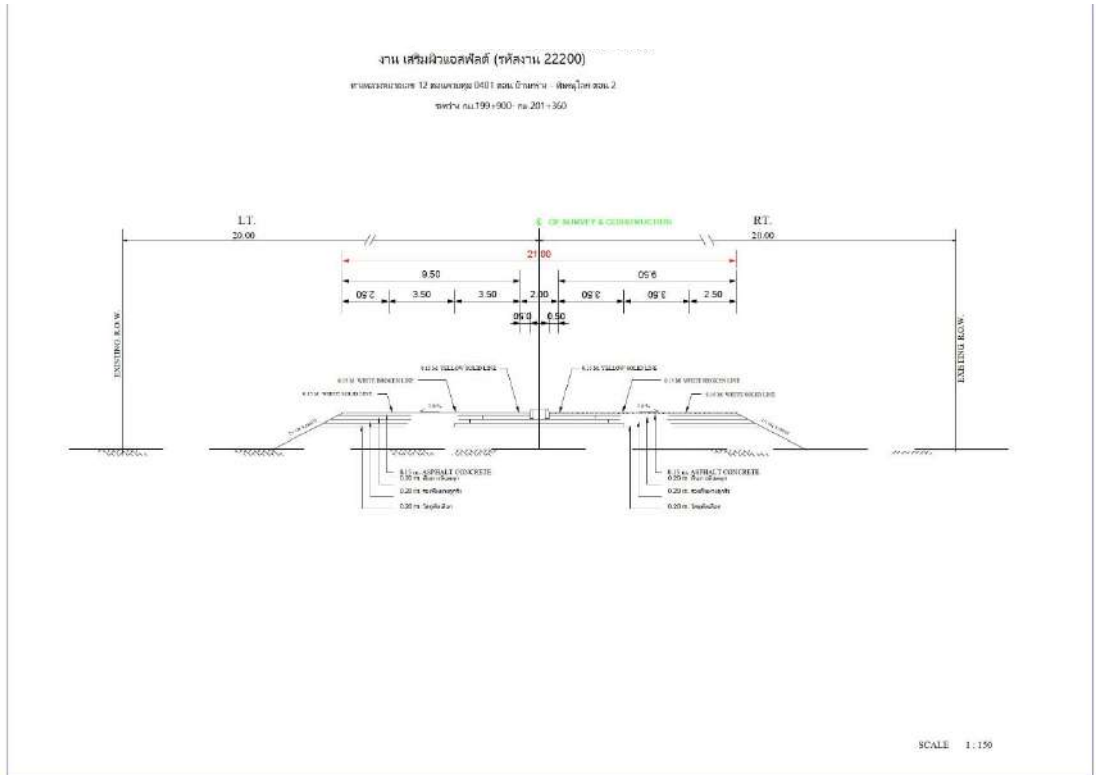
รูปที่ ก71 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนที่ 300 วังสำราญ - วังสะพุง  
กม.118+500 - กม.118+908



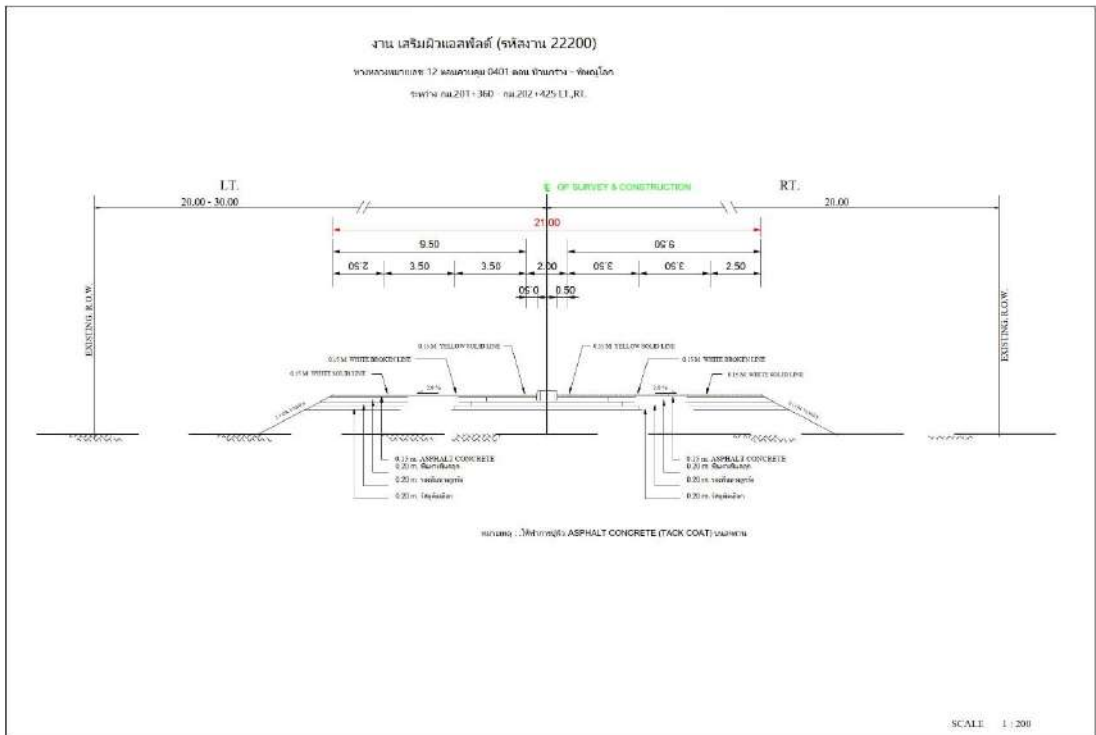
รูปที่ ก72 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.194+769 - 196+480



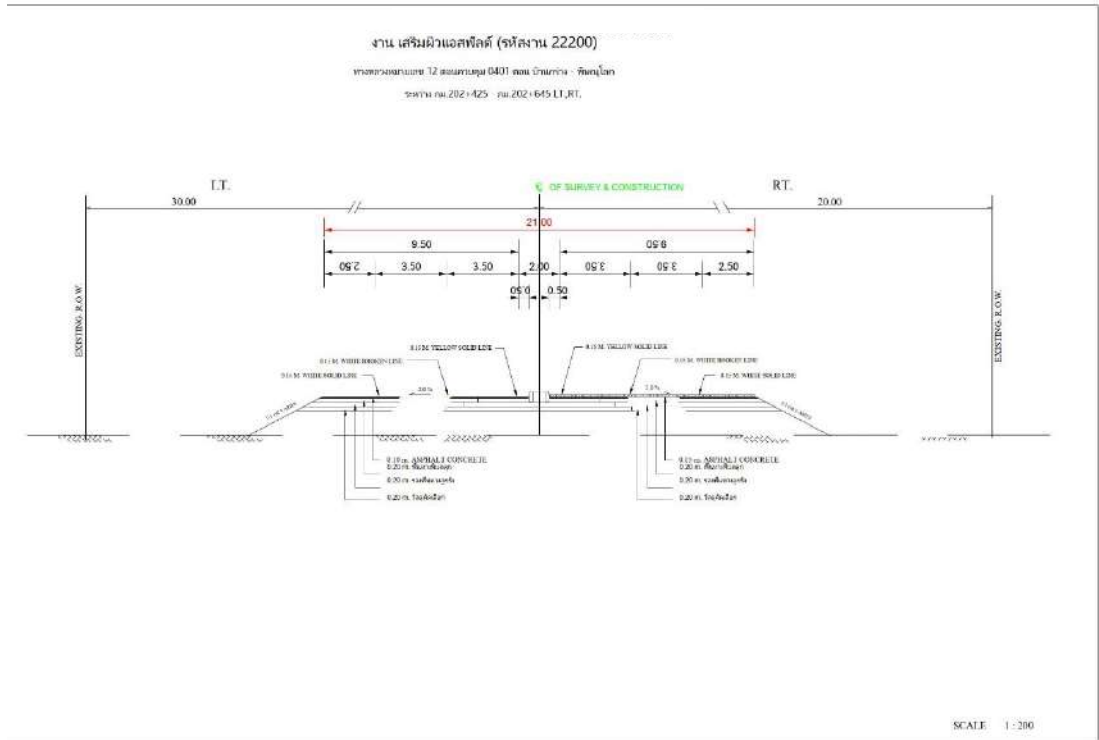
รูปที่ ก73 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.196+480 - กม.199+900



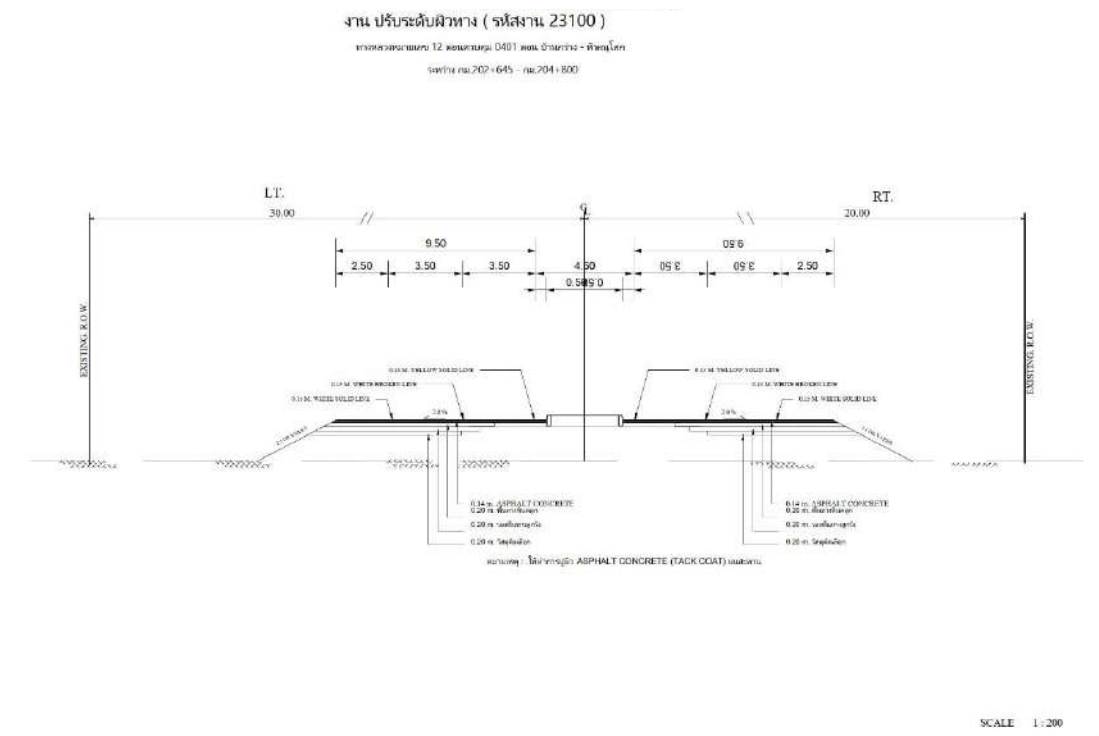
รูปที่ ก74 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.199+900 - 201+360



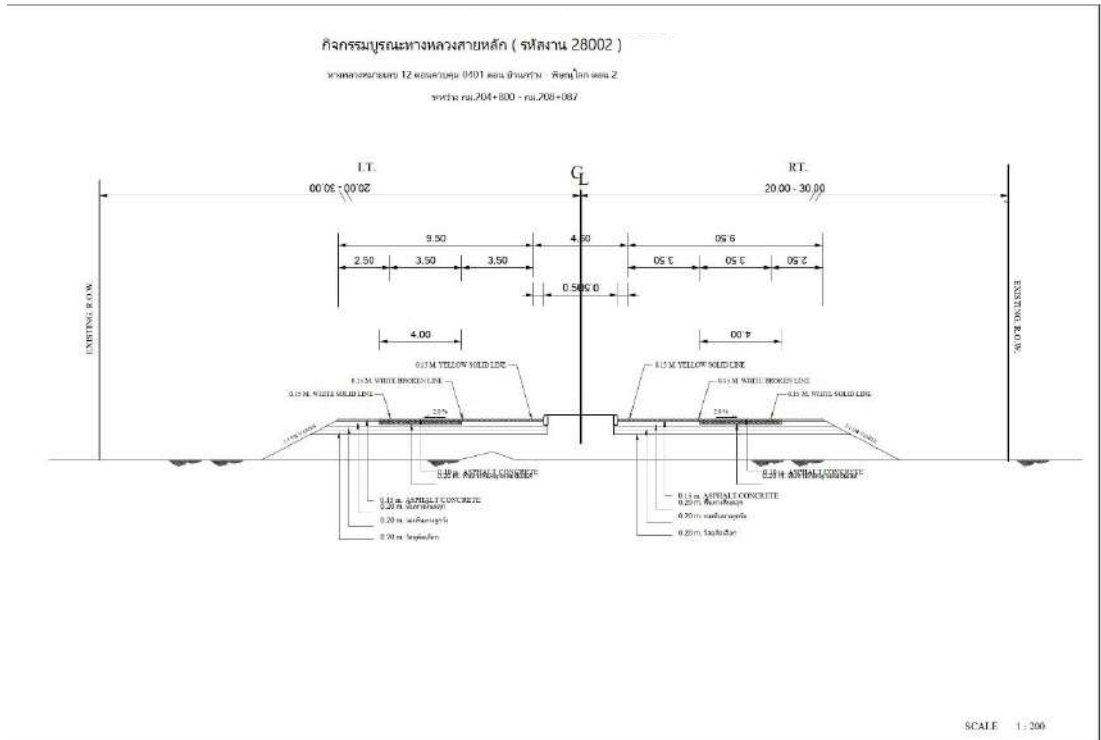
รูปที่ ก75 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.201+360 - กม.202+425



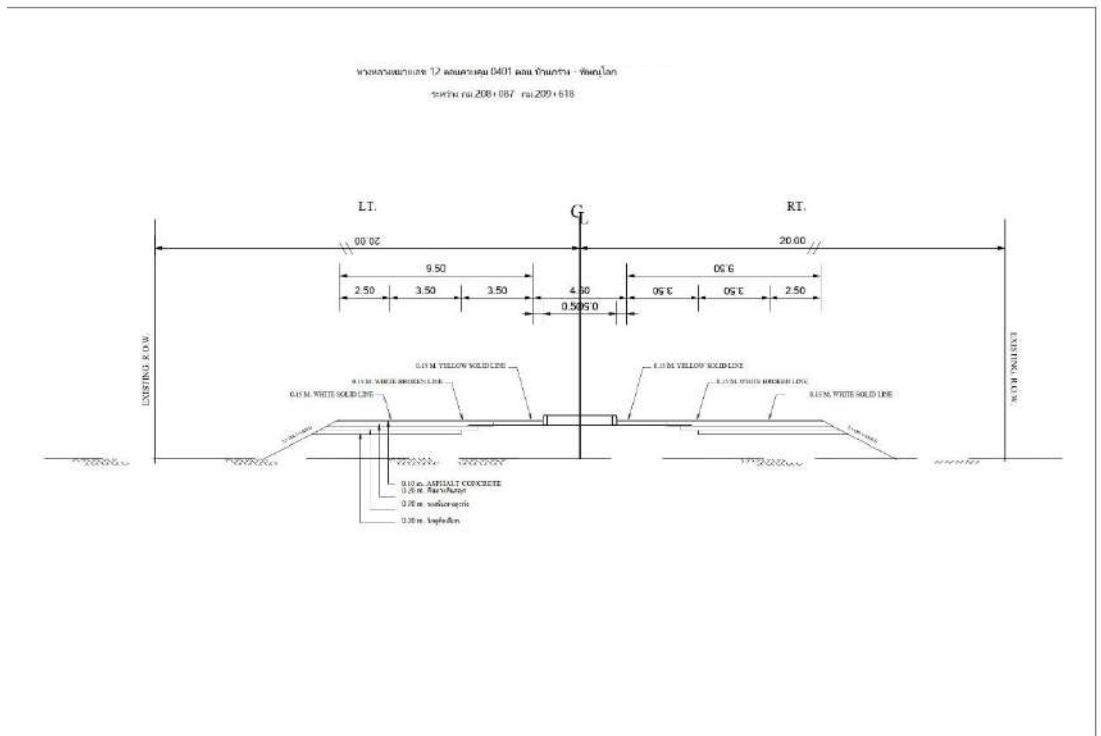
รูปที่ ก76 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.202+425 - กม.202+645



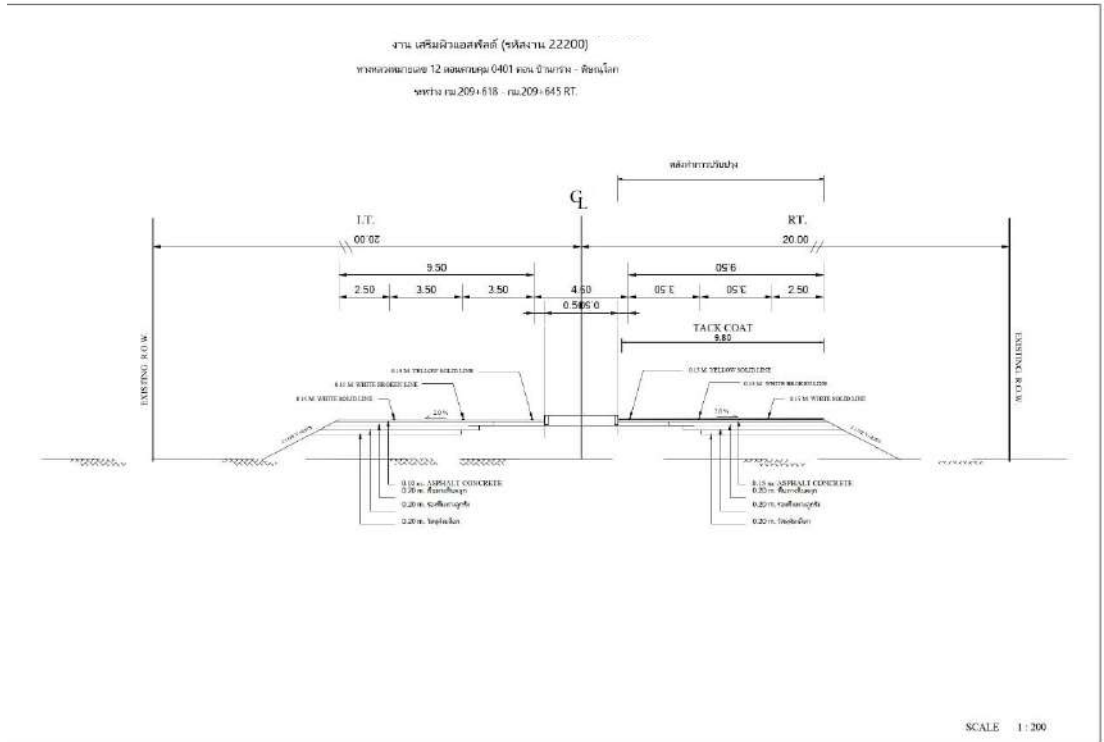
รูปที่ ก77 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.202+645 - กม.204+800



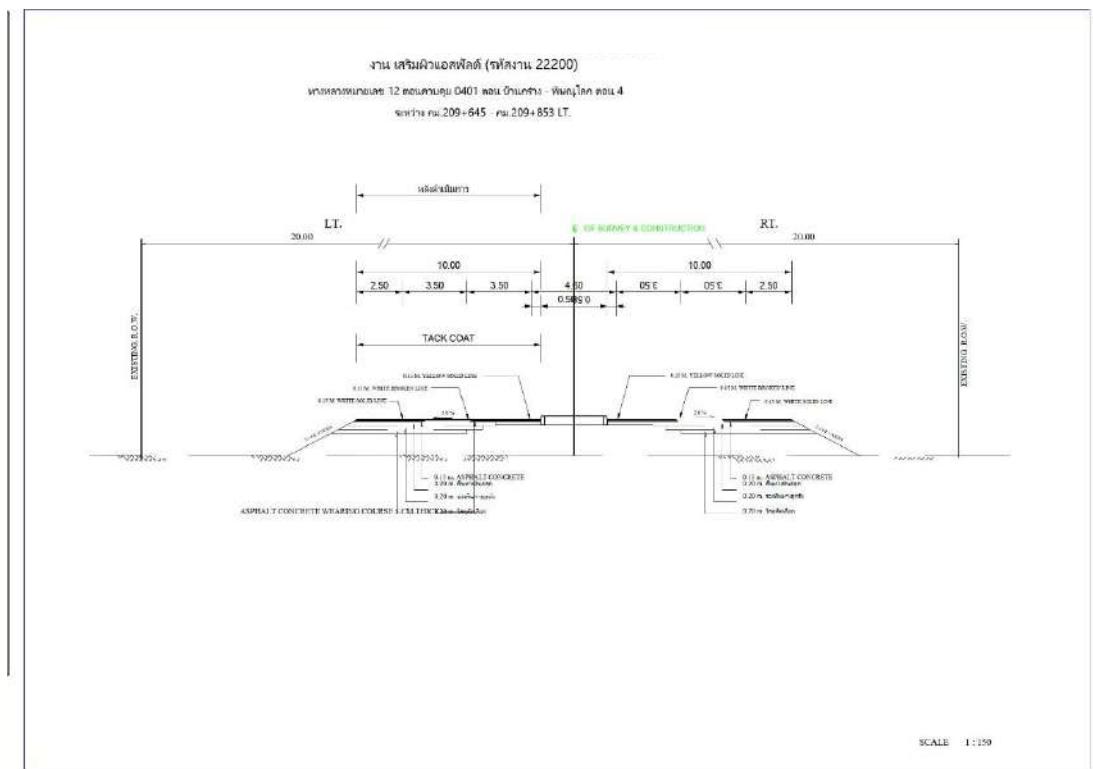
รูปที่ ก78 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
กม. 204+800 – 208+087



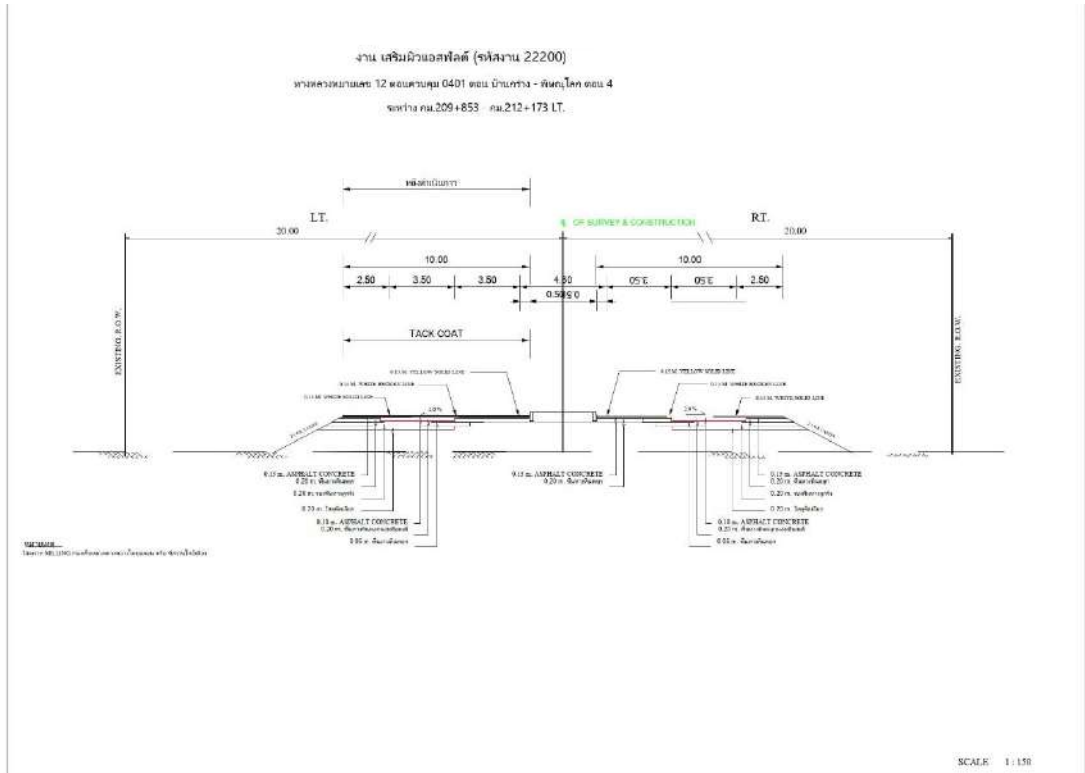
รูปที่ ก79 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
กม.208+087 – กม.209+618



