

ผิวทางนับว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของโครงสร้างถนน ทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกระทำจากการจราจรและสภาพแวดล้อม ปัจจุบันผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยทางหลวงมีสัดส่วนการใช้งานผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมากกว่า 90% ของโครงข่าย

เมื่อถนนได้เปิดใช้งานไประยะหนึ่งจะเกิดความเสียหายขึ้น โดยลักษณะความเสียหายที่มักพบกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ หลุมบ่อ (Pot Hole) การเกิดร่องล้อ (Rutting) รอยแตกจากความล้า (Fatigue Cracking) และอื่นๆ ปัญหาที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของถนนทางหลวงหลายสาย คือ การเกิดร่องล้อ ซึ่งเป็นความเสียหายที่ผิวทางมีลักษณะยุบตัวเป็นแอ่งตามแนวที่ล้อรถบรรทุกวิ่งผ่าน มักพบปัญหานี้ในบริเวณที่มีรถหนัก (Heavy Vehicle) วิ่งเป็นจำนวนมาก ความต่างระดับของผิวทางส่งผลต่อความปลอดภัยของผู้ขับขี่รถขนาดเล็ก เช่น รถจักรยานยนต์ นอกจากนี้เมื่อมีฝนตก น้ำอาจขังเป็นแอ่งตามแนวร่องล้อ หากดอกยางของล้อรถยนต์ไม่สามารถรีดน้ำออกได้ทัน ล้อรถยนต์จะวิ่งบนผิวน้ำ (Hydroplane) ทำให้เสียการทรงตัวและเกิดอุบัติเหตุได้ ดังนั้นปัญหาการเกิดร่องล้อจึงเป็นเรื่องเร่งด่วนที่กรมทางหลวงควรพิจารณาหาแนวทางแก้ไข



รูปที่ 1 ปัญหาการเกิดร่องล้อบนทางหลวง

ถึงแม้ว่าการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในปัจจุบันจะพิจารณาความเสียหายประเภทร่องล้อแล้วก็ตาม แต่ความแม่นยำในการทำนายผลยังไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมของถนนที่แท้จริง ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตบางส่วนเกิดความเสียหายก่อนระยะเวลาที่ได้ออกแบบไว้ ทำให้ต้องสิ้นเปลืองงบประมาณจำนวนมากในการซ่อมบำรุงผิวทางในแต่ละปี

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับสมการทำนายผล นับว่าเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถทำนายการเกิดร่องล้อภายใต้การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ ที่ต้องการจะศึกษาได้แม่นยำขึ้น ดังนั้นโครงการนี้จึงได้จัดให้มีการทดสอบผิวทางที่ภาคสนามและการทดสอบคุณสมบัติวัสดุในห้องปฏิบัติการ และนำผลที่ได้มาใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายการเกิดร่องล้อ

## 1. การคัดเลือกสายทาง

โครงการนี้ได้คัดเลือกถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจำนวน 10 สายทาง เพื่อใช้เป็นตัวแทนถนนที่มีการจราจรหลายระดับ (ต่ำ ปานกลาง และสูง) สำหรับใช้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายการเกิดร่องล้อ โดยการคัดเลือกจะเน้นสายทางที่มีระดับการจราจรปานกลางและสูงเป็นหลัก ซึ่งเป็นกลุ่มข้อมูลที่มักพบปัญหาการเกิดร่องล้อ หลักเกณฑ์การคัดเลือกสรุปได้ดังนี้

1. คัดเลือกสายทางแยกตามภูมิภาค ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 พื้นที่ คือ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลางรวมกับภาคตะวันตก ภาคตะวันออก และภาคใต้ โดยเลือกพื้นที่ละ 2 สายทาง รวมทั้งสิ้น 10 สายทาง
2. คัดเลือกช่วงถนนที่เป็น 4 ช่องจราจรขึ้นไป เพื่อลดปัญหาการปิดการจราจรในแต่ละพื้นที่ และหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการทดสอบภาคสนาม
3. เลือกถนนที่มีปริมาณรถหนัก 3 ระดับ (ต่ำ ปานกลาง และสูง) ตามเกณฑ์ดังนี้

ปริมาณรถหนัก	จำนวน ESALs ในช่วง 20 ปี	ปริมาณรถหนัก (คัน/วัน/ฝั่ง)	จำนวนสายทางที่คัดเลือก
ต่ำ	$< 3 \times 10^6$	$< 400$	1
กลาง	$3 \times 10^6 - 10 \times 10^6$	400 – 1,200	3
สูง	$\geq 10 \times 10^6$	$\geq 1,200$	6

หมายเหตุ สมมุติฐานการคำนวณปริมาณรถหนัก: จำนวนปีออกแบบ  $N=20$  ปี, Distribution Factor =0.5, Lane Factor=0.8, Truck Factor =1.5, Growth rate = 4%, และใช้ค่าเฉลี่ยปริมาณรถหนักตลอด 20 ปี และคิดต่อ 1 ฝั่งทาง (ซ้ายทาง หรือ ขวาทาง)

4. ผิวทางมีสภาพดี ไม่เป็นทางคับขัน สามารถจัดทำแปลงทดสอบได้อย่างปลอดภัย
5. อื่นๆ เช่น ผิวทางควรมี 2 ชั้น มีความหนารวมกันประมาณ 10 ซม. ซึ่งเป็นลักษณะชั้นผิวทางที่ใช้งานทั่วไปของกรมทางหลวง มีข้อมูลโครงสร้างชั้นทาง และประวัติสายทาง เพื่อใช้ประกอบดุลพินิจในการจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
6. ประสานงานกับสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบของกรมทางหลวง เพื่อคัดเลือกสายทางที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวแทนถนนในการศึกษาของโครงการนี้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายชื่อ 10 สายทางที่คัดเลือกสำหรับการทดสอบภาคสนาม

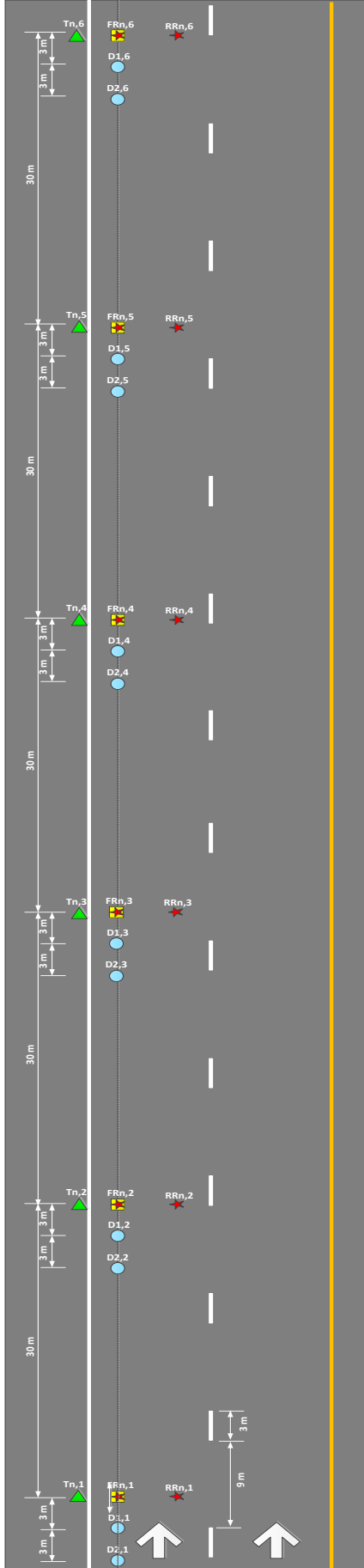
พื้นที่	ที่	หมายเลขทางหลวง	ชื่อตอน	ช่วงกม. (ฝั่งทาง)	จำนวนช่องทางจราจร	AADT (คันวันฝั่ง)	% รถหนัก	ปริมาณรถหนัก (คันวันฝั่ง)	ระดับการจราจร
เหนือ	1	11	อุดรดิตถ์ - เด่นชัย	333+382 - 333+538 (LT)	4	6,479	14.68	951	ปานกลาง
	2	101	แพร่ - ร้องกวาง	272+750 - 272+906 (LT)	4	2,693	8.24	222	ต่ำ
ตะวันออกเฉียงเหนือ	3	24	โขงชัย - สีคิ้ว	36+310 - 36+466 (LT)	4	11,896	28.7	3,414	สูง
	4	214	สุรินทร์ - ปราสาท	202+420 - 202+576 (LT)	4	6,014	14.75	887	ปานกลาง
กลาง+	5	3414	พุดมณฑลสาย 5	6+244 - 6+400 (RT)	4	22,285	20.42	4,551	สูง
	6	122	ทางเลี่ยงเมืองนครสวรรค์	10+404 - 10+560 (RT)	4	7,312	23.37	1,709	สูง
ตะวันออกเฉียงใต้	7	304	แปลงยาว-พนมสารคาม	101+100 - 101+156 (RT)	4	19,168	27.93	5,354	สูง
	8	317	จันทบุรี - สระแก้ว	20+000 - 21+156 (LT)	4	12,341	7.37	910	ปานกลาง
ใต้	9	41	แยกปทุมพร	5+244 - 5+400 (RT)	4	14,971	23.79	3,562	สูง
	10	41	ไชยา - พุนพิน	142+900 - 143+056 (LT)	4	14,519	39.36	5,715	สูง

## 2. การทดสอบภาคสนาม

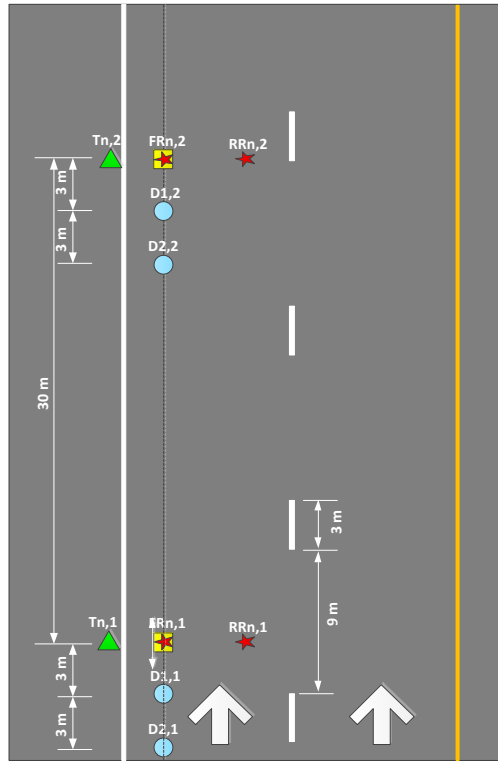
การทดสอบภาคสนามมี 4 รายการ คือ การตรวจวัดความลึกร่องล้อ (Rutting) การทดสอบการแอ่นตัวของถนนด้วย Falling Weight Deflectometer (FWD) การเจาะเก็บก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) และการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางด้วยวิธี Dynamic Cone Penetration (DCP) โดยการทดสอบทั้ง 4 รายการนั้น จะกระทำบน 10 แปลงทดสอบที่ตั้งอยู่บนฝั่งซ้ายทางหรือฝั่งขวาทางของ 10 สายทางที่ได้คัดเลือกไว้ และได้ดำเนินการ 2 รอบ ห่างกันประมาณ 51 วัน โดยแปลงทดสอบภาคสนามได้แสดงไว้ในรูปที่ 2

การทดสอบ FWD ได้กระทำ 2 ช่วงเวลา คือ เช้า (9.00 น.) และ บ่าย (15.00 น.) เพื่อให้ได้ข้อมูลในช่วงที่ผิวทางมีอุณหภูมิเย็นและร้อน โดยแต่ละแปลงทดสอบจะมี 6 ตัวอย่างซ้ำ (Replicate Samples) และในแต่ละตำแหน่งตัวอย่างซ้ำจะทดสอบ 3 ระดับน้ำหนัก คือ 566, 707 และ 849 kPa ซึ่งค่าการแอ่นตัวของ 6 ตำแหน่งนี้ จะถูกวิเคราะห์แบบย้อนกลับด้วยโปรแกรม ELMOD เพื่อหาค่าโมดูลัสของแต่ละชั้นวัสดุ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ 6 ตัวอย่างซ้ำ (ค่าการแอ่นตัวและค่าโมดูลัสของแต่ละชั้นวัสดุ) จะถูกคำนวณหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนของสายทางนั้นๆ ดังตัวอย่างสายทางในรูปที่ 3 และตารางที่ 2 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

รูปที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวของ 10 สายทาง ที่ตำแหน่งตกกระทบด้วยน้ำหนักทดสอบ 849 kPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าสายทางที่คัดเลือกในโครงการนี้มีความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางหลายระดับ (ต่ำ ปานกลาง และสูง) โดยสายทาง ทล.41 (แยกปฐมพร) มีความแข็งแรงที่สุด และ ทล.101 (แพร์-ร้องกวาง) มีสภาพอ่อนที่สุด นอกจากนี้สามารถสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทดสอบ FWD ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ผิวทางจะแอ่นตัวได้มากขึ้น บ่งบอกถึงโครงสร้างชั้นทางจะอ่อนตัวลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอาจก่อให้เกิดปัญหาร่องล้อได้



(ก) แปลงทดสอบมี 6 ซ้ำวาง 6 ตัวอย่างซ้ำ (Replicate samples) โดยห่างกันช่วงละ 30 เมตร

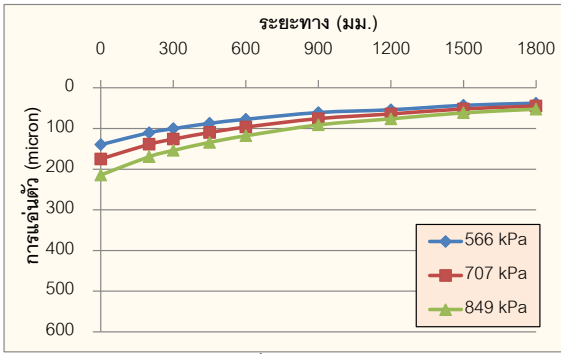


(ข) ภาพขยายแปลงทดสอบของ 2 ตัวอย่างซ้ำแรก

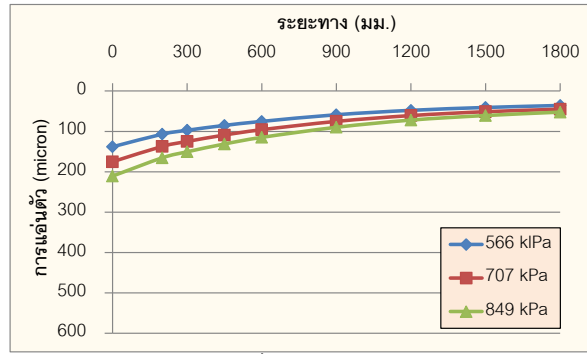
สัญลักษณ์	ความหมาย
Tn,1	วัดอุณหภูมิในรอบที่ 1 และ รอบที่ 2 ( ตำแหน่งทดสอบที่ 1 )
Tn,2	วัดอุณหภูมิในรอบที่ 1 และ รอบที่ 2 ( ตำแหน่งทดสอบที่ 2 )
FRn,1	ทดสอบ FWD, วัด Rutting รอบที่ 1 และ รอบที่ 2 ( ตำแหน่งทดสอบที่ 1 )
FRn,2	ทดสอบ FWD, วัด Rutting รอบที่ 1 และ รอบที่ 2 ( ตำแหน่งทดสอบที่ 2 )
RRn,1	วัด Rutting ล้อรถขุม รอบที่ 1 และ รอบที่ 2 ( ตำแหน่งทดสอบที่ 1 )
RRn,2	วัด Rutting ล้อรถขุม รอบที่ 1 และ รอบที่ 2 ( ตำแหน่งทดสอบที่ 2 )
D1,1	ทำ Core Drilling แล้ว ทำ DCP รอบที่ 1 ( ตำแหน่งทดสอบที่ 1 )
D2,1	ทำ Core Drilling แล้ว ทำ DCP รอบที่ 2 ( ตำแหน่งทดสอบที่ 1 )
D1,2	ทำ Core Drilling แล้ว ทำ DCP รอบที่ 1 ( ตำแหน่งทดสอบที่ 2 )
D2,2	ทำ Core Drilling แล้ว ทำ DCP รอบที่ 2 ( ตำแหน่งทดสอบที่ 2 )

(ค) คำอธิบายตำแหน่งทดสอบ

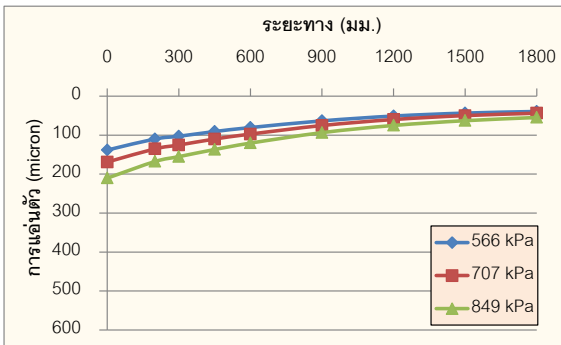
รูปที่ 2 แปลงทดสอบภาคสนาม (รอบที่ 1 และ รอบที่ 2)



