

Chulalongkorn University

Chula Digital Collections

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2022

การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อคาดการณ์ความ แข็งแรงโครงสร้างทาง

ธนพล เทพวงษ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Civil Engineering Commons](#), and the [Construction Engineering and Management Commons](#)

Recommended Citation

เทพวงษ์, ธนพล, "การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6537.
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6537>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุเพื่อคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้าง
ทาง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

APPLICATION OF MATERIAL PROPERTY CHANGING MODEL FOR PREDICTING THE
PAVEMENT STRENGTH



Mr. Thanapon Thepwong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุเพื่อคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง
โดย	นายธนพล เทพวงษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)		
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		
	ประธานกรรมการ
(ดร.พงษ์สันต์ บัณฑิตสกุลชัย)		
	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม)		
	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสสิทธิ์)		

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ธนพล เทพวงษ์ : การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุเพื่อ
 คาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง. (APPLICATION OF MATERIAL PROPERTY
 CHANGING MODEL FOR PREDICTING THE PAVEMENT STRENGTH) อ.ที่ปรึกษา
 หลัก : รศ. ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม

ปัจจุบันถนนในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นถนนแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อมีปริมาณจราจรมา
 กระทำบนถนนทำให้ถนนเกิดความเสียหาย การตรวจสอบความแข็งแรงของถนนสามารถเข้าถึงได้
 ด้วยเครื่องมือทดสอบการวัดการแอ่นตัวของผิวทางด้วย Falling Weight Deflectometer อย่างไร
 ก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของวัสดุโครงสร้างทางตามเวลาและการกระทำของจราจรส่งผลให้ความ
 แข็งแรงของถนนมีการเปลี่ยนแปลง และตอบสนองการเกิดความเสียหาย งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการ
 ประยุกต์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุมาใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางในแต่
 ละช่วงเวลา มีวัตถุประสงค์คือเพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทางตามอายุ
 การใช้งาน และได้ทดสอบความถูกต้องของการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยข้อมูล
 การทดสอบภาคสนามด้วยวิธี FWD ของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความ
 แข็งแรงโครงสร้างทางคือ ประเภทโครงสร้างทาง แรงกระทำต่อผิวทาง อุณหภูมิและฤดูกาล การ
 ดำเนินการวิจัยจะทำการประยุกต์ใช้แบบจำลอง และนำมาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความ
 แข็งแรงโครงสร้างทางระหว่างข้อมูลการทดสอบ FWD และแบบจำลอง ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์
 กับข้อมูลการทดสอบ FWD เป็นเส้นตรง แบบจำลองสามารถใช้ได้ในวัสดุชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้น
 ทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และวัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุ
 ไม่เกาะตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
 ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370377621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Asphalt pavement, Pavement strength, Deflection, Structural
Number, Prediction model

Thanapon Thepwong : APPLICATION OF MATERIAL PROPERTY CHANGING
MODEL FOR PREDICTING THE PAVEMENT STRENGTH. Advisor: Assoc. Prof.
Boonchai Sangpetngam, Ph.D.

In the present, roads in Thailand are mainly asphalt concrete pavements. While traffic is applying on the road, it is also damaging the pavement structure. Currently the remaining pavement strength can be assessed by pavement surface deflection measurement by using the Falling Weight Deflectometer test. However, the material changing by time and traffic result in change of pavement strength and response damage. This research presents the application of material property changing for pavement strength prediction in each period. The objectives predict pavement strength changing according to service life. Then validate the pavement strength prediction with the FWD test data of asphalt concrete pavement. The factors that affect pavement strength are type of base material, number of standard axle repetition applying on the pavement, temperature, and season. Research methodologies apply the model and compare pavement strength changing between test data from FWD test and prediction model. Relationship of pavement strength changing from FWD test and model is linear. The model can be practical for base and subbase materials are unbound material and base is cement-treated material and subbase material is unbound material.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม เป็นอย่างสูง ที่เป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง อบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้ข้อคิดเห็นในการแก้ปัญหาทางวิทยานิพนธ์ รวมทั้งสร้างแรงกระตุ้นในการทำงาน ตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ตลอดระยะเวลาในการจัดทำอย่างดี ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จและสมบูรณ์ได้ และขอขอบพระคุณต่อคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งได้แก่ ดร.พงษ์สันต์ บัณฑิตสกุลชัย ที่เป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสิทธิ์ ที่เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ซึ่งกรรมการทุกท่านให้คำแนะนำและข้อคิดที่เป็นประโยชน์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์และมีความเหมาะสม

การเตรียมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทางเพื่อการผลการทดสอบในเล่มวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อคุณณัฐชนน พันธพานิชย์กุล จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณภาณุพงศ์ เย็นฉ่ำ จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และกรมทางหลวง ที่นำเข้าสู่ข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบแบบจำลอง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยมีความสำนึกในพระคุณของคณาจารย์ทุกท่าน คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อบิดามารดา ครอบครัว พี่และเพื่อนของผู้วิจัยที่ได้สนับสนุนเอาใจใส่ดูแลและให้ความอนุเคราะห์แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษาในปัจจุบันลุล่วงไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ธนพล เทพวงษ์

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.1. ที่มาของการศึกษา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์.....	2
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4. ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1. โครงสร้างของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต.....	4
2.2. ความแข็งแรงโครงสร้างทาง.....	5
2.3. โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus).....	6
2.4. การแอ่นตัว (Deflection).....	7
2.4.1. การทดสอบหาค่าการแอ่นตัว.....	7
2.4.1.1. การทดสอบแบบอยู่กับที่ (Static Loading).....	7
2.4.1.2. การทดสอบแบบสภาวะคงตัว (Steady State Loading).....	8

2.4.1.3. การทดสอบแบบแรงกระแทก (Impact Loading)	9
2.4.2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการแอ่นตัว	11
2.5. การทำนายปริมาณจราจร	12
2.6. Structural Number.....	15
2.6.1. สัมประสิทธิ์วัสดุโครงสร้าง (Structural Layer Coefficient)	15
2.6.2. สัมประสิทธิ์การระบายน้ำ (Drainage Coefficient)	19
2.7. การคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation)	20
2.8. การประมาณอายุคงเหลือของทาง.....	22
2.9. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ.....	25
2.9.1. ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.....	25
2.9.2. วัสดุไม่เกาะตัว	31
2.9.3. พื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์.....	33
2.10. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุมาจากแรงที่กระทำต่อเนื่อง	33
2.11. การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทาง.....	35
2.12. สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	47
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	49
3.1. คุณสมบัติวัสดุที่ใช้การคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง.....	51
3.2. การคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง	53
3.3. การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างทาง	56
3.3.1. วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต.....	56
3.3.2. วัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์.....	58
3.3.3. วัสดุไม่เกาะตัว	59
3.4. การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number ของทาง.....	60
3.5. โปรแกรม BISAR.....	60

3.6. การทดสอบความถูกต้องของการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุ	61
3.7. การเก็บข้อมูลสายทางและการเก็บข้อมูล FWD.....	62
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	66
4.1. การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว	66
4.2. การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุพื้นทางบางส่วนเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์.....	70
4.2.1. วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว.....	70
4.2.2. วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์.....	75
4.3. การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number.....	79
4.3.1. วัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว	80
4.3.2. วัสดุชั้นพื้นทางบางส่วนเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์	82
4.4. การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD	88
4.5. การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number ระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	111
5.1. สรุปผลการทดสอบ	111
5.2. ข้อจำกัดของการวิจัย.....	112
5.3. ข้อเสนอแนะ	113
บรรณานุกรม.....	114
ภาคผนวก.....	119
ภาคผนวก ก โปรแกรม BISAR และผลการทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางของวัสดุ.....	120
ภาคผนวก ข การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างทาง.....	126
ภาคผนวก ค การคำนวณค่า Stuctural Number ของทาง	142
ประวัติผู้เขียน	152



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การกระจายตัวรถบรรทุกขึ้นอยู่กับจำนวนเลนถนน	14
ตารางที่ 2 แพลตฟอร์มรถบรรทุกแต่ละประเภท	15
ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์โครงสร้างทางและโมดูลัสมาตรฐานจากการทดสอบ AASHO สำหรับวัสดุแต่ละชนิด	18
ตารางที่ 4 การเลือกสัมประสิทธิ์การระบายน้ำที่เหมาะสมของชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางสำหรับวัสดุไม่เกาะตัว	19
ตารางที่ 5 การเลือกสัมประสิทธิ์การระบายน้ำที่เหมาะสมของชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์	19
ตารางที่ 6 เกณฑ์การกำหนดความเสียหายและสัมประสิทธิ์ของผู้พัฒนา	24
ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ของวัสดุแอสฟัลต์ขึ้นอยู่กับชนิดของแอสฟัลต์	27
ตารางที่ 8 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งของแอสฟัลต์หลังจากการผสม	28
ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ในการคำนวณค่าโมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัวขึ้นอยู่กับผู้พัฒนา	32
ตารางที่ 10 ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง	51
ตารางที่ 11 ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางสำหรับพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์	52
ตารางที่ 12 ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางสำหรับวัสดุไม่เกาะตัว	53
ตารางที่ 13 การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุ	54
ตารางที่ 14 อุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยที่ใช้ในการจำลองการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์	57
ตารางที่ 15 ข้อมูลที่ใช้ในวิเคราะห์สมการถดถอย	61
ตารางที่ 16 ช่วงเวลาข้อมูลการทดสอบ FWD	63
ตารางที่ 17 รูปแบบของโครงสร้างทางที่ใช้ในการวิเคราะห์	64
ตารางที่ 18 สายทางที่มีการคาดการณ์ค่าโมดูลัสคล้ายกัน (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)	68

ตารางที่ 19 ช่วงของถนนสาย 344 ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณจราจรและความหนาแน่นแอสฟัลต์คอนกรีต	71
ตารางที่ 20 สายทางที่มีการคาดการณ์ค่าโมดูลัสคล้ายกัน (วัสดุพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	72
ตารางที่ 21 สายทางที่มีการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number คล้ายกัน (วัสดุ พื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว).....	81
ตารางที่ 22 สายทางที่มีการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number คล้ายกัน (วัสดุ พื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์).....	83
ตารางที่ 23 ช่วงเวลาของการทดสอบ FWD ในแต่ละสายทาง.....	89
ตารางที่ 24 จำนวนข้อมูลของการทดสอบ FWD ในแต่ละสายทาง.....	91
ตารางที่ 25 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุพื้น ทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)	96
ตารางที่ 26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)	96
ตารางที่ 27 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุพื้น ทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)	97
ตารางที่ 28 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุชั้นพื้น ทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์).....	98
ตารางที่ 29 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์).....	98
ตารางที่ 30 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุชั้น พื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์).....	99
ตารางที่ 31 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์).....	100
ตารางที่ 32 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)	106
ตารางที่ 33 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว).....	106

ตารางที่ 34 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)	107
ตารางที่ 35 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	108
ตารางที่ 36 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	108
ตารางที่ 37 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	109
ตารางที่ 38 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	110



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 โครงสร้างของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต	4
รูปที่ 2 กราฟแสดงความเครียดของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำต่อเนื่อง	6
รูปที่ 3 แผนภาพแองการแอนด์ตัวของผิวทาง	7
รูปที่ 4 รูปแบบของ Benkelman Beam	8
รูปที่ 5 การทดสอบการแอนด์ตัวของถนนโดยใช้เครื่องมือ Benkelman Beam	8
รูปที่ 6 การทดสอบการแอนด์ตัวของถนนโดยใช้เครื่องมือ Dynaflect	9
รูปที่ 7 การทดสอบการแอนด์ตัวโดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer	10
รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความแข็งแรงของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต	12
รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการสำรวจและค่าการแอนด์ตัวของถนน	12
รูปที่ 10 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางชั้นผิวทางโดยใช้โมดูลัสยืดหยุ่นของแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 68 องศาฟาเรนไฮต์	16
รูปที่ 11 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางชั้นพื้นทางของวัสดุไม่เกาะตัว	16
รูปที่ 12 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางของวัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์	17
รูปที่ 13 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางชั้นรองพื้นทาง	17
รูปที่ 14 การหาค่าอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสประสิทธิผลและโมดูลัสคืนตัวดินเดิมที่ใช้ออกแบบ	21
รูปที่ 15 รูปแบบของทฤษฎี Shakedown ภายใต้แรงกระทำซ้ำต่อเนื่องในวัสดุไม่เกาะตัว	34
รูปที่ 16 การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัวขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำต่อวัสดุ	35
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอนด์ตัวที่จุดกึ่งกลางและความลึกร่องล้อ	36
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าการแอนด์ตัวของ FWD และความลึกร่องล้อ	37
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าการแอนด์ตัวของ FWD และอายุของถนน	37
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าการแอนด์ตัวและอายุของถนน	38