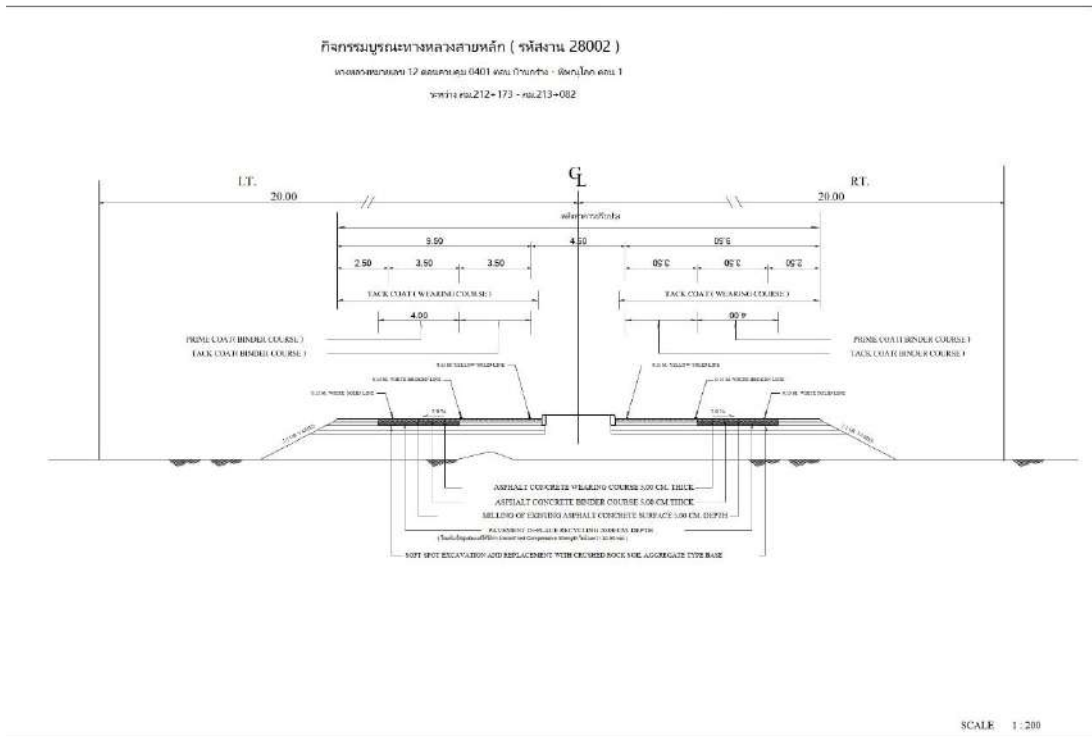
รูปที่ 80 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.209+618 - 209+645



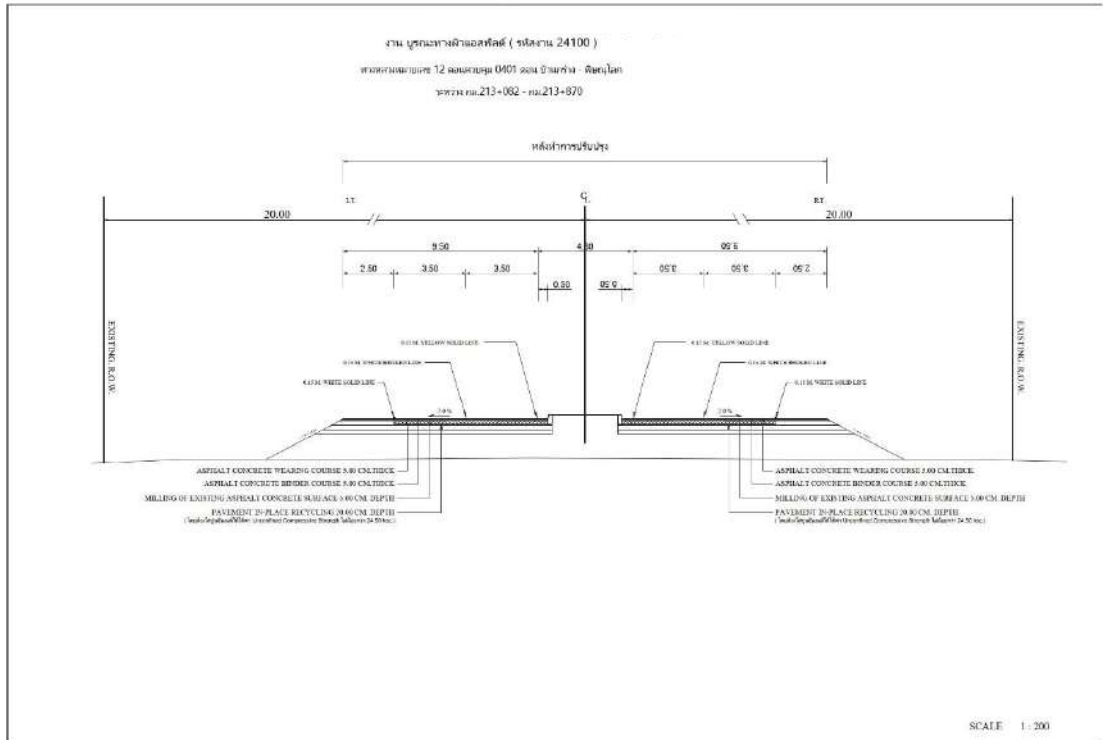
รูปที่ 81 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.209+645 - กม.209+853



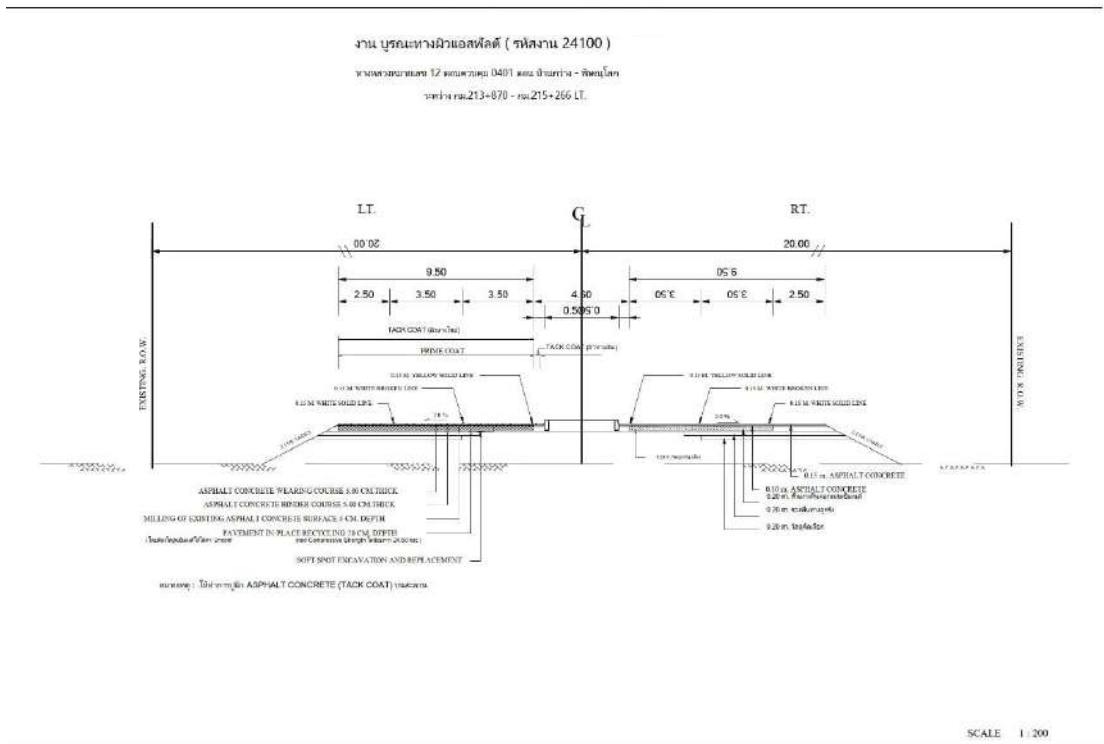
รูปที่ ก82 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.209+853 - กม.212+173



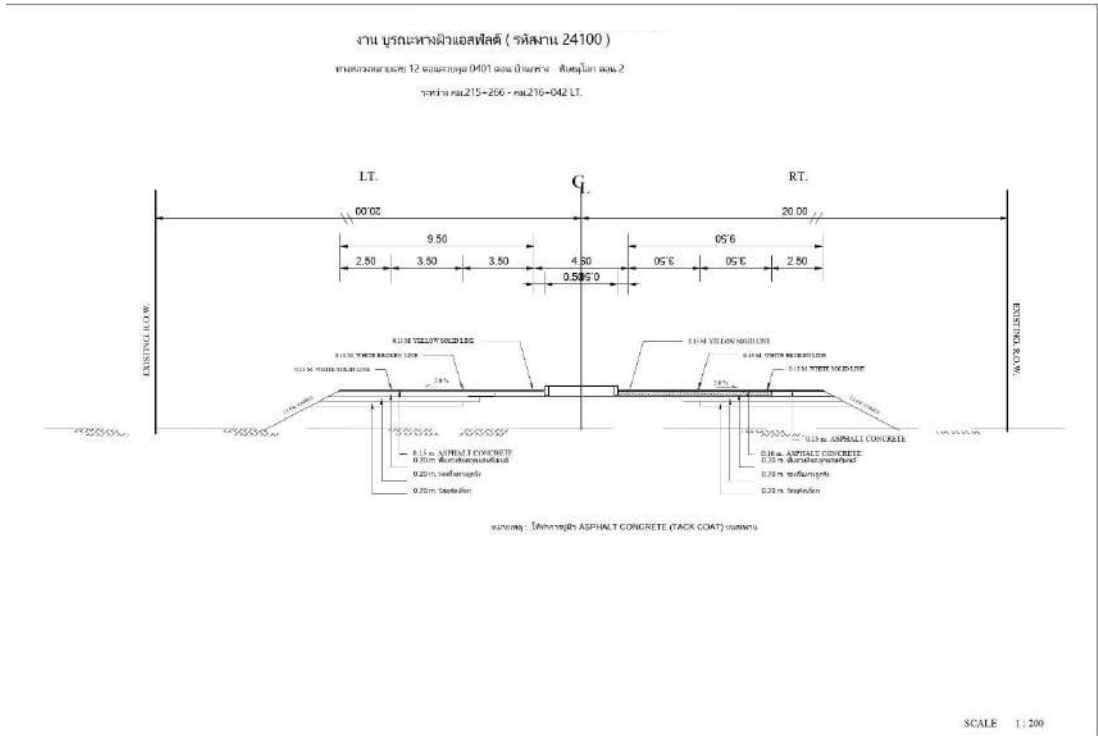
รูปที่ ก83 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.212+173 - กม.213+082



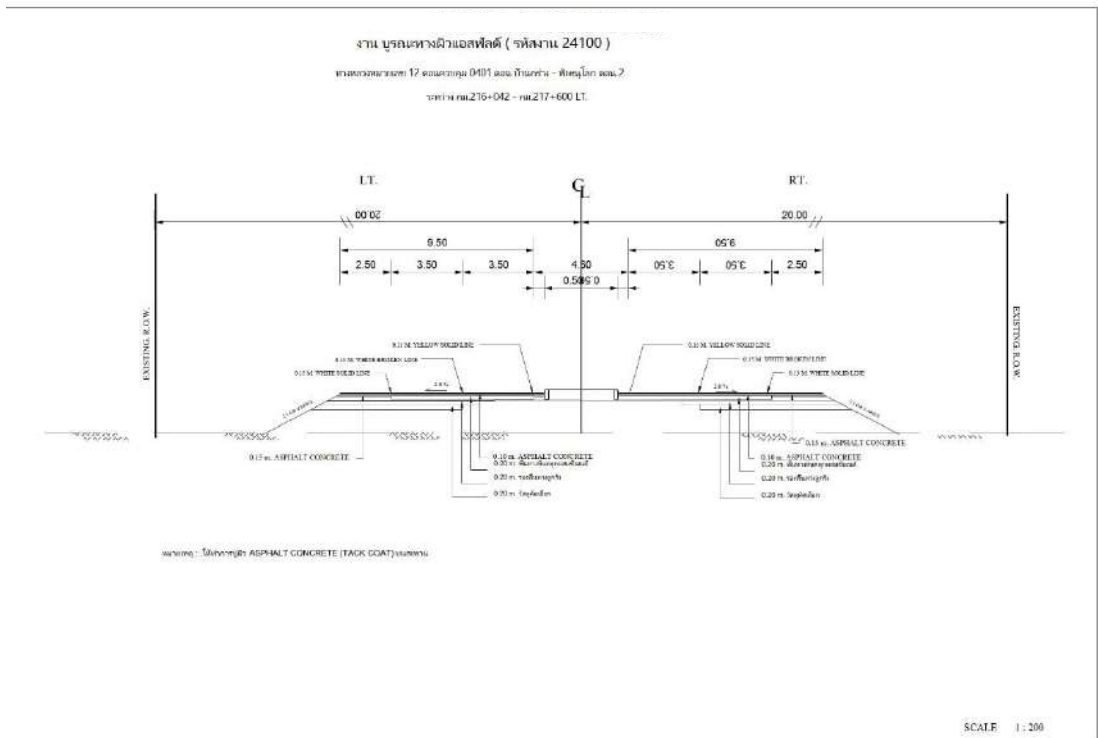
รูปที่ ก84 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.213+082 - กม.213+870



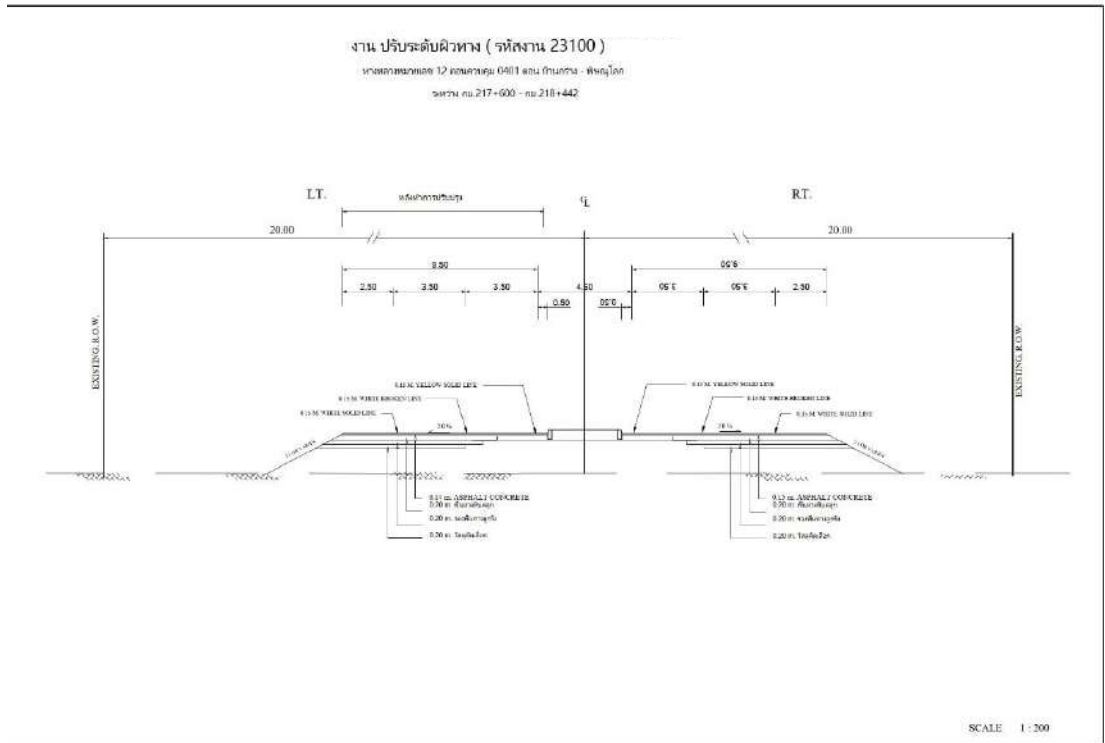
รูปที่ ก85 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.213+870 - กม.215+266



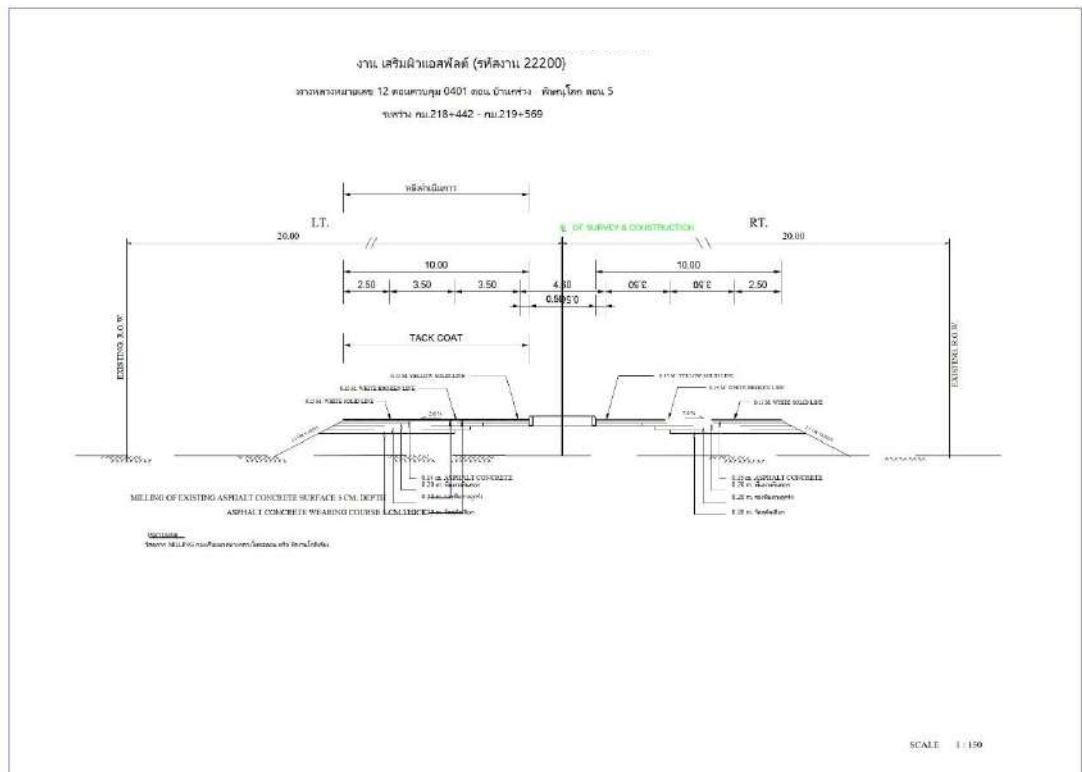
รูปที่ ก86 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.215+266 - กม.216+042



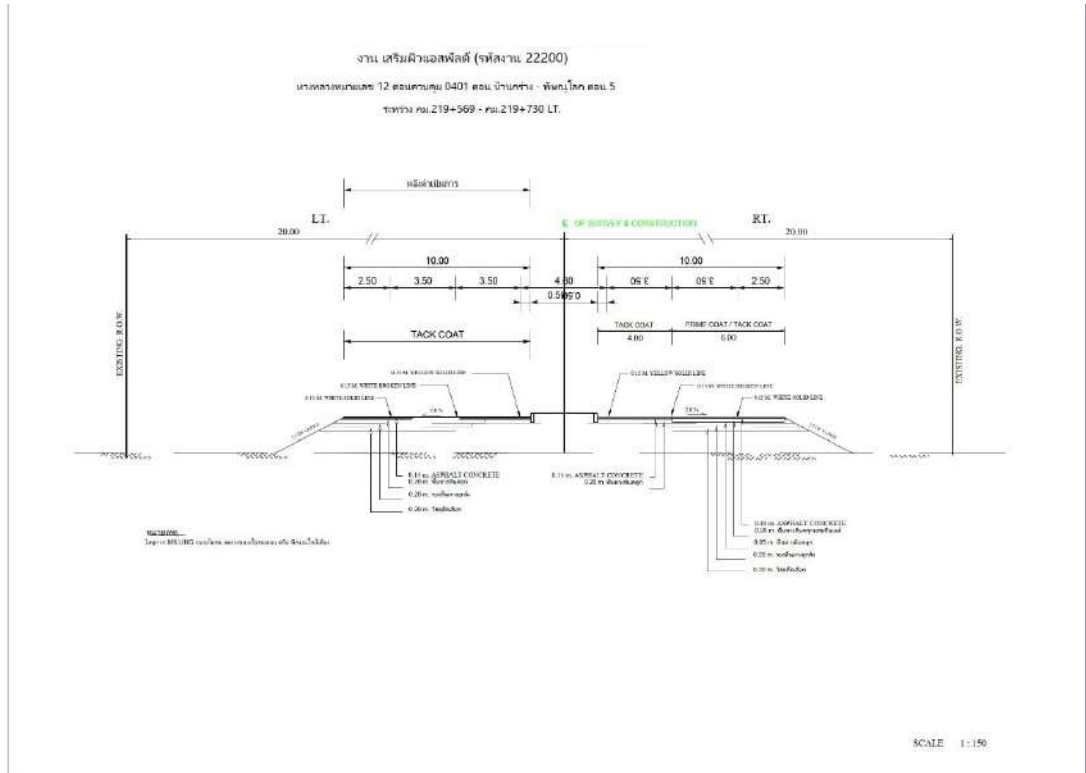
รูปที่ ก87 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.216+042 - กม.217+600