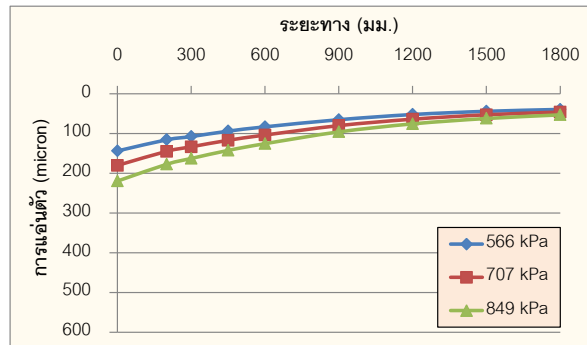
(ก) รอบที่ 1 (เช้า 9.00)



(ข) รอบที่ 1 (บ่าย 15.00)



(ค) รอบที่ 2 (เช้า 9.00)



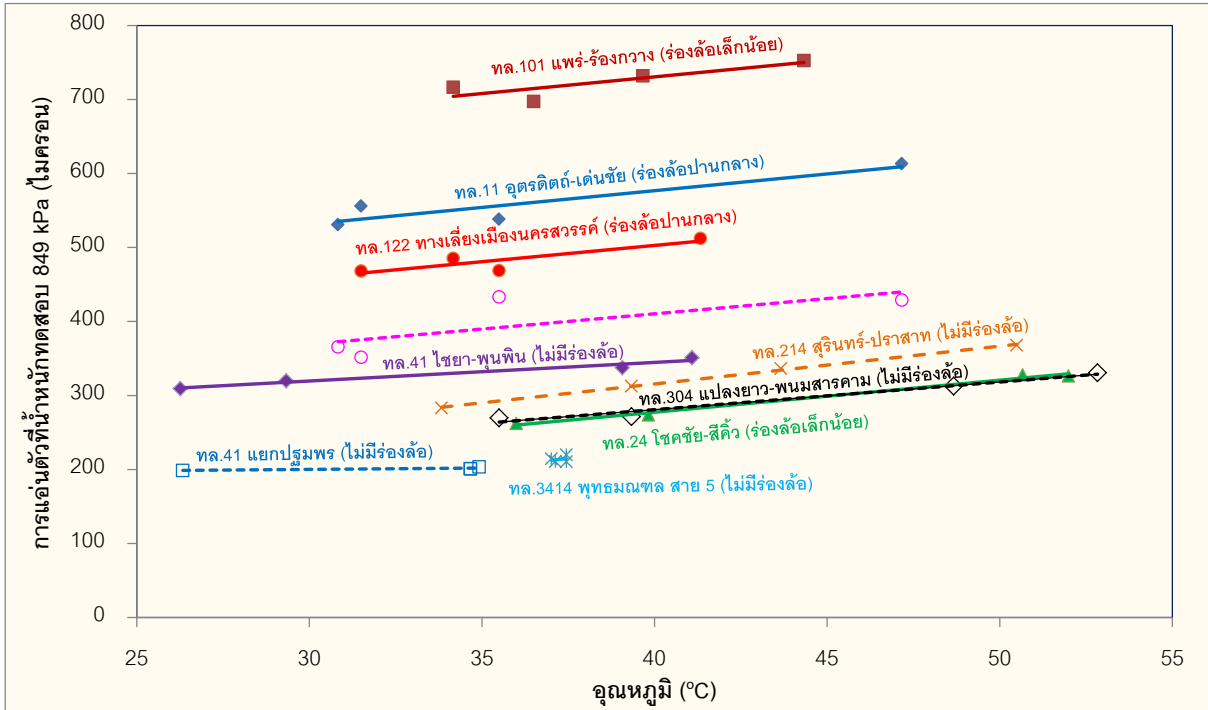
(ง) รอบที่ 2 (บ่าย 15.00)

รูปที่ 3 ตัวอย่างค่าเฉลี่ยเส้นโค้งการแอนตัวที่ 3 ระดับน้ำหนักร  
(สายทางที่ 6 ทล.122 ทางเลี้ยวเมืองนครสวรรค์)

ตารางที่ 2 ตัวอย่างค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ FWD ของสายทางที่ 6 (ทล.122 ทางเลี่ยงเมืองนครสวรรค์)

รอบที่	เวลา	อุณหภูมิ ม. (C)	น้ำหนัก (kPa)	ค่าการแอ่นตัว (ไมครอน) ที่ตำแหน่งห่างจากจุดตกกระทบ D (มม.)				ค่าการแอ่นตัวสูงสุด (ไมครอน) ที่ตำแหน่งทดสอบ				ค่าโมดูลัส (Mpa)										
				D0	D200	D300	D450	D600	D900	D1200	D1500	D1800	ST.6	ST.36	ST.66	ST.96	ST.126	ST.156	E1	E2	E3	E4
1	เช้า 9.00	31.5	566	323	268	231	183	134	105	79	57	46	347	272	316	250	358	395	4,178	665	175	96
		31.5	707	393	332	288	229	168	132	97	71	58	415	328	373	314	444	486	6,020	587	179	93
		31.5	849	468	397	347	279	206	163	119	88	71	497	394	445	376	527	570	2,855	1,021	158	97
	บ่าย 15.00	34.2	566	331	274	237	184	134	106	77	56	45	350	283	318	263	363	408	4,759	580	171	95
		34.2	707	406	338	294	232	170	135	91	72	58	428	347	391	319	451	503	3,694	726	156	122
		34.2	849	485	411	359	285	208	166	121	88	70	503	416	469	390	537	598	3,609	922	153	94
2	เช้า 9.00	35.5	566	323	264	228	180	132	105	79	56	46	342	282	341	242	356	378	4,372	744	159	144
		35.5	707	396	330	287	228	169	134	100	72	58	417	342	417	308	436	459	4,944	743	163	123
		35.5	849	469	393	343	275	204	162	121	86	69	502	403	480	371	518	539	4,691	846	161	122
	บ่าย 15.00	41.3	566	353	278	240	189	140	110	81	57	46	409	295	350	262	383	421	3,424	664	137	167
		41.3	707	433	348	301	240	176	140	103	73	58	495	360	423	333	475	510	3,901	654	128	174
		41.3	849	512	414	360	288	213	169	125	88	70	582	431	499	397	564	600	3,808	704	125	176
																	Avg	4,188	738	155	125	

รูปแบบความหนาในการ วิเคราะห์	ลักษณะวัสดุ
h1 100 mm.	แอสฟัลต์คอนกรีต
h2 200 mm.	หินคลุก
h3 900 mm.	ลูกรัง+วัสดุคัดเล็ก



รูปที่ 4 ค่าเฉลี่ยการแฉกตัวที่ตำแหน่งตกกระทบด้วยน้ำหนักทดสอบ 849 kPa ของ 10 สายทาง ที่อุณหภูมิต่างๆ (2 รอบ ห่างกัน 51 วัน)

ในแต่ละแปลงทดสอบ มีการตรวจวัดความลึกร่องล้อในช่องจราจรด้านซ้ายสุดจำนวน 6 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งจะวัดความลึกร่องล้อที่ด้านซ้ายและด้านขวาของช่องจราจร (รวมทั้งสิ้น 12 ค่า) และนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนของแต่ละสายทางในแต่ละรอบการตรวจวัด จากคู่มือการตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง กรมทางหลวง (2550) ความเสียหายชนิดร่องล้อ (Rutting) จะแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ เล็กน้อย (6-12 มม.) ปานกลาง (12-25 มม.) และ สูง (มากกว่า 25 มม.) ผลการทดสอบภาคสนามและผลการวิเคราะห์ของ 10 สายทาง ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความลึกร่องล้อที่อยู่ระดับปานกลาง (12-25 มม.) มี 2 สายทาง คือ ทล.11 อุตรดิตถ์-เด่นชัย และ ทล.122 ทางเลี้ยวเมืองนครสวรรค์ และความลึกร่องล้อที่อยู่ระดับเล็กน้อย (6-12 มม.) มี 2 สายทาง คือ ทล.101 แพร่-ร้องกวาง และ ทล.24 โชคชัย-สีคิ้ว อีก 6 สายทาง ที่เหลือยังไม่เกิดปัญหาร่องล้อ

ตารางที่ 3 สรุปผลการตรวจวัดร่องล้อของ 10 สายทาง

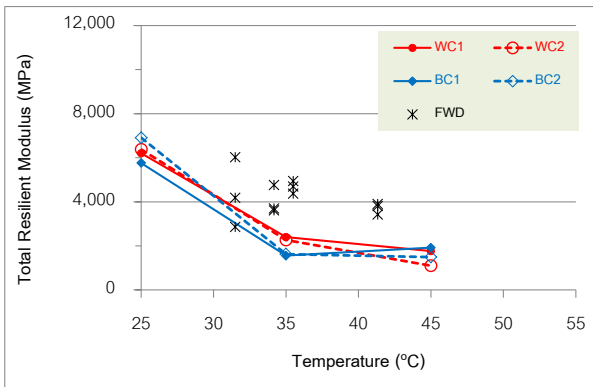
ทางหลวง	ชื่อตอน	ปริมาณรถหนัก (คัน/วัน/ฝั่ง)	การแอ่นตัวที่ 849 kPa 37°C	ค่าเฉลี่ยความลึกร่องล้อของ แปลงทดสอบ (มม.)			ระดับความรุนแรงของร่องล้อ
				รอบที่ 1	รอบที่ 2	เพิ่มขึ้น	
11	อุดรดิตถ์ – เด่นชัย	951	563	16.33	16.58	0.25	ปานกลาง
101	แพร่ – ร่องกวาง	222	717	8.25	8.92	0.67	เล็กน้อย
24	โชคชัย – สีคิ้ว	3,414	264	7.17	7.25	0.08	เล็กน้อย
214	สุรินทร์ – ปราสาท	887	300	1.92	3.08	1.17	-
3414	พุทธมณฑลสาย 5	4,551	213	0.00	0.00	0.00	-
122	ทางเลี่ยงเมืองนครสวรรค์	1,709	490	12.42	12.58	0.17	ปานกลาง
304	แปลงยาว-พนมสารคาม	5,354	270	2.92	2.92	0.00	-
317	จันทบุรี – สระแก้ว	910	398	2.50	3.08	0.58	-
41	แยกปฐมพร	3,562	203	4.50	5.67	1.17	-
41	ไชยา – พุนพิน	5,715	337	4.08	4.50	0.42	-

การตรวจวัดค่าความลึกร่องล้อบนผิวทางที่ขรุขระอาจมีคลาดเคลื่อนได้  $\pm 1$  มม. จากผลการตรวจวัดค่าความลึกร่องล้อ 2 รอบ ห่างกันประมาณ 51 วัน พบว่าสายทางต่างๆมีอัตราการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 0-1.17 มม. ซึ่งอาจยังน้อยเกินไปที่จะแยกแยะความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากปัจจัยการเกิดร่องล้อกับความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตรวจวัด ดังนั้นควรเก็บข้อมูลต่อเนื่องอีกครั้งอย่างน้อย 1 ปี ที่ตำแหน่งเดิม จึงจะสามารถแยกแยะความแตกต่างได้ชัดเจนขึ้น

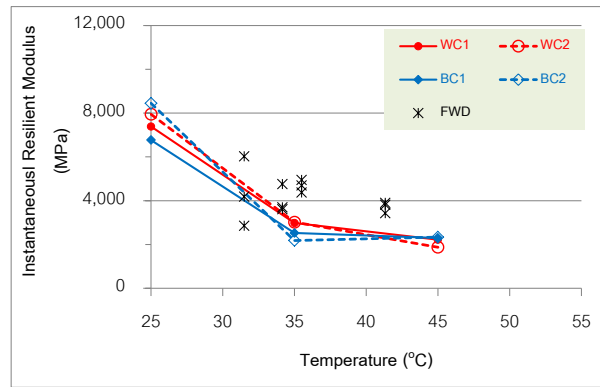
นอกจากนี้ที่แปลงทดสอบภาคสนาม ได้เจาะเก็บก้อนตัวอย่าง (Core Sample) จำนวน 6 ตำแหน่งในแนวร่องล้อด้านซ้าย ห่างจากตำแหน่งทดสอบ FWD ไปอีก 3 เมตร เพื่อนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวในห้องปฏิบัติการ เมื่อได้เจาะเปิดชั้นผิวทางออกแล้ว ดำเนินการทดสอบ DCP ต่อใน 6 หลุมนั้น โดยตอกให้ลึกถึงระดับชั้นดินเดิมประมาณ 30 ซม. แต่ไม่เกินความลึกสูงสุดที่ DCP จะสามารถกระทำได้ (ประมาณ 1.0 เมตร) เมื่อการทดสอบเสร็จสิ้น ทำการซ่อมหลุมเจาะให้เรียบร้อย

ก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากภาคสนามจะถูกย่อยเป็นส่วนผิวบน (Wearing course) และส่วนผิวล่าง (Binder Course) และนำไปทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะรายงานผล 2 ค่า คือ ค่า

โมดูลัสคืนตัวแบบทันที (Instantaneous Resilient Modulus,  $E_{RI}$ ) และค่าโมดูลัสคืนตัวแบบทั้งหมด (Total Resilient Modulus,  $E_{RT}$ ) เมื่อนำค่าทั้งสองแบบนี้ไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสแบบย้อนกลับจากการแ่นตัวด้วยโปรแกรม ELMOD ( $E_{ELMOD}$ ) จำนวน 10 สายทาง รวม 2 รอบ ที่หลายระดับอุณหภูมิ พบว่าค่า  $E_{RI}$  มีความใกล้เคียงกับค่า  $E_{ELMOD}$  มากกว่าค่า  $E_{RT}$  (6 สายทาง ต่อ 4 สายทาง) ดังตัวอย่างการเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้อาจเนื่องจากการแ่นตัวที่เกิดจากน้ำหนักกระแทกเป็นผลตอบสนองของแรงกระทำฝั่งขาขึ้น (Loading) ซึ่งมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแรงกระทำฝั่งขาลง (Unloading) แบบทันที ไม่รวมการคืนตัวทั้งหมดจากการคืบระยะสั้น



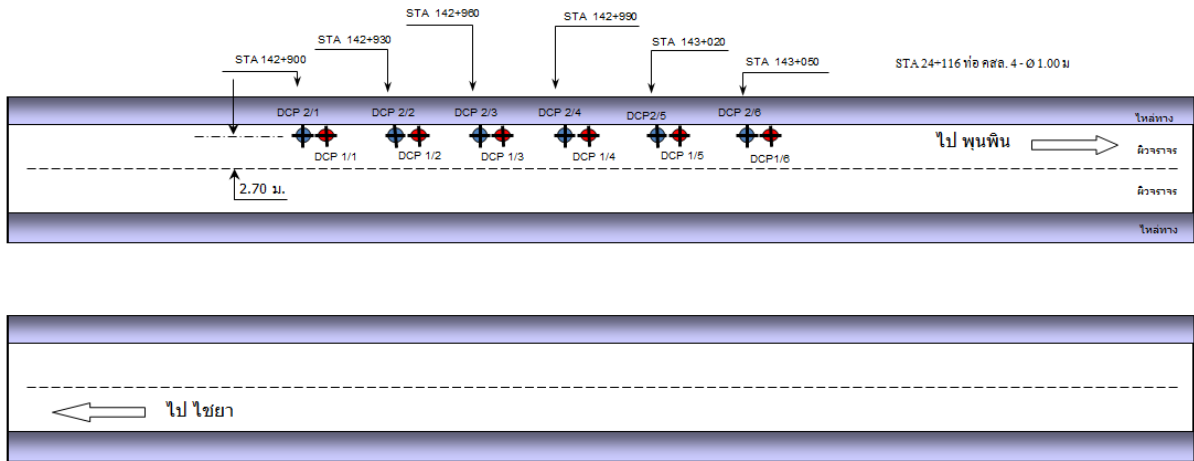
(ก)  $E_{RT}$  ของก้อนตัวอย่าง vs  $E_{ELMOD}$  จาก FWD