รูปที่ 21 โครงสร้างแบบจำลอง CAPTIF ของการทดสอบ PR3-0404.....	39
รูปที่ 22 โครงสร้างแบบจำลอง CAPTIF ของการทดสอบ PR3-0610.....	39
รูปที่ 23 โครงสร้างแบบจำลอง CAPTIF ของการทดสอบ PR3-0805.....	40
รูปที่ 24 โครงสร้างหน้าต่างแบบจำลอง CAPTIF	40
รูปที่ 25 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่ จริงของการทดสอบ PR3-0404 โดยวิธีโดยตรง	41
รูปที่ 26 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่ จริงของการทดสอบ PR3-0404 โดยวิธี M-EP.....	42
รูปที่ 27 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่ จริงของการทดสอบ PR3-0610 โดยวิธี M-EP.....	42
รูปที่ 28 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่ จริงของการทดสอบ PR3-0805 โดยวิธี M-EP.....	43
รูปที่ 29 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่ จริงของการทดสอบ PR3-0404 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีเปอร์เซนไทล์ที่ 10	43
รูปที่ 30 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่ จริงของการทดสอบ PR3-0610 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีเปอร์เซนไทล์ที่ 10	44
รูปที่ 31 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่ จริงของการทดสอบ PR3-0805 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีเปอร์เซนไทล์ที่ 10	44
รูปที่ 32 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่ จริงของการทดสอบ PR3-0404 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีเปอร์เซนไทล์ที่ 50	45
รูปที่ 33 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่ จริงของการทดสอบ PR3-0610 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีเปอร์เซนไทล์ที่ 50	45
รูปที่ 34 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่ จริงของการทดสอบ PR3-0805 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีเปอร์เซนไทล์ที่ 50	46
รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวและอายุของถนน.....	47
รูปที่ 36 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	50

รูปที่ 37 แผนภาพแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุ.....	55
รูปที่ 38 โครงสร้างหน้าตัดสายทางสำหรับชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็น Unbound	64
รูปที่ 39 โครงสร้างหน้าตัดสายทางสำหรับชั้นพื้นทางเป็น CTB และชั้นรองพื้นทางเป็น Unbound.....	65
รูปที่ 40 โครงสร้างหน้าตัดสายทางสำหรับชั้นพื้นทางเป็น Unbound และชั้นรองพื้นทางเป็น CTB.....	65
รูปที่ 41 โครงสร้างหน้าตัดสายทางสำหรับชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็น CTB.....	65
รูปที่ 42 เวลาของการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)	67
รูปที่ 43 ความชื้นของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)	69
รูปที่ 44 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (วัสดุพื้นทางทั้งหมด เป็นวัสดุไม่เกาะตัว)	69
รูปที่ 45 เวลาของการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง (ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	71
รูปที่ 46 ความชื้นของถนนสาย 117 กม. 24.750 – 25.000.....	73
รูปที่ 47 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของถนนสาย 117 กม. 24.750 – 25.000	73
รูปที่ 48 ความชื้นของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.....	74
รูปที่ 49 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.....	75
รูปที่ 50 เวลาของการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง (ชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วย ซีเมนต์).....	76
รูปที่ 51 ความชื้นของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และชั้น รองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์).....	77
รูปที่ 52 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่ เกาะตัว และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์).....	77
รูปที่ 53 ความชื้นของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุ ปรับปรุงด้วยซีเมนต์).....	78

รูปที่ 54 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์).....	79
รูปที่ 55 ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว).....	81
รูปที่ 56 ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number ของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว).....	82
รูปที่ 57 ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 117 กม. 24.750 – 25.000	84
รูปที่ 58 ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number ของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว).....	84
รูปที่ 59 ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม...85	
รูปที่ 60 ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.	86
รูปที่ 61 ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	87
รูปที่ 62 ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number ของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	87
รูปที่ 63 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.	90
รูปที่ 64 ข้อมูลค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนซ้าย)....	91
รูปที่ 65 ข้อมูลค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนขวา)....	92
รูปที่ 66 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนซ้าย).....	92
รูปที่ 67 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนขวา).....	93
รูปที่ 68 ผลการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.94	

รูปที่ 69 ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.	95
รูปที่ 70 แผนภาพการกระจายตัวของการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)	96
รูปที่ 71 แผนภาพการกระจายตัวของการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	98
รูปที่ 72 แผนภาพการกระจายตัวของการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	99
รูปที่ 73 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.	101
รูปที่ 74 ผลการคำนวณค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนซ้าย)	102
รูปที่ 75 ผลการคำนวณค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนขวา)	102
รูปที่ 76 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนซ้าย)	103
รูปที่ 77 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนขวา)	103
รูปที่ 78 ผลการเปรียบเทียบค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.	104
รูปที่ 79 ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.	105
รูปที่ 80 แผนภาพการกระจายตัวของการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number จากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)	106
รูปที่ 81 แผนภาพการกระจายตัวของการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number จากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	108

รูปที่ 82 แผนภาพการกระจายตัวของการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number จากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)	109
---	-----



บทที่ 1

ที่มาและความสำคัญ

1.1. ที่มาของการศึกษา

ปัจจุบันถนนที่อยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทรับผิดชอบเป็นถนนแอสฟัลต์คอนกรีตมากกว่าร้อยละ 90 (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศการขนส่งและจราจร, 2562) เมื่อมีปริมาณจราจรกระทำถนนแอสฟัลต์คอนกรีต จะทำให้โครงสร้างทางของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดความเสียหาย ซึ่งกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทสามารถประเมินสภาพความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยเครื่องมือทดสอบการแอ่นตัวของถนนด้วยน้ำหนักกระแทก หรือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ซึ่งเป็นเครื่องมือตรวจสอบสภาพความเสียหายของถนน โดยทำให้ทราบถึงความเสียหาย และค่าการแอ่นตัว (Deflection) ภายใต้น้ำหนักกระแทก ซึ่งค่านี้จะเป็นตัวชี้วัดของความเสียหายของถนน โดย FWD สามารถใช้ทดสอบความแข็งแรงของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตและถนนคอนกรีตได้ (สมศักดิ์ ธรรมจารุสิริ และคณะ, 2561) ผลของสภาพความแข็งแรงของถนนที่มาจากการทดสอบวิเคราะห์ที่มาจาก FWD จะนำไปพิจารณาเพื่อกำหนดวิธีการซ่อมบำรุงถนนที่เหมาะสม เพื่อยืดอายุการใช้งานของถนนให้ยาวนาน และทำให้หน่วยงานประหยัดงบประมาณในการบำรุงรักษาถนนได้ (นวพล พรหมจารีย์, อภิชัย อีสริยานุกูล และ สาธิต อินนามเพ็ง, 2557) ซึ่งค่าการแอ่นตัวที่มาจากการทดสอบ FWD มีปัจจัยมาจากแรงที่กระทำต่อผิวทาง อุณหภูมิ ช่วงฤดูกาล และรูปแบบลักษณะของโครงสร้าง (สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท, 2563)

อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของวัสดุโครงสร้างทางตามเวลาและการกระทำของจราจรส่งผลให้ความแข็งแรงของถนนมีการเปลี่ยนแปลง และตอบสนองการเกิดความเสียหาย จำเป็นต้องมีการวางแผนการซ่อมบำรุงเพื่อเพิ่มอายุโครงสร้างทางต่อไปได้ และอัตราการเพิ่มขึ้นของรถยนต์และรถบรรทุกแตกต่างไปจากสมมติฐานตั้งต้นที่ใช้ในการออกแบบในอดีต ส่งผลให้ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดการชำรุดเสียหายก่อนครบกำหนดอายุการออกแบบ (ภัทรพล สีดอกบวบ และคณะ, 2557) ซึ่งกรมทางหลวงได้สำรวจความเสียหายถนนทั่วประเทศไทยในอดีต พบว่ามีการออกแบบอายุถนนเป็นเวลา 15 ปี (ธันวิน สวัสดิ์สานต์ และคณะ, 2551) และกรมทางหลวงชนบทได้กำหนดอายุการออกแบบถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นเวลา 7 ปี หรือ 10 ปี (สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวงชนบท, 2561)

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงต้องการประยุกต์ใช้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุทาง มาใช้เป็นการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ ความแข็งแรงโครงสร้างทางของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต แล้วนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบ ภาคนามด้วยวิธี FWD เพื่อทดสอบความถูกต้องของการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง และสามารถนำแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุทางไปใช้ในการทำนายแนวโน้มการ เปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทาง ทำให้สามารถกำหนดการซ่อมบำรุงทางได้ก่อนที่ถนนมี ความเสียหาย

1.2. วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทางตามอายุการใช้งาน โดยใช้ แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงด้านคุณสมบัติวัสดุในแต่ละชั้นและการวิเคราะห์โครงสร้างทาง อีลาสติกเชิงเส้นหลายชั้น (Multi Layered Linear Elastic Analysis)
- 2) เพื่อทดสอบความถูกต้อง (Calibration) ของการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วย ข้อมูลการทดสอบภาคนามด้วยวิธี FWD ของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) โครงสร้างทางในการประยุกต์ใช้แบบจำลองเป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต
- 2) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงโครงสร้างทาง ได้แก่ ลักษณะของโครงสร้างทางในแต่ละชั้น ทาง อุณหภูมิ ฤดูกาล และปริมาณเพลาสะสมมาตรฐาน (Equivalent Single Axle Load, ESAL)
- 3) คาดการณ์และจำลองความแข็งแรงโครงสร้างทางที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งจะเป็นค่า โมดูลัส ค่าการแอ่นตัว และค่า Structural Number ของทาง
- 4) ทดสอบความถูกต้องของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number ด้วยข้อมูลการทดสอบ FWD ของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

1.4. ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) สามารถคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง เพื่อลดระยะเวลาในการตรวจสอบความแข็งแรงโครงสร้างทางตั้งแต่ช่วงเวลาการทดสอบ FWD จนถึงการจัดสรรงบประมาณซ่อมบำรุง
- 2) ทราบการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทางจากการทำนายในแบบจำลองก่อนที่ถนนมีความเสียหาย ทำให้สามารถจัดลำดับความสำคัญในการซ่อมบำรุงได้



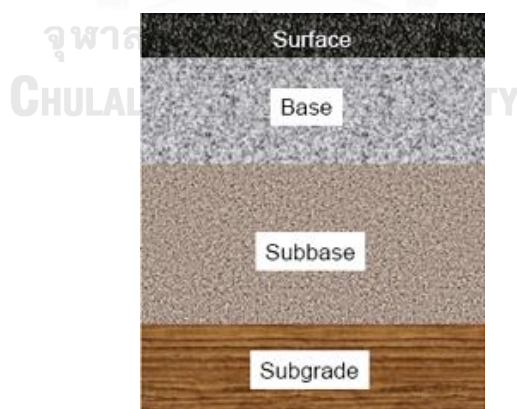
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความแข็งแรงโครงสร้างทางมีปัจจัยมาจากแรงที่กระทำต่อผิวทาง อุณหภูมิ ช่วงฤดูกาล และรูปแบบลักษณะของโครงสร้าง ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นคือการเปลี่ยนแปลงของวัสดุโครงสร้างทางตามเวลา และการกระทำของจราจรส่งผลให้ความแข็งแรงของถนนมีการเปลี่ยนแปลง การตอบสนองของปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้ถนนมีความเสียหาย และถนนมีความเสียหายก่อนครบกำหนดอายุการออกแบบ มีสาเหตุมาจากข้อมูลที่ใช้ออกแบบมีความแตกต่างจากข้อมูลจริงปัจจุบัน โดยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีต, ความแข็งแรงโครงสร้างทาง, โมดูลัสคืนตัว, การแอ่นตัว, การทำนายปริมาณจราจร, Structural Number, การคำนวณย้อนกลับ, การประมาณอายุคงเหลือของทาง, การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ, การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุมาจากแรงที่กระทำต่อเนื่อง และการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทาง

2.1. โครงสร้างของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

ถนนในประเทศไทยที่เป็นของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทเป็นถนนแอสฟัลต์คอนกรีตมากกว่าร้อยละ 90 (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศการขนส่งและจราจร, 2562) ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานจากด้านบนถึงด้านล่างตามลำดับได้แก่ ชั้นผิวทาง (Surface Course) ชั้นพื้นทาง (Base Course) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase Course) และชั้นดินเดิม (Subgrade Course) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

ที่มา : Christopher และคณะ (2006)

วัสดุที่ใช้ก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นหินคลุก (Crushed Rock) และชั้นรองพื้นทางส่วนใหญ่เป็นวัสดุผสมรวม (Soil Aggregate) และวัสดุคัดเลือก (Selected Material) (ธันวิน สวัสดิ์ศานต์ และคณะ, 2551) นอกจากนี้ทุกชั้นทางสามารถใช้วัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) ได้ ชั้นพื้นทางสามารถใช้วัสดุทดแทนได้ เช่น พื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) และหินคลุกซีเมนต์ (Cement Modified Crushed Rock) และชั้นรองพื้นทางสามารถใช้รองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase) ได้

2.2. ความแข็งแรงโครงสร้างทาง

ความแข็งแรงโครงสร้างทาง สามารถบอกได้จากค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) หรือโมดูลัสของยัง (Young's Modulus) ซึ่งสามารถหาได้โดยอัตราส่วนของความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ในสมการที่ (1)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

โดยที่ E คือโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ
 σ คือความเค้นที่กระทำต่อวัสดุ
 ϵ คือความเครียดที่มาจากแรงกระทำ

AASHTO (1993) ได้กำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของโครงสร้างทางดังนี้