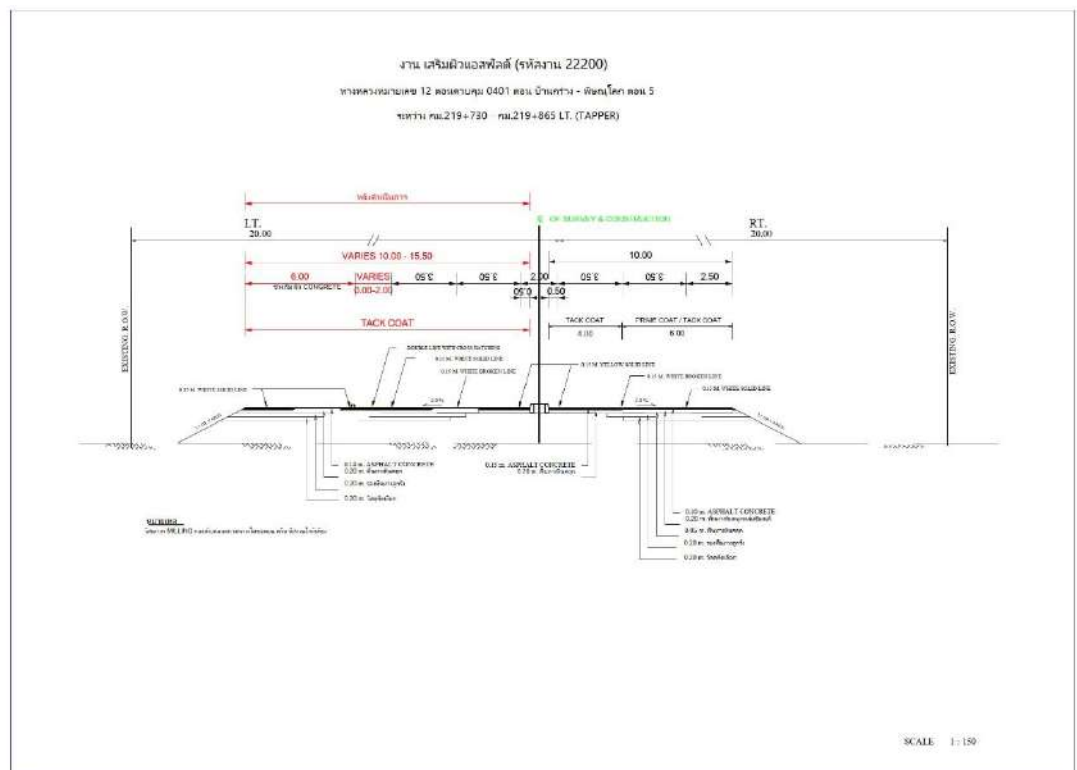
รูปที่ ก88 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.217+600 - กม.218+442



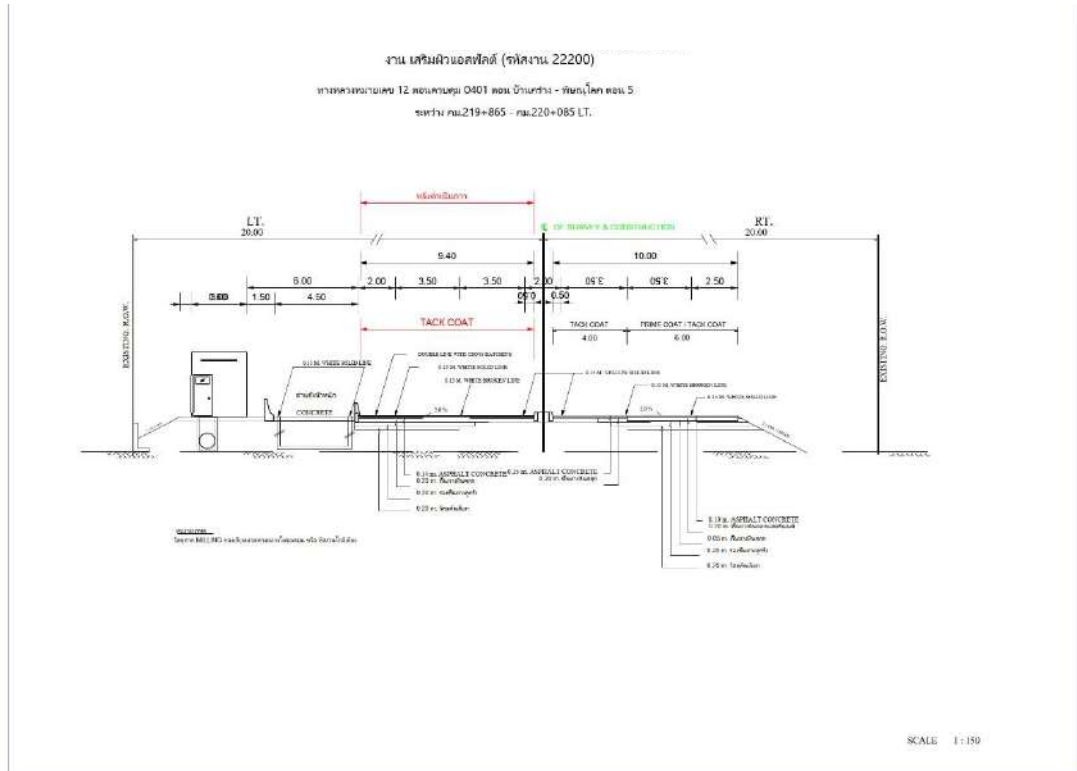
รูปที่ ก89 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.218+442 - กม.219+569



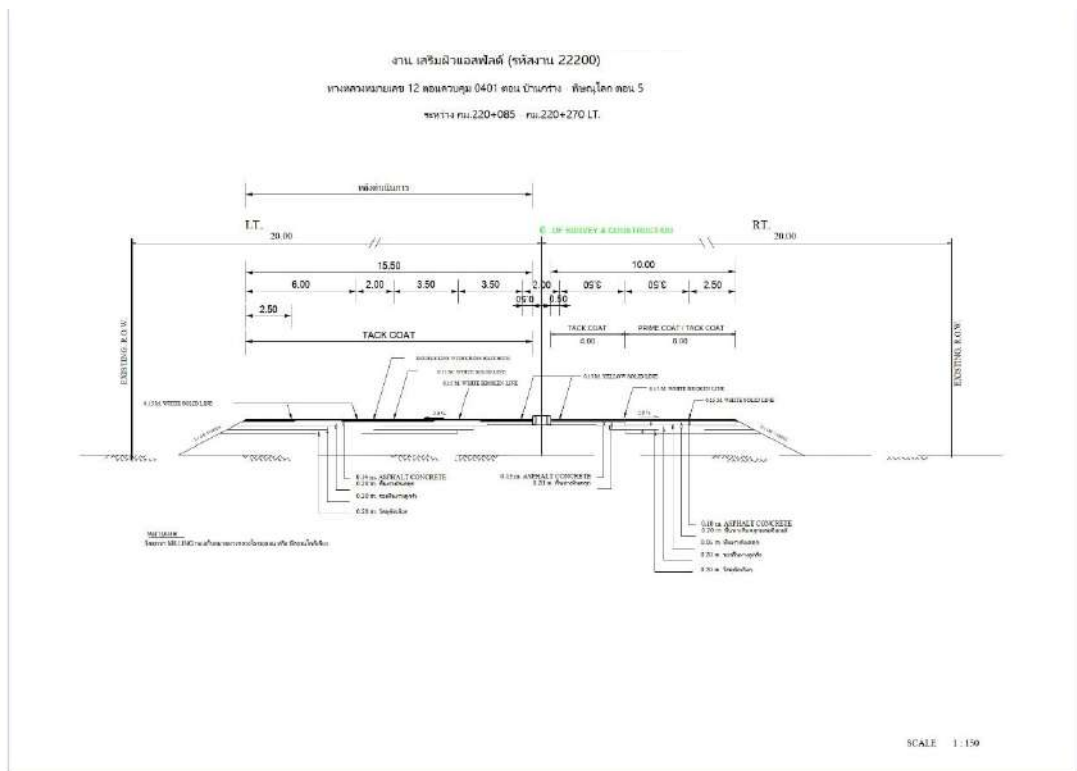
รูปที่ ก90 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.219+569 - 219+730



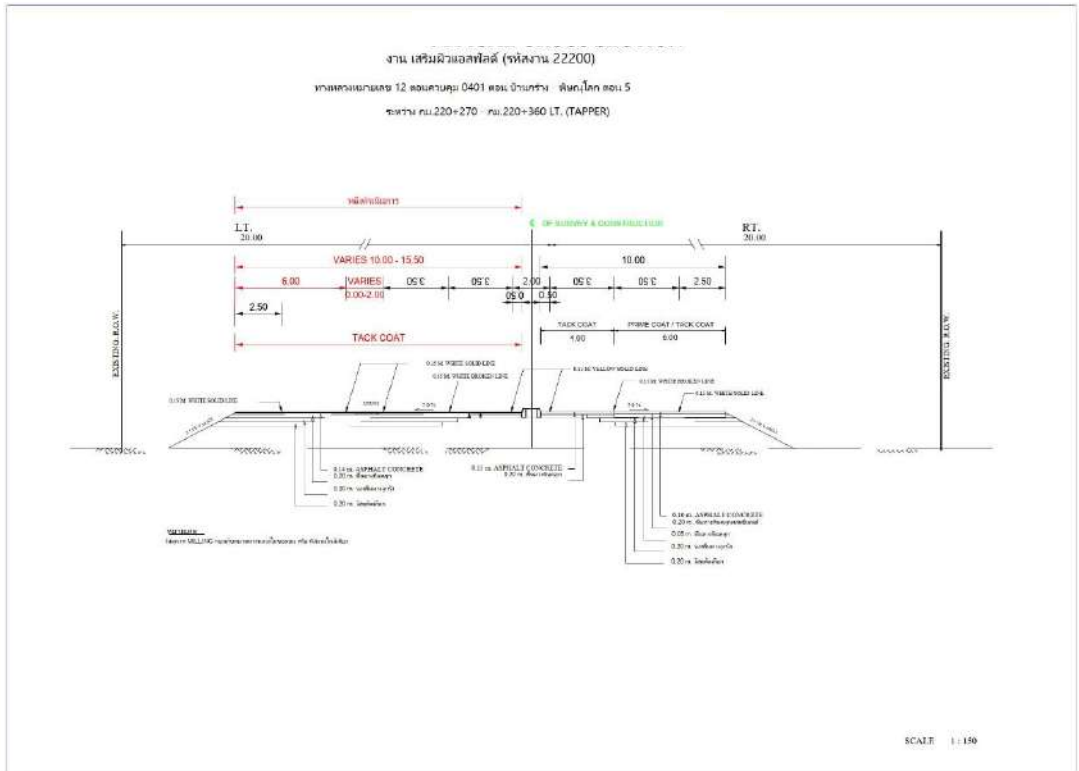
รูปที่ ก91 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.219+730 - กม.219+865



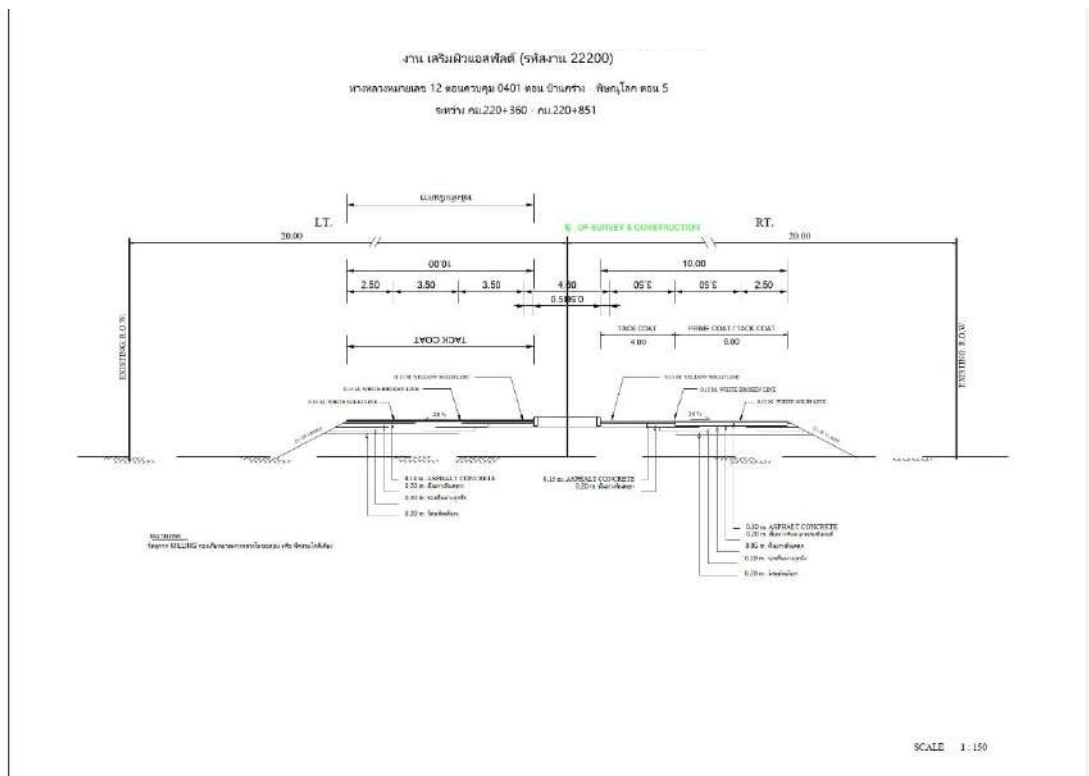
รูปที่ ก92 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.219+865 - กม.220+085



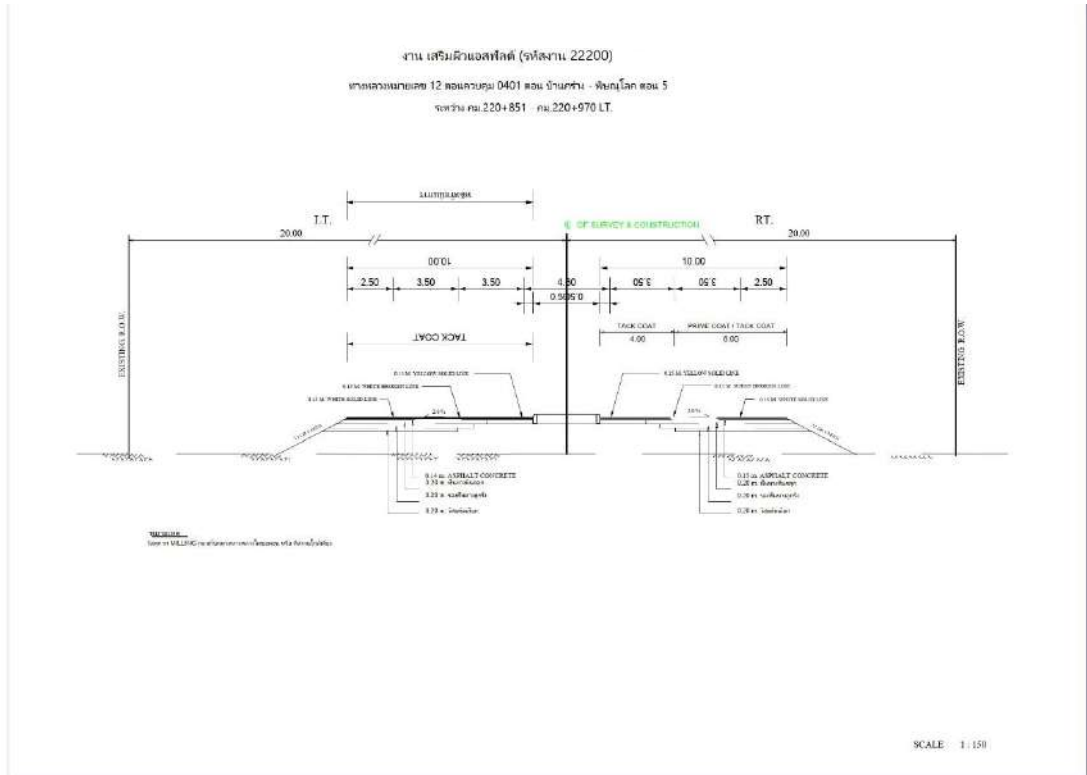
รูปที่ ก93 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.220+085 - กม.220+270



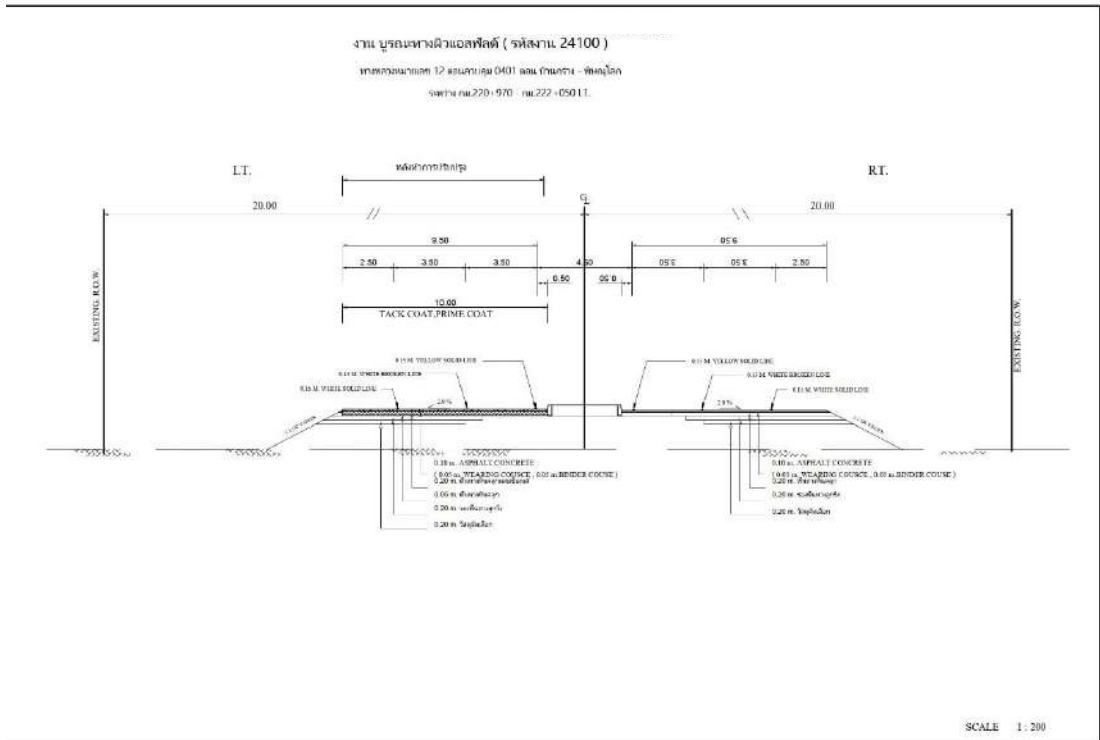
รูปที่ ก94 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.220+270 - 220+360



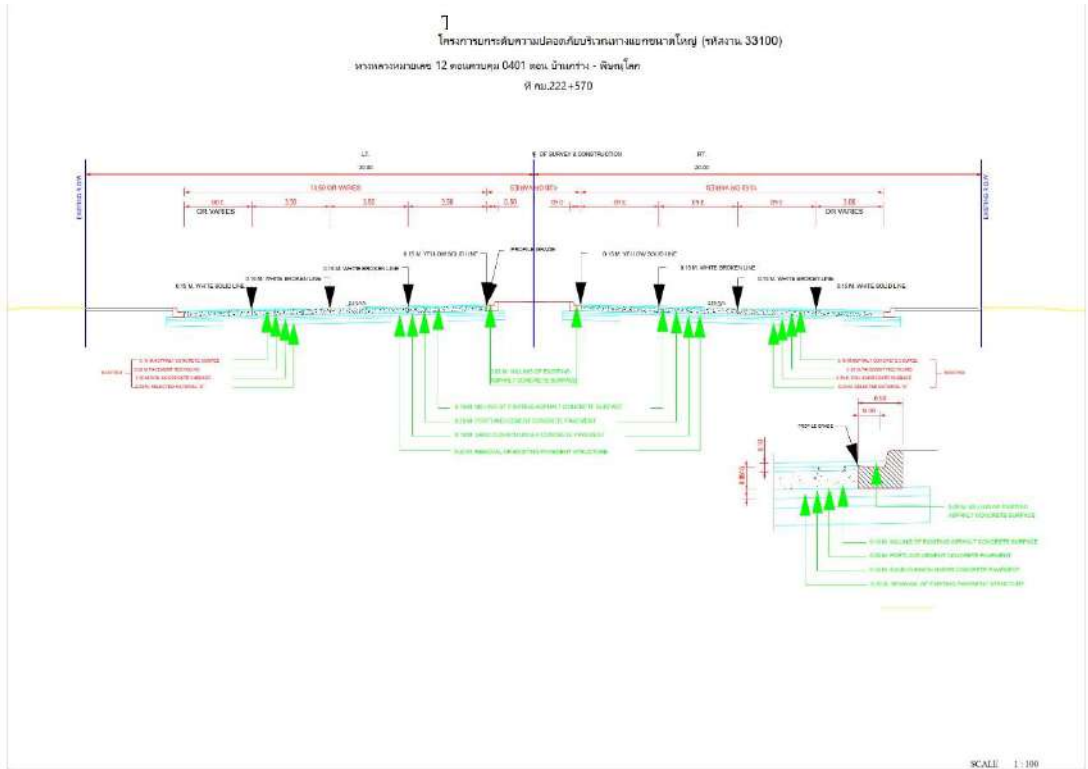
รูปที่ ก95 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิชญ์โลก  
 กม.220+360 - กม.220+851



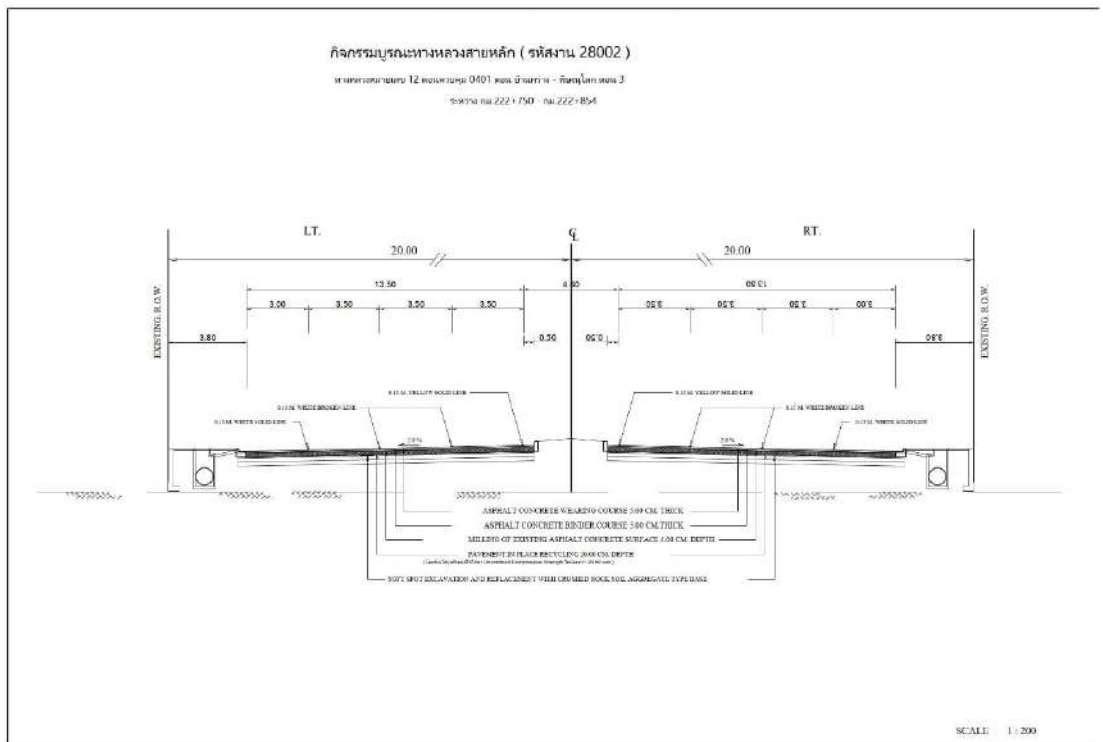
รูปที่ ก96 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.220+851 - กม.220+970