(ข)  $E_{RI}$  ของก้อนตัวอย่าง vs  $E_{ELMOD}$  จาก FWD

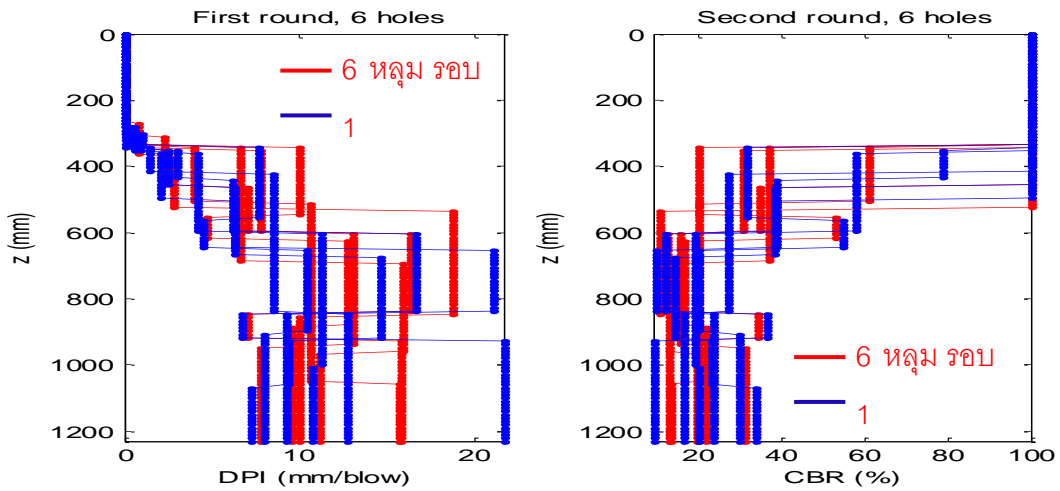
**รูปที่ 5 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของสายทางที่ 6 (ทล.122 ทางเลี่ยงเมืองนครสวรรค์)**

รายการทดสอบสุดท้าย คือ การทดสอบความแข็งแรงโครงสร้างชั้นทางด้วย DCP ซึ่งได้กระทำ 2 รอบ ห่างกันประมาณ 51 วัน โดยกระทำ 6 หลุมต่อ 1 สายทาง เพื่อหาค่า Dynamic Cone Penetration Index (DPI) และแปลงเป็นค่า California Baring Ratio (CBR) จากผลการทดสอบ 10 สายทาง พบว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุในชั้นต่างๆ มีความแปรปรวนสูงมาก ถึงแม้ตำแหน่งทดสอบจะอยู่ห่างกันเพียง 30 เมตร บนแปลงทดสอบของสายทางเดียวกันก็ตาม ดังนั้นข้อมูลจำนวน 6 หลุม จะถูกคำนวณให้เป็นค่าเฉลี่ย DPI และค่าเฉลี่ย CBR เพื่อใช้เป็นตัวแทนความแข็งแรงของดินในสายทางนั้นๆ ดังตัวอย่างของสายทางที่ 10 (ทล.41 ไซยา - พุนพิน) ที่แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย DPI และ CBR ของแต่ละสายทางในแต่ละรอบการทดสอบแล้ว ความแปรปรวนลดลงมาก ค่าเฉลี่ยในรอบที่ 1 มีความแตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยในรอบที่ 2 อยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องจากค่า DPI และ CBR ขึ้นอยู่กับระดับความชื้นของดิน การทดสอบ 2 รอบ ห่างกัน 51 วันนี้ ดินอาจมีความชื้นแตกต่างกัน

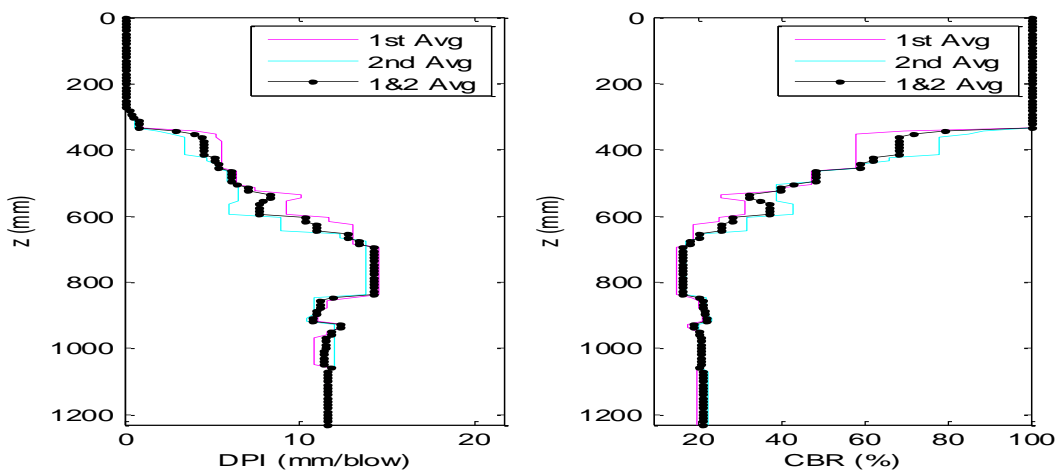


- ◆ ตำแหน่งดกทดสอบ DCP รอบที่1
- ◆ ตำแหน่งดกทดสอบ DCP รอบที่2

(ก) ตำแหน่งทดสอบ DCP 2 รอบ



(ข) ค่า DPI (mm/blow) และ CBR (%) ของ 6 หลุม 2 รอบ



(ค) ค่าเฉลี่ย DPI (mm/blow) และ CBR (%) ในแต่ละรอบ

รูปที่ 6 ตัวอย่างผลการทดสอบ DCP ของสายทางที่ 10 (ทล.41 ชัยยา - พุนพิน)

### 3. การออกแบบสูตรส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตและการทดสอบคุณสมบัติของก้อนตัวอย่าง

โครงการนี้ได้คัดเลือกหินจากแหล่งวัสดุต่างๆ ให้มีความหลากหลาย สามารถใช้เป็นตัวแทนคุณภาพวัสดุหินของประเทศไทยได้ โดยแหล่งวัสดุจะแบ่งออกเป็น 5 พื้นที่ ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลางรวมกับภาคตะวันตก ภาคตะวันออก และภาคใต้ โดยคัดเลือกพื้นที่ละ 2 แหล่งวัสดุ และนำหินดังกล่าวมาออกแบบสูตรส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ (Superpave) ตามคู่มือ MS-2 Asphalt Mix Design, 7<sup>th</sup> Edition, Asphalt Institute (2014) โดยการออกแบบสูตรส่วนผสมจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มปริมาณจราจรปานกลาง และ กลุ่มปริมาณจราจรสูง และในแต่ละระดับปริมาณจราจรจะออกแบบผิวทางจำนวน 2 ชั้น คือ Wearing Course (NMAS 12.5 มม. Coarse Gradation) และ Binder Course (NMAS 19.0 มม. Coarse Gradation) เกรดยางที่ใช้จะเป็น AC60-70 ทั้งหมด ยกเว้น Wearing Course ของกลุ่มปริมาณจราจรสูงจะใช้ยาง PMA โดยแต่ละชั้นผิวทางจะใช้หินจาก 5 พื้นที่ในการออกแบบ รวมทั้งสิ้น 20 สูตรส่วนผสม ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อมูลวัสดุที่ใช้ออกแบบสูตรส่วนผสมรองรับปริมาณจราจรปานกลางและสูง

พื้นที่	ปริมาณจราจรปานกลาง (3-10 ล้าน ESALs)				ปริมาณจราจรสูง (10-30 ล้าน ESALs)			
	แหล่งวัสดุ	วัสดุ มวลรวม	ชั้นทาง	ยาง แอสฟัลต์	แหล่งวัสดุ	วัสดุ มวล	ชั้นทาง	ยาง แอสฟัลต์
เหนือ	โรงโม่ หจก. แพร์ วิศวกรรม 97 จ.แพร์	หินปูน	BC	AC 60-70	โรงโม่ หจก. เชียงใหม่ ไท่เชียง จ.เชียงใหม่	หินปูน	BC	AC 60-70
			WC	AC 60-70			WC	PMA
ตะวันออกเฉียงเหนือ	โรงโม่ ศิลาต้อยตึง จ.หนองบัวลำภู	หินปูน	BC	AC 60-70	โรงโม่ หจก. ย่งฉิ่ง สุรินทร์ จ.สุรินทร์	หินปะ ชอล์ค	BC	AC 60-70
			WC	AC 60-70			WC	PMA
กลาง+ตก	โรงโม่ ศิลาเพิ่มพูน จ.สระบุรี	หินปูน	BC	AC 60-70	โรงโม่ ศิลาทอง จ. นครสวรรค์	หินปูน	BC	AC 60-70
			WC	AC 60-70			WC	PMA
ออก	โรงโม่ บ.ทัศนาศลบุรี จ.ชลบุรี	หินปูน	BC	AC 60-70	โรงโม่ เทพศิลา แกร เกต จ. ชลบุรี	หินแกร นิต	BC	AC 60-70
			WC	AC 60-70			WC	PMA
ใต้	โรงโม่ ผาทองทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช	หินปูน	BC	AC 60-70	โรงโม่ บ.เอส.ซี.จี (1995) จ.สุราษฎร์ธานี	หินปูน	BC	AC 60-70
			WC	AC 60-70			WC	PMA

การออกแบบสูตรส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตของโครงการเริ่มต้นโดยตรวจสอบคุณสมบัติหิน ทั้ง Consensus Properties และ Source Properties และนำหินไปทดลองออกแบบสูตรส่วนผสม (Trial Mixes) ที่ 4 ระดับปริมาณยาง จากนั้นตรวจสอบคุณสมบัติเชิงปริมาตร (Volumetric Properties) และทดสอบความสามารถต้านทานความชื้น (Moisture Susceptibility) โดยเงื่อนไขการตรวจสอบได้สรุปไว้ในตารางที่ 5

**ตารางที่ 5 เงื่อนไขการตรวจสอบคุณสมบัติหินและสูตรส่วนผสมที่ออกแบบของโครงการ**

กลุ่มการ ตรวจสอบ	รายการ	เอกสารอ้างอิง	ระดับปริมาณการจราจร	
			ปานกลาง 3-10 ล้าน ESALs	สูง 10-30 ล้าน ESALs
Consensus Properties	Coarse Aggregate Angularity, CAA (%)	AASHTO T 335	≥ 85/80	≥ 95/90
	Fine Aggregate Angularity, FAA (%)	AASHTO T 304	≥ 45	≥ 45
	Sand Equivalent, SE (%)	AASHTO T 176	≥ 45	≥ 45
	Flat and Elongation, F&E (%)	ASTM D 4791	≤ 10	≤ 10
Source Properties	Los Angeles Abrasion (%)	AASHTO T 96	≤ 30	≤ 30
	Sodium or Magnesium Sulfate Soundness (%)	AASHTO T 104	≤ 15	≤ 15
	Clay Lumps/Friable Particles	AASHTO T 112	≤ 3	≤ 2
	Lightweight Particles	AASHTO T 113	≤ 3	≤ 2

ตารางที่ 5 เงื่อนไขการตรวจสอบคุณสมบัติหินและสูตรส่วนผสมที่ออกแบบของโครงการ (ต่อ)

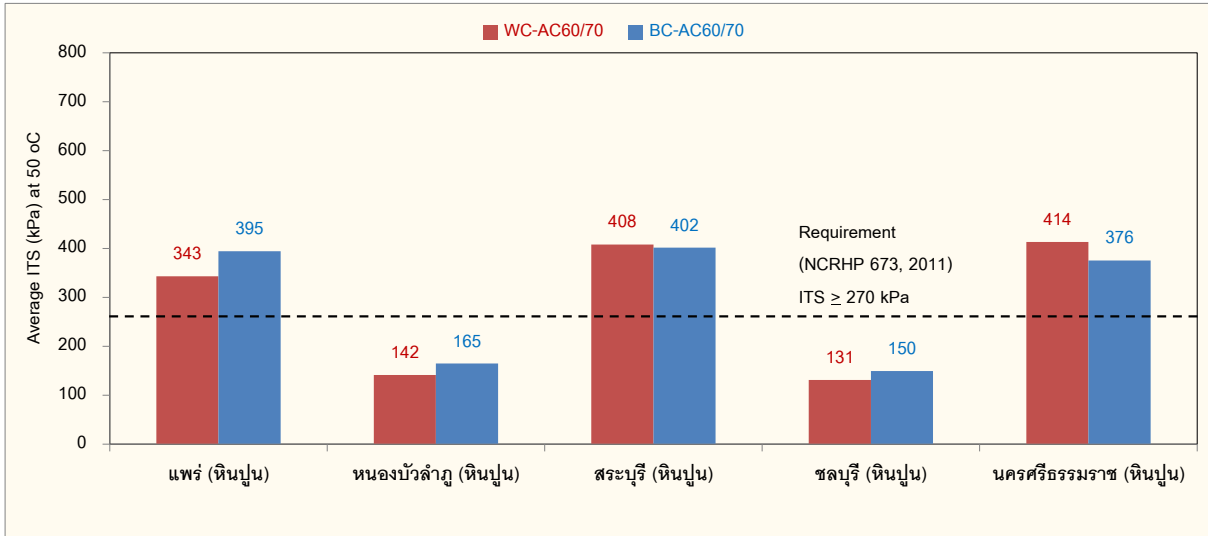
กลุ่มการตรวจสอบ	รายการ	เอกสารอ้างอิง	ระดับปริมาณการจราจร	
			ปานกลาง 3-10 ล้าน ESALs	สูง 10-30 ล้าน ESALs
Volumetric Properties	Theoretical Maximum Density, $G_{mm}$ (%) ที่ $N_{initial}$	MS-2, AI 2014	$\leq 89.0$	$\leq 89.0$
	Theoretical Maximum Density, $G_{mm}$ (%) ที่ $N_{design}$		96.0	96.0
	Theoretical Maximum Density, $G_{mm}$ (%) ที่ $N_{max}$		$\leq 98.0$	$\leq 98.0$
	Air Void, VA (%)		4.0	4.0
	Void Filled with Asphalt, VFA (%)		65-75	65-75
	Dust-to-Binder Ratio, DP (%)		0.6-1.2	0.6-1.2
	Void in Mineral Aggregate, VMA (%)		$\geq 14.0$ for NMAS 12.5 mm $\geq 13.0$ for NMAS 19.0 mm	
Moisture Susceptibility	Tensile Strength Ratio, TSR	AASHTO T 283	$\geq 80\%$	$\geq 80\%$
IDT-HT	Indirect Tensile Strength at High Temperatures	NCHRP 673, 2011	$\geq 270$ kPa	$\geq 380$ kPa

คู่มือการออกแบบซูเปอร์เพฟของ MS-2 (AI, 2014) แนะนำการประเมินความสามารถทางด้านทานร่องล้อ (Rutting Resistance) ด้วยวิธีการทดสอบ Flow Number ซึ่งจะใช้น้ำหนัก 600 kPa กดบนก้อนตัวอย่างแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) โดยมีระยะเวลาให้น้ำหนัก (Load Duration) 0.1 วินาที และระยะพัก (Rest Period) 0.9 วินาที ทดสอบแบบไม่มีแรงกระทำด้านข้าง (Unconfined Test) แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านเครื่องมือทดสอบที่ไม่สามารถให้น้ำหนักได้สูงถึง 600 kPa อย่างปลอดภัย โครงการนี้จึงได้

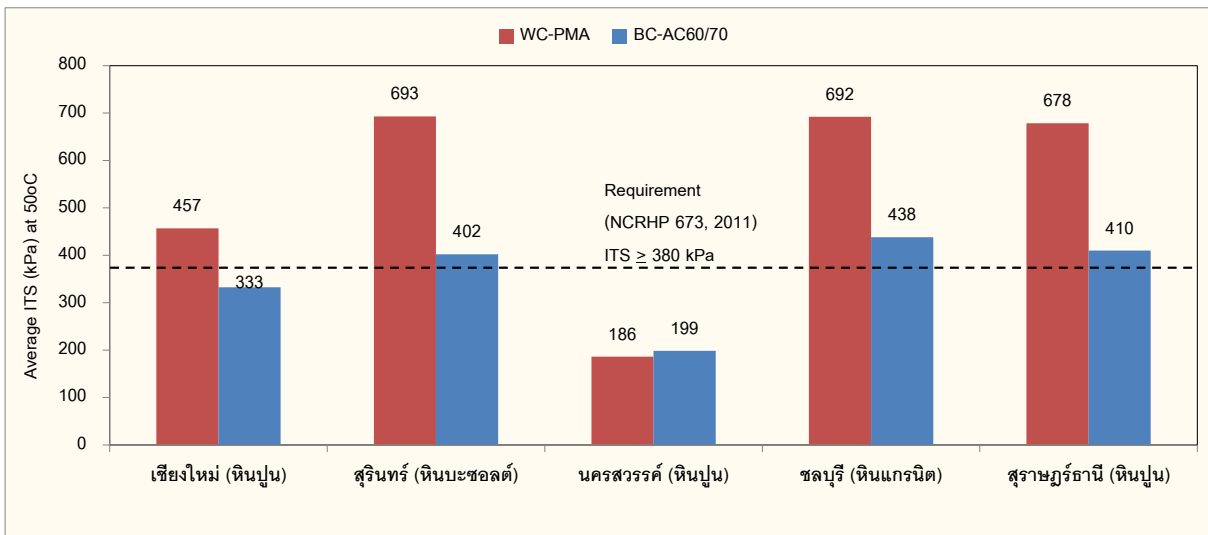
เลือกใช้วิธี Indirect Tensile Strength at High Temperatures (IDT-HT) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบที่แนะนำโดย  
คู่มือการออกแบบสูตรส่วนผสมจากเอกสาร NCHRP Report 673 (2011)