- 1) ความแข็งแรงแอสฟัลต์คอนกรีต ได้กำหนดตัวแปรเป็น E_{AC}
- 2) ความแข็งแรงของชั้นพื้นทาง หรือโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของชั้นพื้นทาง ได้กำหนดตัวแปรเป็น E_{BS}
- 3) ความแข็งแรงของชั้นรองพื้นทาง หรือโมดูลัสคืนตัวของชั้นรองพื้นทาง ได้กำหนดตัวแปรเป็น E_{SB}
- 4) ความแข็งแรงชั้นรองพื้นทาง หรือโมดูลัสคืนตัวชั้นดินเดิม ได้กำหนดตัวแปรเป็น MR หรือ E_{SG}

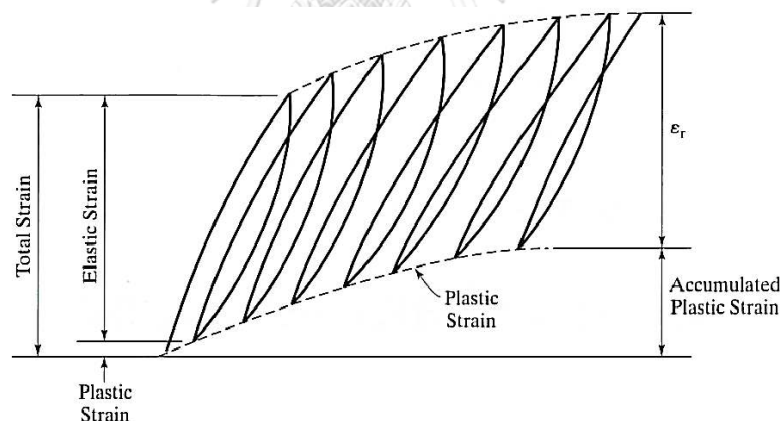
2.3. โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_R) เป็นค่าประมาณของโมดูลัสยืดหยุ่น หรือความแข็งแรงโครงสร้างทางที่มาจากแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง และเป็นตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งโมดูลัสคืนตัวของวัสดุหาได้จากสมการที่ (2)

$$M_R = \frac{\sigma_D}{\epsilon_r} \quad (2)$$

โดยที่ M_R คือโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ
 σ_D คือความเค้นเพิ่มที่กระทำในแต่ละรอบ (Deviator Stress)
 ϵ_r คือความเครียดที่คืนตัวได้ (Recoverable Strain)

เมื่อวัสดุถูกแรงกระทำซ้ำกันอย่างต่อเนื่อง จะทำให้เกิดการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของความเครียดที่ไม่สามารถคืนตัวได้ (Plastic Strain) ทำให้วัสดุไม่สามารถคืนตัวกลับสภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ได้แสดงดังรูปที่ 2



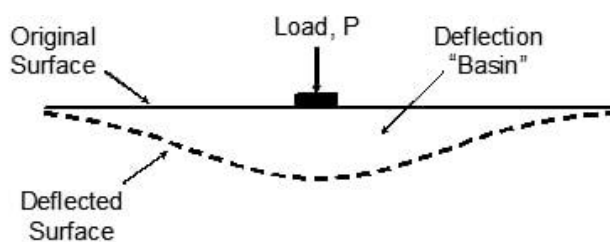
รูปที่ 2 กราฟแสดงความเครียดของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำต่อเนื่อง

ที่มา : Huang (2004)

โดยทั่วไปโมดูลัสคืนตัวมีค่าใกล้เคียงกับโมดูลัสยืดหยุ่น เนื่องจากความเครียดทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกับความเครียดคืนตัว ทำให้ในทางปฏิบัติสามารถนำโมดูลัสยืดหยุ่นมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทาง และสมมติให้วัสดุโครงสร้างทางและดินเดิมเป็นวัสดุยืดหยุ่น (อินวิน สวัสดิ์สานต์, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ์ และ อภิสิทธิ์ กล้าเหม็ง, 2551)

2.4. การแอ่นตัว (Deflection)

การแอ่นตัว (Deflection) เป็นตัวแปรที่ประมาณความแข็งแรงของโครงสร้างทาง ซึ่งสามารถทดสอบได้ด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing, NDT) โดยกำหนดน้ำหนักแรงกระทำที่กำหนดลงไปจะทำให้เกิดค่าการแอ่นตัวของผิวทางสูงสุด (Pavement Deflection) ในตำแหน่งที่แรงกระทำ และระยะที่ห่างออกจากแรงกระทำจะมีค่าการแอ่นตัวลดลง ซึ่งหมายถึงแอ่งการแอ่นตัว (Deflection Basin) แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพแอ่งการแอ่นตัวของผิวทาง

ที่มา : สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท (2563)

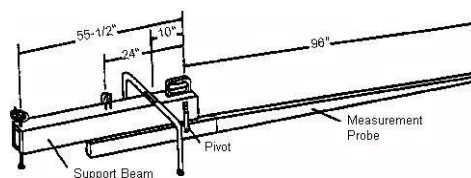
ประโยชน์ในการนำค่าการแอ่นตัวมาใช้ คือสามารถประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างทาง โดยการเพิ่มประสิทธิภาพของทางเพื่อรับปริมาณจราจรในอนาคตได้ (Pierce และคณะ, 2017) สามารถนำไปใช้หาสาเหตุความเสียหายของโครงสร้างทาง และสามารถจัดลำดับความสำคัญของการซ่อมบำรุงทางได้ (สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท, 2563)

2.4.1. การทดสอบหาค่าการแอ่นตัว

การทดสอบหาค่าการแอ่นตัว โดยทั่วไปจะมีทั้งหมด 3 ประเภทในวิธีการทดสอบไม่ทำลาย ได้แก่ การทดสอบแบบอยู่กับที่ (Static Loading) การทดสอบแบบสภาวะคงตัว (Steady State Loading) และการทดสอบแบบแรงกระแทก (Impact Loading)

2.4.1.1. การทดสอบแบบอยู่กับที่ (Static Loading)

การทดสอบแบบอยู่กับที่ (Static Loading) จะใช้เครื่องมือ Benkelman Beam ในการทดสอบ ซึ่งตัวเครื่องมือมีรูปแบบในรูปที่ 4 และทดสอบโดยการวางตัวเครื่องที่ตำแหน่งระหว่างล้อคู่ของรถบรรทุก 18 ล้อ น้ำหนัก 80 กิโลนิวตัน (kN) หรือ 18,000 ปอนด์ (lb) และยางรถมีความดันระหว่าง 480 ถึง 550 กิโลปาสคาล (kPa) หรือ 70 ถึง 80 ปอนด์ต่อตารางฟุต (psf) มีรูปแบบการทดสอบดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 รูปแบบของ Benkelman Beam

ที่มา : Pavement Interactive (2010)



รูปที่ 5 การทดสอบการแอ่นตัวของถนนโดยใช้เครื่องมือ Benkelman Beam

ที่มา : Pavement Interactive (2010)

ข้อดีในการทดสอบด้วย Benkelman Beam คือราคาค่อนข้างไม่แพง แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถวัดแ่งการแอ่นตัวได้ แต่สามารถวัดค่าการแอ่นตัวสูงสุดได้ ใช้แรงงานคนจำนวนมาก ทดสอบช้า และต้องควบคุมการจราจรสำหรับการหยุดรถเพื่อทดสอบในการหาค่าแอ่นตัว (Pierce และคณะ, 2017)

2.4.1.2. การทดสอบแบบสภาวะคงตัว (Steady State Loading)

การทดสอบแบบสภาวะคงตัว (Steady State Loading) นิยมใช้เครื่องมือ Dynaflect ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ไม่เปลี่ยนแปลงการสั่นตัวโดยใช้เครื่องปั่นแรงพลวัต (Dynamic Force Generator) ตำแหน่งการทดสอบจะเป็นการทดสอบที่ผิวทาง ค่าการแอ่นตัวสามารถวัดได้โดยใช้ตัวแปลงสัญญาณความเร็ว (Velocity Transducers) มีรูปแบบการทดสอบดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การทดสอบการแอ่นตัวของถนนโดยใช้เครื่องมือ Dynaflect

ที่มา : Pavement Interactive (2010)

การทดสอบแบบสภาวะคงตัวสามารถวัดแ่งการแอ่นตัวได้ แต่ต้องมีการควบคุมจราจรในช่วงระหว่างการทดสอบและมีความเหมาะสมกับผิวทางที่บาง เนื่องจากแรงกระทำเบา (Pierce และคณะ, 2017)

2.4.1.3. การทดสอบแบบแรงกระแทก (Impact Loading)

การทดสอบแบบแรงกระแทก (Impact Loading) จะใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ทดสอบ ซึ่งทดสอบโดยปล่อยน้ำหนักกระทำลงในแต่ละจุดโดยความสูงที่ปล่อยลงมาจะแตกต่างกัน น้ำหนักที่ปล่อยลงมาจะอยู่ในช่วงระหว่าง 6.7 ถึง 120 kN หรือ 1,500 ถึง 27,000 lbf การวัดค่าการแอ่นตัวสามารถวัดได้จากเครื่องมือวัดแผ่นดินไหว (Seismometer) ตัวแปลงสัญญาณความเร็ว และเครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer) มีรูปแบบการทดสอบดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดสอบการแอ่นตัวโดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer

ที่มา : สมศักดิ์ ธรรมจารุสิริ และคณะ (2561)

สมศักดิ์ ธรรมจารุสิริ และคณะ (2561) ได้กล่าวว่าผลจากการทดสอบด้วยเครื่อง FWD จะถูกจัดเก็บในรูปแบบของค่าการแอ่นตัวของเซ็นเซอร์ในคานทดสอบการแอ่นตัว (Geophone) และความเค้นใต้จุดกึ่งกลางของแผ่นทดสอบ ซึ่งข้อมูลดิบที่ได้มาไม่สามารถนำมาประเมินคุณสมบัติของชั้นโครงสร้างทางได้โดยตรง จึงต้องนำข้อมูลมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลประกอบด้านอื่นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประเมินความแข็งแรงโดยรวมของชั้นโครงสร้างทาง โดยใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation Method) ทำให้ทราบถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ความหนา และอายุคงเหลือของชั้นโครงสร้างในแต่ละชั้น โดยจะนำข้อมูลเหล่านี้มาประเมินเพื่อออกแบบยกกระดับ หรือออกแบบขยายช่องจราจรให้เหมาะสมกับความแข็งแรงของโครงสร้างทางปัจจุบัน และปริมาณจราจรที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

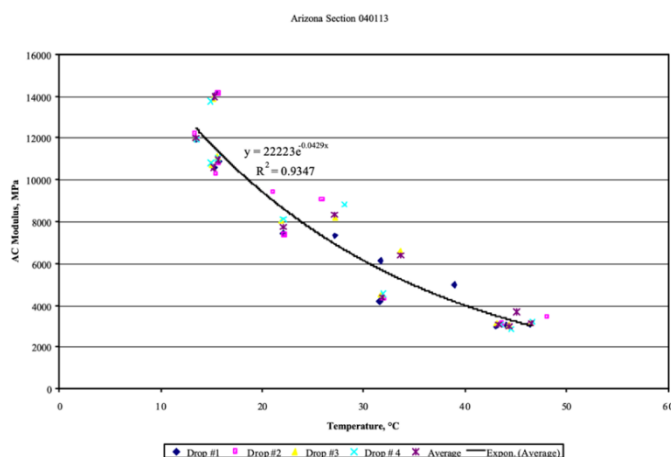
กรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์วัดการแอ่นตัว (Geophone) ที่ระยะ 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1,200, 1,500 และ 1,800 มิลลิเมตร จากจุดกึ่งกลางของแผ่นทดสอบ การทดสอบของกรมทางหลวงใช้วิเคราะห์จะใช้แรงกระทำที่ 754 kPa ซึ่งสอดคล้องกับขนาดน้ำหนักของรถบรรทุกขนาด 25 ตันที่ ถ่วงน้ำหนักลงเพลาลงผ่านล้อที่กระทำต่อโครงสร้างทาง ซึ่งเป็นขนาดรถบรรทุกทุกตามประกาศของกรมทางหลวงวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2548 ซึ่งห้ามยานพาหนะที่มีน้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลากินกว่ากำหนด ตำแหน่งการทดสอบจะทดสอบที่ร่องล้อซ้ายของช่องจราจรซ้าย (เลนรถบรรทุก) (ภัทรพล สีดอกบวบ และคณะ, 2557) และการทดสอบของกรมทางหลวงชนบทจะใช้แรงกดในการทดสอบ 50 kN ตามมาตรฐาน ASTM D 469 ตำแหน่งทำการทดสอบตลอดความยาว

ของสายทาง โดยทดสอบทุกระยะ 250 เมตร สำหรับสายทางที่มีปริมาณจราจรน้อยถึงปานกลาง หรือทุกระยะ 100 เมตร ในสายทางที่เป็นสายหลักที่มีปริมาณจราจรจำนวนมาก โดยทั่วไปการทดสอบจะทำการปล่อยตุ้มน้ำหนักบริเวณร่องล้อซ้ายของช่องจราจรซ้ายสุด เพื่อให้ตำแหน่งทดสอบสอดคล้องกับสมมติฐานการทดสอบแบบกึ่งกลาง (สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท, 2563)