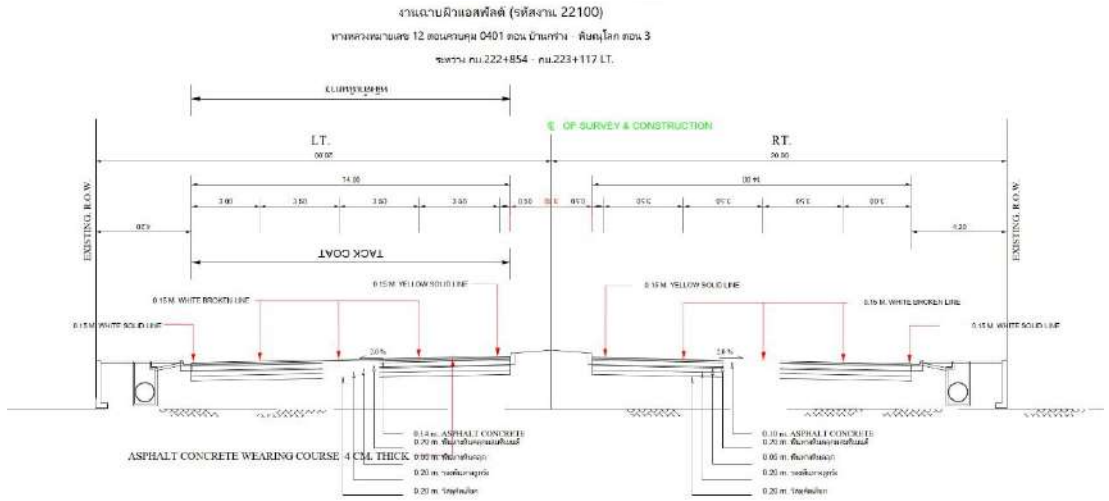
รูปที่ ก97 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.220+790 - กม.222+050



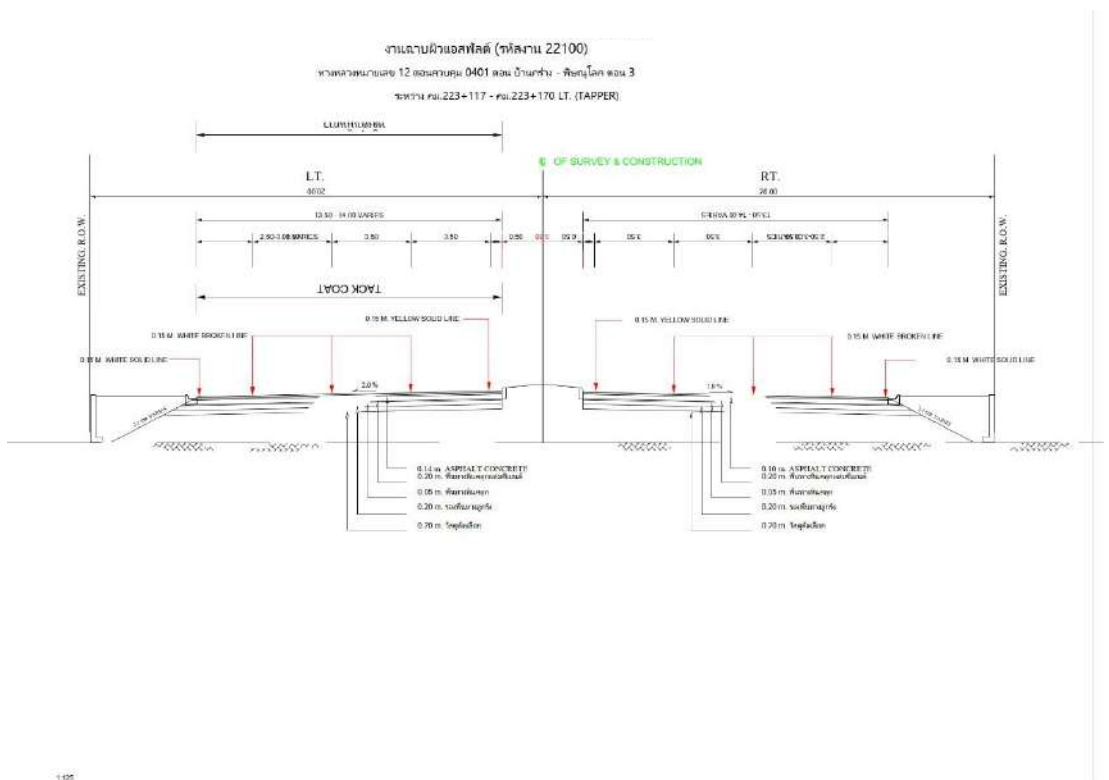
รูปที่ ก98 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.222+570



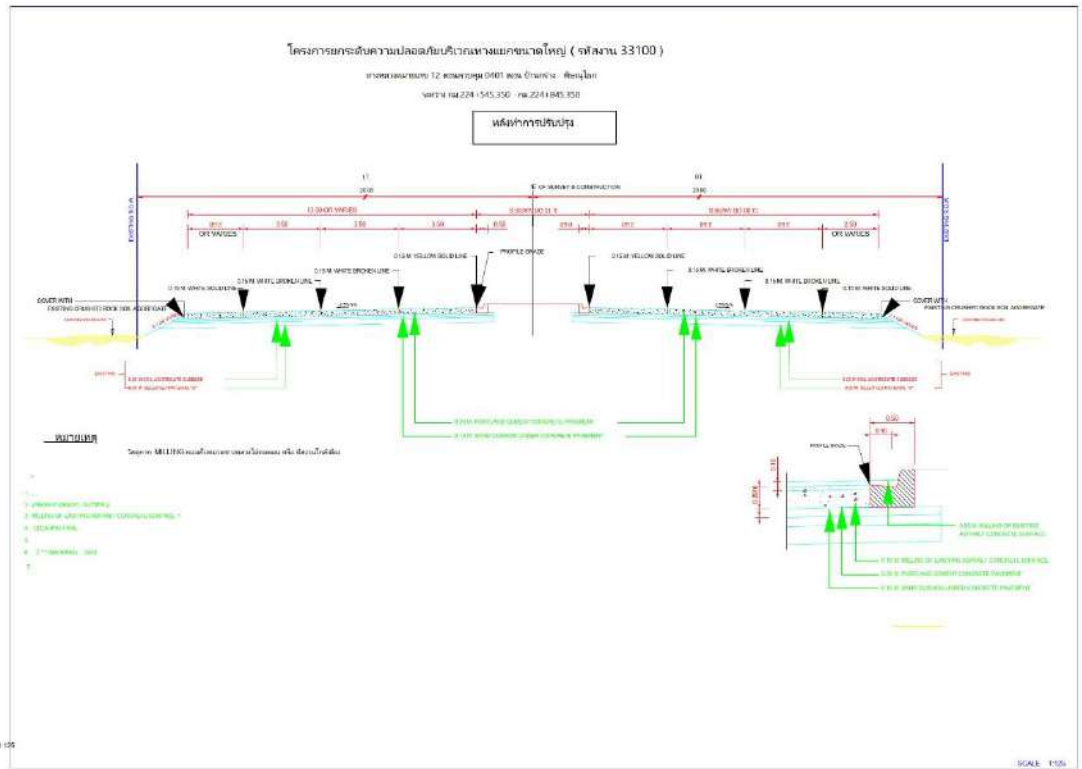
รูปที่ ก99 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.222+750 - 222+854



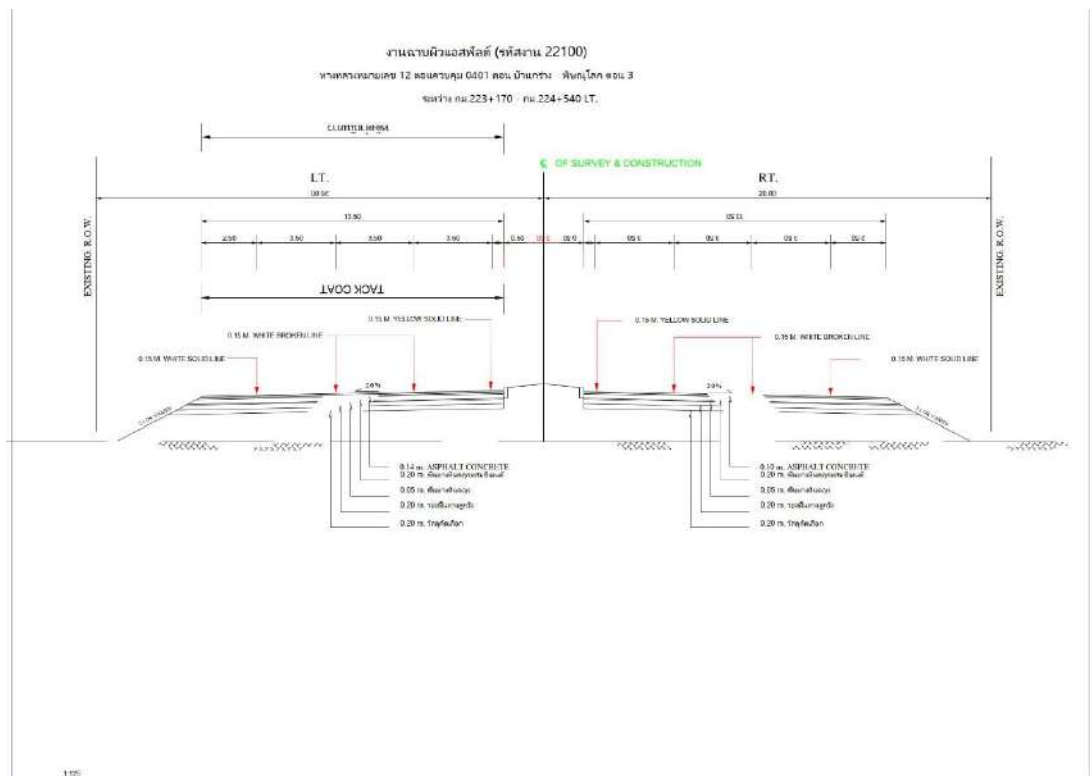
รูปที่ ก100 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง - พิษณุโลก  
 กม.222+854 - 223+117



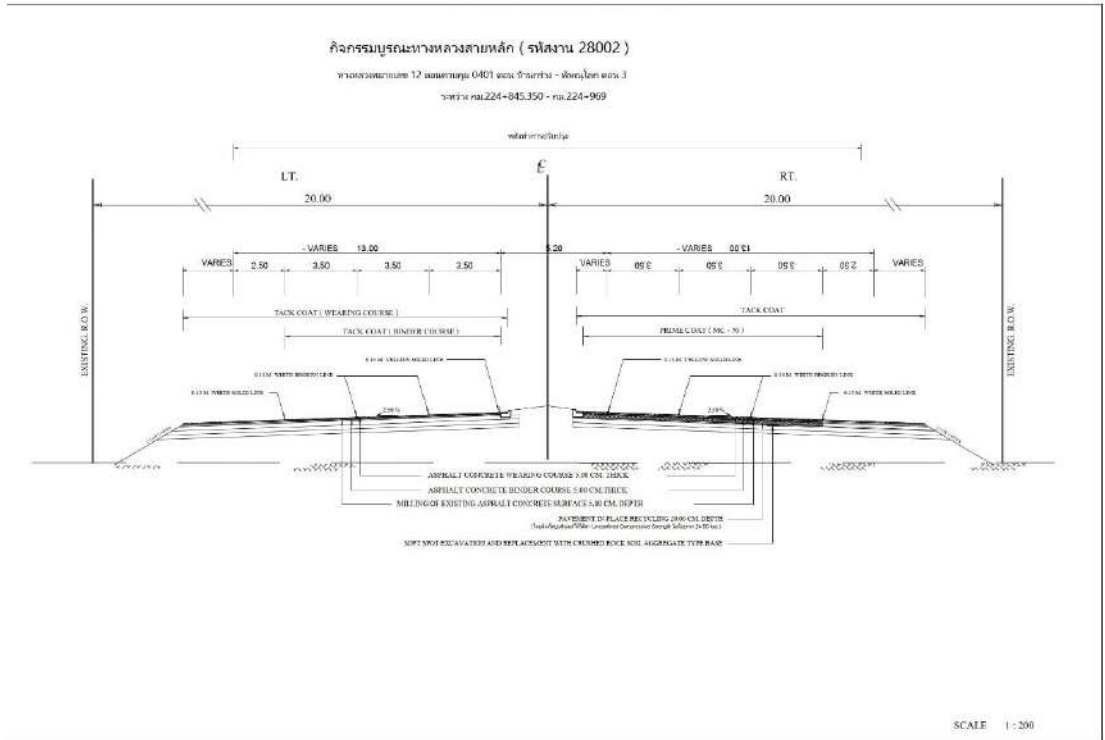
รูปที่ ก101 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกว้าง - พิษณุโลก  
 กม.223+117 - 223+170



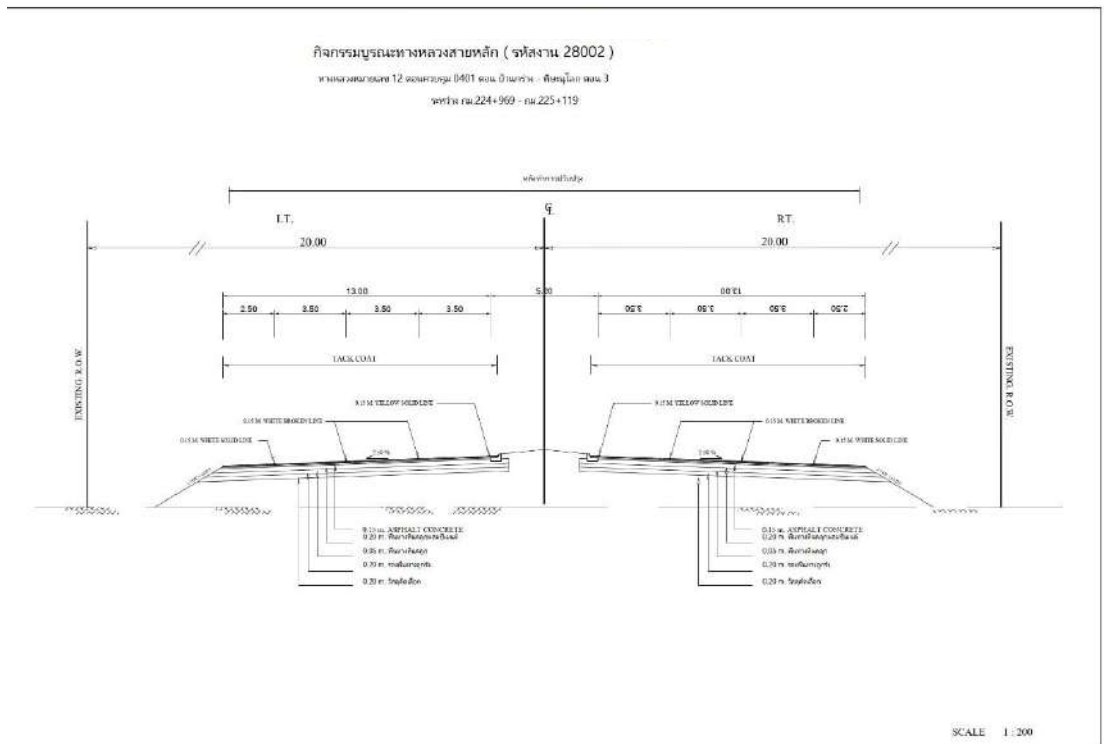
รูปที่ ก102 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
กม.224+545 - 224+845



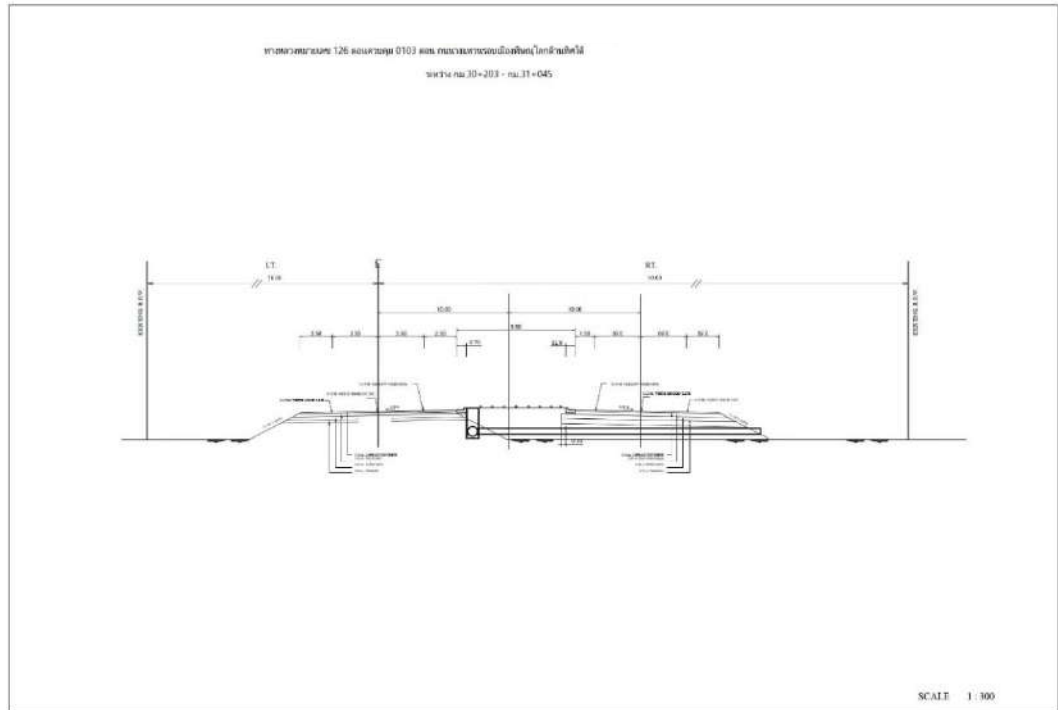
รูปที่ ก103 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
กม.223+170 - 224+540



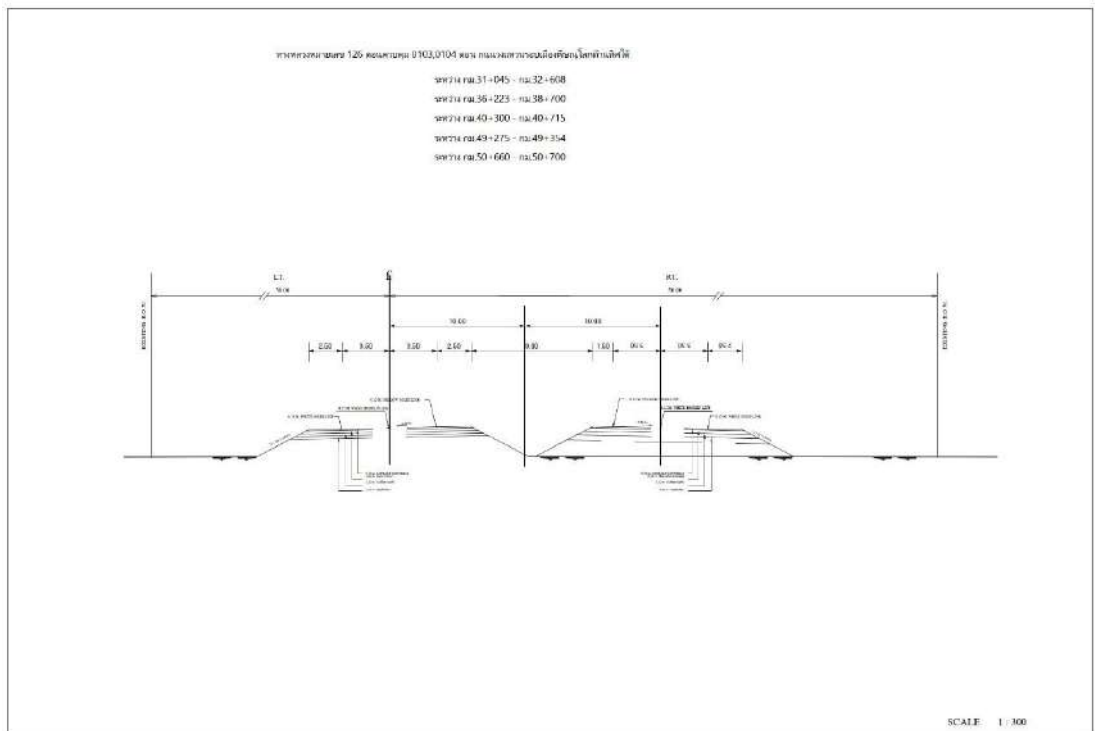
รูปที่ ก104 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.224+845 - 224+969



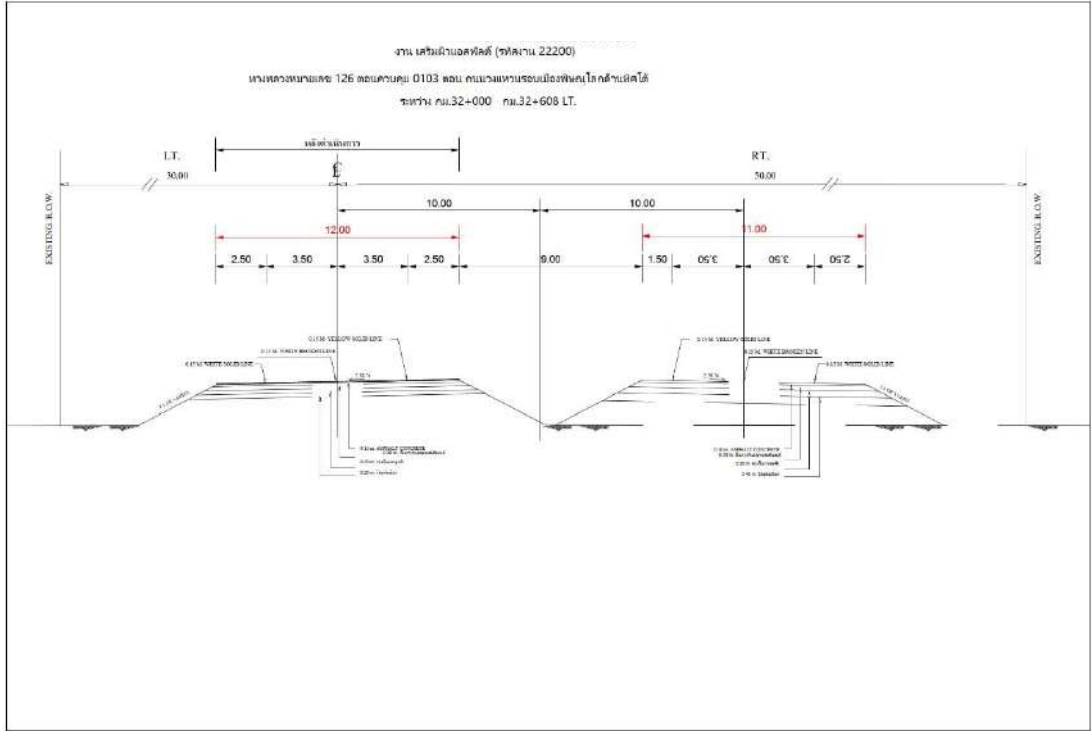
รูปที่ ก105 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 401 บ้านกร่าง - พิษณุโลก  
 กม.224+969 - 225+119