วิธีการทดสอบ IDT-HT มีความสะดวกในทางปฏิบัติ สามารถกระทำได้อย่างรวดเร็ว เหมาะสมที่จะ  
ใช้เป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบสูตรส่วนผสม อย่างไรก็ตามโครงการวิจัยนี้จะใช้เกณฑ์ผ่าน (Passing  
Criteria) ที่แนะนำโดย NCHRP Report 673 เพื่อประเมินความสามารถของสูตรส่วนผสมที่ออกแบบเท่านั้น  
กรณีที่สูตรส่วนผสมไม่ผ่านการประเมินดังกล่าว จะไม่มีการแก้ไขสูตรส่วนผสมใหม่ โดยผลการประเมินสูตร  
ส่วนผสมสำหรับปริมาณจราจรปานกลางและปริมาณจราจรสูงอย่างละ 10 สูตรส่วนผสมได้แสดงไว้ใน  
รูปที่ 7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสูตรส่วนผสมสำหรับปริมาณจราจรปานกลางและปริมาณจราจรสูงผ่านการประเมิน  
6 ใน 10 และ 7 ใน 10 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าทั้งสองกลุ่มจะผ่านเกณฑ์การประเมินได้เกินกึ่งหนึ่ง แต่ก็ยังไม่  
นับว่าดีมากนัก การใช้ยาง PMA ในชั้น Wearing Course ของกลุ่มปริมาณจราจรสูง มีแนวโน้มทำให้สูตร  
ส่วนผสมแข็งแรงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ยาง AC60-70 ในกลุ่มปริมาณจราจรปานกลาง

คู่มือ SP-2 (AI, 2001) และ MS-2 (AI, 2014) ต่างก็แนะนำระดับการบดอัดสำหรับช่วงปริมาณ  
จราจร 3-30 ล้าน ESAL ไว้ที่ 100 รอบ แต่ SP-2 (AI, 2001) ได้ให้หมายเหตุไว้ว่าผู้ออกแบบสามารถ  
เลือกใช้ระดับการบดอัด 75 รอบ สำหรับปริมาณจราจร 3-10 ล้าน ESAL ได้ตามดุลพินิจ ซึ่งโครงการนี้ได้  
เลือกใช้ 75 รอบ สำหรับปริมาณจราจรปานกลาง (3-10 ล้าน ESAL) และ 100 รอบ สำหรับปริมาณจราจร  
สูง (10-30 ล้าน ESAL) เพื่อแยกระดับความสามารถของสูตรส่วนผสม และเพื่อให้สอดคล้องกับระดับบด  
อัดที่เคยใช้ในงานวิจัยของกรมทางหลวงในอดีต หินที่ใช้ในการออกแบบสูตรส่วนผสมสำหรับปริมาณจราจร  
ปานกลางล้วนเป็นหินปูน ซึ่งมีใช้หินที่มีคุณภาพสูงมากนั้น ดังนั้นทั้งระดับการบดอัดที่น้อยกว่าค่าปกติและ  
คุณภาพของหินที่ไม่สูงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความสามารถต้านทานร่องล้อของบางสูตรส่วนผสมสำหรับ  
ปริมาณจราจรปานกลางไม่ผ่านการประเมิน ในกรณีกลุ่มปริมาณจราจรสูง สังเกตได้ว่าถ้าหิน  
คุณภาพสูง คือ หินแกรนิตและหินบะซอลต์ ไม่ว่าจะใช้ออกแบบ Wearing Course ด้วยยาง PMA หรือ  
Binder Course ด้วยยาง AC60-70 ล้วนผ่านการทดสอบ (ผ่าน 4 ใน 4) ส่วนการใช้หินปูนในการออกแบบ  
อาจผ่านหรือไม่ผ่านก็ได้ (ผ่าน 3 ใน 6)



(ก) สูตรส่วนผสมสำหรับปริมาณจราจรปานกลาง

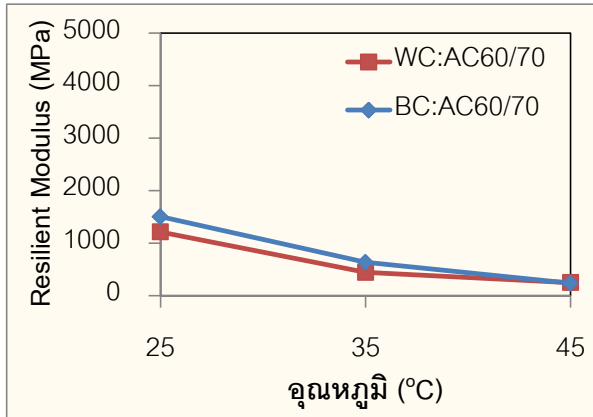


(ข) สูตรส่วนผสมสำหรับปริมาณจราจรสูง

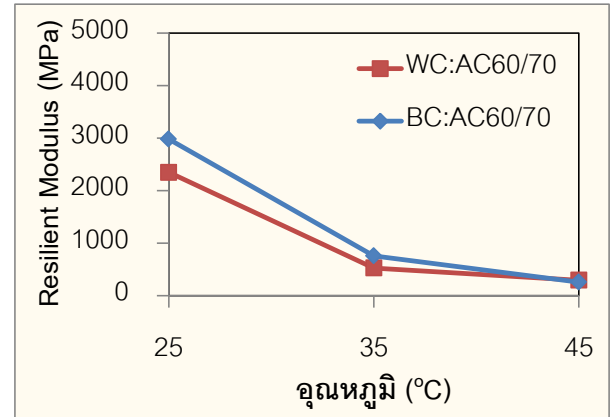
### รูปที่ 7 ผลการประเมินความต้านทานการเกิดร่องล้อของสูตรผสมด้วยวิธี Indirect Tensile Strength at High Temperatures (50 °C)

โครงการนี้ได้ผลิตก้อนตัวอย่างตามสูตรส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้จำนวน 20 สูตร และนำไปทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่ 3 ระดับอุณหภูมิ คือ 25, 35 และ 45 °C โดยผลการทดสอบสูตรส่วนผสมสำหรับปริมาณจราจรปานกลางและปริมาณจราจรสูงได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 และ รูปที่ 9 ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า 1) ค่าโมดูลัสของก้อนตัวอย่างจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการอ่อนตัวของยาง 2) ระดับการบดอัด 100 รอบ ของกลุ่มปริมาณจราจรสูง โดยทั่วไปมีแนวโน้มให้ค่าโมดูลัสสูงกว่า ระดับการบดอัด 75 รอบ ของกลุ่มปริมาณจราจรปานกลาง เนื่องจากโครงสร้างของก้อนตัวอย่างที่บดอัดด้วยจำนวนรอบมากกว่าโดยทั่วไปจะแข็งแรงกว่า 3) ในกลุ่มปริมาณจราจรปานกลาง ค่าโมดูลัสของชั้น Wearing Course และ Binder Course ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน แต่ในกลุ่มปริมาณจราจรสูง

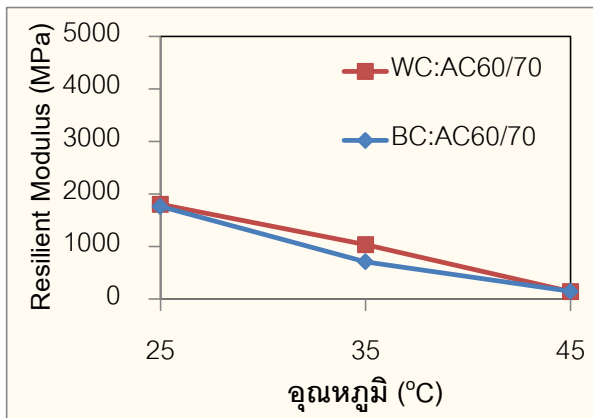
การใช้ยาง PMA สำหรับชั้น Wearing Course มีแนวโน้มให้ค่าโมดูลัสสูงกว่ากลุ่ม Binder Course ที่ใช้ยาง AC60-70 ทั้งนี้เนื่องจากยาง PMA มีความแข็งกว่ายาง AC60-70



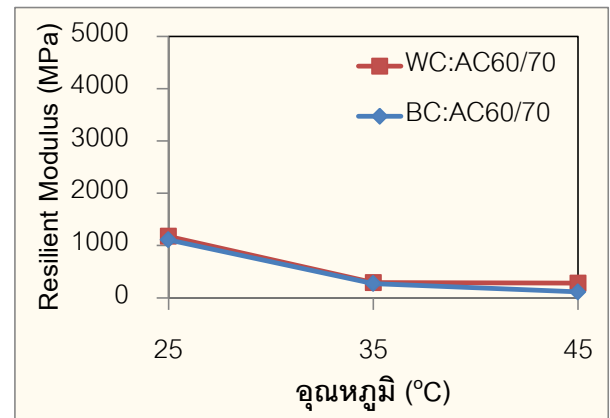
(ก) หินปูน-แพร์



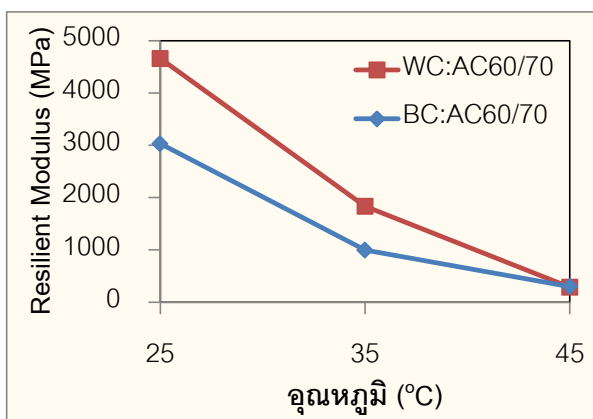
(ข) หินปูน-หนองบัวลำภู



(ค) หินปูน-สระบุรี

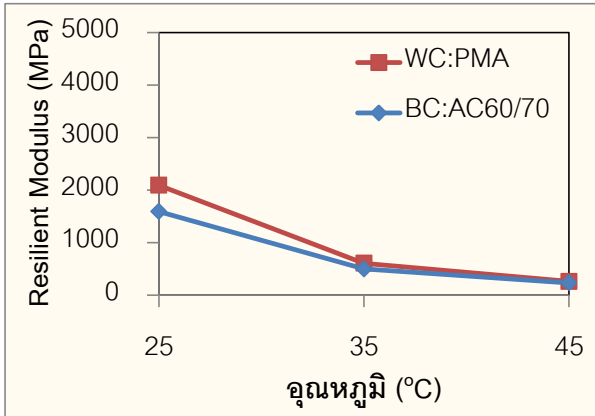


(ง) หินปูน-ชลบุรี

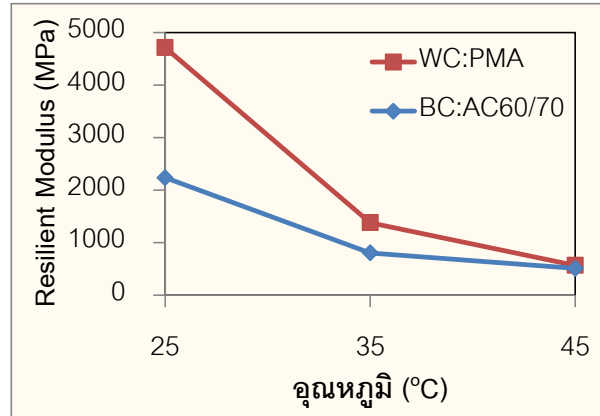


(จ) หินปูน-นครศรีธรรมราช

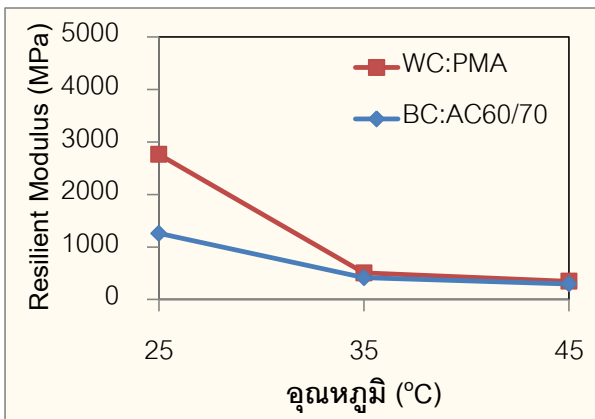
รูปที่ 8 ค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของสูตรส่วนผสมรองรับปริมาณจราจรปานกลาง



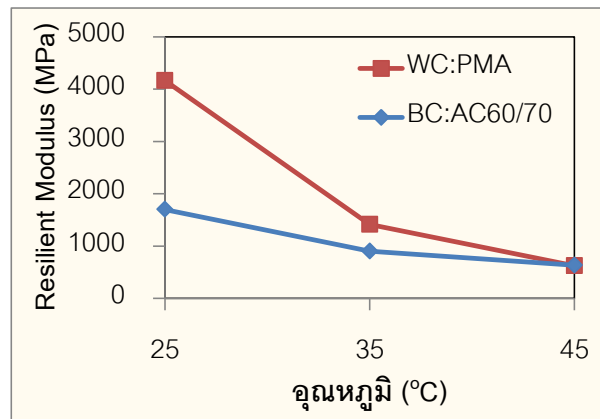
(ก) หินปูน-เซียงใหม่



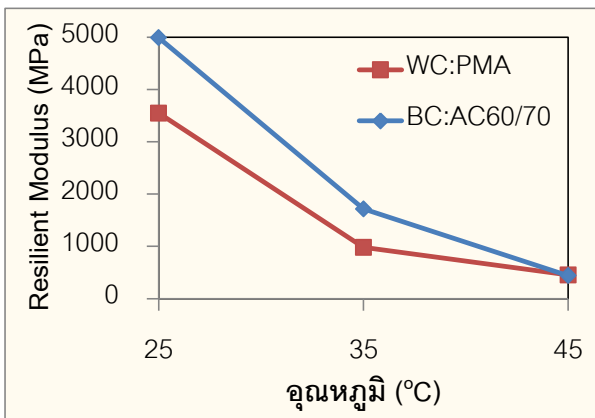
(ข) หินบะซอลต์-สุรินทร์



(ค) หินปูน-นครสวรรค์



(ง) หินแกรนิต-ชลบุรี

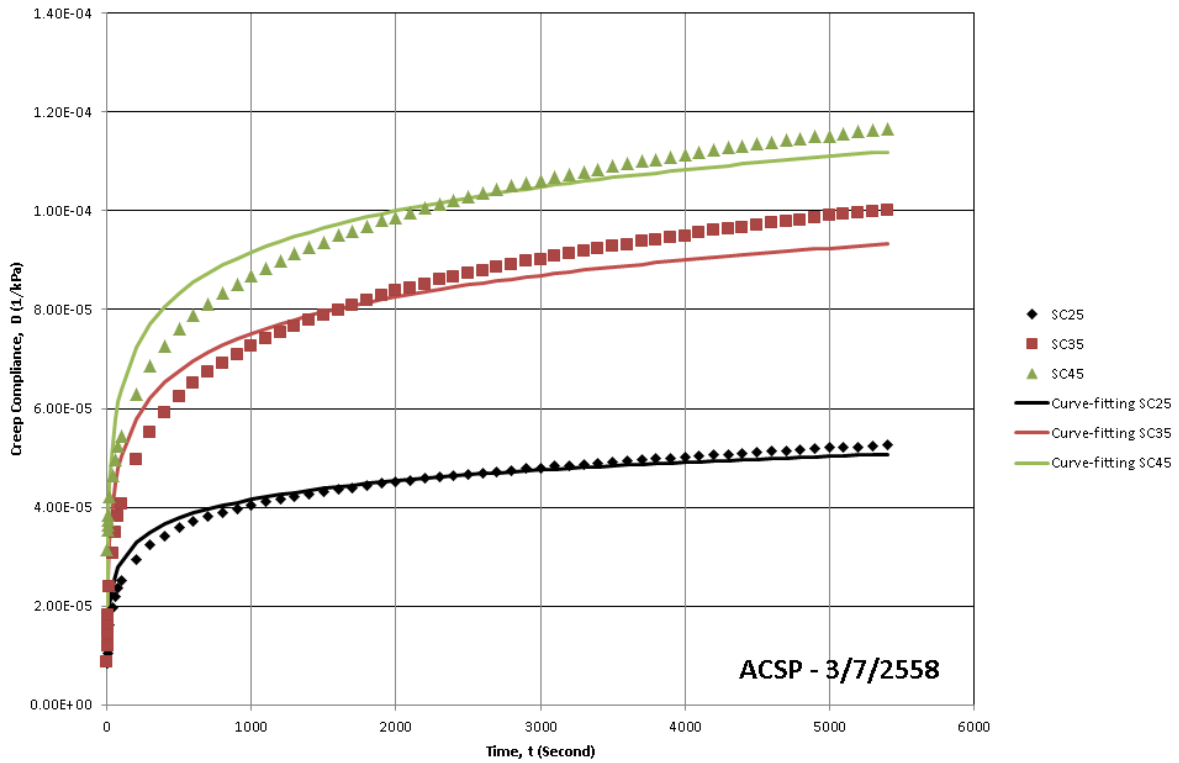


(จ) หินปูน-สุราษฎร์ธานี

**รูปที่ 9 ค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของสูตรส่วนผสมรองรับปริมาณจราจรสูง**

นอกจากนี้ยังได้ผลิตก้อนตัวอย่างตามสูตรส่วนผสมที่ออกแบบไว้จำนวน 20 สูตร และนำไปทดสอบหา Creep Compliance ที่ 3 ระดับอุณหภูมิ คือ 25, 35 และ 45 °C โดยตัวอย่างผลการทดสอบของสูตรส่วนผสมที่ใช้หินปูน ชลบุรี และยาง AC60-70 ในการออกแบบชั้น Binder course รองรับปริมาณจราจรปานกลางได้แสดงไว้ในรูปที่ 10 และผลการวิเคราะห์สมการ Creep Compliance ทั้งหมด สำหรับปริมาณจราจรปานกลางและปริมาณจราจรสูงได้แสดงไว้ในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 ตามลำดับ ซึ่ง Creep