2.4.2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการแอ่นตัว

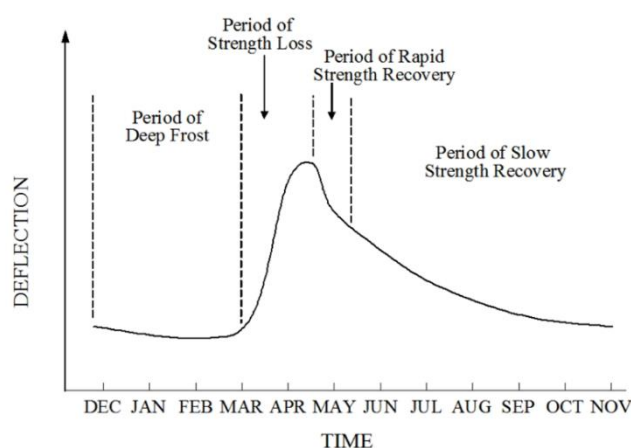
จากรายงาน FHWA-HRT-16-009 ของ Smith และคณะ (2017) กล่าวว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อค่าการแอ่นตัวสามารถแบ่งได้ทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ ประเภทของโครงสร้างทาง แรงที่กระทำต่อผิวทาง และลักษณะภูมิอากาศ

- 1) ประเภทของโครงสร้างทาง การทดสอบหาค่าการแอ่นตัวจะเป็นการทดสอบโครงสร้างทุกชั้นที่อยู่ภายใต้แรงกระทำ ซึ่งหมายความว่าขึ้นอยู่กับความหนาของโครงสร้างในแต่ละชั้น และชนิดวัสดุที่ใช้ในการสร้างถนน โดยวัสดุที่ใช้ในการสร้างถนนมีความแข็งแรงที่แตกต่างกัน
- 2) แรงที่กระทำต่อผิวทาง แรงกระทำที่ใช้จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหนักรถที่ตกลงบนผิวทางเป็นประจำ ซึ่งจำเป็นต้องเลือกแรงกระทำให้ใกล้เคียงกับค่าแรงกระทำที่ใช้ในการออกแบบ ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบทางหลวงทั่วไปแรงกระทำที่ใช้ทดสอบบ่อยครั้งคือ 40 kN หรือ 9,000 lbf เนื่องจากเป็นตัวแทนของน้ำหนักเพลามาตรฐาน 80 kN หรือ 18,000 lbf แต่ถ้าเป็นแรงกระทำที่ใช้ทดสอบเป็น 156 ถึง 200 kN หรือ 35,000 ถึง 45,000 lbf จะเป็นการทดสอบผิวทางของสนามบิน รวมถึงประเภทน้ำหนักรถ ซึ่งทำให้เกิดค่าการแอ่นตัวที่แตกต่างกัน เช่น การทดสอบด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam มีแนวโน้มที่มีค่าการแอ่นตัวมากกว่าการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD
- 3) ลักษณะภูมิอากาศ แบ่งได้ 2 ประเภท คืออุณหภูมิและฤดูกาล โดยอุณหภูมิจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการทดสอบหาค่าการแอ่นตัว ในถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ถ้าไม่ดูถึงความยืดหยุ่นมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการแอ่นตัวมีค่ามากขึ้น มีตัวอย่างความสัมพันธ์ดังรูปที่ 8 และฤดูกาล ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่ออุณหภูมิ ความชื้นของถนน และยังส่งผลถึงค่าการแอ่นตัวได้ โดยถ้ามีอุณหภูมิที่เย็นจะส่งผลให้ค่าการแอ่นตัวลดลงเนื่องจากโครงสร้างทางที่แข็ง แต่ถ้าอุณหภูมิที่ร้อนจะส่งผลให้ค่าการแอ่นตัวเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากโครงสร้างทางที่อ่อนตัวลง แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความแข็งแรงของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

ที่มา : Von Quintus และ Simpson (2002)



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการสำรวจและค่าการแอ่นตัวของถนน

ที่มา : Lytton, Moore และ Mahoney (1975)

2.5. การทำนายปริมาณจราจร

ปริมาณจราจรบนถนน ในรูปแบบการทำให้เป็นความเสียหายต่อโครงสร้างทางจะเป็นจำนวนเพลามาตรฐาน (Equivalent Single Axle Load, ESAL) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างทาง ทำให้ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตยุบตัวลงเนื่องจากน้ำหนักของรถที่กดทับต่อเนื่องโดยการคำนวณปริมาณ ESAL โดย AASHTO (1993) ได้สร้างสมการทำนายปริมาณจราจรที่เกิดขึ้นในอนาคตได้จากสมการที่ (3) และสมการที่ (4)

$$\text{Total ESAL} = \sum \text{ESAL}_i \quad (3)$$

$$\text{ESAL}_i = \text{ADT}_0 \times T_i \times (T_f)_i \times G \times D \times L \times 365 \quad (4)$$

โดยที่	Total ESAL	คือจำนวนเพลามาตรฐานทั้งหมด (ESAL)
	ESAL_i	คือจำนวนเพลามาตรฐานในแต่ละประเภท (ESAL)
	ADT_0	คือปริมาณจราจรต่อวันเริ่มต้นที่ใช้ในการออกแบบ (คันต่อวัน)
	T_i	คือร้อยละของปริมาณรถบรรทุกแต่ละประเภท
	$T_{f,i}$	คือสัมประสิทธิ์ของน้ำหนักรถบรรทุกแต่ละประเภท
	L	คือร้อยละของปริมาณจราจรในแต่ละเลนและทิศทาง
	D	คือร้อยละของปริมาณจราจรในแต่ละทิศทาง
	G	คืออัตราการเติบโตของจราจร คำนวณจากสมการที่ (5)

$$G = \frac{(1+g)^n - 1}{g} \quad (5)$$

โดยที่	g	คือร้อยละการเติบโตของปริมาณจราจร
	n	คือจำนวนปีที่ใช้ในการออกแบบ

การกระจายตัวของรถบรรทุก (Lane Distribution) ในสายทางขึ้นอยู่กับปริมาณจราจรและจำนวนเลนถนน ซึ่ง Darter และคณะ (1985) ได้กำหนดร้อยละของปริมาณรถบรรทุกในแต่ละเลนถนน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณจราจรในแต่ละทิศทาง และ Truck Factor ขึ้นอยู่กับชนิดและน้ำหนักของรถบรรทุกแต่ละประเภท ซึ่งกำหนด Truck Factor จากข้อมูลมาจากการดำเนินงานทั่วประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกระจายตัวรถบรรทุกขึ้นอยู่กับจำนวนเลนถนน

ปริมาณ จราจร ทิศทางเดียว	2 เลนถนน		3 เลนถนน หรือมากกว่า		
	เลนใน	เลนนอก	เลนใน*	เลนกลาง	เลนนอก
2000	6**	94	6	12	82
4000	12	88	6	18	76
6000	15	85	7	21	72
8000	18	82	7	23	70
10000	19	81	7	25	68
15000	23	77	7	28	65
20000	25	75	7	30	63
25000	27	73	7	32	61
30000	28	72	8	33	59
35000	30	70	8	34	58
40000	31	69	8	35	57
50000	33	67	8	37	55
60000	34	66	8	39	53
70000	-	-	8	40	52
80000	-	-	8	41	51
100000	-	-	9	42	49

หมายเหตุ * คือรวมกับเลนด้านในสุด 1 เลนหรือมากกว่า 1 เลน

** คือร้อยละของปริมาณรถบรรทุกใน 1 ทิศทาง

ที่มา : Darter และคณะ (1985)

แฟกเตอร์รถบรรทุก (Truck Factor) ขึ้นอยู่กับชนิดและน้ำหนักของรถบรรทุกแต่ละประเภท ซึ่งกรมทางหลวงได้กำหนดค่า Truck Factor ที่มาจากข้อมูลมาจากการดำเนินงานทั่วประเทศไทยแสดงดัง
ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แฟคเตอร์รถบรรทุกแต่ละประเภท

ประเภทรถบรรทุก	Truck factor (กรมทางหลวงปีพ.ศ. 2552)
รถบรรทุก 2 เพลา	1.03
รถบรรทุก 3-4 เพลา	1.57
รถบรรทุกกึ่งพ่วง	2.93
รถพ่วง	5.90

ที่มา : วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน (2556)

2.6. Structural Number

ค่า Structural Number (SN) เป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงของโครงสร้างทาง ซึ่งมี ความสัมพันธ์ระหว่างความหนา ชนิดวัสดุ และการระบายน้ำออกของวัสดุแต่ละชนิดในโครงสร้างทาง โดย AASHTO (1993) ได้สร้างสมการทำนายค่า SN ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (6)$$

โดยที่ SN คือค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทาง

a_1, a_2, a_3 คือค่าสัมประสิทธิ์โครงสร้างวัสดุชั้นผิวทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทางตามลำดับ

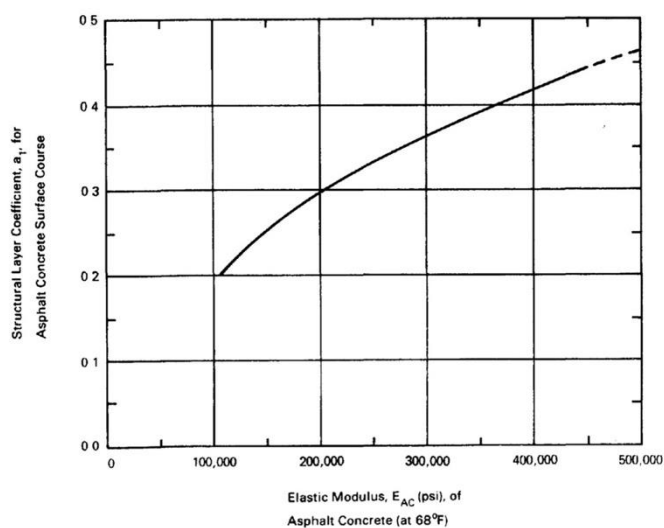
D_1, D_2, D_3 คือความหนาของชั้นผิวทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทางตามลำดับ (in)

m_2, m_3 คือค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำของชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทางตามลำดับ

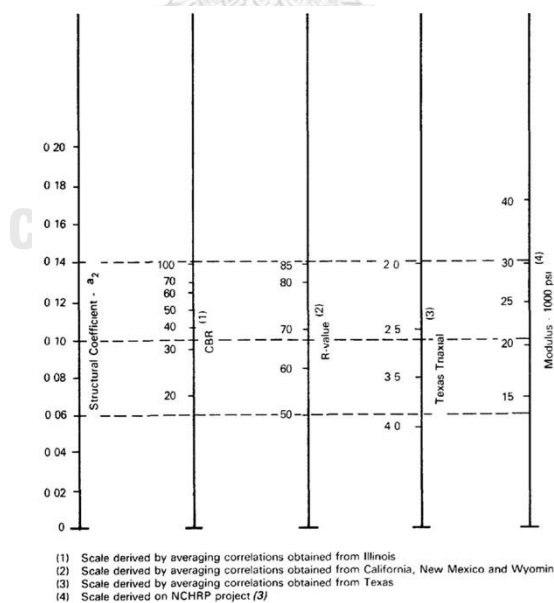
2.6.1. สัมประสิทธิ์วัสดุโครงสร้าง (Structural Layer Coefficient)

สัมประสิทธิ์วัสดุโครงสร้าง (Structural Layer Coefficient, a_i) เป็นตัวแปรที่เปลี่ยนมาจากค่าโมดูลัสของโครงสร้างในแต่ละชั้นทาง ซึ่ง AASHTO (1993) กล่าวว่าค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่เลือก โดยมีความสัมพันธ์กับโมดูลัสยืดหยุ่นของแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 68 องศาฟาเรนไฮต์ และมีเงื่อนไขคือค่าโมดูลัสไม่ควรเกิน 450,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เนื่องจากถ้าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงมาก ทำให้มีความอ่อนแอกับความเสียหายที่มาจากความร้อน (Thermal Cracking) และความเสียหายจากการล้า (Fatigue Cracking) ได้ ค่าสัมประสิทธิ์โครงสร้างวัสดุชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถหาได้จากรูปที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์โครงสร้างวัสดุชั้นพื้นทางสำหรับวัสดุไม่เกาะตัว (Unbound Material) สามารถหาได้จากรูปที่ 11 หรือสมการที่ (7) ค่าสัมประสิทธิ์โครงสร้างวัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (Cement-Treated Base, CTB) สามารถ

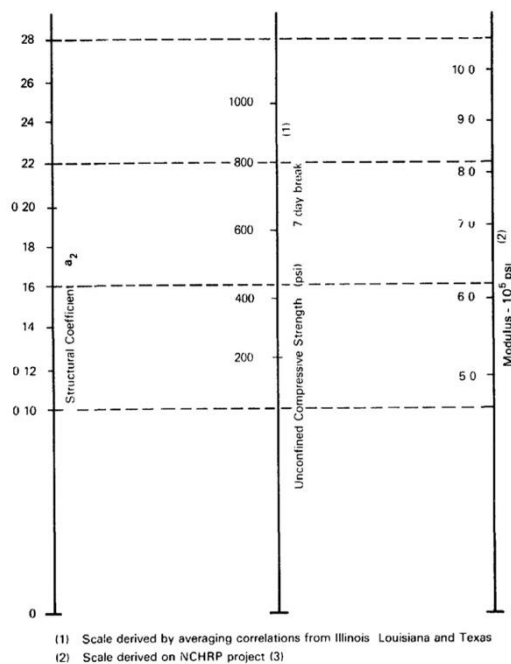
หาได้จากรูปที่ 12 และค่าสัมประสิทธิ์โครงสร้างวัสดุชั้นรองพื้นทางหาได้จากรูปที่ 13 หรือสมการที่ (8)



รูปที่ 10 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางชั้นผิวทางโดยใช้โมดูลัสยืดหยุ่นของแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 68 องศาฟาเรนไฮต์
ที่มา : AASHTO (1993)