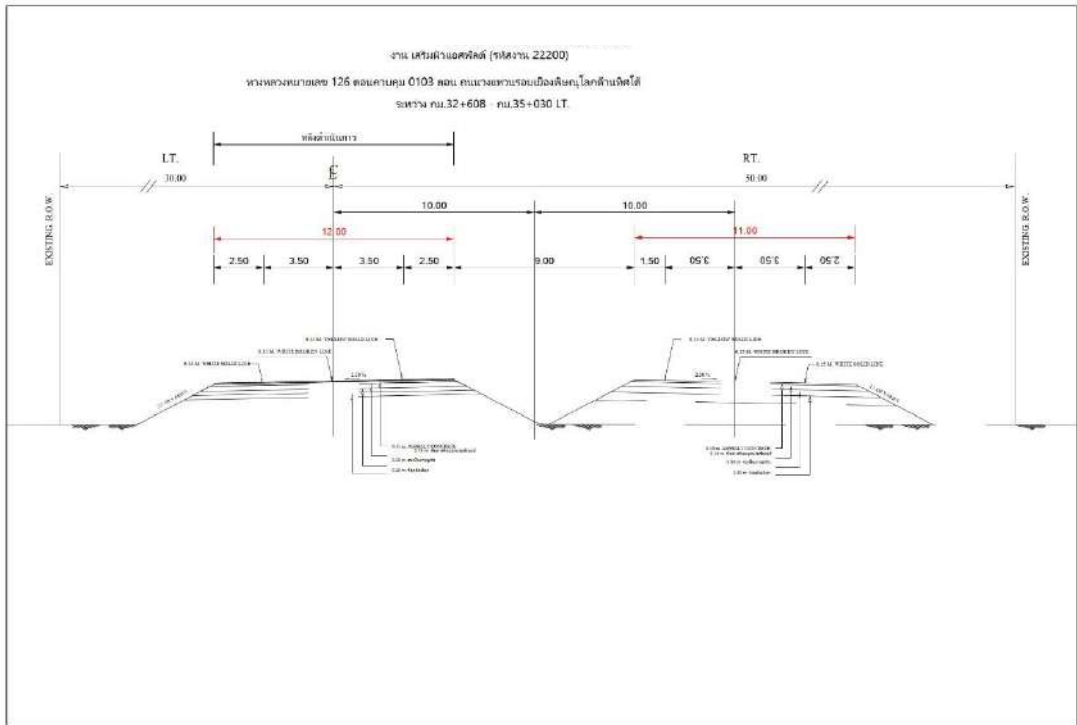
รูปที่ ก106 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 30+203 - 31+045



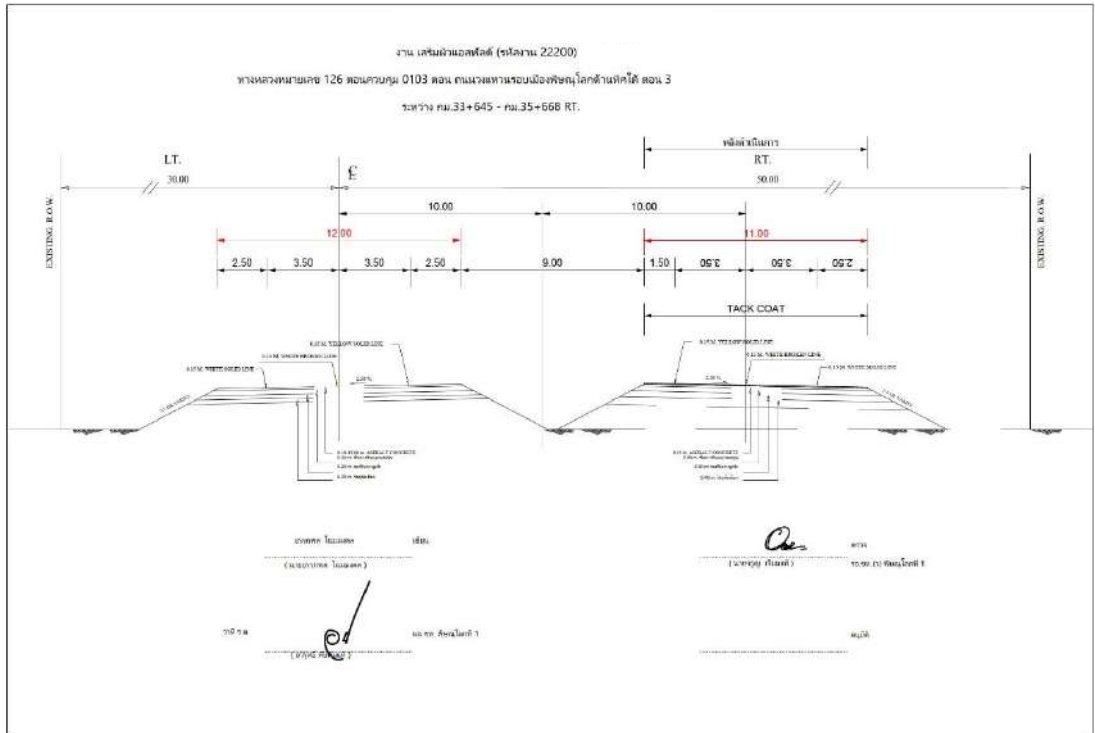
รูปที่ ก107 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 31+045 - 32+608, กม.36+223 - 38+700, กม.40+300 - 40+715 กม.49+275 - 49+354, กม.50+660 - กม.50+700



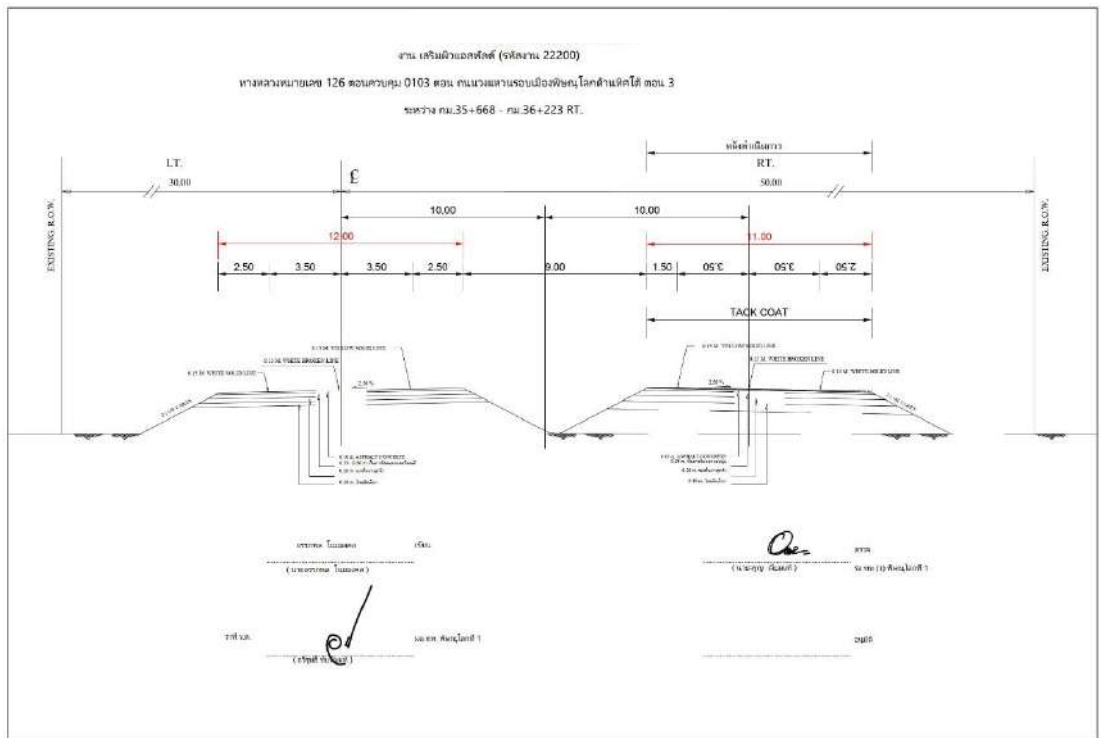
รูปที่ ก108 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง  
พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 32+000 - 32+608



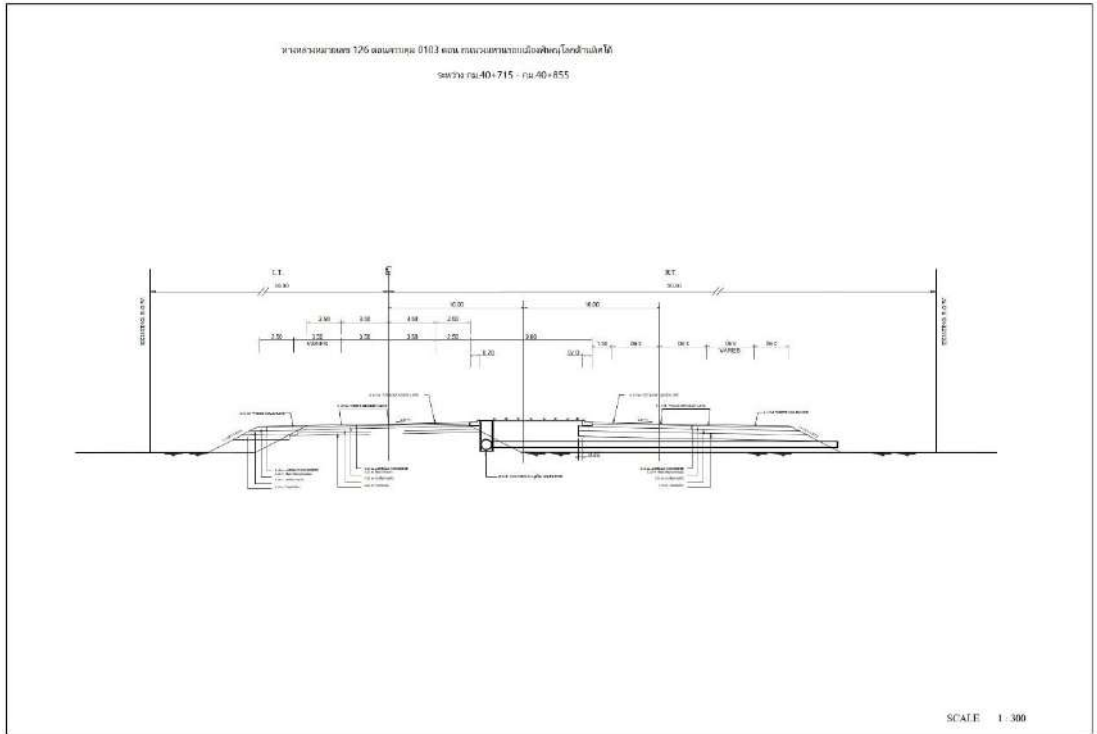
รูปที่ ก109 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง  
พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 32+608 - 35+030



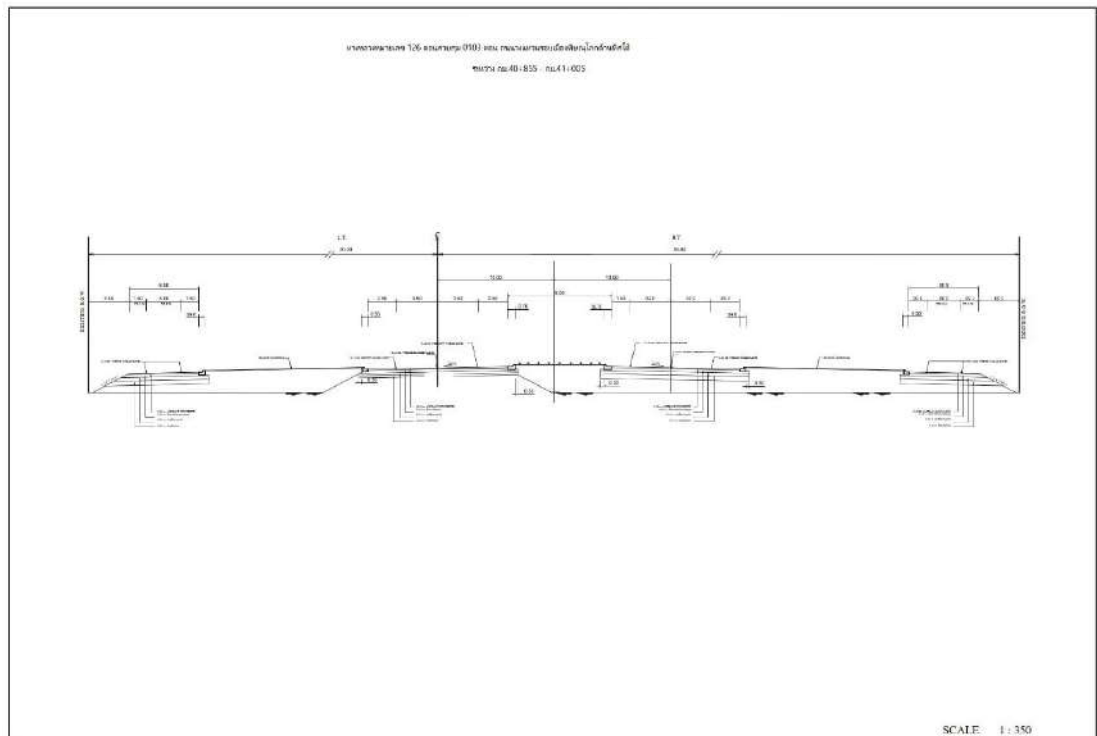
รูปที่ ก110 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 33+645 - 35+668



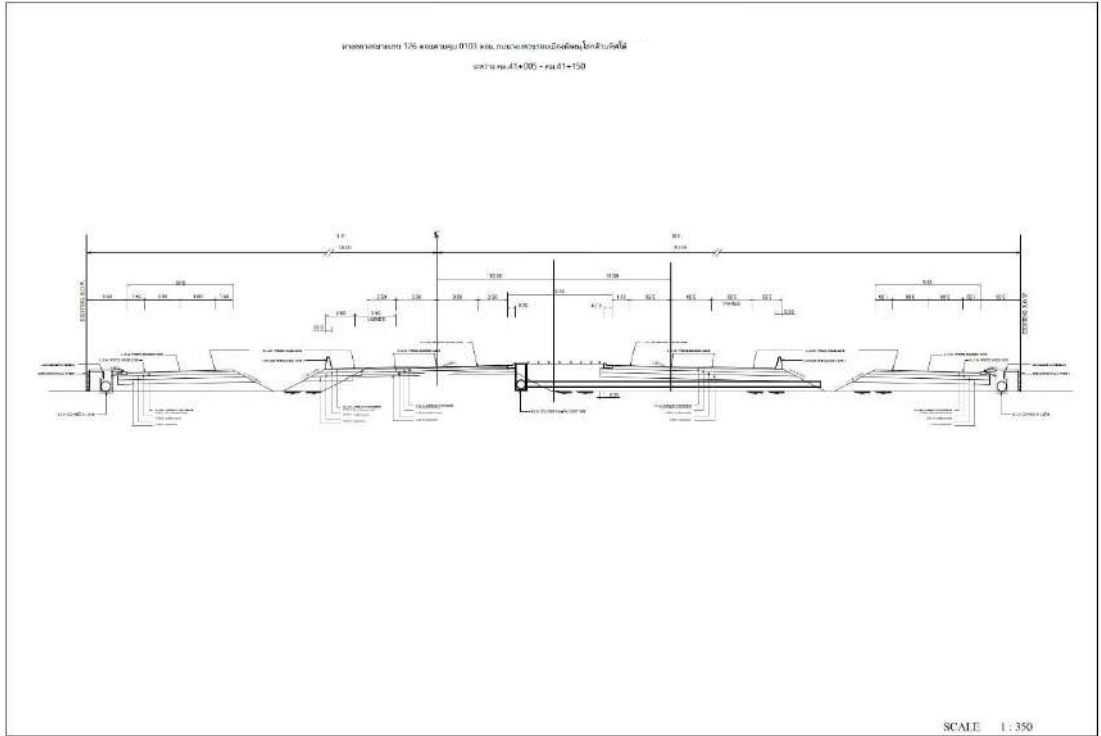
รูปที่ ก111 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 35+668 - 36+223



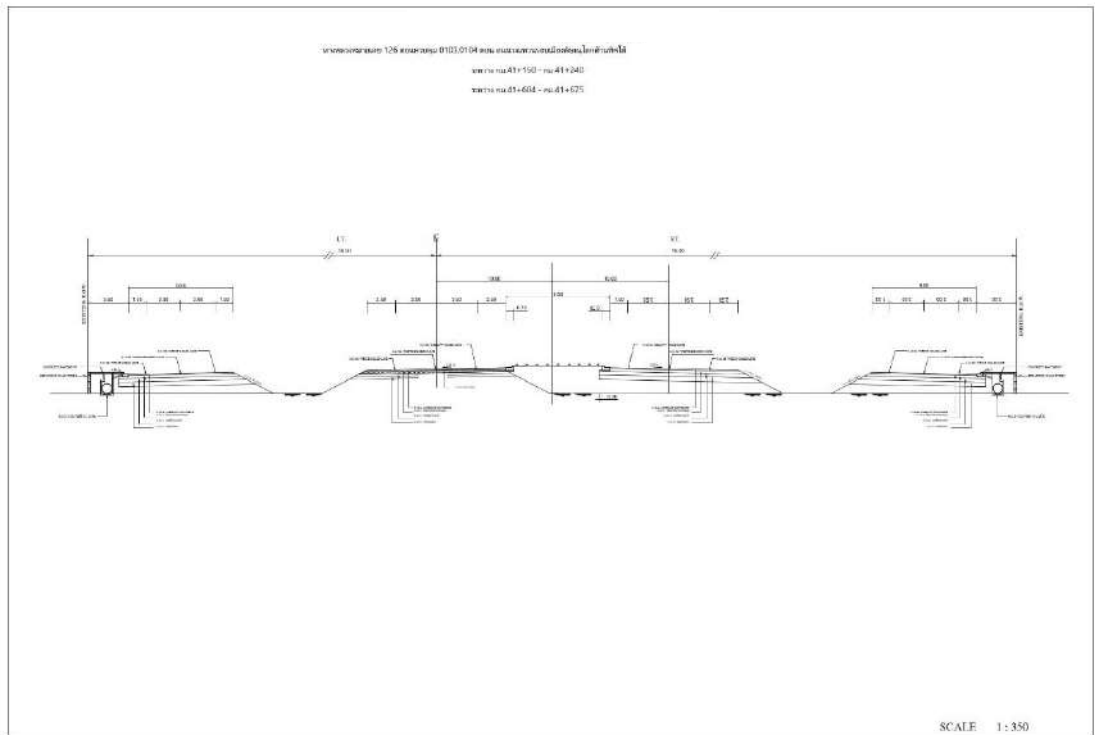
รูปที่ ก112 แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 40+715 - 40+855



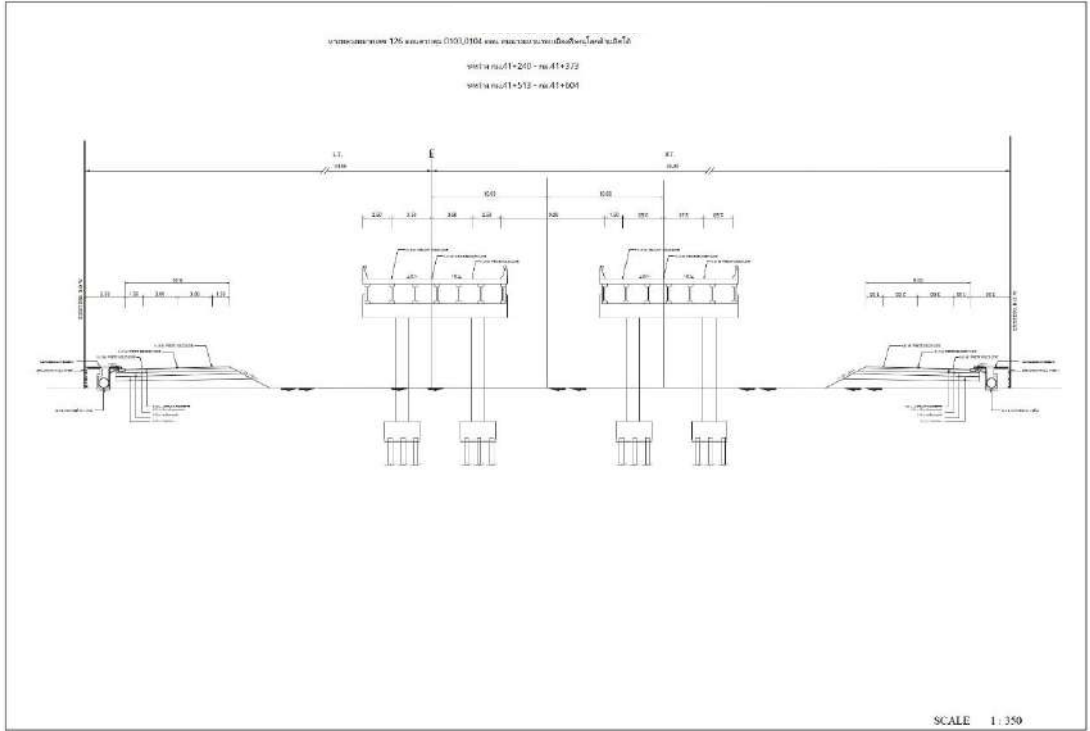
รูปที่ ก113 แบบรูปตัดโค้งสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 40+855 - 41+005