Compliance เป็นคุณสมบัติทางกลศาสตร์อย่างหนึ่งของวัสดุวิสโคอีลาสติก อธิบายถึงการเสียรูปของวัสดุที่แปรเปลี่ยนตามเวลาและอุณหภูมิ สามารถนำข้อมูลไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมวัสดุได้



รูปที่ 10 ตัวอย่าง Creep Compliance ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 °C ของสูตรส่วนผสมชั้น Binder Course ที่ใช้ยาง AC60-70 กับหินปูนชลบุรี ออกแบบรองรับปริมาณการจราจรปานกลาง

ตารางที่ 6 Creep Compliance ของสูตรส่วนผสมสำหรับปริมาณจราจรปานกลาง

พื้นที่	แหล่งวัสดุในโครงการ	ชนิดมวลรวม	ชั้นทาง	ชนิดยางแอสฟัลต์	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	Target Stress (kPa)	Static Creep Test (NCHRP 465-Appendix C)		
							Least Squares	Intercept	Slope
เหนือ	โรงไม่ หจก. แพร่วิศวกรรม 97 จ.แพร่	หินปูน	BC	AC 60-70	25	70.0	$D(t) = 2.25 \times 10^{-5} \log(t) + 6.98 \times 10^{-6}$	6.98E-06	2.25E-05
					35	30.0	$D(t) = 2.22 \times 10^{-5} \log(t) + 6.95 \times 10^{-6}$	6.95E-06	2.22E-05
					45	30.0	$D(t) = 2.04 \times 10^{-5} \log(t) + 6.18 \times 10^{-6}$	6.18E-06	2.04E-05
			WC	AC 60-70	25	70.0	$D(t) = 1.37 \times 10^{-5} \log(t) + 4.29 \times 10^{-6}$	4.29E-06	1.37E-05
					35	30.0	$D(t) = 9.52 \times 10^{-6} \log(t) + 2.99 \times 10^{-6}$	2.99E-06	9.52E-06
					45	30.0	$D(t) = 3.35 \times 10^{-5} \log(t) + 1.03 \times 10^{-5}$	1.03E-05	3.35E-05
อีสาน	โรงไม่ ศิลาด้อยตี่ง จ.หนองบัวลำภู	หินปูน	BC	AC 60-70	25	100.0	$D(t) = 7.14 \times 10^{-6} \log(t) + 2.32 \times 10^{-6}$	2.32E-06	7.14E-06
					35	60.0	$D(t) = 3.60 \times 10^{-6} \log(t) + 1.24 \times 10^{-6}$	1.24E-06	3.60E-06
					45	30.0	$D(t) = 1.24 \times 10^{-5} \log(t) + 3.97 \times 10^{-6}$	3.97E-06	1.24E-05
			WC	AC 60-70	25	90.0	$D(t) = 4.25 \times 10^{-6} \log(t) + 1.42 \times 10^{-6}$	1.42E-06	4.25E-06
					35	60.0	$D(t) = 9.47 \times 10^{-6} \log(t) + 3.02 \times 10^{-6}$	3.02E-06	9.47E-06
					45	30.0	$D(t) = 7.02 \times 10^{-6} \log(t) + 2.26 \times 10^{-6}$	2.26E-06	7.02E-06
กลาง/ตก	โรงไม่ ศิลาด้อยตี่ง จ.สระบุรี	หินปูน	BC	AC 60-70	25	80.0	$D(t) = 8.37 \times 10^{-6} \log(t) + 2.67 \times 10^{-6}$	2.67E-06	8.37E-06
					35	30.0	$D(t) = 8.02 \times 10^{-6} \log(t) + 2.80 \times 10^{-6}$	2.80E-06	8.02E-06
					45	30.0	$D(t) = 1.63 \times 10^{-5} \log(t) + 5.14 \times 10^{-6}$	5.14E-06	1.63E-05
			WC	AC 60-70	25	70.0	$D(t) = 9.11 \times 10^{-6} \log(t) + 2.88 \times 10^{-6}$	2.88E-06	9.11E-06
					35	20.0	$D(t) = 6.84 \times 10^{-6} \log(t) + 2.18 \times 10^{-6}$	2.18E-06	6.84E-06
					45	30.0	$D(t) = 6.44 \times 10^{-6} \log(t) + 2.08 \times 10^{-6}$	2.08E-06	6.44E-06
ออก	โรงไม่ บ.ทัศนากลบุรี จ.ชลบุรี	หินปูน	BC	AC 60-70	25	70.0	$D(t) = 1.25 \times 10^{-5} \log(t) + 3.94 \times 10^{-6}$	3.94E-06	1.25E-05
					35	30.0	$D(t) = 2.48 \times 10^{-5} \log(t) + 8.63 \times 10^{-7}$	8.63E-07	2.48E-05
					45	30.0	$D(t) = 2.77 \times 10^{-5} \log(t) + 8.64 \times 10^{-6}$	8.64E-06	2.77E-05
			WC	AC 60-70	25	60.0	$D(t) = 5.29 \times 10^{-6} \log(t) + 1.72 \times 10^{-6}$	1.72E-06	5.29E-06
					35	30.0	$D(t) = 1.72 \times 10^{-5} \log(t) + 5.32 \times 10^{-6}$	5.32E-06	1.72E-05
					45	30.0	$D(t) = 1.21 \times 10^{-5} \log(t) + 3.77 \times 10^{-6}$	3.77E-06	1.21E-05
ใต้	โรงไม่ ผาทองทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช	หินปูน	BC	AC 60-70	25	70.0	$D(t) = 6.11 \times 10^{-6} \log(t) + 1.96 \times 10^{-6}$	1.96E-06	6.11E-06
					35	30.0	$D(t) = 2.43 \times 10^{-5} \log(t) + 7.51 \times 10^{-6}$	7.51E-06	2.43E-05
					45	30.0	$D(t) = 9.16 \times 10^{-6} \log(t) + 2.95 \times 10^{-6}$	2.95E-06	9.16E-06
			WC	AC 60-70	25	70.0	$D(t) = 7.36 \times 10^{-6} \log(t) + 2.32 \times 10^{-6}$	2.32E-06	7.36E-06
					35	30.0	$D(t) = 1.93 \times 10^{-5} \log(t) + 5.91 \times 10^{-6}$	5.91E-06	1.93E-05
					45	30.0	$D(t) = 4.56 \times 10^{-6} \log(t) + 1.51 \times 10^{-6}$	1.51E-06	4.56E-06

ตารางที่ 7 Creep Compliance ของสูตรส่วนผสมสำหรับปริมาณจราจรสูง

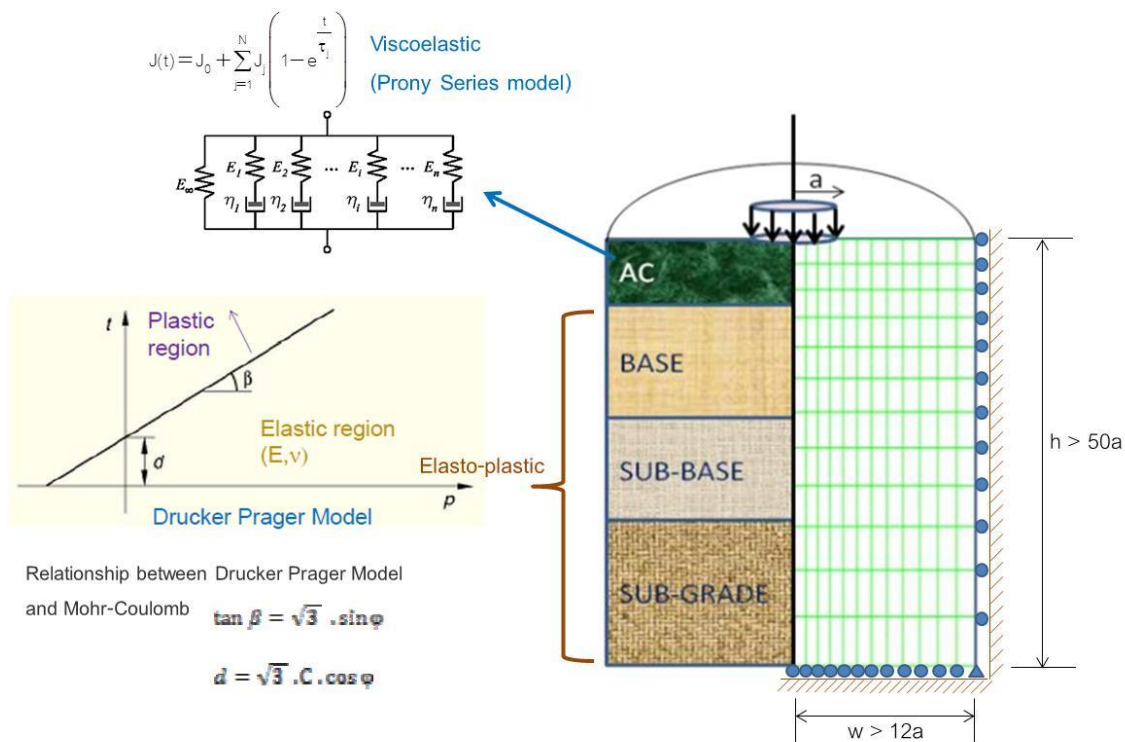
พื้นที่	แหล่งวัสดุในโครงการ	ชนิดมวลรวม	ชั้นทาง	ชนิดยางแอสฟัลต์	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	Target Stress (kPa)	Static Creep Test (NCHRP 465-Appendix C)		
							Least Squares	Intercept	Slope
เหนือ	โรงไม้ หจก. เชียงใหม่ ไร่ เชียงใหม่	หินปูน	BC	AC 60-70	25	80.0	$D(t) = 7.30 \times 10^{-6} \log(t) + 2.39 \times 10^{-6}$	2.39E-06	7.30E-06
					35	50.0	$D(t) = 1.17 \times 10^{-5} \log(t) + 4.21 \times 10^{-6}$	4.21E-06	1.17E-05
					45	30.0	$D(t) = 6.14 \times 10^{-6} \log(t) + 2.00 \times 10^{-6}$	2.00E-06	6.14E-06
			WC	PMA	25	90.0	$D(t) = 8.71 \times 10^{-6} \log(t) + 3.18 \times 10^{-6}$	3.18E-06	8.71E-06
					35	60.0	$D(t) = 9.41 \times 10^{-6} \log(t) + 3.30 \times 10^{-6}$	3.30E-06	9.41E-06
					45	30.0	$D(t) = 5.35 \times 10^{-6} \log(t) + 3.66 \times 10^{-5}$	3.66E-05	5.35E-06
อีสาน	โรงไม้ หจก. ย่งฉิ่ง สุรินทร์ จ.สุรินทร์	หินบะซอลต์	BC	AC 60-70	25	100.0	$D(t) = 4.08 \times 10^{-6} \log(t) + 1.39 \times 10^{-6}$	1.39E-06	4.08E-06
					35	60.0	$D(t) = 3.60 \times 10^{-6} \log(t) + 1.24 \times 10^{-6}$	1.24E-06	3.60E-06
					45	30.0	$D(t) = 1.24 \times 10^{-5} \log(t) + 3.97 \times 10^{-6}$	3.97E-06	1.24E-05
			WC	PMA	25	90.0	$D(t) = 4.26 \times 10^{-6} \log(t) + 1.42 \times 10^{-6}$	1.42E-06	4.26E-06
					35	60.0	$D(t) = 9.47 \times 10^{-6} \log(t) + 3.02 \times 10^{-6}$	3.02E-06	9.47E-06
					45	30.0	$D(t) = 7.02 \times 10^{-6} \log(t) + 2.26 \times 10^{-6}$	2.26E-06	7.02E-06
กลาง/ตก	โรงไม้ ศิลาทอง จ. นครสวรรค์	หินปูน	BC	AC 60-70	25	70.0	$D(t) = 1.09 \times 10^{-5} \log(t) + 3.02 \times 10^{-6}$	3.02E-06	1.09E-05
					35	50.0	$D(t) = 6.87 \times 10^{-6} \log(t) + 2.19 \times 10^{-6}$	2.19E-06	6.87E-06
					45	30.0	$D(t) = 1.02 \times 10^{-5} \log(t) + 3.38 \times 10^{-6}$	3.38E-06	1.02E-05
			WC	PMA	25	90.0	$D(t) = 7.73 \times 10^{-6} \log(t) + 2.51 \times 10^{-6}$	2.51E-06	7.73E-06
					35	70.0	$D(t) = 6.19 \times 10^{-6} \log(t) + 2.05 \times 10^{-6}$	2.05E-06	6.19E-06
					45	30.0	$D(t) = 7.38 \times 10^{-6} \log(t) + 2.53 \times 10^{-6}$	2.53E-06	7.38E-06
ออก	โรงไม้ เทพศิลา แอกริเกต จ. ชลบุรี	หินแกรนิต	BC	AC 60-70	25	80.0	$D(t) = 2.21 \times 10^{-5} \log(t) + 6.73 \times 10^{-6}$	6.73E-06	2.21E-05
					35	30.0	$D(t) = 4.66 \times 10^{-5} \log(t) + 1.42 \times 10^{-5}$	1.42E-05	4.66E-05
					45	30.0	$D(t) = 2.53 \times 10^{-5} \log(t) + 7.90 \times 10^{-6}$	7.90E-06	2.53E-05
			WC	PMA	25	90.0	$D(t) = 6.92 \times 10^{-6} \log(t) + 2.22 \times 10^{-6}$	2.22E-06	6.92E-06
					35	50.0	$D(t) = 1.43 \times 10^{-5} \log(t) + 4.49 \times 10^{-6}$	4.49E-06	1.43E-05
					45	50.0	$D(t) = 1.57 \times 10^{-5} \log(t) + 4.96 \times 10^{-6}$	4.96E-06	1.57E-05
ใต้	โรงไม้ บ.เอส.ซี.จี (1995) จ.สุราษฎร์ธานี	หินปูน	BC	AC 60-70	25	70.0	$D(t) = 1.21 \times 10^{-5} \log(t) + 3.83 \times 10^{-6}$	3.83E-06	1.21E-05
					35	30.0	$D(t) = 5.16 \times 10^{-6} \log(t) + 5.56 \times 10^{-6}$	5.56E-06	5.16E-06
					45	30.0	$D(t) = 1.30 \times 10^{-5} \log(t) + 8.08 \times 10^{-6}$	8.08E-06	1.30E-05
			WC	PMA	25	80.0	$D(t) = 8.97 \times 10^{-6} \log(t) + 2.85 \times 10^{-6}$	2.85E-06	8.97E-06
					35	50.0	$D(t) = 5.98 \times 10^{-6} \log(t) + 1.93 \times 10^{-6}$	1.93E-06	5.98E-06
					45	40.0	$D(t) = 1.71 \times 10^{-5} \log(t) + 5.28 \times 10^{-6}$	5.28E-06	1.71E-05