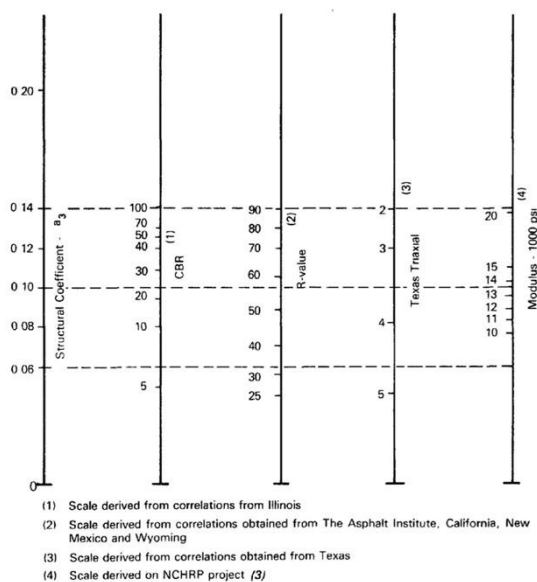


รูปที่ 11 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางชั้นพื้นทางของวัสดุไม่เกาะตัว
ที่มา : AASHTO (1993)



รูปที่ 12 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางของวัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์

ที่มา : AASHTO (1993)



รูปที่ 13 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางชั้นรองพื้นทาง

ที่มา : AASHTO (1993)

$$a_2 = 0.249 \log_{10} E_{BS} - 0.977 \quad (7)$$

$$a_3 = 0.227 \log_{10} E_{SB} - 0.839 \quad (8)$$

โดยที่ a_2 คือสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางชั้นพื้นทางสำหรับวัสดุไม่เกาะตัว
 a_3 คือสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางชั้นรองพื้นทางสำหรับวัสดุไม่เกาะตัว
 E_{AC} คือโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นผิวทาง (MPa)
 E_{BS} คือโมดูลัสคั่นตัวชั้นพื้นทาง (psi)
 E_{SB} คือโมดูลัสคั่นตัวชั้นรองพื้นทาง (psi)

นอกจากนี้ Rohde และ Hartman (1996) ได้พัฒนาการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์โครงสร้างทางในแต่ละวัสดุ ซึ่งได้พัฒนามาจาก AASHTO Pavement Design Guide ในปี ค.ศ.1986 แสดงดังสมการที่ (9)

$$a_i = a_g \left(\frac{E_i}{E_g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

โดยที่ a_i คือสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางของวัสดุ
 a_g คือสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างทางของวัสดุมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 3
 E_i คือโมดูลัสของวัสดุ (MPa)
 E_g คือโมดูลัสของวัสดุมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์โครงสร้างทางและโมดูลัสมาตรฐานจากการทดสอบ AASHTO สำหรับวัสดุแต่ละชนิด

ประเภทวัสดุ	Layer coefficient (a_g)	โมดูลัสวัสดุมาตรฐาน (E_g) (MPa)
แอสฟัลต์คอนกรีตชั้นผิวทาง	0.44	3100
ชั้นพื้นทางวัสดุไม่เกาะตัวหรือชั้นพื้นทางพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์	0.14	207
ชั้นรองพื้นทางวัสดุละเอียด	0.11	104

ที่มา : Rohde และ Hartman (1996)

2.6.2. สัมประสิทธิ์การระบายน้ำ (Drainage Coefficient)

สัมประสิทธิ์การระบายน้ำ (Drainage Coefficient, m) เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเวลาการระบายน้ำหรือความชื้นออกจากโครงสร้างทาง ซึ่ง AASHTO (1993) ได้กำหนดเงื่อนไขเกี่ยวกับคุณภาพของการระบายน้ำทั่วไปสำหรับชั้นพื้นทางสำหรับวัสดุไม่เกาะตัวและชั้นรองพื้นทาง สามารถหาได้จากตารางที่ 4 และชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์สามารถหาได้จากตารางที่ 5

ตารางที่ 4 การเลือกสัมประสิทธิ์การระบายน้ำที่เหมาะสมของชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางสำหรับวัสดุไม่เกาะตัว

ประสิทธิภาพในการระบายน้ำ	ระยะเวลาการระบายน้ำ	ร้อยละของเวลาที่โครงสร้างทางถึงจุดอิ่มตัว			
		น้อยกว่า 1	1 - 5	5 - 25	มากกว่า 25
ยอดเยี่ยม	2 ชั่วโมง	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
ดี	1 วัน	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.10	1.00
พอใช้	1 สัปดาห์	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
แย่มาก	1 เดือน	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
แย่มาก	น้ำไม่ระบาย	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

ที่มา : AASHTO (1993)

ตารางที่ 5 การเลือกสัมประสิทธิ์การระบายน้ำที่เหมาะสมของชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์

ประสิทธิภาพในการระบายน้ำ	ระยะเวลาการระบายน้ำ	ร้อยละของเวลาที่โครงสร้างทางถึงจุดอิ่มตัว			
		น้อยกว่า 1	1 - 5	5 - 25	มากกว่า 25
ยอดเยี่ยม	2 ชั่วโมง	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
ดี	1 วัน	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
พอใช้	1 สัปดาห์	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
แย่มาก	1 เดือน	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
แย่มาก	น้ำไม่ระบาย	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

ที่มา : AASHTO (1993)

2.7. การคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation)

การคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation) เป็นการคำนวณข้อมูลที่ได้จากการเอนตัวของ การทดสอบ FWD ให้เป็นค่า Structural Number ซึ่งเป็นตัวแทนความแข็งแรงของโครงสร้างทาง มี ปัจจัยมาจากสภาพของผิวทาง สภาพของชั้นด้านล่างผิวทาง รูปแบบวัสดุแต่ละชนิด และโครงสร้าง ทางที่กำหนด (Pierce และคณะ, 2017) โดยที่ AASHTO (1993) ได้พัฒนาสมการการออกแบบค่า โมดูลัสที่มาจาก การทดสอบ FWD มีปัจจัยมาจากน้ำหนักกดของ FWD ค่าการเอนตัว และระยะทาง ของจุดกึ่งกลางแผ่นกึ่งถึงจุดที่ทดสอบค่าการเอนตัวสามารถคำนวณได้จาก **สมการที่(10)** โดยการ คำนวณหาค่าโมดูลัสที่ใช้ในการออกแบบไม่จำเป็นต้องปรับแก้อุณหภูมิ แต่มีเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับ ระยะห่างจากแผ่นกึ่งน้ำหนักที่มาจาก การทดสอบ FWD เพื่อคำนวณหาโมดูลัสคืนตัว มีเงื่อนไข ระยะห่างจากแผ่นกึ่งน้ำหนักดัง **สมการที่ (11)** และสามารถคำนวณระยะห่างที่มาจากเงื่อนไขได้จาก **สมการที่ (12)**

$$\text{Design } M_R = CM_{R-\text{Field}} = C \left(\frac{0.24P}{d_r r} \right) \quad (10)$$

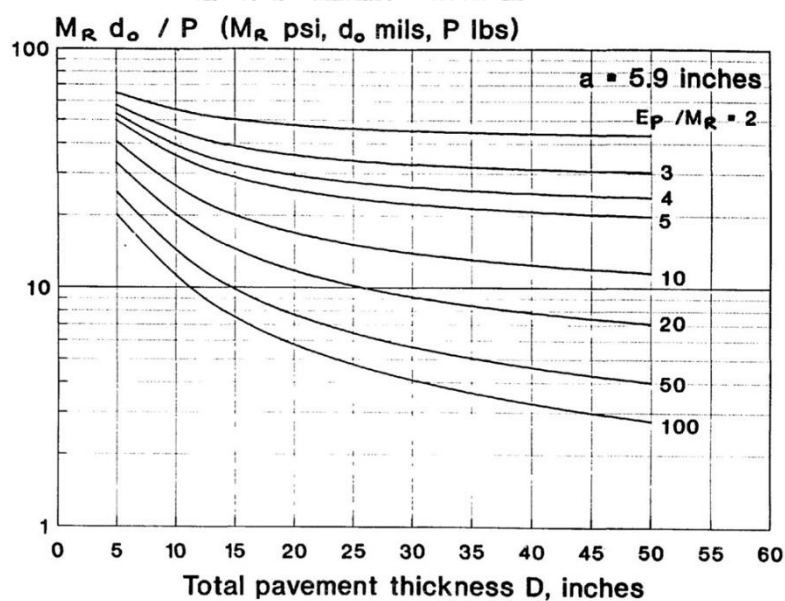
โดยที่	Design M_R	คือโมดูลัสคืนตัวของดินชั้นดินเดิมที่ใช้ในการออกแบบ (psi)
	$M_{R-\text{Field}}$	คือโมดูลัสคืนตัวของดินชั้นดินเดิมจากการทดสอบ FWD (psi)
	P	คือน้ำหนักกดของ FWD (lb)
	C	คือค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับแก้ ซึ่ง AASHTO (1993) กำหนดเป็น 0.33
	d_r	คือการเอนตัวที่ระยะ r จากจุดกึ่งกลางแผ่นน้ำหนัก (in)
	r	คือระยะทางจากจุดกึ่งกลางแผ่นน้ำหนักถึงตำแหน่งที่ทดสอบการเอนตัว (in)

$$r \geq 0.7a_e \quad (11)$$

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(D^3 \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2 \right]} \quad (12)$$

- โดยที่ a คือรัศมีแผ่นกด (in)
 D คือความหนาของถนนจากด้านบนของชั้นดินเดิมถึงชั้นผิวทาง (in)
 M_R คือโมดูลัสคืนตัวของดินชั้นดินเดิมที่ใช้ในการออกแบบ (psi)
 E_p คือโมดูลัสประสิทธิภาพของถนนตั้งแต่ชั้นดินเดิมขึ้นไป (psi)

สำหรับรัศมีแผ่นกดที่มีรัศมีเป็น 5.9 นิ้วสามารถหาค่าอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสประสิทธิภาพ (E_p) และโมดูลัสคืนตัวของดินเดิมที่ใช้ออกแบบ (M_R) ได้จากรูปที่ 14 เมื่อคำนวณหาโมดูลัสคืนตัวของดินชั้นดินเดิมได้ สามารถหาโมดูลัสประสิทธิภาพของชั้นด้านบนดินเดิมได้ในสมการที่ (13) เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่า Structural Number ที่คงเหลือในปัจจุบันได้จากสมการที่ (14)



รูปที่ 14 การหาค่าอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสประสิทธิภาพและโมดูลัสคืนตัวของดินเดิมที่ใช้ออกแบบ

ที่มา : AASHTO (1993)

$$d_0 = 1.5pa \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D^3}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\} \quad (13)$$

โดยที่	d_0	คือค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางแผ่นน้ำหนักร 9000 ปอนด์ อุณหภูมิ 20 °C (in)
	p	คือน้ำหนักแรงกระทำของแผ่นน้ำหนักกด (psi)
	a	คือรัศมีแผ่นกด (in)
	D	คือความหนาของถนนจากด้านบนของชั้นดินเดิมถึงชั้นผิวทาง (in)
	M_R	คือโมดูลัสคืนตัวของดินชั้นดินเดิมที่ทดสอบจาก FWD (psi)
	E_p	คือโมดูลัสประสิทธิภาพของถนนตั้งแต่ชั้นดินเดิมขึ้นไป (psi)

$$SN_{eff} = 0.0045D^3 \sqrt{E_p} \quad (14)$$

โดยที่	SN_{eff}	คือค่า Structural Number ที่คงเหลือในปัจจุบัน
	E_p	คือโมดูลัสประสิทธิภาพของถนน (psi)
	D	คือความหนาของถนนจากด้านบนของชั้นดินเดิมถึงชั้นผิวทาง (in)

ระยะ r ที่ใช้ออกแบบสามารถใช้เช่นเซอร์ที่ทดสอบการแอ่นตัวของ FWD ที่ระยะมากกว่า 36 นิ้วได้ จากการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัวในสมการที่ (10) และผลการทดสอบรายงาน LRTC Report ฉบับที่ 417 พบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวมีความสอดคล้องกัน (Wu และ Gaspard, 2009)

2.8. การประมาณอายุคงเหลือของทาง

อายุคงเหลือของทางมีปัจจัยมาจากแรงกระทำของจราจรอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ทางมีความเสียหายหลัก 2 รูปแบบ ได้แก่ ความเสียหายที่ชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต และความเสียหายแบบร่องล้อ โดยในประเทศไทยมีความเสียหายแบบร่องล้อมากที่สุด (อินวิน สวัสดิ์ศานต์ และคณะ, 2551)

NCHRP 1-37A (2004) และ AASHTO (2011) ได้พัฒนาสมการทำนายความเสียหายของชั้นผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีตได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ ความเสียหายแบบรอยแตกคล้ายผิวจระเข้ (Alligator Cracking) และความเสียหายแนวยาว (Longitudinal Cracking) โดยใช้วิธีของ Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) ซึ่งความเสียหายแบบรอยแตกคล้ายผิวจระเข้เป็นความเสียหายที่ด้านล่างของแอสฟัลต์คอนกรีต ส่งผลให้ความเสียหายกระจายสู่พื้นผิวทางเมื่อรองรับปริมาณจราจรอย่างต่อเนื่อง และความเสียหายแนวยาวเป็นความเสียหายที่ด้านบนของแอสฟัลต์คอนกรีต การทำนายอายุคงเหลือถนนที่มาจากความเสียหายชั้นผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถทำนายได้จากสมการที่ (15)