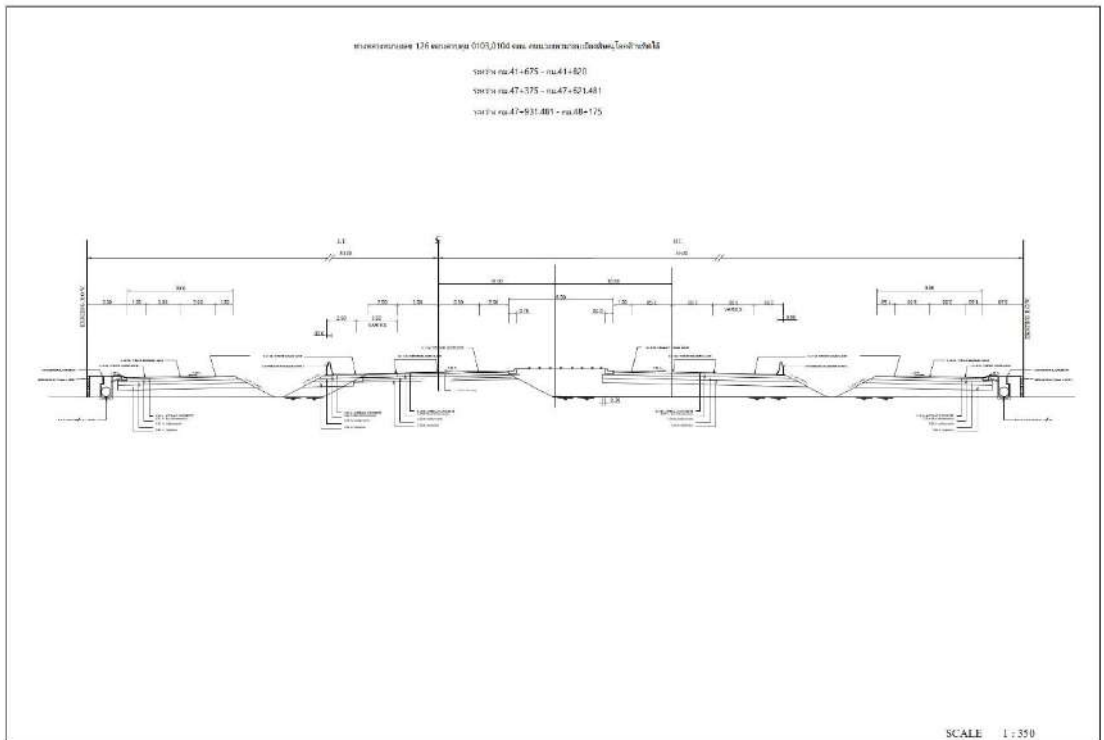
รูปที่ ก114 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง  
พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+005 - 41+150



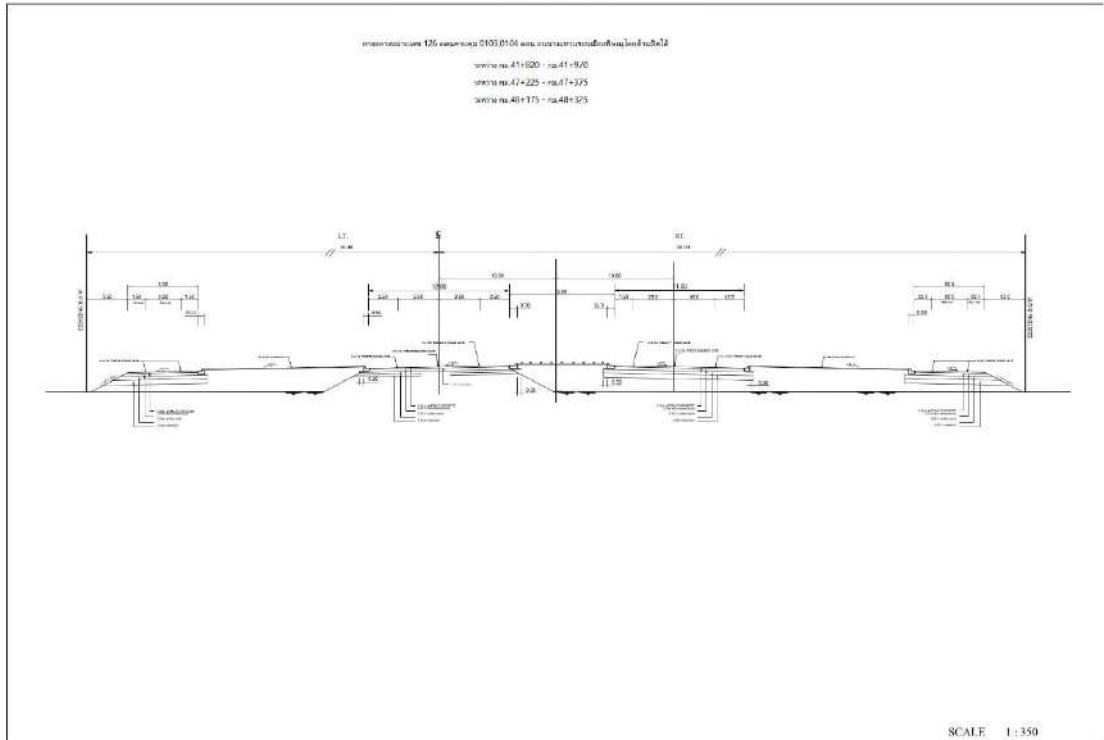
รูปที่ ก115 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง  
พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+150 - 41+240, กม. 41+604 - 41+675



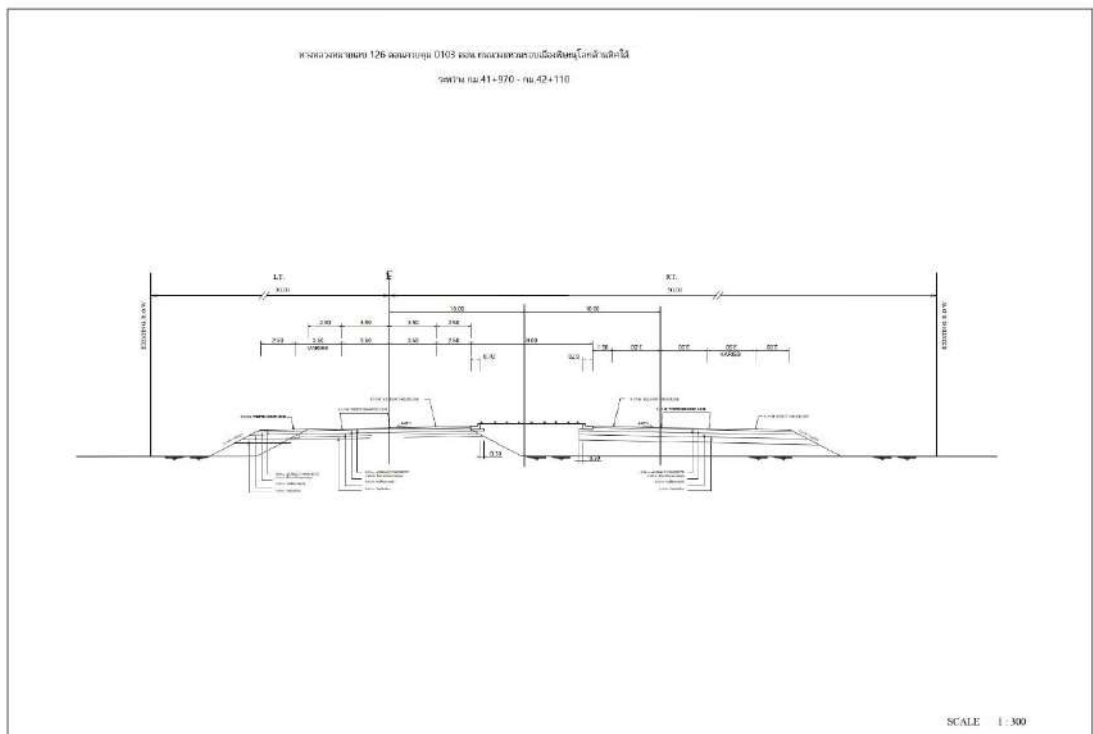
รูปที่ ก116 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง  
พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+240 - 41+373, กม.41+604 - 41+675



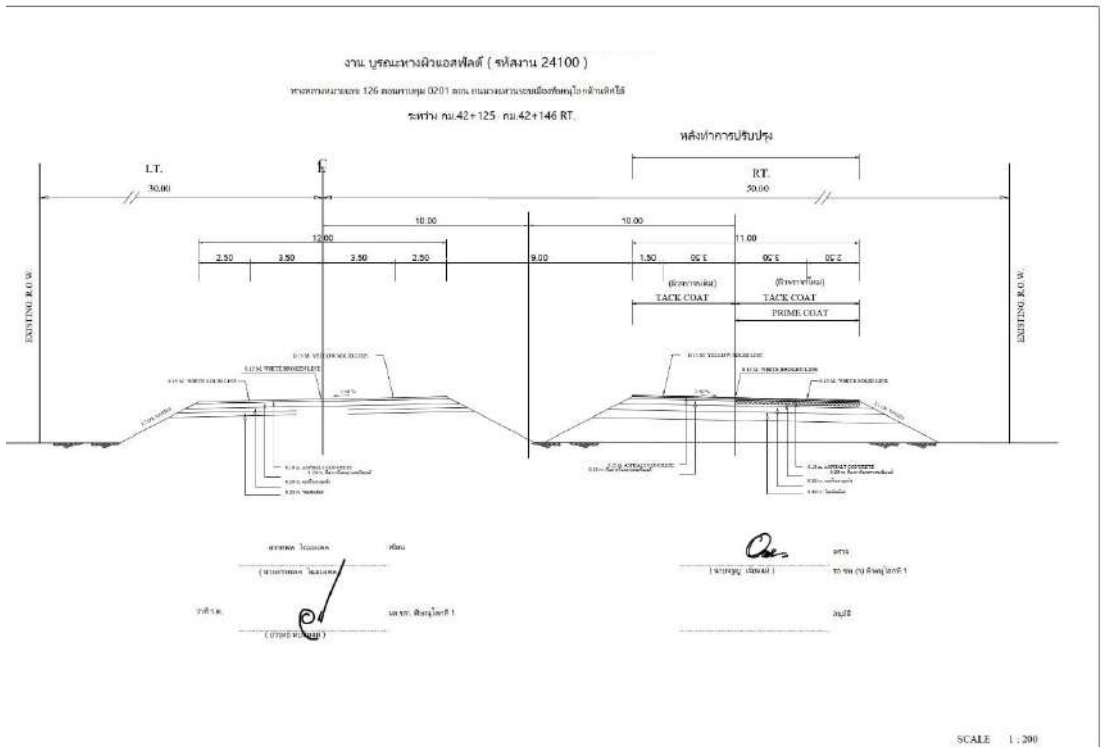
รูปที่ ก117 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง  
พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+675 - 41+820, กม.47+373 - 47+621.481, กม.47+931.481 - 48+175



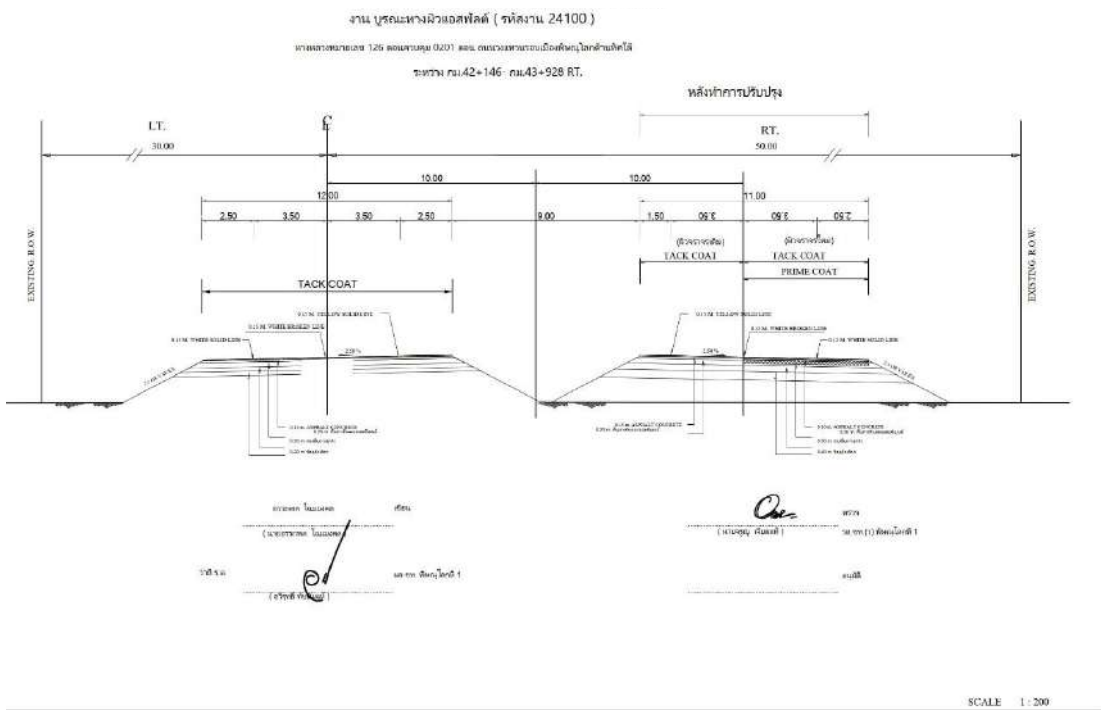
รูปที่ ก118 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+820 - 41+970, กม.47+252 - 47+375, กม.48+175 - 48+325



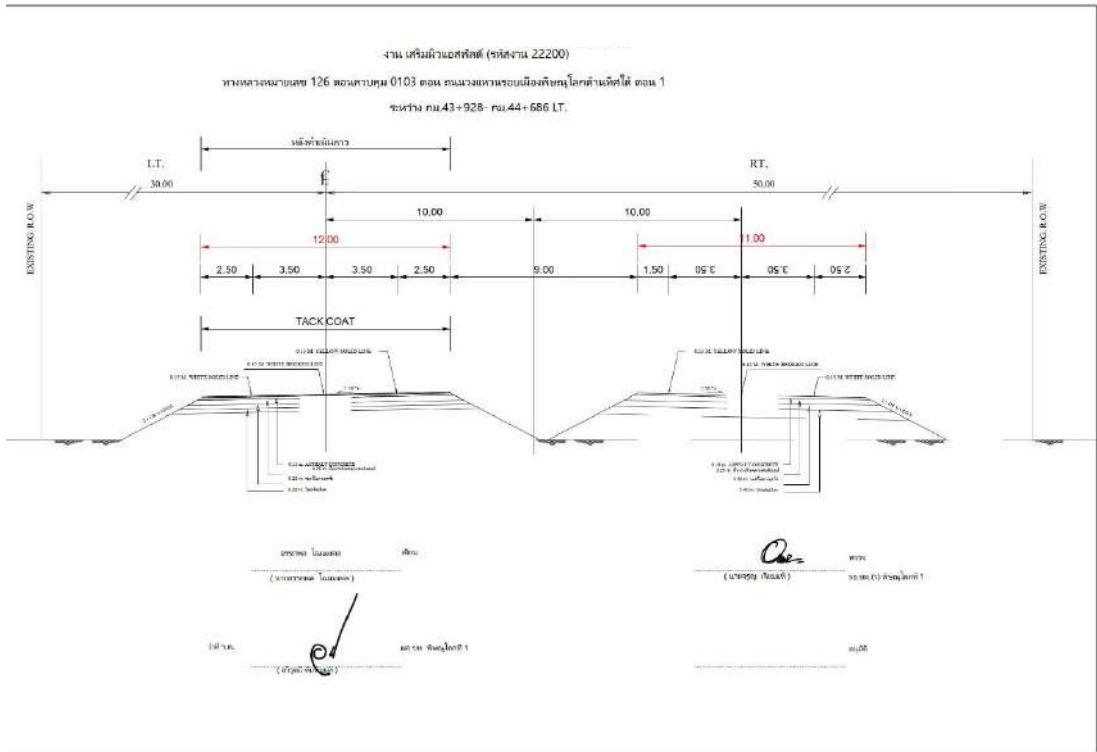
รูปที่ ก119 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 41+970 - 42+110



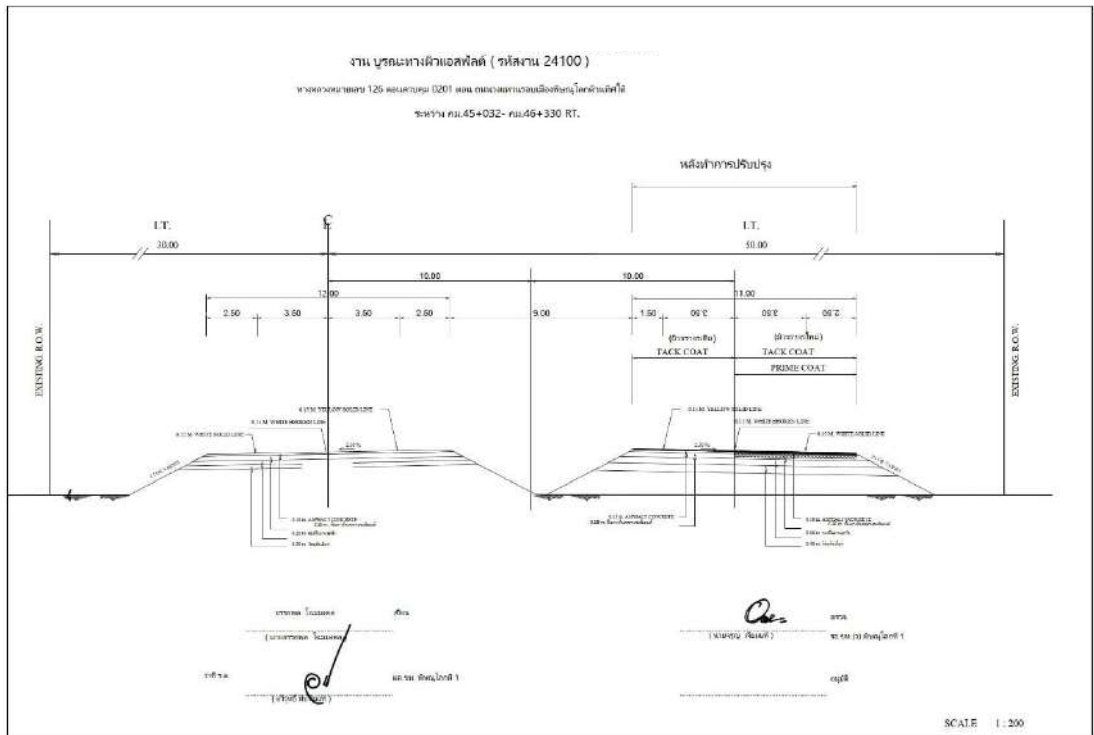
รูปที่ ก120 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง  
 พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 42+125 - 42+146



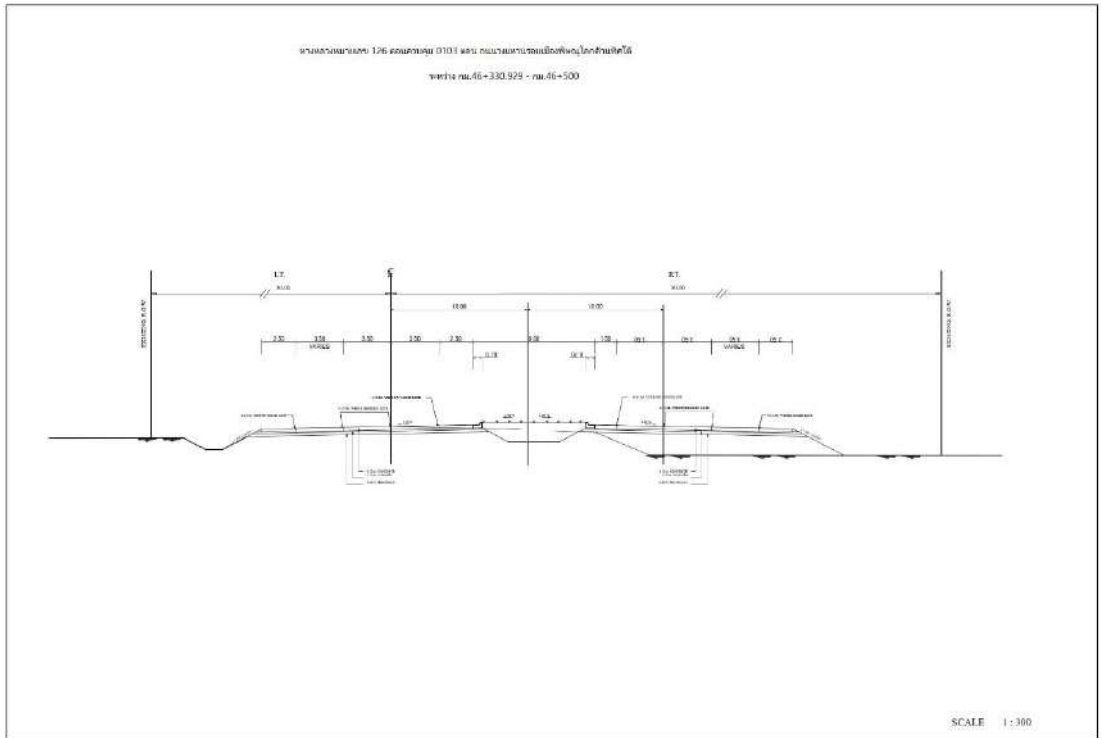
รูปที่ ก121 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง  
 พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 42+146 - 43+928



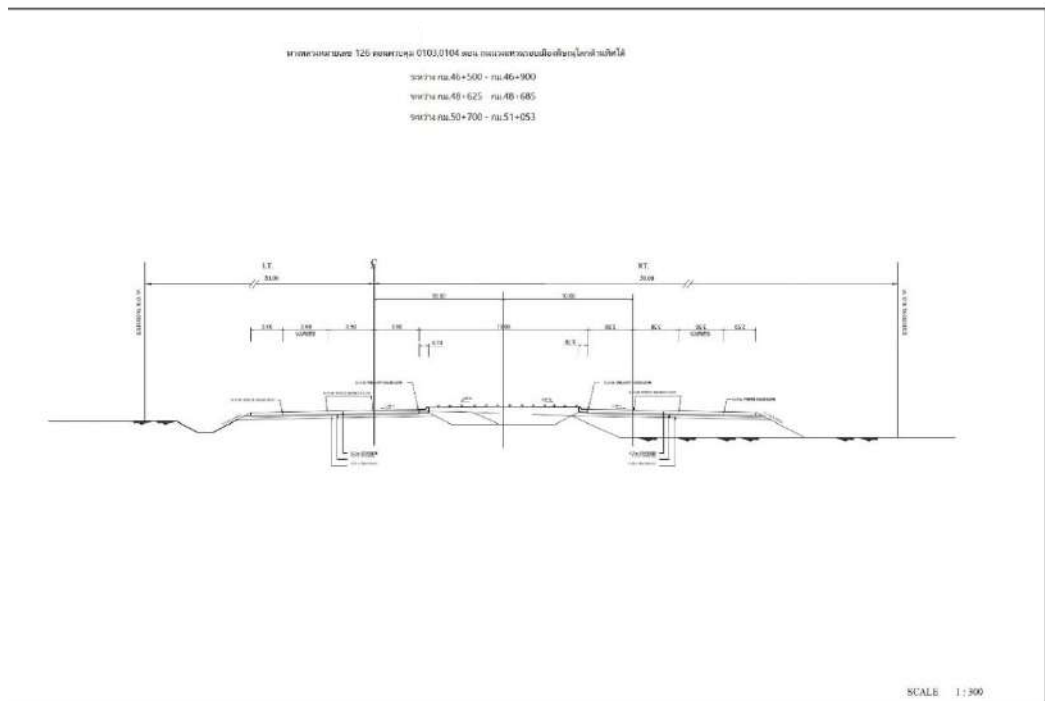
รูปที่ ก122 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 43+928 - 44+686