#### 4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างชั้นทาง

โครงการนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ในการจำลองโครงสร้างชั้นทางเพื่อวิเคราะห์หาค่าความเครียดคืนตัวในแนวตั้ง (Resilient Vertical Strain) ที่ตำแหน่งใต้แรงกระทำของการจราจร เพื่อนำไปใช้ร่วมกับสมการทำนายค่าการยุบตัวของชั้นวัสดุต่างๆ และรวมผลการยุบตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นค่าร่องล้อที่สังเกตได้ที่ผิวทาง

จากการทบทวนงานวิจัย พบว่าแบบจำลอง Axisymmetric 2D เป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพ ใช้เวลาคำนวณน้อย แต่ให้ผลใกล้เคียงกับแบบจำลอง 3D โดยมีข้อจำกัดว่าแรงกระทำจะต้องเป็นแบบวงกลมและไม่สามารถจำลองสภาพของไหล่ทางตามความเป็นจริงได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวก็นับว่ามีความละเอียดเพียงพอที่จะใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดร่องล้อได้

รูปที่ 11 แสดงแบบจำลองโครงสร้างชั้นทางที่ใช้ในโครงการ ซึ่งใช้ Axisymmetric Element ในการจำลองวัสดุชั้นต่างๆ ตั้งแต่ ผิวทาง (AC) พื้นทาง (Base) รองพื้นทางและวัสดุคัดเลือก (Sub-Base) และชั้นดินเดิม (Sub-Grade) ขนาดของแบบจำลองมีความกว้างมากกว่า 12a และมีความสูงมากกว่า 50a โดยที่ a คือ รัศมีของผิวล้อสัมผัส สภาพขอบด้านข้างจะถูกกำหนดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวนอน และที่ขอบด้านล่างจะถูกกำหนดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ซึ่งงานวิจัยในอดีตได้ระบุว่าการกำหนดสภาพขอบที่อยู่ไกลจากบริเวณที่ให้น้ำหนักที่เพียงพอ (มากกว่า 12a และ 50a) จะไม่ส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทาง



รูปที่ 11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างชั้นทางเพื่อทำนายการเกิดร่องล้อ

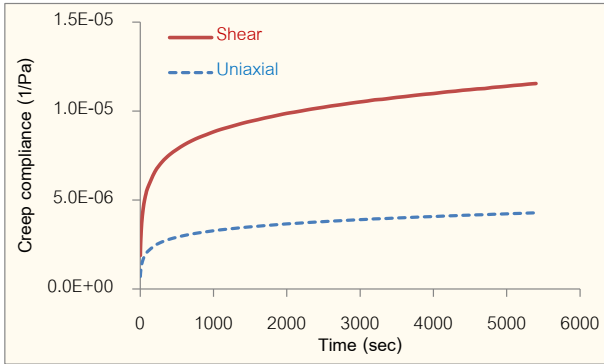
พฤติกรรมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะจำลองด้วยวัสดุวิสโคอิลาสติกโดยใช้แบบจำลอง Prony Series ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีตมากที่สุด ส่วนวัสดุในชั้นอื่นๆที่อยู่ด้านล่าง อันได้แก่ พื้นทาง รองพื้นทาง วัสดุคัดเลือก และชั้นดินเดิม จะจำลองด้วย Drucker Prager Model โดยค่า Cohesion และ Friction Angle สำหรับแบบจำลองดังกล่าวจะใช้ค่าทั่วไปของดินงานทาง (Typical Soil Parameters) จากเอกสาร Theyse et al (1996) แรงกระทำจากล้อรถบรรทุกจะจำลองด้วยน้ำหนักแผ่นสม่ำเสมอรูปวงกลม โดยสมมุติให้ล้อมีแรงดันลมยาง 600 kPa (กรณีปกติ) และ 900 kPa (กรณีบรรทุกเกินพิกัดที่กฎหมายกำหนด)

ผลการทดสอบ Uniaxial Creep Test ของ 20 สูตรส่วนผสม ที่ได้ออกแบบไว้ จะนำมายุบรวมกันเป็น 4 กลุ่มวัสดุ เพื่อใช้เป็นตัวแทนแอสฟัลต์คอนกรีตที่นิยมใช้งานของกรมทางหลวง

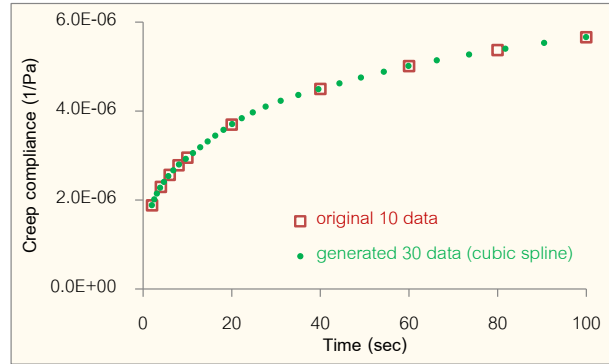
1. MBC: กลุ่มปริมาณจากราปานกลาง, Binder Course, ใช้ยาง AC60-70, Coarse Gradation
2. MWC: กลุ่มปริมาณจากราปานกลาง, Wearing Course, ใช้ยาง AC60-70, Coarse Gradation
3. HBC: กลุ่มปริมาณจากราจรสูง, Binder Course, ใช้ยาง AC60-70, Coarse Gradation
4. HWC: กลุ่มปริมาณจากราจรสูง, Wearing Course, ใช้ยาง PMA, Coarse Gradation

โดยในแต่ละกลุ่มวัสดุ และในแต่ละระดับอุณหภูมิ (25, 35, 45 °C) จะวิเคราะห์หา Uniaxial Creep Compliance 3 ระดับ คือ เส้นขีดล่าง (Lower Bound Curve) เส้นกลาง (Mean Curve) และเส้นขีดบน (Upper Bound Curve) และแปลงค่า Uniaxial Creep Compliance,  $D(t)$  ให้เป็น Shear Creep Compliance,  $J(t)$  จากนั้นใช้ Nonlinear Least Square Method ในการคาร์ริเบตหาชุดพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดที่จะทำให้ผลการจำลองของ Prony Series ใกล้เคียงกับผลทดสอบมากที่สุด ตัวอย่างการคาร์ริเบตพารามิเตอร์แสดงในรูปที่ 12

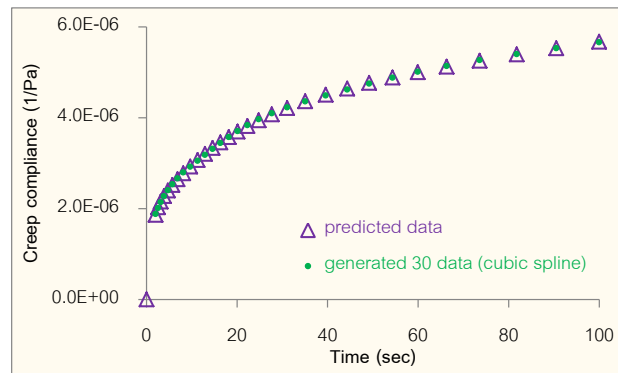
สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของ 10 สายทาง ที่ปรึกษาได้ทดลองใช้ค่าโมดูลัสที่ได้จากโปรแกรม ELMOD ( $E_{ELMOD}$ ) ที่ 3 ระดับน้ำหนัก (566, 707 และ 849 kPa) ในการคาร์ริเบตหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Prony Series แต่พบว่า 3 ระดับน้ำหนัก ถึงแม้จะให้ความเร็วการให้น้ำหนัก (Stress Rate) แตกต่างกัน แต่ช่วงความแตกต่างยังน้อยเกินไป ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของ Prony Series ที่วิเคราะห์ได้จึงไม่มีรูปแบบจำเพาะ (No Uniqueness) จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง Prony Series 1-5 ที่มีความแตกต่างกันมากดังรูปที่ 13 ล้วนสามารถจำลองการทดสอบ Resilient Modulus และให้ค่า  $E_{Ri}$  (Instantaneous Resilient Modulus) ได้ใกล้เคียงกับค่า  $E_{ELMO}$  หากนำแบบจำลอง 1-5 มาทำนายพฤติกรรมของถนนภายใต้ความเร็วการจราจรในระดับต่างๆ ดังรูปที่ 14 จะได้พฤติกรรมใกล้เคียงกันที่ความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วการทดสอบ FWD เท่านั้น (30 มิลลิวินาที หรือ 35 กม./ชม.) แต่ที่ระดับความเร็วอื่นๆ ไม่สามารถระบุได้ว่าแบบจำลองตัวไหน (1-5) จะให้พฤติกรรมของผิวทางจริงที่ได้ทดสอบ FWD



(ก) แปลงข้อมูล Uniaxial Data ให้เป็น Shear Data

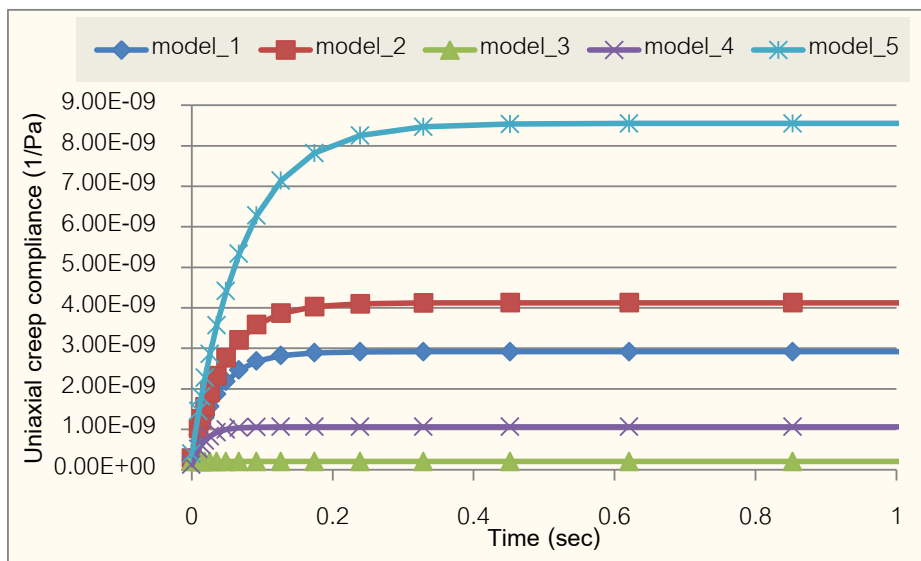


(ข) ใช้ Cubic Spline Function เพิ่มข้อมูลเริ่มต้น 10 ค่า เป็น 30 ค่า (หนาแน่นช่วงต้นและเบาบางช่วงปลาย)

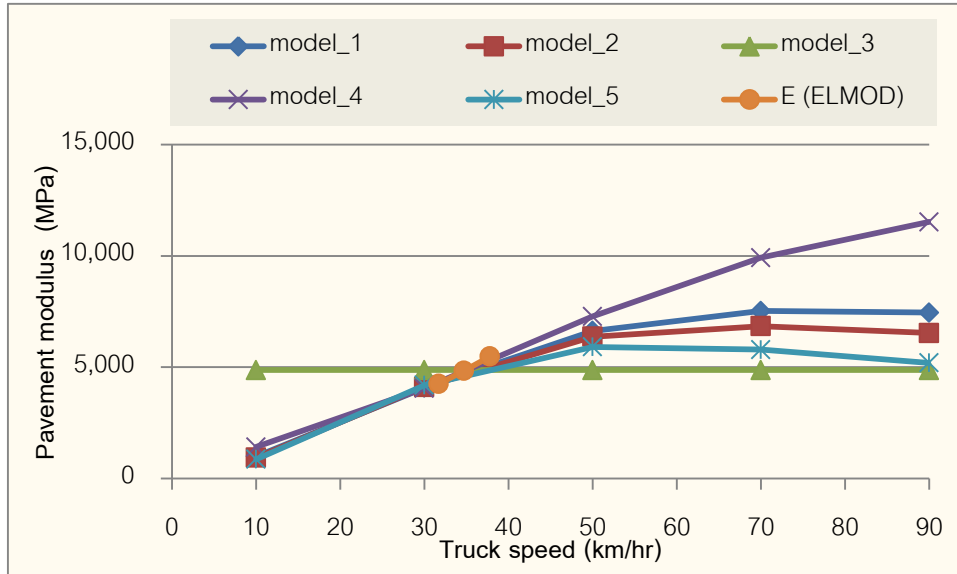


(ค) ใช้ Nonlinear Least Square Method คาริเบตหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับแบบจำลอง Proney Series

รูปที่ 12 ตัวอย่างการคาริเบต Proney Series Parameters โดยใช้เส้นกลาง (Mean Curve) ของกลุ่มวัสดุ HBC ที่อุณหภูมิ 25 °C

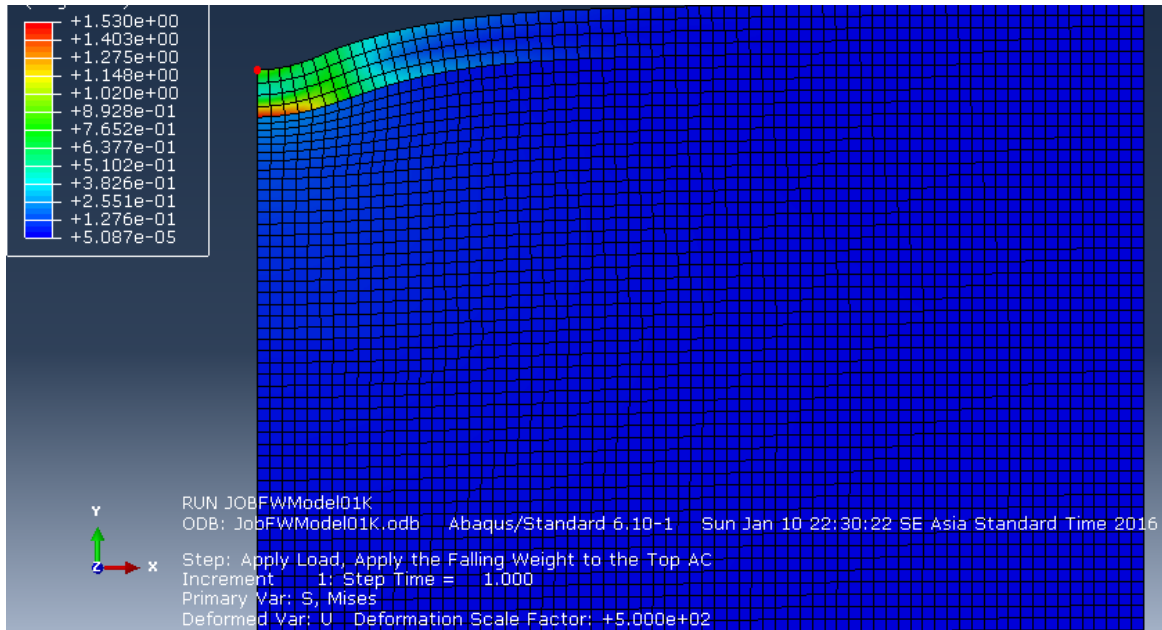


รูปที่ 13 Uniaxial Creep Compliance ของ Model 1-5 ที่ให้ค่า  $E_{RI}$  ใกล้เคียงกับ  $E_{ELMOD}$

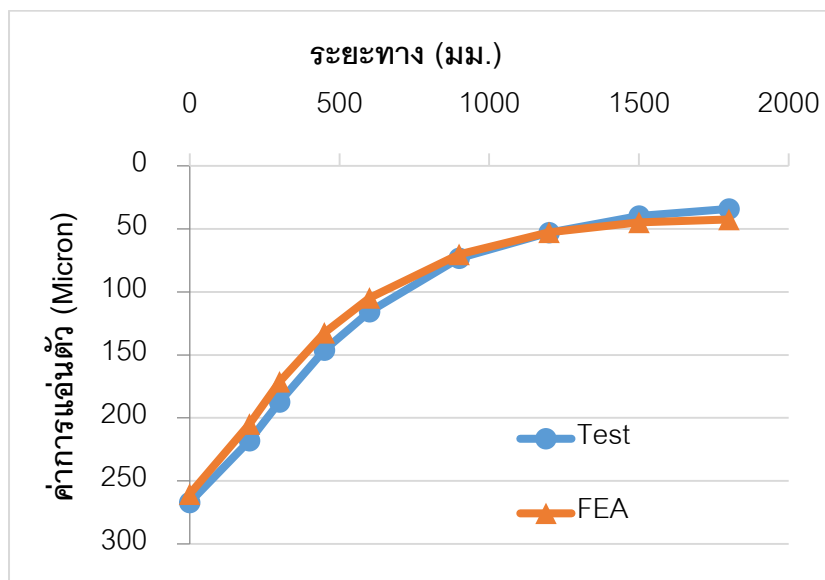


รูปที่ 14 ผลการจำลองค่า  $E_{RI}$  ที่เกิดจากรถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็วต่างๆ โดยใช้ Creep Compliance Model 1-5