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\epsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA})^{k_{f3}\beta_{f3}} \quad (15)$$

โดยที่	N_{f-HMA} (ESAL)	คืออายุทางที่รองรับได้จากความเสียหายแบบล้าของแอสฟัลต์คอนกรีต
	ϵ_t	คือความเครียดแรงดึงใต้ผิวแอสฟัลต์คอนกรีต
	E_{HMA}	คือโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต (psi)
	k_{f1}, k_{f2}, k_{f3}	คือสัมประสิทธิ์ทำนายปริมาณจราจรที่ยอมให้
	$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$	คือสัมประสิทธิ์ของวัสดุ ถ้าเป็นมาตรฐานสากลจะมีค่าเป็น 1.0
	C	คือสัมประสิทธิ์ของส่วนประกอบแอสฟัลต์คอนกรีต คำนวณได้จาก
สมการที่ (16)		

$$C = 10^{4.84\left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69\right)} \quad (16)$$

โดยที่	V_{be}	คือร้อยละของปริมาณแอสฟัลต์ต่อปริมาณทั้งหมด
	V_a	คือร้อยละของปริมาณช่องว่างในแอสฟัลต์คอนกรีต

C_H คือสัมประสิทธิ์ของความหนาที่มีปัจจัยมาจากความเสียหาย ถ้าเป็นความเสียหายแบบรอยแตกคล้ายผิวจระเข้ คำนวณโดยใช้สมการที่ (17) และถ้าเป็นความเสียหายแนวยาว คำนวณโดยใช้สมการที่ (18)

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49H_{HMA})}}} \quad (17)$$

$$C_H = \frac{1}{0.01 + \frac{12.00}{1 + e^{(15.676 - 2.8186H_{HMA})}}} \quad (18)$$

โดยที่ H_{HMA} คือความหนาของแอสฟัลต์คอนกรีต (in)

ความเสียหายแบบร่องล้อ (Rutting) เป็นความเสียหายที่ส่งผลกระทบต่อทุกชั้นของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต สมการทำนายใช้ความเครียดยืดหยุ่นแนวดิ่งซึ่งมีเงื่อนไขมาจากปริมาณจราจร (AASHTO, 2011) ซึ่งเป็นสมการทำนายทั่วไปดัง**สมการที่ (19)** โดยเกณฑ์การกำหนดความเสียหายขึ้นอยู่กับผู้พัฒนา แสดงดัง**ตารางที่ 6**

$$N_r = a\varepsilon_v^{-b} \quad (19)$$

โดยที่ N_r คืออายุทางของความเสียหายร่องล้อที่รองรับได้ของวัสดุแต่ละชนิด (ESAL)
 ε_v คือความเครียดยืดหยุ่นเฉลี่ยแนวดิ่งด้านบนของชั้นดินเดิม
 a, b คือสัมประสิทธิ์ปรับแก้ของวัสดุ

ตารางที่ 6 เกณฑ์การกำหนดความเสียหายและสัมประสิทธิ์ของผู้พัฒนา

ผู้พัฒนา	ระยะร่องล้อที่กำหนด	สัมประสิทธิ์ปรับแก้ของวัสดุ	
		a	b
Asphalt Institute (1982)	ไม่เกิน 0.5 นิ้ว	1.365×10^{-9}	-4.477
Shell (1985)	ไม่เกิน 0.5 นิ้ว	1.94×10^{-7}	-4
Transport Research Laboratory (1985)	ไม่เกิน 0.4 นิ้ว	6.18×10^{-8}	-3.95

ที่มา : Huang (2004)

อายุคงเหลือของชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์เป็นความเสียหายแบบล้า ซึ่งมีความเสียหายเป็นรูปแบบเดียวกันกับชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต อายุคงเหลือของชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำต่อวัสดุและความแข็งแรงของวัสดุ แสดงดัง**สมการที่ (20)**

$$\log(N_{f-CTB}) = \frac{0.972\beta_{c1} - \left(\frac{\sigma_t}{MR}\right)}{0.0825\beta_{c2}} \quad (20)$$

โดยที่ N_{f-CTB} คืออายุทางที่รองรับได้จากความเสียหายแบบล้าของพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (ESAL)

σ_t คือแรงดึงสูงสุดที่ตำแหน่งด้านล่างสุดของชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (psi)

β_{c1}, β_{c2} คือ สัมประสิทธิ์ของวัสดุ ถ้าเป็นมาตรฐานสากลจะมีค่าเป็น 1.0

MR คือโมดูลัสแตกหัก (Modulus of rupture, psi)

2.9. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ อ้างอิงจากการใช้ทฤษฎี MEPDG ซึ่งมีที่มาจาก การพัฒนาการออกแบบโครงสร้างทางของ AASHTO ซึ่งแบ่งเป็นชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ชั้นวัสดุแบบไม่เกาะตัว และชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์

2.9.1. ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงจากการเสื่อมอายุ (Aging) และการเปลี่ยนแปลงจากปริมาณจราจรที่กระทำ

การเปลี่ยนแปลงจากการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ เป็นการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของผิวทางจากระยะเวลา ชนิดของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต และสภาพแวดล้อม ซึ่งได้กำหนดการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุแอสฟัลต์เป็นความหนืด (Viscosity) ซึ่ง NCHRP 1-37A (2004) ได้กำหนดปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงวัสดุชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ อุณหภูมิผิวทาง ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ปริมาณหินในแต่ละขนาด เวลา และช่องว่างอากาศ และพัฒนาสมการการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุแอสฟัลต์ ซึ่งสมการกำหนดรูปแบบความแข็งแรงเป็นโมดูลัสพลวัต (Dynamic Modulus, E^*) ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ และสมการเป็นรูปแบบ Master Curve การคำนวณการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุแอสฟัลต์แสดงดังสมการที่ (21), สมการที่ (22), สมการที่ (23), สมการที่ (24) และสมการที่ (25)

$$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log t_r}} \quad (21)$$

$$\log(t_r) = \log(t) - c(\log(\eta) - \log(\eta_{t_r})) \quad (22)$$

$$\delta = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \left[\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right] \quad (23)$$

$$\alpha = 3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34} \quad (24)$$

$$\beta = -0.603313 - 0.393532 \log(\eta_{t_r}) \quad (25)$$

- โดยที่ E^* คือค่าโมดูลัสของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่เกี่ยวข้องกับวัสดุและเวลา (psi)
- t คือเวลาของการกระทบน้ำหนัในวัสดุแอสฟัลต์ (s)
- t_r คือเวลามาตรฐานของการกระทบน้ำหนัในวัสดุแอสฟัลต์ (s)
- η คือความหนืดของแอสฟัลต์ (10^6 Poise)
- η_{t_r} คือความหนืดของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิมาตรฐาน (10^6 Poise)
- δ คือค่าที่ต่ำที่สุดของค่า E^*
- $\delta + \alpha$ คือค่าที่สูงที่สุดของค่า E^*
- β, γ คือค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับของฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoidal Function)
- $\gamma = 0.313351$
- $c = 1.255882$
- ρ_{34} คือร้อยละของปริมาณหินค้ำตะแกรงขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว
- ρ_{38} คือร้อยละของปริมาณหินค้ำตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$ นิ้ว
- ρ_4 คือร้อยละของปริมาณหินค้ำตะแกรงเบอร์ 4
- ρ_{200} คือร้อยละของปริมาณหินค้ำตะแกรงเบอร์ 200
- V_{beff} คือร้อยละของปริมาณแอสฟัลต์ต่อปริมาณทั้งหมด
- V_a คือร้อยละของปริมาณช่องว่างในแอสฟัลต์คอนกรีต

ความหนืดของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิของแอสฟัลต์และชนิดของแอสฟัลต์ที่ใช้ในโครงสร้างทาง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (26) และพารามิเตอร์ของวัสดุแอสฟัลต์ที่ใช้โครงสร้างทาง แบ่งรูปแบบเป็น Low Mix, Med Mix และ High Mix แสดงดังตารางที่ 7

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R \quad (26)$$

โดยที่ η คือความหนืดของแอสฟัลต์ (cP)

T_R คืออุณหภูมิแอสฟัลต์ (Rankine)

A คือค่าคงที่ของวัสดุแอสฟัลต์

VTS คือสัมประสิทธิ์ของวัสดุแอสฟัลต์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ของวัสดุแอสฟัลต์ขึ้นอยู่กับชนิดของแอสฟัลต์

พารามิเตอร์	Low Mix	Medium Mix	High Mix
δ	2.8657	2.8234	-0.6719
α	3.8185	3.9435	4.1776
β	-0.4236	-0.7920	-1.2554
A	11.504	11.01	10.015
VTS	-3.901	-3.701	-3.315
ร้อยละหินที่ค้ำตะแกรง ¾ นิ้ว	0	11.63	30
ร้อยละหินที่ค้ำตะแกรง 3/8 นิ้ว	1.16	35.3	47
ร้อยละหินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4	27.65	52.64	52.8
%Passing #200	11.12	7.28	8.38
Air Void (%)	7	7	8
Eff. Binder (%)	12	11	10
PG Grade	46-34	58-28	76-16

ที่มา : NCHRP 1-37A (2004)

การเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ ปัจจัยหลักมาจากเวลาและสภาพแวดล้อม ซึ่งได้กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นความหนืดแอสฟัลต์หลังจากการผสม (Mix-Lay Down Viscosity) การคำนวณค่าความหนืดของแอสฟัลต์หลังจากการผสมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (27), สมการที่ (28) และสมการที่ (29)

$$\log \log(\eta_{t=0}) = a_0 + a_1 \log \log(\eta_{\text{orig}}) \quad (27)$$

$$a_0 = 0.054405 + 0.004082 \times \text{code} \quad (28)$$

$$a_1 = 0.972035 + 0.010886 \times \text{code} \quad (29)$$

โดยที่ $\eta_{t=0}$ คือความหนืดของแอสฟัลต์หลังจากการผสม (cP)
 η_{orig} คือความหนืดเริ่มต้นของแอสฟัลต์ (cP)
code คืออัตราส่วนความแข็งของแอสฟัลต์ (ทั่วไปกำหนดเป็น 0) แสดงดัง

ตารางที่ 8

ตารางที่ 8 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งของแอสฟัลต์หลังจากการผสม

ความแข็งหลังจากการผสม	ค่าความแข็ง (HR)	code
ดีมากหรือดี	$HR \leq 1.030$	-1
ปานกลาง	$1.030 < HR \leq 1.075$	0
พอใช้	$1.075 < HR \leq 1.100$	1
ต่ำ	$HR > 1.100$	2

ที่มา : NCHRP 1-37A (2004)

เมื่อคำนวณความหนืดหลังจากการผสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะคำนวณความหนืดแอสฟัลต์หลังจากการเสื่อมอายุที่ชั้นผิวทาง มีปัจจัยมาจากอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิแอสฟัลต์ และเวลาของการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ การคำนวณความหนืดที่เวลาต่างๆสามารถคำนวณดังสมการที่ (30), สมการที่ (31), สมการที่ (32), สมการที่ (33) และสมการที่ (34)

$$\log \log(\eta_{\text{aged}}) = \frac{\log \log(\eta_{t=0}) + At}{1 + Bt} \quad (30)$$

$$A = -0.004166 + 1.41213C + \log \text{MAAT} + D \log \log(\eta_{t=0}) \quad (31)$$

$$B = 0.197725 + 0.068384 \log C \quad (32)$$

$$C = 10^{274.4946 - 193.831 \log T_R + 33.9366 \log(T_R)^2} \quad (33)$$

$$D = -14.5521 + 10.47662 \log T_R - 1.88161 \log(T_R)^2 \quad (34)$$

โดยที่ η_{aged}	คือความหนืดแอสฟัลต์หลังจากการเสื่อมอายุที่ชั้นผิวทาง (cP)
t	คือเวลาของการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ (เดือน)
MAAT	คืออุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน ($^{\circ}\text{F}$)
T_R	คืออุณหภูมิแอสฟัลต์ (Rankine)

เมื่อคำนวณความหนืดแอสฟัลต์ที่เสื่อมอายุแล้ว จำเป็นต้องทำการปรับแก้ความหนืดแอสฟัลต์จากปริมาณช่องว่างอากาศของแอสฟัลต์ ซึ่งช่องว่างมีความสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมภายนอก การปรับแก้ความหนืดแอสฟัลต์ที่เสื่อมอายุแล้วมาจากช่องว่างอากาศของแอสฟัลต์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (35), สมการที่ (36) และสมการที่ (37)

$$\log \log(\eta_{\text{aged}})' = F_v \log \log(\eta_{\text{aged}}) \quad (35)$$

$$F_v = \frac{1 + 1.0367 \times 10^{-4}(\text{VA})(t)}{1 + 6.1798 \times 10^{-4}(t)} \quad (36)$$

$$\text{VA} = \frac{\text{VA}_{\text{orig}} + 0.011(t) - 2}{1 + 4.24 \times 10^{-4}(t)(\text{Maat}) + 1.169 \times 10^{-3} \left(\frac{t}{\eta_{\text{orig},77}} \right)} + 2 \quad (37)$$

โดยที่ η_{aged}'	คือความหนืดของแอสฟัลต์จากการเสื่อมอายุที่ปรับแก้ช่องว่างอากาศตำแหน่งผิวทาง (cP)
VA	คือร้อยละของปริมาณช่องว่างในแอสฟัลต์คอนกรีต
VA_{orig}	คือร้อยละของปริมาณช่องว่างในแอสฟัลต์คอนกรีตในช่วงเวลาหลังจากการผสม
t	คือเวลาของการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ (เดือน)
MAAT	คืออุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน ($^{\circ}\text{F}$)
$\eta_{\text{orig},77}$	คือความหนืดของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 77 $^{\circ}\text{F}$ (MPoise)

ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการคำนวณความหนืดของแอสฟัลต์ปรับแก้ช่องว่างในอากาศและเวลาของการเสื่อมอายุในตำแหน่งที่ต้องการ มีความสัมพันธ์กับความลึกและสิ่งแวดล้อมภายนอกสามารถคำนวณจากสมการที่ (38) และสมการที่ (39)

$$\eta_{t,z} = \frac{\eta_t(4 + E) - E(\eta_{t=0})(1 - 4z)}{4(1 + Ez)} \quad (38)$$

$$E = 23.83e^{(-0.0308MAAT)} \quad (39)$$

โดยที่ $\eta_{t,z}$ คือความหนืดแอสฟัลต์ที่เสื่อมอายุเป็นเวลา t เดือน ความลึก z นิ้ว (MPoise)
 η_t คือความหนืดแอสฟัลต์ที่ปรับแก้ช่องว่างอากาศและเวลาของการเสื่อมอายุตำแหน่งผิวทาง (MPoise)
 z คือตำแหน่งแอสฟัลต์คอนกรีตจากผิวทาง (นิ้ว)

การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต นอกจากมีปัจจัยมาจากการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์แล้ว จะมีปัจจัยมาจากปริมาณจราจรที่กระทำต่อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ ซึ่ง Pierce และคณะ (2017) ได้พัฒนาสมการการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสที่เกี่ยวข้องกับปริมาณจราจร โดยสมการที่พัฒนามีปัจจัยมาจากปริมาณ ESAL ที่กระทำต่อโครงสร้างทาง ค่าโมดูลัสที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลา และค่าโมดูลัสที่ใช้ในการออกแบบ แสดงดังสมการที่ (40) และสมการที่ (41)

$$E_{dam}^* = 10^\delta + \frac{E^* - 10^\delta}{1 - e^{(-0.3+5 \log D)}} \quad (40)$$

$$D = \frac{n}{N_f} \quad (41)$$

โดยที่ E_{dam}^* คือโมดูลัสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ความเสียหาย D (psi)
 E^* คือโมดูลัสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ออกแบบ (psi)
 δ คือค่า E^* ที่น้อยที่สุดที่ได้จาก Master Curve
 N_f คือปริมาณจราจรที่รองรับได้ (ESAL)
 D คือความเสียหายเป็นทศนิยม
 n คือปริมาณจราจรที่กระทำในเวลา t (ESAL)

2.9.2. วัสดุไม่เกาะตัว

วัสดุไม่เกาะตัว เป็นวัสดุที่ไม่มีตัวเชื่อมจากวัสดุเกาะตัว วัสดุที่เกาะตัวได้แก่แอสฟัลต์ หรือ คอนกรีต วัสดุไม่เกาะตัวมีปัจจัยหลักมาจากแรงที่กระทำต่อวัสดุ ลักษณะของดินในแต่ละชั้นทาง และความชื้นในชั้นทาง ซึ่ง NCHRP 1-37A (2004) ได้พัฒนาสมการคำนวณค่าโมดูลัส ในแต่ละ ช่วงเวลาซึ่งขึ้นอยู่กับความชื้นแสดงดังสมการที่ (42), สมการที่ (43), สมการที่ (44) และ สมการที่ (45)

$$\log \frac{M_R}{M_{Ropt}} = a + \frac{b - a}{1 + e^{\left(\ln\left(-\frac{b}{a}\right) + k_s(S - S_{opt})\right)}} \quad (42)$$

$$M_{Ropt} = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a}\right)^{k_3} \quad (43)$$

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (44)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (45)$$

โดยที่	M_R	คือโมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัว
	M_{Ropt}	คือโมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัวที่ความชื้นเหมาะสมที่สุด
	a	คือค่าที่น้อยที่สุดของ $\log(M_R/M_{Ropt})$
	b	คือค่าที่มากที่สุดของ $\log(M_R/M_{Ropt})$
	k_s	คือพารามิเตอร์ของวัสดุ
	$S - S_{opt}$	คือการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นเป็นทศนิยม
	σ_1	คือ Major stress
	σ_2	คือ Intermediate stress
	σ_3	คือ Minor stress

พารามิเตอร์ a, b และ k_s ได้กำหนดค่าคงที่หรือพารามิเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้พัฒนาและชนิดของวัสดุที่ใช้ ทำให้ส่งผลต่อค่าโมดูลัสในแต่ละจุดความชื้นที่กำหนด ค่าพารามิเตอร์แต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ในการคำนวณค่าโมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัวขึ้นอยู่กับผู้พัฒนา

พารามิเตอร์	NCHRP 1-37A (2004)		Naji (2018)
	วัสดุผิวหยาบ	วัสดุผิวละเอียด	ไม่กำหนดชนิดวัสดุ
a	-0.3123	-0.5934	-0.59
b	0.3	0.4	0.4
k_s	6.8157	6.1324	k_m

พารามิเตอร์วัสดุ k_s เป็นค่าที่บอกถึงความชันกราฟของอัตราส่วนโมดูลัสในรูปแบบลอการิทึม (Logarithm) ของวัสดุในทฤษฎี MEPDG และสามารถใช้ได้กับวัสดุที่เป็นผิวหยาบและผิวละเอียด โดย Naji (2018) ได้พัฒนาสมการพารามิเตอร์วัสดุ k_s ที่มีความเกี่ยวข้องกับดัชนีพลาสติกของวัสดุเป็นพารามิเตอร์ k_m แสดงดังสมการที่ (46)

$$k_m = 0.362PI + 3.545 \quad (46)$$

โดยที่ k_m คือพารามิเตอร์ของวัสดุ = k_s

PI คือดัชนีพลาสติก (%)

ความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสเป็นอย่างมาก เมื่อมีความชื้นมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าโมดูลัสลดลงสำหรับวัสดุไม่เกาะตัว โดย Phommavone และ Sangpetngam (2018) ได้พัฒนาสมการด้วยแรงที่กระทำและความชื้นให้มีความเหมาะสมในประเทศไทย และสมการทำนายค่าโมดูลัสได้แบ่งประเภทวัสดุเป็นวัสดุเป็นวัสดุหยาบและวัสดุละเอียด แสดงดังสมการที่ (47) สำหรับวัสดุผิวละเอียด และสมการที่ (48) สำหรับวัสดุผิวหยาบ

$$M_R(\text{MPa}) = 271 \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{0.0137} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{P_a} + 1 \right)^{0.991} (\%w)^{-0.451} \quad (47)$$

$$M_R(\text{MPa}) = 252 \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{0.086} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{P_a} + 1 \right)^{1.107} (\%w)^{-0.479} \quad (48)$$

โดยที่ P_a คือแรงดันมาตรฐาน = 101.3 kPa

%w คือความชื้นของวัสดุไม่เกาะตัว (%)

θ คือแรงทั้งหมดที่กระทำ 3 แกน (kPa)

τ_{oct} คือแรงเฉือนทั้งหมดจาก 3 แกน (kPa)

2.9.3. พื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์

ชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์เป็นวัสดุเกาะตัว (Bound Material) เหมือนกับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งจะแสดงในรูปแบบความเสียหายแบบล้า (Fatigue Damage) ซึ่ง NCHRP 1-37A (2004) และ AASHTO (2011) ได้พัฒนาสมการการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสขึ้นอยู่กับปริมาณจราจร มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ ค่าโมดูลัสในการออกแบบ ค่าโมดูลัสเมื่อวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ทำลายโดยสมบูรณ์และความเสียหายที่มาจากปริมาณ ESAL การคำนวณการเปลี่ยนแปลงวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์แสดงดังสมการที่ (49) และสมการที่ (50)

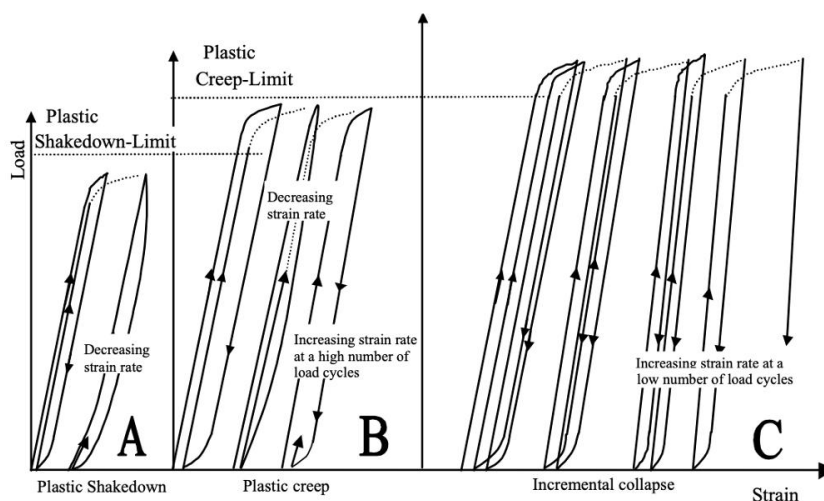
$$E_{CSM}(t) = E_{CSM}(\min) + \frac{E_{CSM}(\max) - E_{CSM}(\min)}{1 - e^{(-4+14D)}} \quad (49)$$

$$D = \frac{n}{N_f} \quad (50)$$

โดยที่	$E_{CSM}(t)$	คือโมดูลัสของวัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่ความเสียหาย D (psi)
	$E_{CSM}(\min)$	คือโมดูลัสของวัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่เสียหายสมบูรณ์ (psi)
	$E_{CSM}(\max)$	คือโมดูลัสออกแบบของวัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (psi)
	N_f	คืออายุทางที่รองรับได้จากความเสียหายแบบล้าของพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (ESAL)
	D	คือความเสียหาย หน่วยเป็นทศนิยม
	n	คือปริมาณจราจรสะสมในช่วงเวลา t (ESAL)

2.10. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุมาจากแรงที่กระทำต่อเนื่อง

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุมาจากแรงที่กระทำต่อเนื่อง เมื่อมีแรงในปริมาณที่กำหนดกระทำซ้ำกันต่อเนื่อง จะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสเป็นรูปแบบ Shakedown ซึ่งมีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 3 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 15

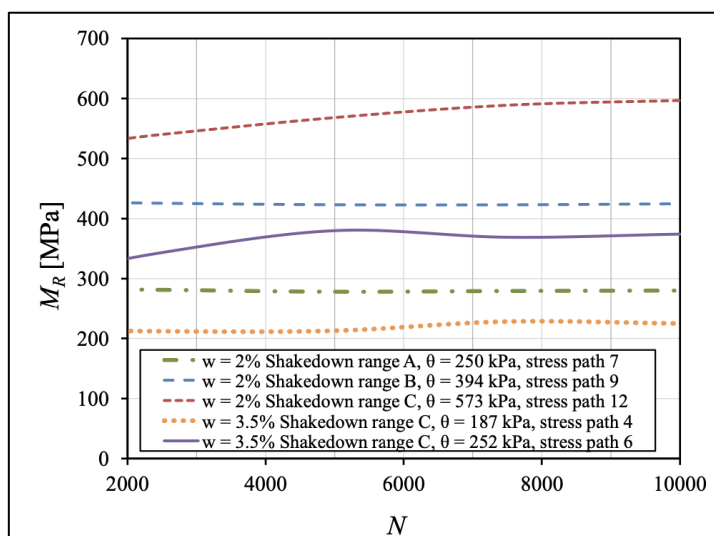


รูปที่ 15 รูปแบบของทฤษฎี Shakedown ภายใต้แรงกระทำซ้ำต่อเนื่องในวัสดุไม่เกาะตัว

ที่มา : Werkmeister, Dawson และ Wellner (2001)

- 1) ช่วง A จะเป็น Plastic Shakedown ซึ่งแรงที่กระทำมีค่าน้อยกว่า Plastic Shakedown-Limit และวัสดุจะมีการตอบสนองแบบพลาสติกเมื่อมีปริมาณจรรยาจรที่กำหนด แต่หลังจากช่วงเวลาการบดอัดทาง โครงสร้างทางจะตอบสนองแบบยืดหยุ่นทั้งโครงสร้าง และจะไม่มีค่าความเครียดถาวรเกิดขึ้นต่อไป
- 2) ช่วง B จะเป็น Plastic Creep ซึ่งแรงที่กระทำมีค่ามากกว่า Plastic Shakedown-Limit ช่วงที่เกิดรอบกระทำครั้งแรก อัตราของความเครียดที่อยู่ในระดับสูงจะมีค่าลดลงจนถึงค่าคงที่ในระดับหนึ่ง รอบกระทำของปริมาณจรรยาจรสำหรับถึงระดับอัตราความเครียดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุและแรงที่กระทำ
- 3) ช่วง C จะเป็น Incremental Collapse ซึ่งแรงที่กระทำมีค่ามากกว่า Plastic Creep-Limit โครงสร้างทางจะตอบสนองแบบพลาสติก อัตราความเครียดขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำและจะมีค่าลดลงช้ามากเมื่อเปรียบเทียบกับช่วง A และ B หรือไม่มีความเปลี่ยนแปลง