รูปที่ ก123 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 45+032 - 46+330



รูปที่ ก124 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง  
 พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 46+330.929 - 46+500



รูปที่ ก125 แบบรูปตัดโครงสร้างชั้นทาง ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนที่ 103 ถนนวงแหวนรอบเมือง  
 พิษณุโลกด้านทิศใต้ ช่วง กม. 46+500 - 46+900, กม. 48+625 - 48+685, กม. 50+700 - 51+053

ภาคผนวก ข

ข้อมูลปริมาณจราจรรายวัน (ADT)

ตารางที่ ข1 ข้อมูลปริมาณจราจร - รถบรรทุกรายวันเฉลี่ยต่อปี

ทางหลวงสาย	ตอน ควบคุม	ชื่อสายทาง	กม.จุด สำรวจ (KM.)	AADT	ปริมาณจราจร (ปี พ.ศ.)			แขวงทางหลวง	จังหวัด
					2563	2564	2565		
344	102	หนองรี - หนองปรือ	16+470	ทุกชนิด	34872	30401	32,988	ขท.ชลบุรีที่ 1	ชลบุรี
				รถ 6 ล้อ	1909	1914	1,903		
				รถ 10 ล้อ	2150	1938	1,824		
				รถพ่วง	2046	1841	1,698		
				รถกึ่งพ่วง	2010	1246	1,489		
				% รถบรรทุก	26.009	27.302	27.195		
344	103	หนองปรือ - คลองเข็ด	48+725	ทุกชนิด	21480	20494	21,049	ขท.ชลบุรีที่ 1	ชลบุรี
				รถ 6 ล้อ	1367	1372	1,553		
				รถ 10 ล้อ	1406	1361	1,330		
				รถพ่วง	1496	1424	1,263		
				รถกึ่งพ่วง	1504	1471	1,084		
				% รถบรรทุก	33.962	34.615	25.07		
32	202	อ่างทอง - ไซโย	49+087	ทุกชนิด	45951	30140	42,084	ขท.อ่างทอง	อ่างทอง
				รถ 6 ล้อ	2102	1425	2,105		
				รถ 10 ล้อ	1338	964	1,724		
				รถพ่วง	1904	1082	2,358		
				รถกึ่งพ่วง	2425	1413	2,961		
				% รถบรรทุก	19.062	18.912	23.914		
12	702	ร่องแซง - หนองแก	469+996	ทุกชนิด	33301	29535	32,161	ขอนแก่นที่ 2 (ชุม	ขอนแก่น
				รถ 6 ล้อ	1176	866	1,183		
				รถ 10 ล้อ	1251	732	1,234		
				รถพ่วง	1345	703	1,346		
				รถกึ่งพ่วง	1375	624	1,240		
				% รถบรรทุก	18.813	11.248	17.711		
201	304	โนนหัน - ผานกเค้า	237+211	ทุกชนิด	14675	10110	9,680	ขอนแก่นที่ 2 (ชุม	ขอนแก่น
				รถ 6 ล้อ	641	357	491		
				รถ 10 ล้อ	509	222	167		
				รถพ่วง	1237	888	611		
				รถกึ่งพ่วง	699	434	408		
				% รถบรรทุก	23.871	19.604	18.037		

ตารางที่ ข1 (ต่อ) ข้อมูลปริมาณจราจร - รถบรรทุกรายวันเฉลี่ยต่อปี

ทางหลวงสาย	ตอน ควบคุม	ชื่อสายทาง	กม.จุด สำรวจ (KM.)	AADT	ปริมาณจราจร (ปี พ.ศ.)			แขวงทางหลวง	จังหวัด
					2563	2564	2565		
12	603	น้ำคอก - ห้วยข่ามะคาว	383+989	ทุกชนิด	3533	2343	2,451	ขท.เพชรบูรณ์ที่ 1	เพชรบูรณ์
				รถ 6 ล้อ	132	93	105		
				รถ 10 ล้อ	21	34	41		
				รถพ่วง	22	24	25		
				รถกึ่งพ่วง	15	16	16		
				% รถบรรทุก	5.944	7.128	7.63		
117	202	เนินสว่าง - หนองนา	88+934	ทุกชนิด	16774	17924	24,257	ขท.พิจิตร	พิจิตร
				รถ 6 ล้อ	1135	617	950		
				รถ 10 ล้อ	790	845	520		
				รถพ่วง	865	848	780		
				รถกึ่งพ่วง	537	710	829		
				% รถบรรทุก	20.49	17.903	13.382		
115	301	บึงบัว - คลองโนน	73+135	ทุกชนิด	10013	4827	8,388	ขท.พิจิตร	พิจิตร
				รถ 6 ล้อ	272	262	315		
				รถ 10 ล้อ	115	159	106		
				รถพ่วง	165	175	136		
				รถกึ่งพ่วง	95	92	172		
				% รถบรรทุก	6.611	17.879	8.703		
221	101	ศรีสะเกษ - ภูเงิน	4+780	ทุกชนิด	17124	15940	16,517	ขท.ศรีสะเกษที่ 2	ศรีสะเกษ
				รถ 6 ล้อ	364	323	369		
				รถ 10 ล้อ	149	159	188		
				รถพ่วง	169	148	172		
				รถกึ่งพ่วง	85	80	95		
				% รถบรรทุก	5.075	5.044	5.655		
2	602	อุดรธานี - น้ำสวย	471+435	ทุกชนิด	18681	21168	23,257	ขท.อุดรธานีที่ 1	อุดรธานี
				รถ 6 ล้อ	484	1156	1,261		
				รถ 10 ล้อ	346	614	649		
				รถพ่วง	400	596	510		
				รถกึ่งพ่วง	344	378	314		
				% รถบรรทุก	8.752	13.502	12.71		

ตารางที่ ข1 (ต่อ) ข้อมูลปริมาณจราจร - รถบรรทุกรายวันเฉลี่ยต่อปี

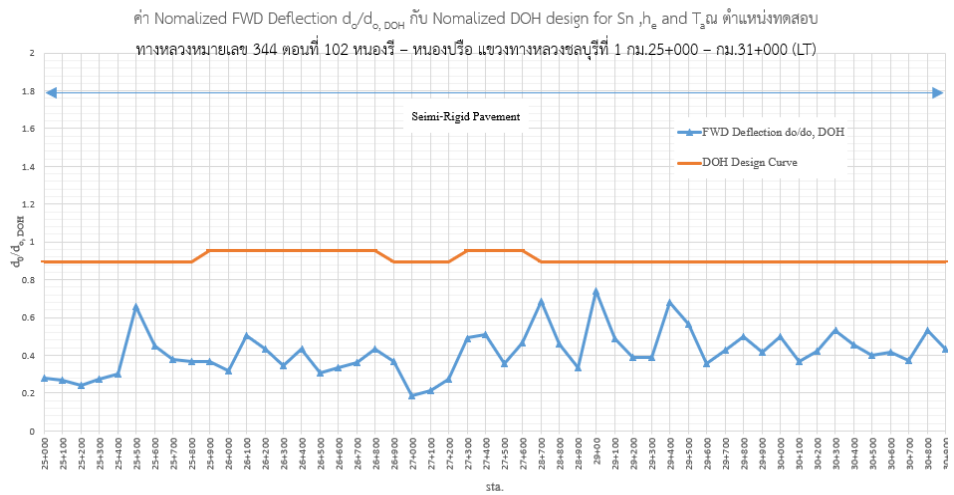
ทางหลวงสาย	ตอนควบคุม	ชื่อสายทาง	กม.จุดสำรวจ (KM.)	AADT	ปริมาณจราจร (ปี พ.ศ.)			แขวงทางหลวง	จังหวัด
					2563	2564	2565		
210	300	วังสำราญ - วังสะพุง	107+848	ทุกชนิด	4652	4532	6,175	ขท.เลขที่ 1	เลย
				รถ 6 ล้อ	311	238	283		
				รถ 10 ล้อ	105	95	80		
				รถพ่วง	218	220	199		
				รถกึ่งพ่วง	121	8	135		
				% รถบรรทุก	18.014	12.732	11.757		
12	401	บ้านกร่าง - พิษณุโลก	218+546	ทุกชนิด	19821	19665	20,132	ขท.พิษณุโลกที่ 1	พิษณุโลก
				รถ 6 ล้อ	887	875	828		
				รถ 10 ล้อ	458	461	488		
				รถพ่วง	457	465	415		
				รถกึ่งพ่วง	467	499	427		
				% รถบรรทุก	13.314	13.715	12.86		
126	103	ถนนวงแหวนรอบเมือง พิษณุโลกด้านทิศใต้	33+891	AADT	16905	12761	17,797	ขท.พิษณุโลกที่ 1	พิษณุโลก
				รถ 6 ล้อ	887	561	670		
				รถ 10 ล้อ	458	356	391		
				รถพ่วง	457	439	404		
				รถกึ่งพ่วง	467	344	371		
				% รถบรรทุก	13.314	13.715	12.86		

ภาคผนวก ค

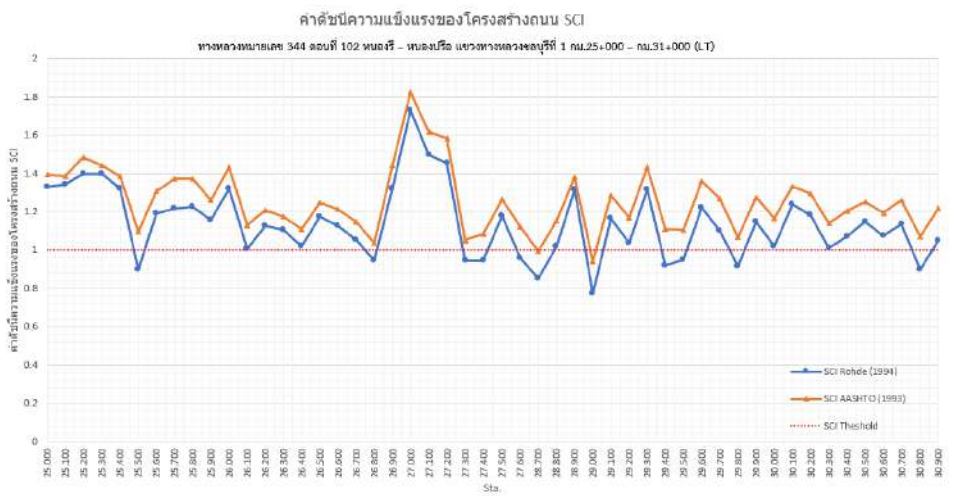
ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection ( $d_o/d_{o,DOH}$ )

ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index, SCI)

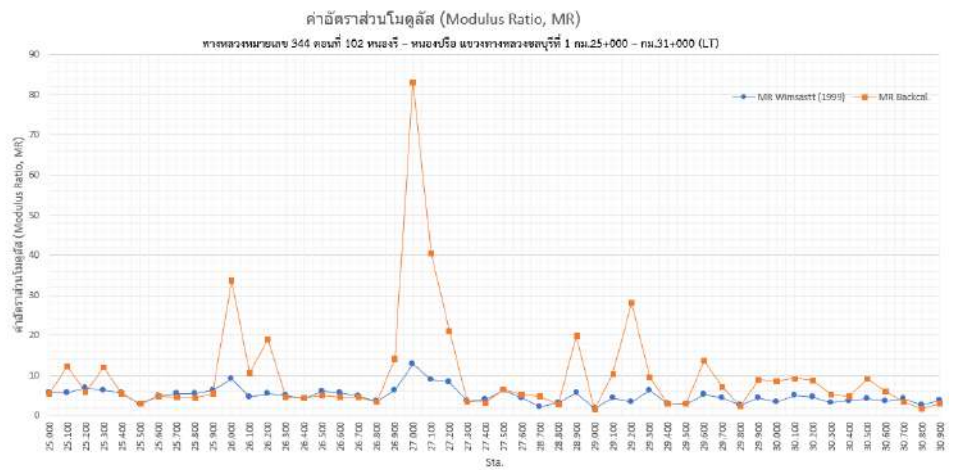
และค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR)



(ก) ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection

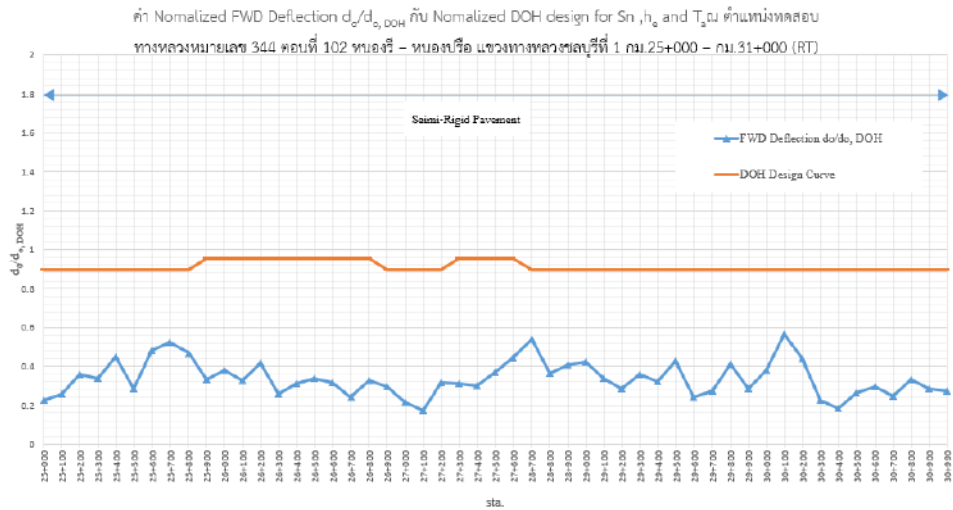


(ข) ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

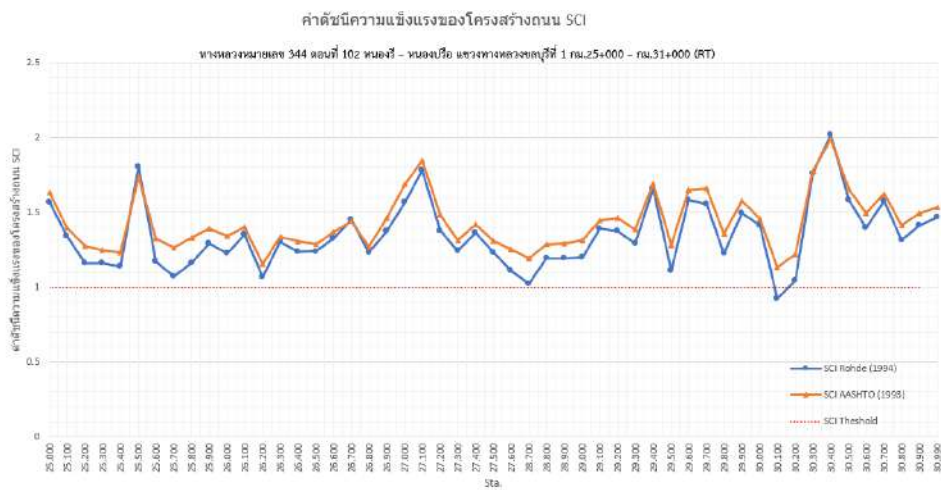


(ค) ค่าอัตราส่วนโมดูลัส

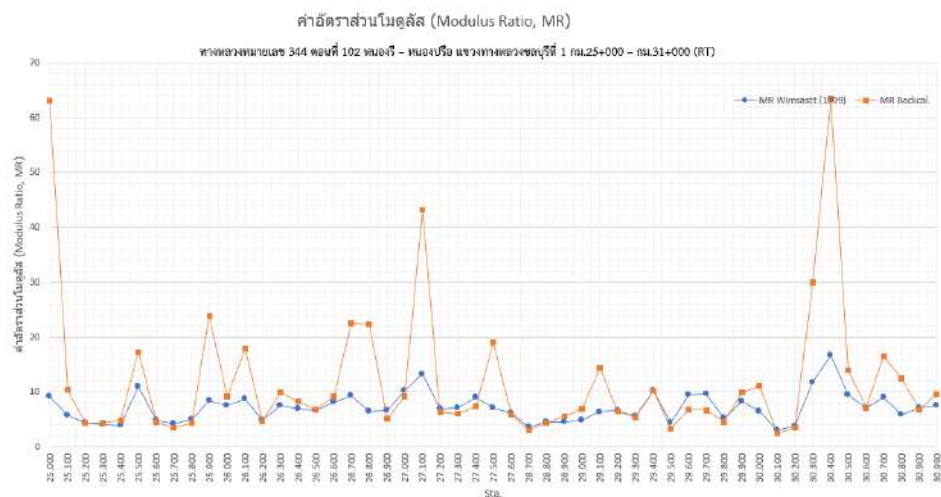
รูปที่ ค1 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $d_o/d_{o,DOH}$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 102 หนองรี - หนองปรือ แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.25+000 - กม.31+000 (LT)



(ก) ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection

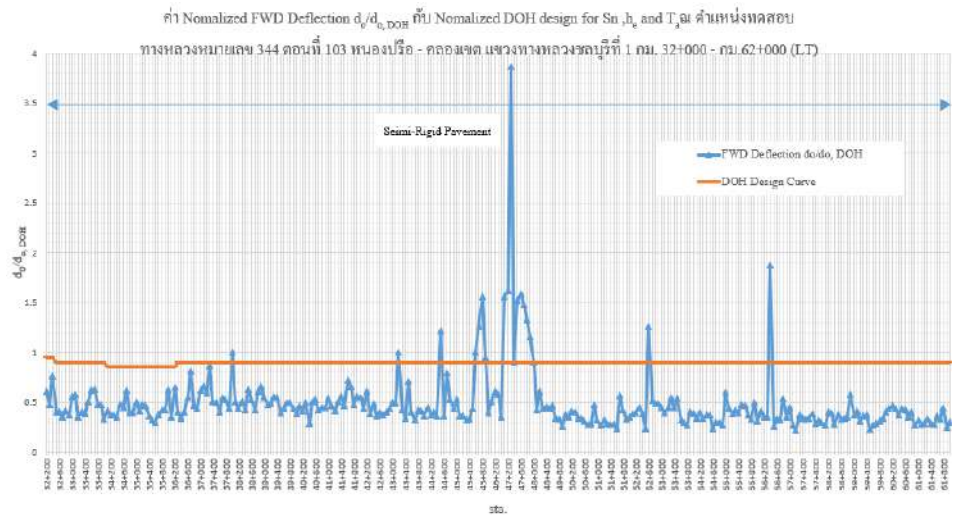


(ข) ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

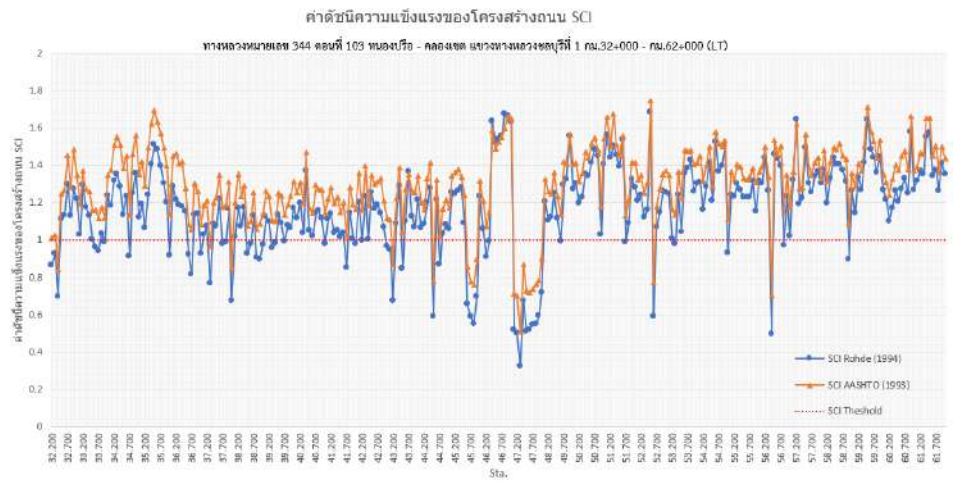


(ค) ค่าอัตราส่วนโมดูลัส

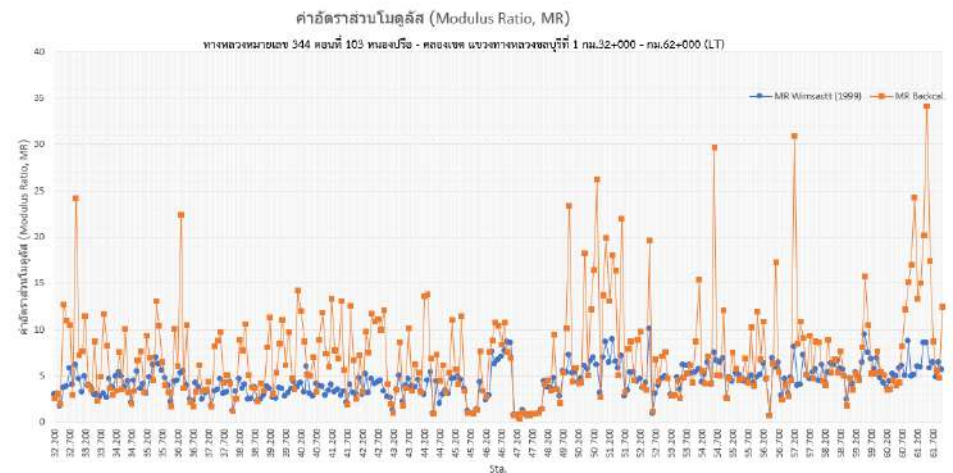
รูปที่ ค2 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $d_o/d_{o,DOH}$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 102 หนองรี - หนองปรือ แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.25+000 - กม.31+000 (RT)