ดังนั้นแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของโครงสร้างชั้นทางจำนวน 10 สายทาง จะใช้ค่า  $E_{ELMOD}$  และความหนาที่ได้จากผลการวิเคราะห์ FWD เป็นค่าตั้งต้น จากนั้นทำการปรับแก้พารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลอง เพื่อให้ผลการทำนายค่าการแอ่นตัวสอดคล้องกับชุดข้อมูลการแอ่นตัวที่ทดสอบด้วย FWD ที่ อุณหภูมิผิวทางใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวทาง (35 °C) มากที่สุด ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 15 และจะใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ได้ปรับแก้แล้วในการทำนายการเกิดร่องล้อในชั้นตอถัดไป



(ก) ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัว (Deflection curve)



(ข) การเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบ FWD

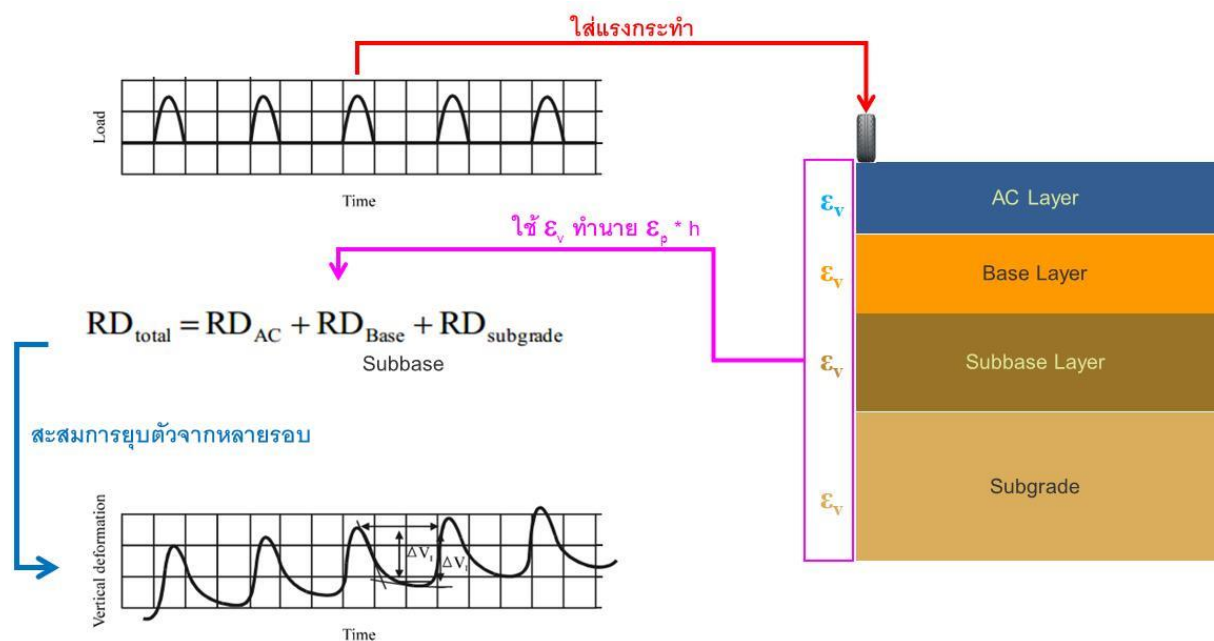
รูปที่ 15 ตัวอย่างการปรับแก้แบบจำลองโครงสร้างชั้นทางโดยใช้ข้อมูลการทดสอบ FWD ของสายทางที่ 10 ทล.41 ไซยา-พูนพิน

## 5. การประเมินความสามารถของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในการต้านทานการเกิดร่องล้อ

การประเมินการเกิดร่องล้อของโครงการนี้จะใช้วิธี MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) ดังรูปที่ 16 วิธีนี้จะใช้ค่าความเครียดในแนวดิ่งที่กึ่งกลางของแต่ละชั้นวัสดุที่เกิดจากล้อรถบรรทุกวิ่งผ่านในการทำนายความเครียดถาวร (Permanent Strain) ซึ่งเมื่อนำมาคูณกับความหนาของ

แต่ละชั้นวัสดุ จะได้ค่าการยุบตัวถาวรของวัสดุในชั้นนั้นๆ และรวมผลการยุบตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดความลึกโครงสร้างชั้นทางจะได้อัตราการเกิดร่องล้อ (Rutting) ที่สังเกตได้บนผิวทาง การประเมินความสามารถของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในการต้านทานการเกิดร่องล้อของโครงการนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การทำนายการเกิดร่องล้อของถนนทางหลวงก่อสร้างใหม่โดยอาศัยผลทดสอบสูตรส่วนผสมที่ออกแบบด้วยวิธีซูเปอร์เพพ
2. การทำนายการเกิดร่องล้อของ 10 สายทาง ที่เปิดให้บริการไปแล้วโดยอาศัยผลทดสอบ FWD จากภาคสนาม



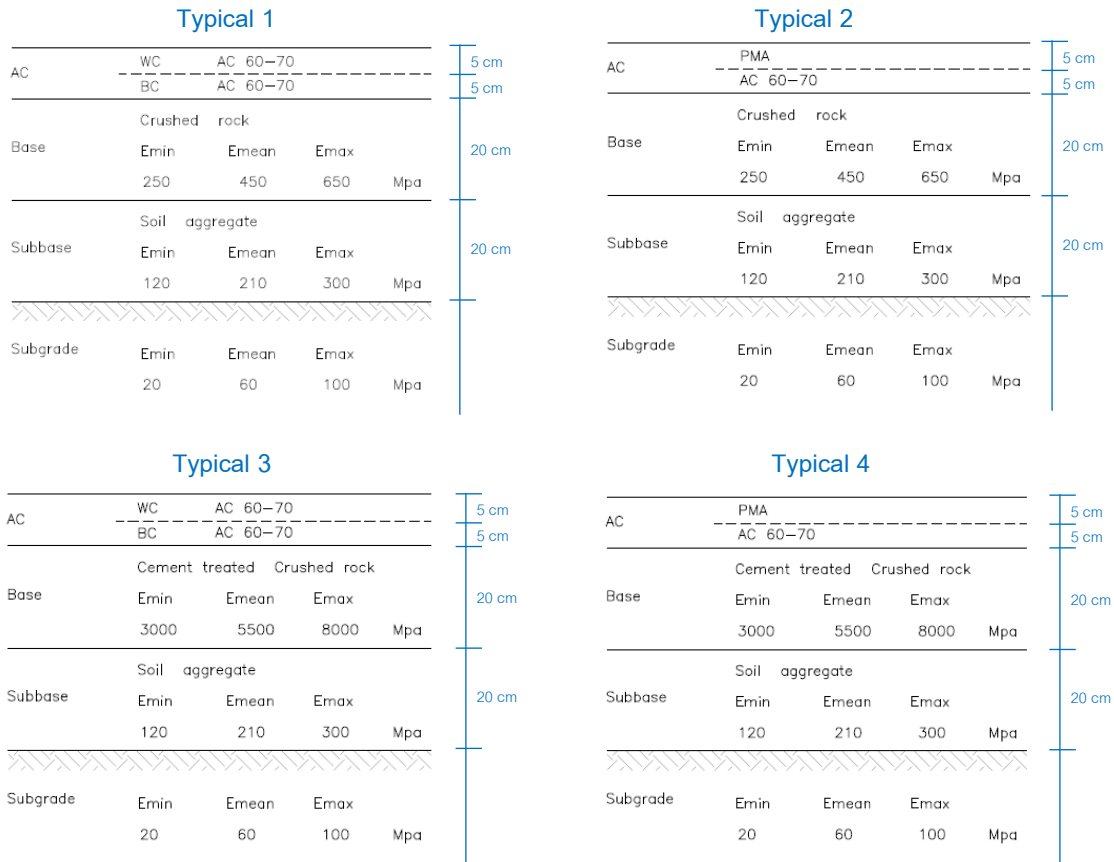
รูปที่ 16 การจำลองการเกิดร่องล้อด้วยวิธี MEPDG

### 5.1. การทำนายการเกิดร่องล้อของถนนทางหลวง (ก่อสร้างใหม่)

การทำนายผลในส่วนนี้เป็นการศึกษาปัจจัยด้านต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดร่องล้อของถนนที่ก่อสร้างใหม่ โดยสมมุติให้วัสดุผิวทางมีพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกและวัสดุชั้นทางอื่นๆ เป็น Elasto-Plastic โดยปัจจัยที่ได้ศึกษาประกอบไปด้วย

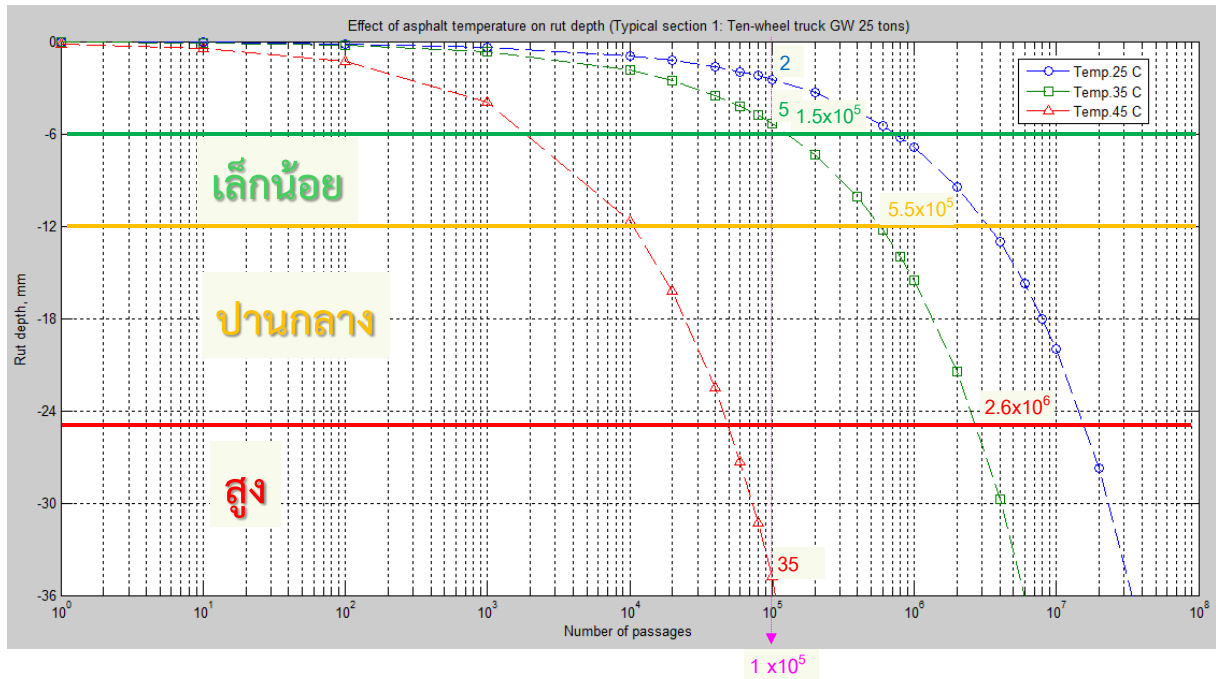
1. รูปแบบโครงสร้างชั้นทาง 4 รูปแบบ ซึ่งมี Wearing Course แตกต่างกัน (AC60-70 หรือ PMA) และมีชั้นพื้นทางแตกต่างกัน (หินคลุก หรือ หินคลุกผสมปูนซีเมนต์) ดังแสดงในรูปที่ 17
2. ความแข็งแรงของดินฐานรากตั้งแต่ชั้นพื้นทางลงไปถึงชั้นดินเดิม 3 ระดับ คือ ต่ำ ปกติ และ สูง
3. อุณหภูมิผิวทาง 3 ระดับ คือ 25, 35, 45 °C

4. ประเภทบรรทุก 6 รูปแบบ คือ SAL (Standard Axle Load) รถหนัก 15 ตัน รถสิบล้อ 25 ตัน รถสิบล้อ 40 ตัน (Overload) รถกึ่งพ่วงสิบล้อ 45 ตัน และรถพ่วงสิบล้อ 47 ตัน



รูปที่ 17 รูปแบบโครงสร้างชั้นทางของถนนทางหลวง

รูปที่ 18 แสดงตัวอย่างการจำลองการเกิดร่องล้อในแต่ละรอบการวิ่งรถบรรทุกสิบล้อหนัก 25 ตัน ด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. บนโครงสร้างชั้นทาง Type 1 ซึ่งมีดินฐานรากแข็งแรงระดับปกติ และศึกษาอิทธิพลเนื่องจากอุณหภูมิผิวทาง 3 ระดับ (25, 35, 45 °C) จากกราฟจะเห็นได้ว่า ที่จำนวน  $1 \times 10^5$  รอบผิวทางก่อสร้างใหม่ที่อุณหภูมิ 25 °C จะเกิดร่องล้อ 2 มม. หากวิ่งที่อุณหภูมิ 35 °C จะเกิดขึ้น 5 มม. แต่ถ้าวิ่งที่อุณหภูมิ 45 °C จะเกิดร่องล้อได้มากถึง 35 มม. หากพิจารณาการวิ่งรถบรรทุกที่อุณหภูมิผิวทางเฉลี่ย 35 °C ผิวทางจะเริ่มเกิดร่องล้อระดับต่ำ (6 มม.), ปานกลาง (12 มม.) และสูง (25 มม.) ที่จำนวน  $1.5 \times 10^5$ ,  $5.5 \times 10^5$  และ  $2.5 \times 10^6$  รอบตามลำดับ



รูปที่ 18 ตัวอย่างการจำลองการเกิดร่องล้อตามจำนวนรอบวิ่งของรถบรรทุกสิบล้อ 25 ตัน ด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. บนโครงสร้างชั้นทาง Type 1 ที่ดินฐานรากแข็งแรงระดับปกติ

ตารางที่ 8 แสดงผลการศึกษาการเกิดร่องล้อจากการวิ่งรถบรรทุกจำนวน 100,000 รอบ แยกตามปัจจัยต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิผิวทางสูงขึ้น การเกิดร่องล้อจะมากตามไปด้วย การใช้อย่าง PMA ของโครงสร้างชั้นทาง Typical 2 ไม่แตกต่างจากการใช้อย่าง AC60-70 ของโครงสร้างชั้น Typical 1 ในช่วงอุณหภูมิ 25-30 °C แต่การใช้อย่าง PMA จะช่วยลดการเกิดร่องล้อได้มากในช่วงอุณหภูมิสูง 45 °C การศึกษาปัจจัยความแข็งแรงของดินฐานราก พบว่ามีผลกระทบการเกิดร่องล้อค่อนข้างน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการยุบตัวส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต การศึกษาปัจจัยประเภทรถบรรทุกพบว่า รถบรรทุกที่บรรทุกน้ำหนักตามกฎหมายที่ใช้งานในปัจจุบันทำให้เกิดร่องล้อสูงกว่าน้ำหนักเพลามาตรฐานที่ใช้ออกแบบ (SAL) ในอดีต รถบรรทุกที่มีขนาดต่างกันแต่บรรทุกน้ำหนักตามกฎหมาย จะทำให้เกิดร่องล้อไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากรถบรรทุกขนาดใหญ่จะใช้หลายเพลลาในการกระจายน้ำหนัก การบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดของรถสิบล้อจาก 25 ตัน ตามที่กฎหมายกำหนดเป็น 40 ตัน (Overload) จะทำให้เกิดร่องล้อเพิ่มขึ้นได้ค่อนข้างมาก (20 % - 100 %) การใช้พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ พบว่าเกิดร่องลือน้อยกว่าการใช้พื้นทางหินคลุกค่อนข้างมาก

ตารางที่ 8 การศึกษาการเกิดร่องล้อจากรถบรรทุกวิ่งจำนวน 100,000 รอบ แยกตามปัจจัยต่างๆ