(ก) ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection

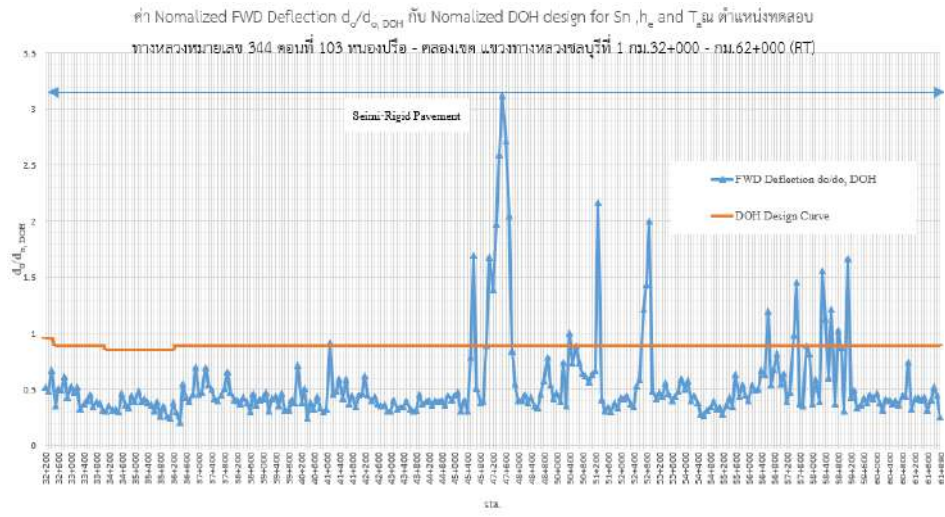


(ข) ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

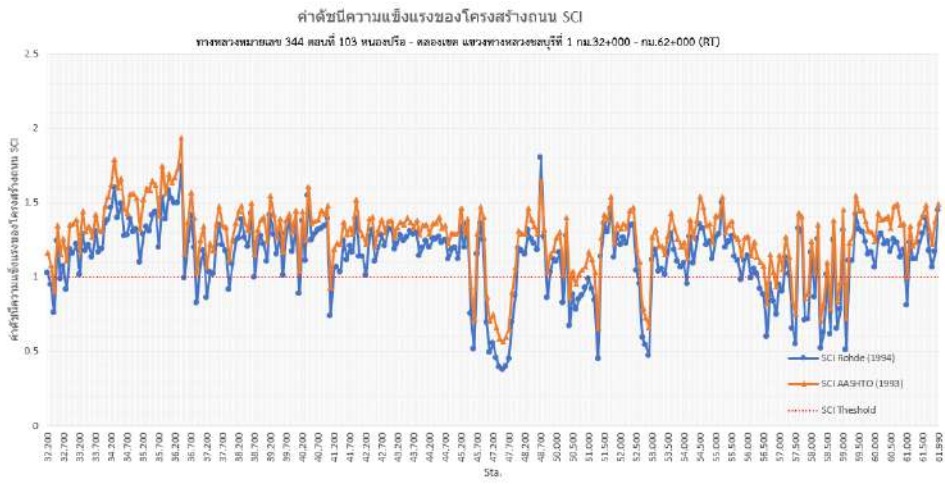


(ค) ค่าอัตราส่วนโมดูลัส

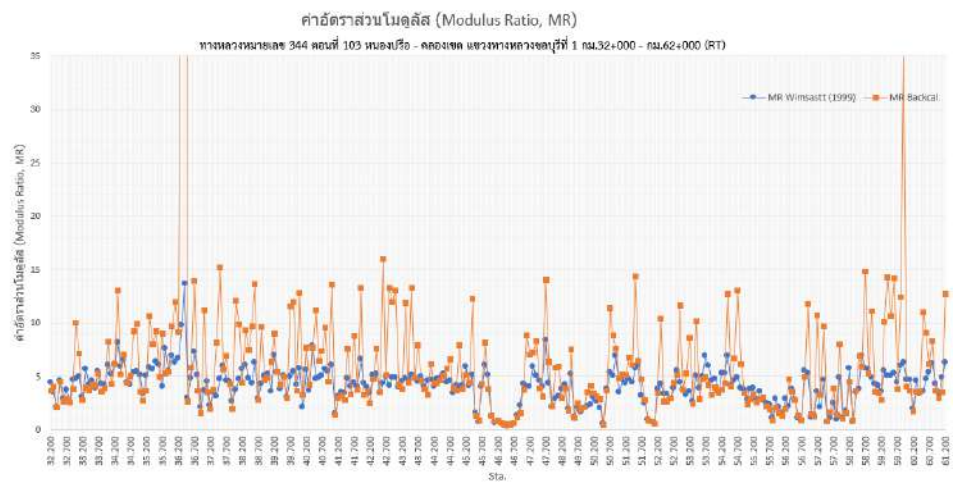
รูปที่ ค3 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103 หนองปรือ - คลองเขต แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม. 32+000 - กม. 62+000 (LT)



(ก) ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection

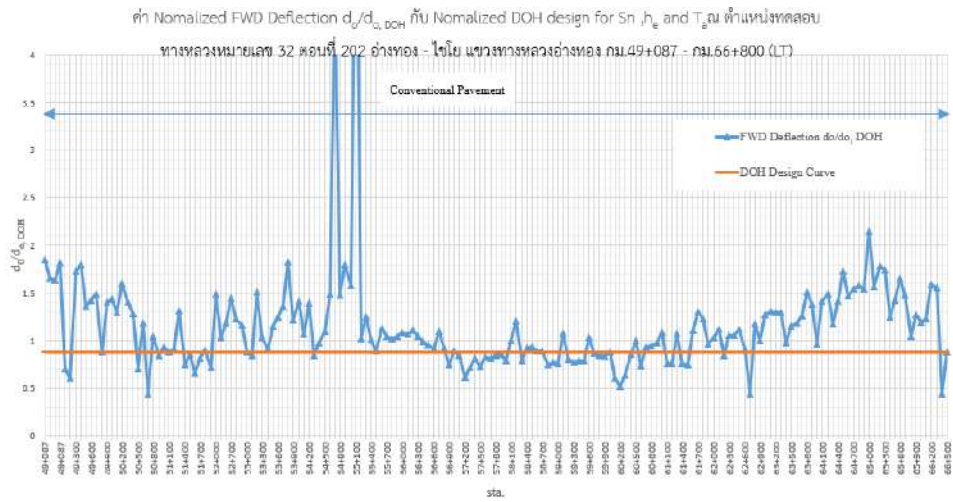


(ข) ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

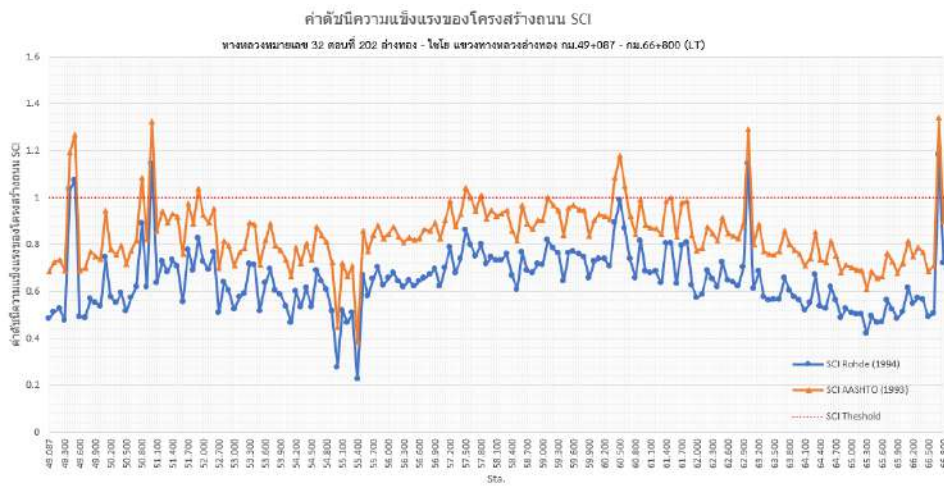


(ค) ค่าอัตราส่วนโมดูลัส

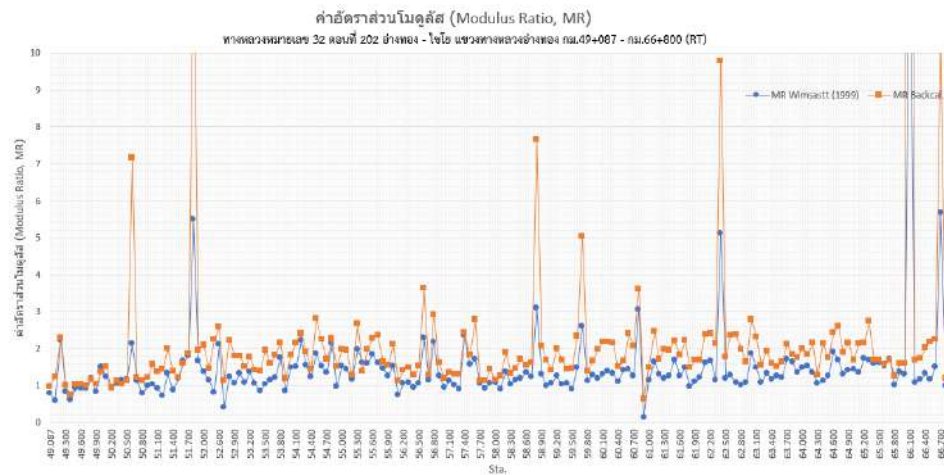
รูปที่ ค4 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $d_o/d_{o,DOH}$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนที่ 103 หนองปรือ - คลองเขต แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.32+000 - กม.62+000 (RT)



(ก) ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection

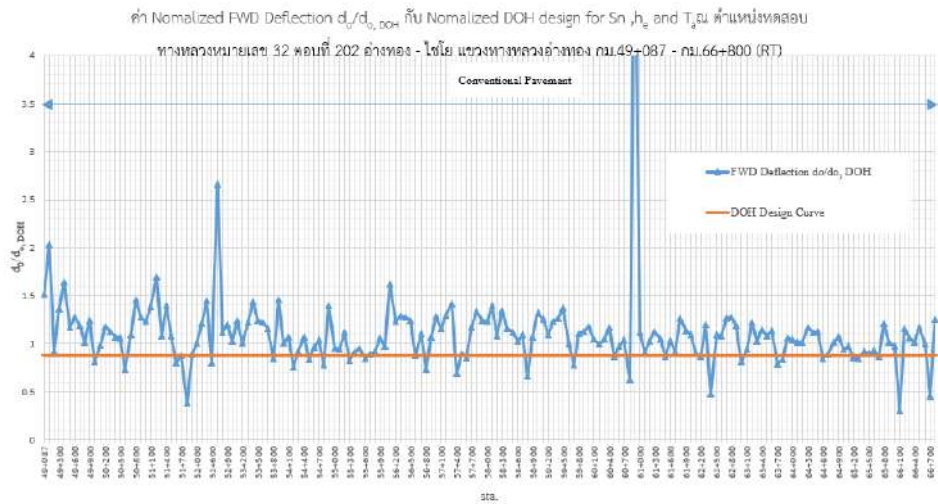


(ข) ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

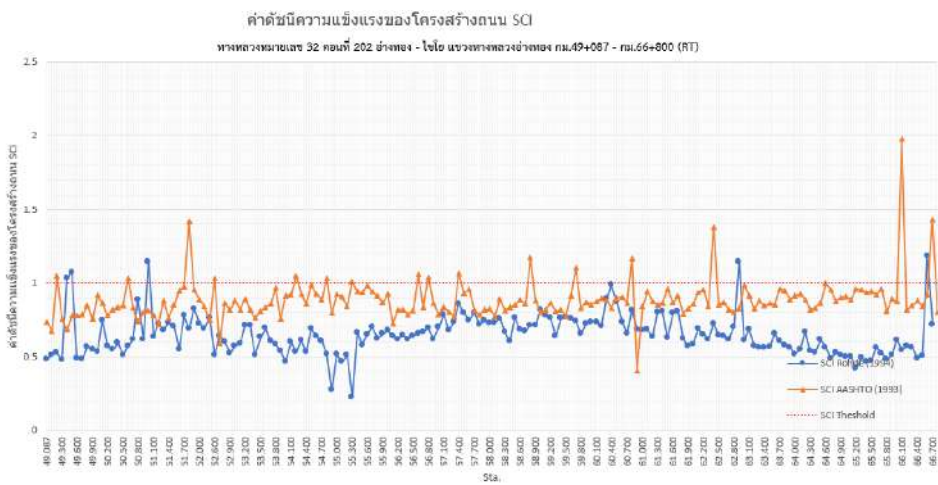


(ค) ค่าอัตราส่วนโมดูลัส

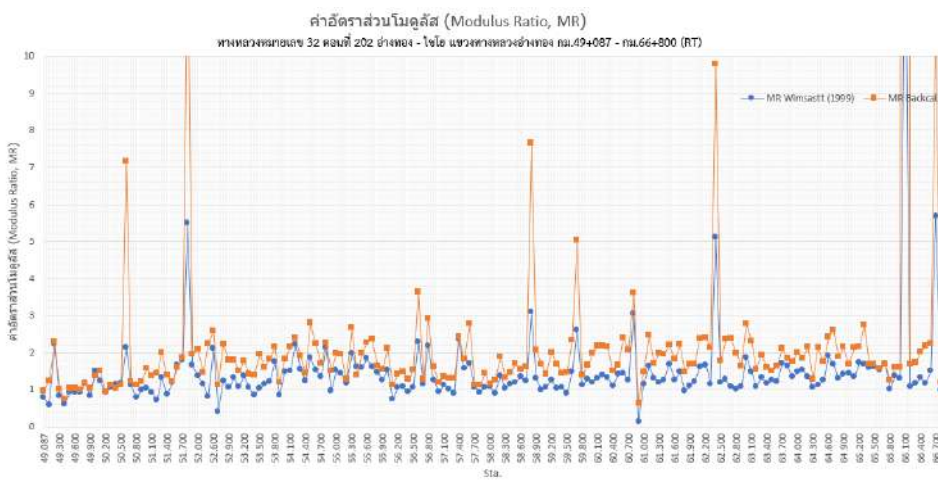
รูปที่ ค5 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $d_0/d_{o, DOH}$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 32 ตอนที่ 202 อ่างทอง - ไชโย แขวงทางหลวงอ่างทอง กม.49+087 - กม.66+800 (LT)



(ก) ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection

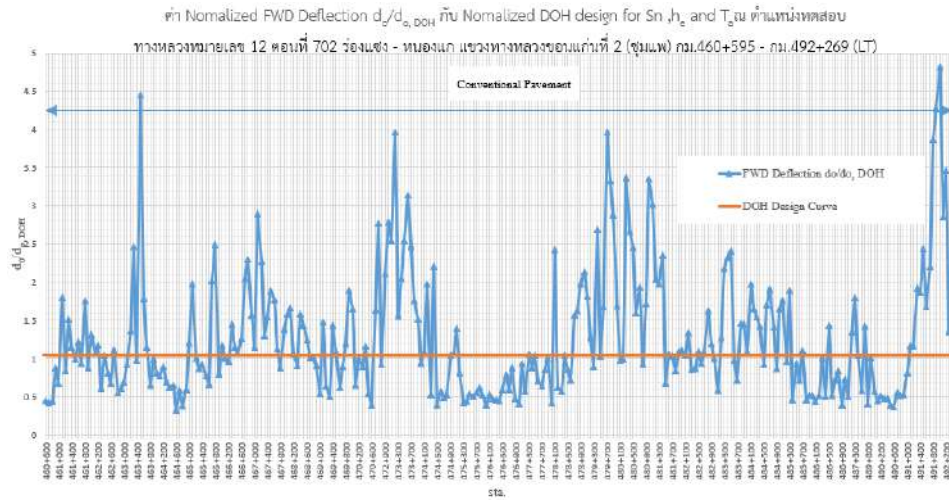


(ข) ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

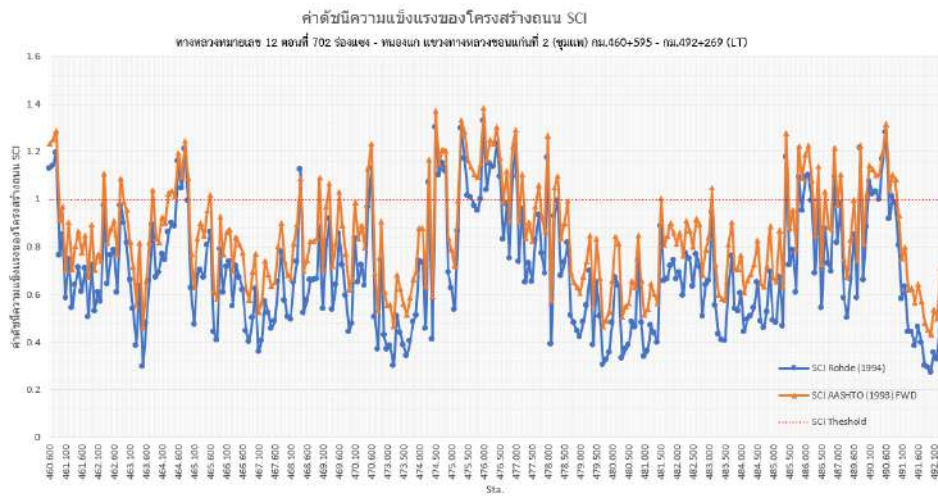


(ค) ค่าอัตราส่วนโมดูลัส

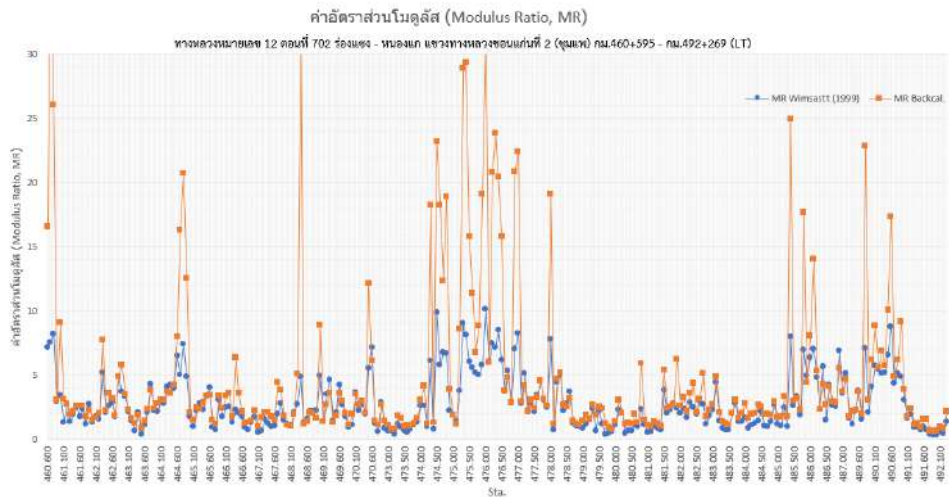
รูปที่ ค6 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $d_w/d_{o,DOH}$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 32 ตอนที่ 202 อ่างทอง - ไซโย แขวงทางหลวงอ่างทอง กม.49+087 - กม.66+800 (RT)



(ก) ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection

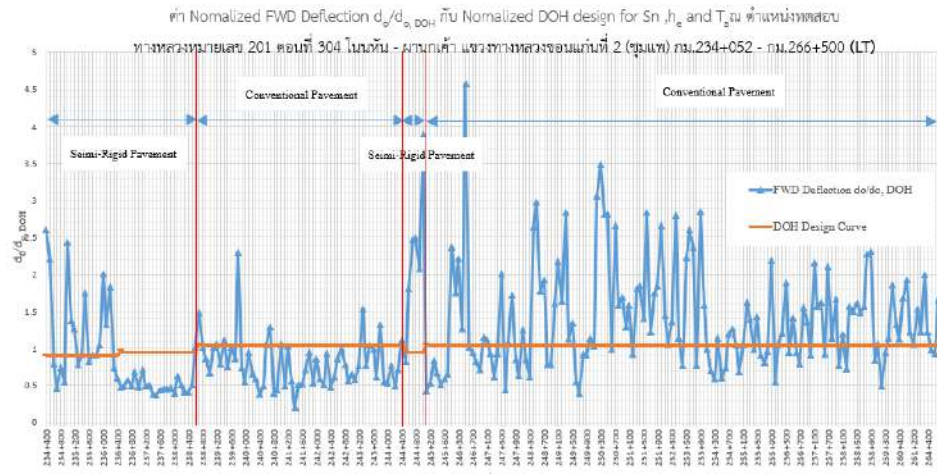


(ข) ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

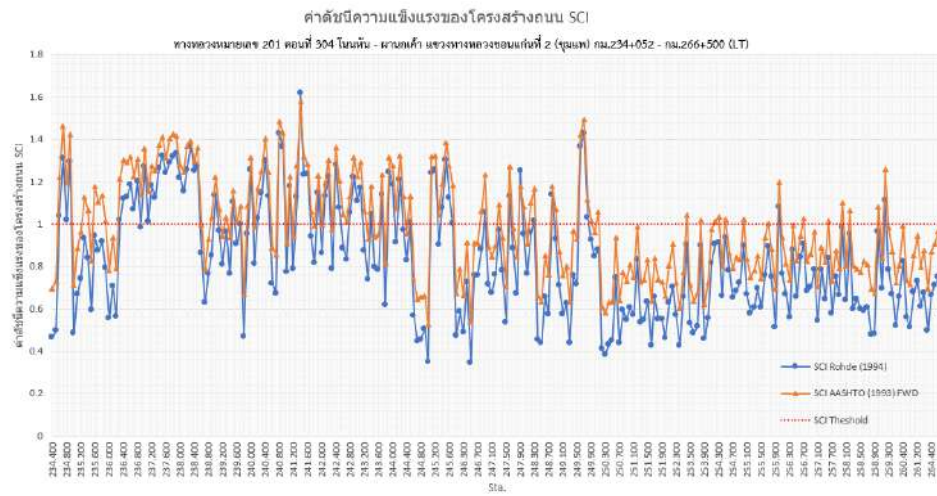


(ค) ค่าอัตราส่วนโมดูลัส

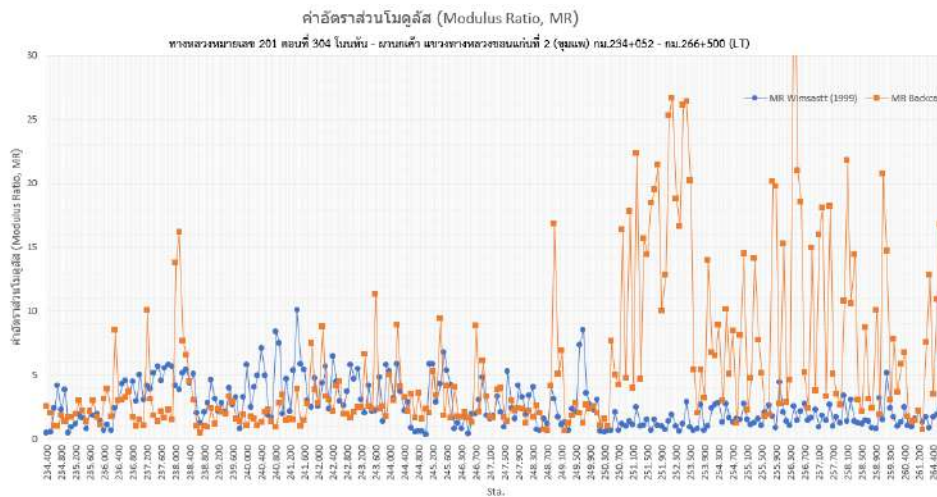
รูปที่ ๓7 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $d_f/d_{c,DOH}$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนที่ 702 ร่องแฉก - หอนงแก แขวงทางหลวงชนบทที่ 2 (ชุมแพ) กม.460+595 - กม.492+269 (LT)



(ก) ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว Normalized Deflection



(ข) ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน



(ค) ค่าอัตราส่วนโมดูลัส

รูปที่ ค8 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $d_o/d_o, DOH$ , SCI และ MR ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนที่ 304 โนนหัน - ผานกเค้า แขวงทางหลวงชนบทพื้นที่ 2 (ชุมแพ) กม.234+052 - กม.266+500 (LT)