ศึกษา	โครงสร้างชั้นทาง	ระดับความแข็งแรง ของดินฐานราก	อุณหภูมิ ผิวทาง °C	รถบรรทุก	การเกิดร่องล้อ (มม.) ที่ 1x10 <sup>5</sup> รอบ
อุณหภูมิผิวทาง แอสฟัลต์	Typical 1 (AC60/70 + หินคลุก)	E_mean	25	รถสิบล้อ 25 ตัน	2
					5
					35
	Typical 2 (PMA + หินคลุก)				2
					5
					7
ความแข็งแรงของ ดินฐานราก	Typical 1 (AC60/70 + หินคลุก)	E_min	35	รถสิบล้อ 25 ตัน	5
		E_mean			5
		E_max			6
	Typical 2 (PMA + หินคลุก)	E_min			5
		E_mean			5
		E_max			3
ประเภทรถบรรทุก	Typical 1 (AC60/70 + หินคลุก)	E_mean	35	SAL	3
				รถหกล้อ 15 ตัน	5
				รถสิบล้อ 25 ตัน	5
				รถสิบล้อ 40 ตัน	7
				รถกึ่งพ่วงสิบล้อ 45 ตัน	4
				รถพ่วงสิบล้อ 47 ตัน	5
	Typical 2 (PMA + หินคลุก)			SAL	3
				รถหกล้อ 15 ตัน	5
				รถสิบล้อ 25 ตัน	5
				รถสิบล้อ 40 ตัน	6
				รถกึ่งพ่วงสิบล้อ 45 ตัน	3
				รถพ่วงสิบล้อ 47 ตัน	4
การบรรทุกน้ำหนัก เกินพิกัดและชั้น พื้นทาง	Typical 3 (AC60/70 + หินคลุกผสม)	E_mean	35	รถสิบล้อ 25 ตัน	2
				รถสิบล้อ 40 ตัน	4
	Typical 4 (PMA + หินคลุกผสมซีเมนต์)			รถสิบล้อ 25 ตัน	1
				รถสิบล้อ 40 ตัน	2

## 5.2. การทำนายการเกิดร่องล้อของ 10 สายทาง ที่เปิดให้บริการไปแล้วโดยอาศัยผลทดสอบ FWD จากภาคสนาม

ตารางที่ 9 แสดงผลการประเมินการเกิดร่องล้อของ 10 สายทาง ซึ่งได้นำข้อมูลการแ่นตัวที่ทดสอบเมื่ออุณหภูมิผิวทางใกล้เคียงกับอุณหภูมิผิวทางเฉลี่ยของประเทศไทย (35 °C) มาวิเคราะห์เป็นค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางต่างๆ และจำลองการเกิดร่องล้อด้วยวิธี MEPDG โดยการประเมินนี้มีสมมุติฐานว่าปริมาณรถหนักวิ่งช่องจราจรด้านซ้ายทั้งหมด และรถหนัก 1 คัน (อาจเป็นรถเปล่าหรือบรรทุกสินค้า) สมมุติให้หนักเทียบเท่า 1 ESAL เมื่อเปรียบเทียบความลึกร่องล้อในปัจจุบันนับตามอายุของถนนหลังการบูรณะ

กับระยะเวลาการเกิดร่องล้อในระดับต่างๆ ที่ทำนายโดย MEPDG พบว่าผลการทำนายการเกิดร่องล้อมี ความแม่นยำในระดับพอใช้ได้ โดยทั่วไปการเกิดร่องล้อเป็นสิ่งที่ทำนายได้ค่อนข้างลำบาก ทั้งนี้เนื่องจากไม่ทราบน้ำหนักที่แท้จริงที่ลงแต่ละเพลลาของรถบรรทุก ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดร่องล้อค่อนข้างมาก นอกจากนี้การทำนายยังไม่ได้พิจารณาพฤติกรรมของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น ค่าโมดูลัสที่เปลี่ยนแปลงตามอายุ (Aging) สภาพแวดล้อม ความหนาแน่นผิวทาง อุณหภูมิในแต่ละรอบวันและในแต่ละฤดูกาล อีกทั้งค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในสมการทำนายผลเป็นข้อมูลของประเทศอเมริกา เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลดังกล่าว

**ตารางที่ 9 การทำนายการเกิดร่องล้อของ 10 สายทางโดยใช้รถหนัก 1 ESAL วิ่งที่อุณหภูมิ 35 °C**

สายทาง	ปริมาณรถบรรทุกหนัก (คัน/วัน/ฝั่ง)	อายุถนนหลังจากการบูรณะ (ปี)	ความลึกร่องล้อ ณ ปัจจุบัน (mm)	ระยะเวลาที่ทำให้เกิดร่องล้อในระดับต่างๆ (ปี)		
				เล็กน้อย (6 - 12 mm)	ปานกลาง (12-25 mm)	สูง (>25 mm)
ทล. 11	951	3	16.58	2	8	30
ทล. 101	222	ไม่มีข้อมูล	8.92	<1	3.5	18
ทล. 24	3,414	1	7.25	1.5	6.5	30
ทล. 214	887	0	3.08	3	10	50
ทล. 3414	4,551	0	0	1.5	6	28
ทล. 122	1,709	3	12.58	1	4	20
ทล. 304	5,354	0	2.92	-	1	3.5
ทล. 317	910	1	3.08	-	1	5.5
ทล. 4 1 (แยกปฐมพร)	3,562	3	5.67	1	2	10
ทล. 41 (ไทรยา)	5,715	3	4.50	-	<1	2.5

**6. การถ่ายทอดความรู้**

ที่ปรึกษาได้จัดงานสัมมนาเพื่อถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์และทดสอบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตให้กับบุคลากรของกรมทางหลวง ที่โรงแรมแกรนด์ ทาวเวอร์อินน์ในวันพุธที่ 24 กุมภาพันธ์ 2559 โดยเนื้อหาที่น่าสนใจประกอบไปด้วย ภาพรวมโครงการและปัญหาการเกิดร่องล้อ การออกแบบสูตรส่วนผสมด้วยวิธีซูเปอร์เพพ การทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีต และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการเกิดร่องล้อ โดยมีผู้เข้าร่วมการฝึกอบรมจำนวน 29 ท่าน

## 7. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 7.1. ข้อสรุป

1. การออกแบบสูตรส่วนผสมด้วยวิธีซูเปอร์เพพสำหรับปริมาณจราจรปานกลาง (3-10 ล้าน ESALs) ขึ้นไป ควรทดสอบสมรรถนะความต้านทานการเกิดร่องล้อ (Performance Test for Rutting Resistance) ซึ่งการทดสอบด้วยวิธี IDT-HT เป็นทางเลือกที่เหมาะสม เพราะกรมทางหลวงมีเครื่องมือพร้อมใช้งาน สามารถปฏิบัติตามมาตรฐานทดสอบได้ และมีเกณฑ์การประเมินแนะนำ (Recommended Criteria) อีกทั้งยังเป็นวิธีการทดสอบที่สะดวก รวดเร็ว และประหยัด
2. ผลการประเมินความสามารถการต้านทานร่องล้อของสูตรส่วนผสมสำหรับปริมาณจราจรปานกลาง (3-10 ล้าน ESALs) และปริมาณจราจรสูง (10-30 ล้าน ESALs) พบว่าผ่าน 6 ใน 10 และ ผ่าน 7 ใน 10 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าทั้งสองกลุ่มจะผ่านเกณฑ์การประเมินเกินกึ่งหนึ่ง แต่ก็ยังไม่นับว่าดีมากนัก ซึ่งในการออกแบบสูตรส่วนผสมเพื่อใช้งานก่อสร้างจริง (ไม่ใช่งานวิจัย) หากผลทดสอบไม่ผ่านเกณฑ์การประเมิน จะต้องปรับปรุงสูตรส่วนผสมใหม่
3. สูตรส่วนผสมของกลุ่มปริมาณจราจรปานกลางที่ผ่านเกณฑ์การประเมินได้ไม่มากเท่าที่ควร เกิดจาก 3 สาเหตุหลัก คือ (1) การใช้ยาง AC60-70 ซึ่งยังมีสมรรถนะไม่เพียงพอกับสภาพอุณหภูมิสูงและการจราจรโดยทั่วไปของประเทศไทย (2) การใช้จำนวนรอบบดอัดออกแบบ ( $N_{des}$ ) ที่ต่ำกว่าค่าปกติที่แนะนำโดยคู่มือ MS-2, AI 2014 (3) การใช้หินปูนในการออกแบบ ซึ่งโดยทั่วไปมีคุณภาพด้อยกว่าหินบะซอลต์หรือหินแกรนิต
4. สูตรส่วนผสมของกลุ่มปริมาณจราจรสูงผ่านเกณฑ์การประเมินได้มากกว่ากลุ่มปริมาณจราจรปานกลาง ทั้งๆที่เกณฑ์การประเมินมีค่าสูงกว่าก็ตาม เพราะว่ามีสูตรส่วนผสมครั้งหนึ่ง (5 ใน 10) ใช้ยาง PMA ซึ่งมีสมรรถนะสูงกว่ายาง AC60-70 ในการออกแบบ และได้ใช้จำนวนรอบบดอัดออกแบบ ( $N_{des}$ ) ตามค่าปกติที่แนะนำโดย MS-2, AI 2014 นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้หินคุณภาพสูง เช่น บะซอลต์ หรือ แกรนิต ช่วยให้สูตรส่วนผสมสามารถผ่านเกณฑ์ความต้านทานร่องล้อได้มากกว่าการหินปูนอย่างเห็นได้ชัด
5. NCHRP 673, 2011 สรุปปัจจัยที่ช่วยเพิ่มความสามารถการต้านทานร่องล้อ ดังนี้ การเพิ่มเกรดยางอุณหภูมิสูง  $PG_{High}$  (3 คะแนน); การเพิ่มความขรุขระของก้อนหิน (2 คะแนน); การเพิ่มปริมาณ Mineral Filler และ/หรือ Dust to Binder Ratio (2 คะแนน); การเพิ่มจำนวนรอบบดอัดที่ออกแบบ (2 คะแนน) การลด VMA และ/หรือ ปริมาณยาง ที่ออกแบบ (2 คะแนน)

6. การใช้แบบจำลอง MEPDG ในการศึกษาปัจจัยการเกิดร่องล้อพบว่า ร่องล้อที่เกิดบนถนนมีสาเหตุหลักมาจากการเสียดสีอย่างถาวรในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต คุณสมบัติผิวทางที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดร่องล้อมากขึ้น ผิวทางที่ใช้ยาง PMA จะมีความสามารถในการต้านทานร่องล้อได้ดีกว่าผิวทางที่ใช้ยาง AC 60-70 เฉพาะในช่วงอุณหภูมิสูง ความแข็งแรงของดินฐานรากมีผลต่อการเกิดร่องล้อเพียงเล็กน้อย น้ำหนักลงเพลามีผลอย่างมากต่อการเกิดร่องล้อ รถบรรทุกประเภทต่างๆ ถึงแม้มีขนาดต่างกัน แต่ถ้าบรรทุกน้ำหนักตามกฎหมายจะมีอัตราการทำลายถนนใกล้เคียงกัน รถสิบล้อที่บรรทุกน้ำหนักเกินพิกัด (40 ตัน) ทำให้เกิดร่องล้อได้มากกว่ารถสิบล้อที่บรรทุกน้ำหนักตามกฎหมาย (25 ตัน) ค่อนข้างมาก การใช้พื้นที่ทางที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีความแข็งแรงสูงแทนการใช้พื้นที่ทางหินคลุกปกติสามารถลดการเกิดร่องล้อได้ค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามพื้นที่ทางที่ปรับปรุงคุณภาพจะต้องออกแบบและก่อสร้างให้สามารถรับน้ำหนักในระยะยาวได้โดยไม่เกิดรอยแตก อันจะทำให้กำลังและความแข็งแรงของวัสดุลดลงได้มาก
7. การใช้แบบจำลอง MEPDG ทำนายการเกิดร่องล้อของ 10 สายทางภาคสนาม มีแนวโน้มที่ดี อย่างไรก็ตาม การไม่ทราบน้ำหนักลงเพลาน้ำหนักที่แท้จริงของรถบรรทุกที่วิ่งในแต่ละสายทาง การไม่ทราบพฤติกรรมของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่เริ่มต้นก่อสร้างจนถึงวันที่ตรวจวัดความลึกร่องล้อ และการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของต่างประเทศในสมการทำนายผล ทำให้ยังไม่สามารถใช้แบบจำลอง MEPDG ได้เต็มศักยภาพ
8. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินอัตราการเกิดร่องล้อของถนนที่อายุต่างๆ ได้ ช่วยให้งานวางแผนซ่อมบำรุงทางมีประสิทธิภาพ หรือใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบโครงสร้างชั้นทางให้มีความสามารถต้านทานร่องล้อดีขึ้น เพื่อลดค่าบำรุงรักษาถนนในระยะยาว

## 7.2. ข้อเสนอแนะ

1. กรมทางหลวงควรจัดให้มีการเก็บข้อมูลผลทดสอบกำลังรับแรงดึงด้วยวิธี IDT-HT สำหรับโครงการก่อสร้างทางใหม่ที่ออกแบบรองรับปริมาณจราจร 3 ระดับ ปานกลาง (3-10 ล้าน ESALs) สูง (10-30 ล้าน ESALs) และสูงพิเศษ (มากกว่า 30 ล้าน ESALs) และประเมินระดับการเกิดร่องล้อของสายทางเหล่านั้นเป็นประจำ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และปรับปรุงเกณฑ์ผ่านความต้านทานร่องล้อที่แนะนำโดย NCHRP 673, 2011 ให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานของเมืองไทยยิ่งขึ้น

2. กรมทางหลวงควรสนับสนุนให้มีการผลิตยางแอสฟัลต์ระบบ Performance Grade (PG) ซึ่งมีความเหมาะสมกว่าระบบ Penetration Grade ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เพราะระบบ Performance Grade จะประเมินสมรรถนะของยางตามอุณหภูมิการใช้งานที่ถนนจะต้องเผชิญ สามารถต้านทานการเกิดร่องล้อเมื่ออุณหภูมิร้อนจัด สามารถต้านทานรอยแตกจากความล้าในช่วงอุณหภูมิปานกลาง และสามารถต้านทานรอยแตกเนื่องจากอุณหภูมิเมื่อผิวทางเย็นจัด
3. ถึงแม้ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า หินบะซอลต์ หรือ หินแกรนิต ที่มีคุณภาพสูงสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดีกว่าหินปูน แต่การเลือกใช้เกรดยางที่มีสมรรถนะเหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนและการจราจรจะมีความคุ้มค่ามากกว่า เนื่องจากยางที่ใช้ในแอสฟัลต์คอนกรีตคิดเป็นสัดส่วนที่น้อย (ประมาณร้อยละ 5 % โดยน้ำหนัก) เมื่อเทียบกับปริมาณหิน (ประมาณร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก) การใช้ยางที่มีสมรรถนะเหมาะสมร่วมกับหินปูนที่มีในท้องถิ่น จะช่วยประหยัดค่าขนส่งหินคุณภาพสูงจากแหล่งวัสดุที่อยู่ห่างไกลจากโครงการได้
4. ประเทศไทยมีแหล่งหินคุณภาพสูง เช่น หินบะซอลต์ หรือ หินแกรนิต จำนวนจำกัด ซึ่งกลุ่มหินดังกล่าวโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติด้านอื่นๆ สูงตามไปด้วย เช่น ความต้านทานการขัดผิว (Polished Stone Value, PSV) ซึ่งมีอาจทดแทนได้โดยการใช้เกรดยางที่เหมาะสมหรือการปรับปรุงโครงสร้างวัสดุผสมรวม ดังนั้นควรส่งวนการใช้ทรัพยากรหินที่มีคุณภาพสูงสำหรับถนนบางประเภทที่ต้องการสมรรถนะสูงหลายด้านพร้อมกัน เช่น ความสามารถต้านทานการเกิดร่องล้อ ความเรียบของผิวทาง ความฝืดของผิวทาง และอื่นๆ
5. กรมทางหลวงควรจัดให้มีโครงการเก็บข้อมูลถนนในระยะยาว (Long-Term Pavement Program) เพื่อคัดเลือกตัวแทนสายทางทั่วประเทศ รวบรวมคุณสมบัติวัสดุงานทางเมื่อเริ่มก่อสร้าง สุ่มเก็บข้อมูลพฤติกรรมและสมรรถนะของผิวทางในช่วงอายุต่างๆ เก็บข้อมูลปริมาณจราจรและสภาพแวดล้อมของสายทาง และนำข้อมูลที่ได้มาคาร์ิเบตกับสมการทำนายผลความเสียหายของผิวทางด้วยวิธี MEPDG
6. กรมทางหลวงควรปรับปรุงขีดความสามารถของแบบจำลองทำนายการเกิดร่องล้อให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของถนนทางหลวงมากขึ้น เช่น ใช้ข้อมูลน้ำหนักบรรทุกและจำนวนรอบของเพลลาในแต่ละสายทาง ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของวัสดุตามอายุ ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวทางและระดับน้ำใต้ดินในแต่ละฤดูกาล ซึ่งจะทำให้แบบจำลองสามารถทำนายการเกิดร่องล้อในฤดูกาลและช่วงอายุต่างๆ ของถนนได้

7. กรมทางหลวงควรศึกษาการนำวิธี MEPDG มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างชั้นทาง ร่วมกับการออกแบบสูตรส่วนผสมด้วยวิธีซูเปอร์เพพ เพื่อให้ถนนทางหลวงมีมาตรฐานสูงขึ้น ทนทานต่อการเกิดร่อนล้าและความเสียหายประเภทต่างๆ อันจะเป็นการลดภาระค่า บำรุงรักษาทางในระยะยาว