การเปลี่ยนแปลงของในแต่ละช่วงส่งผลให้ค่าโมดูลัสในแต่ละชั้นทางเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่ออยู่ในช่วง A หรือ B ค่าโมดูลัสไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณจรรยาจร และถ้าเป็นช่วง C ค่าโมดูลัสจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่ความชื้น 2% ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้น 11 % จากเดิมในช่วง 2000 ครั้งถึง 10000 ครั้ง (Rahman และ Erlingsson, 2016) แสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัวขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำต่อวัสดุ

ที่มา : Rahman และ Erlingsson (2016)

การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของชั้นผิวทาง ในวัสดุบิทูเมนที่มีสารปรับปรุงคุณภาพ (Bitumen Stabilized Material, BSM) เมื่อทดสอบโดยใช้แรงกระทำขนาด 700 kPa พบว่าค่าความเครียดไม่เปลี่ยนแปลงจนถึง 1 ล้านรอบ (Phommavone และ Sangpetngam, 2018) และในวัสดุแอสฟัลต์ผสมกับยางพารา เมื่อทดสอบโดยใช้แรงตามแนวแกนอัดสูงสุด (Deviator Stress) ขนาด 200 kPa ทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นในช่วง 0-2000 รอบการกระทำ (Silimanotham และ Sangpetngam, 2020)

2.11. การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทาง

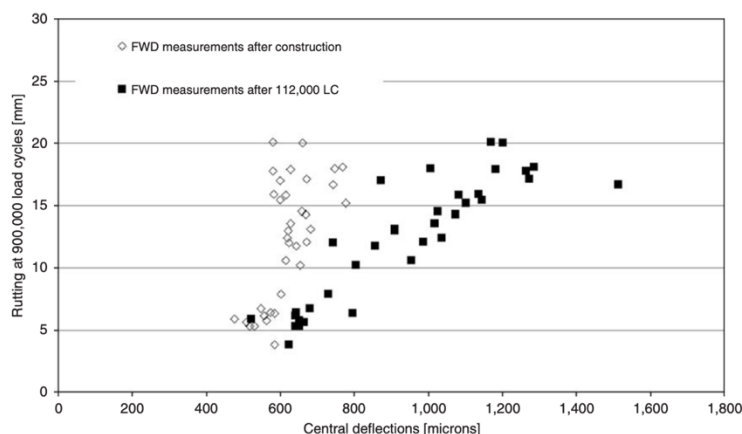
จากการศึกษาของ Werkmeister และ Alabaster (2007) ได้สร้างสมการการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวที่มาจากอายุของถนนสำหรับปริมาณจราจรบนถนนน้อย (Low Volume Road) ซึ่งจำลองการทดสอบโดย Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility (CAPTIF) โดยใช้ตัวอย่างถนนผิวจราจรบาง (ความหนา 25 มม.) ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุที่ไม่เกาะตัว และมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ (ความหนา 300, 250, 200 หรือ 150 มม.) และชั้นดินเดิมจะเป็นดินเหนียว (ความหนาอยู่ในช่วง 1,200 ถึง 1,350 มม.) และชั้นดินเดิมจะเป็นชั้นดินที่บดอัดความหนา 150 มม. จำนวน 11 ตัวอย่าง ใช้น้ำหนักการกดทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ 40 kN (1 ตัวอย่าง), 50 kN (PR3-0404 และ PR3-0805) และ 60 kN (PR3-0610) สมการที่ใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวมีเงื่อนไขสำหรับความเสียหายแบบร่องล้นขนาด 15 มม. แสดงในสมการที่ (51)

$$N \geq 5,000,000e^{(-0.0206\Delta d_0)} \quad (51)$$

โดยที่ N คืออายุของถนน (ESAs)

Δd_0 คือร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวช่วงเวลาหลังจากการบดอัด

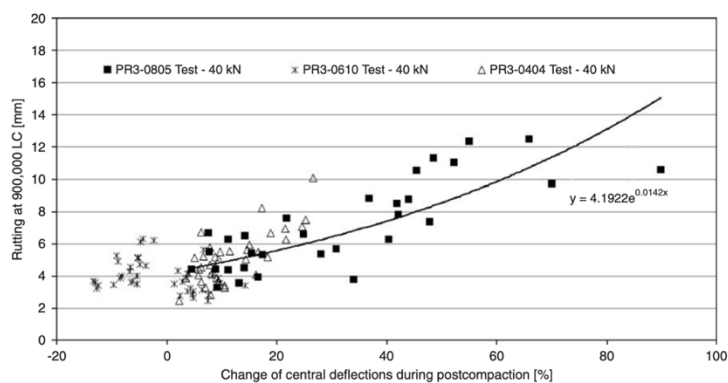
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวจุดกึ่งกลางที่มาจากการทดสอบ FWD สำหรับหลังจากการก่อสร้างเสร็จ หรือรอบกระทำหลังจาก 112,000 รอบ และความเสียหายแบบร่องล้อที่รอบกระทำ 900,000 รอบ พบว่าการทดสอบ FWD หลังจากการก่อสร้างเสร็จ ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนสำหรับการเพิ่มความลึกร่องล้อเมื่อค่าการแอ่นตัวมากขึ้น แต่การทดสอบ FWD ที่รอบกระทำหลังจาก 112,000 รอบ พบว่าการเพิ่มค่าการแอ่นตัวส่งผลให้เพิ่มความลึกร่องล้ออย่างมาก แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางและความลึกร่องล้อ

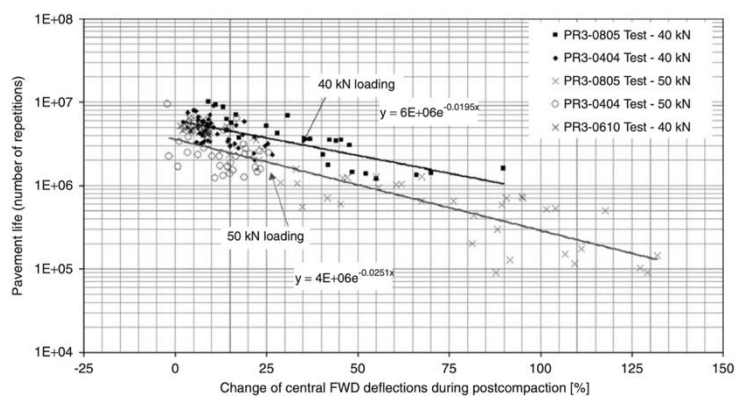
ที่มา : Werkmeister และ Alabaster (2007)

ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของการทดสอบ FWD และความลึกร่องล้อที่รอบกระทำ 900,000 รอบ มีรูปแบบความสัมพันธ์ในระดับดี แสดงดังรูปที่ 18 และความสัมพันธ์ของอายุของถนนมีปัจจัยหลักมาจากน้ำหนักที่กระทำ โดยแรงที่กระทำมากกว่าจะส่งผลให้อายุของถนนลดลงมากกว่าแรงกระทำที่น้อยกว่า แสดงดังรูปที่ 19



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของ FWD และความลึกร่องล้อ

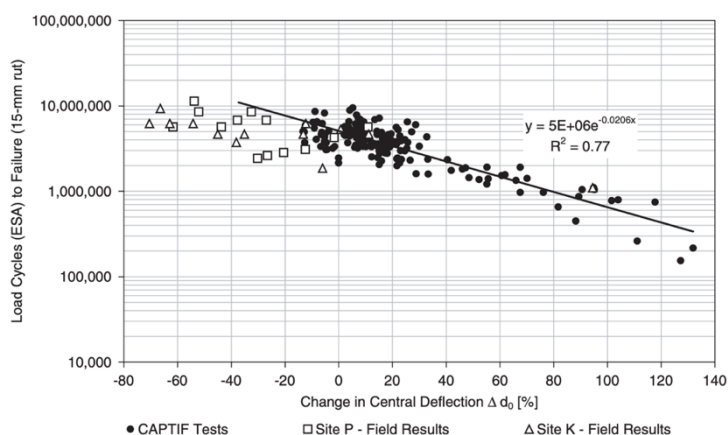
ที่มา : Werkmeister และ Alabaster (2007)



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของ FWD และอายุของถนน

ที่มา : Werkmeister และ Alabaster (2007)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายอายุของถนน เมื่อนำอายุของถนนและร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวเปรียบเทียบกับกรอบการทดสอบของ Road Asset Maintenance Management (RAMM) ซึ่งมีโครงสร้างชั้นผิวทางเป็นชิฟซีล (Chip Seal) และชั้นพื้นทางเป็นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ร้อยละ 1 ความหนา 200 มม. พบว่ามีความสมเหตุสมผลในด้านรูปแบบความสัมพันธ์ แสดงดังรูปที่ 20

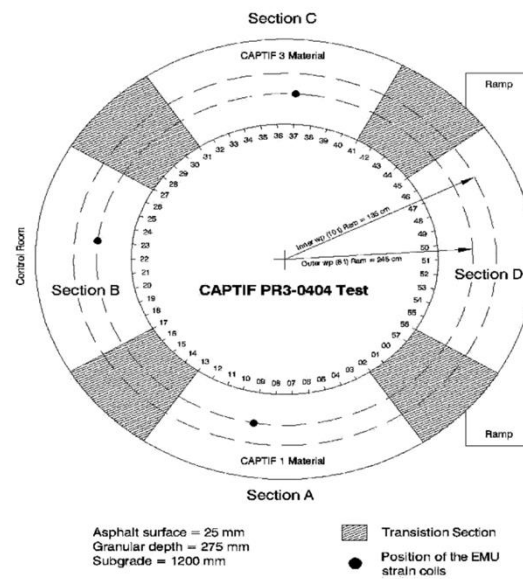


รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวและอายุของถนน

ที่มา : Werkmeister และ Alabaster (2007)

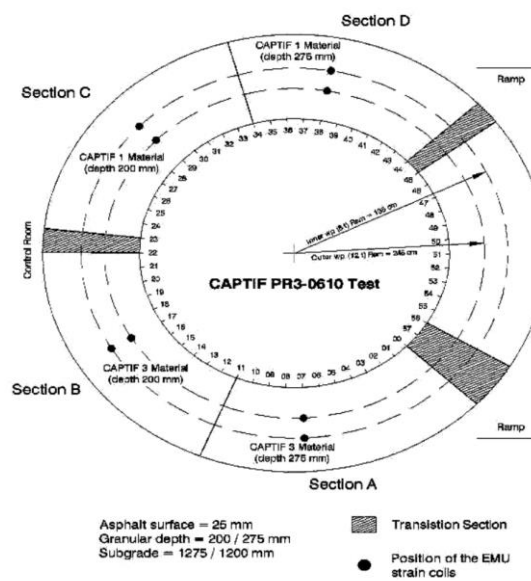
นอกจากนี้ Arnold และคณะ (2009) ได้พัฒนาสมการของ Werkmeister และ Alabaster (2007) การทดสอบจะใช้ CAPTIF ในการจำลองการทดสอบ ใช้เครื่องมือ FWD ทดสอบ กำหนดโดยใช้แรง 40 kN และความลึกร่องล้อ 15 มม. มีรูปแบบโครงสร้างของการทดสอบดังรูปที่ 21, รูปที่ 22 และรูปที่ 23 และแสดงโครงสร้างหน้าตัดของการทดสอบดังรูปที่ 24 การทดสอบใช้ทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่

- 1) วิธีโดยตรง จะใช้เครื่องมือ Benkelman Beam หรือค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของ FWD
- 2) วิธี Mechanistic-Empirical Procedure (M-EP) จะใช้แอ่งการแอ่นตัวของแบบจำลอง หลังจากการซ่อมบำรุงเสร็จ วิเคราะห์ย้อนกลับโดยใช้ถนนที่จำลองและใช้วิธีทฤษฎีโมดูลัส (Elastic Theory) เพื่อหาค่าความเครียดที่ด้านบนของชั้นดินเดิม แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมให้ และหาอายุคงเหลือถนนได้จากสมการที่ (52) โดยสมการจะเป็นการทำนายความเสียหายแบบร่องล้อ
- 3) วิธีใช้สมการ M-EP สมัยก่อน รูปแบบข้อมูลเหมือนกับวิธี M-EP แต่มีค่าคงที่ K ปรับแก้เพิ่มเติมในสมการของ M-EP แสดงดังสมการที่ (53) โดยสมการจะเป็นการทำนายความเสียหายแบบร่องล้อที่ชั้นดินเดิม



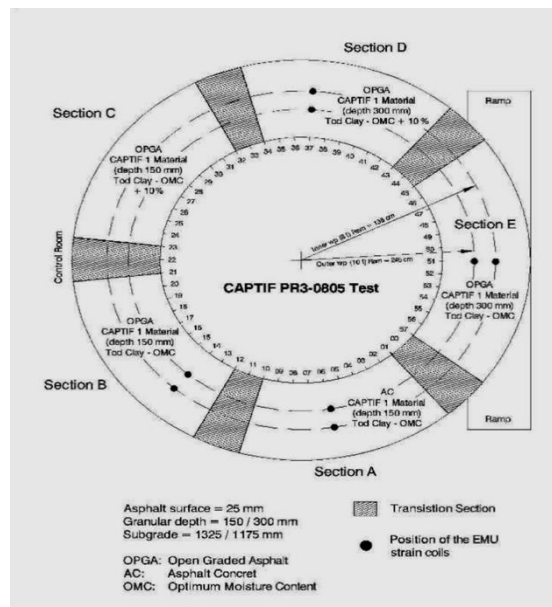
รูปที่ 21 โครงสร้างแบบจำลอง CAPTIF ของการทดสอบ PR3-0404

ที่มา : Arnold และคณะ (2009)



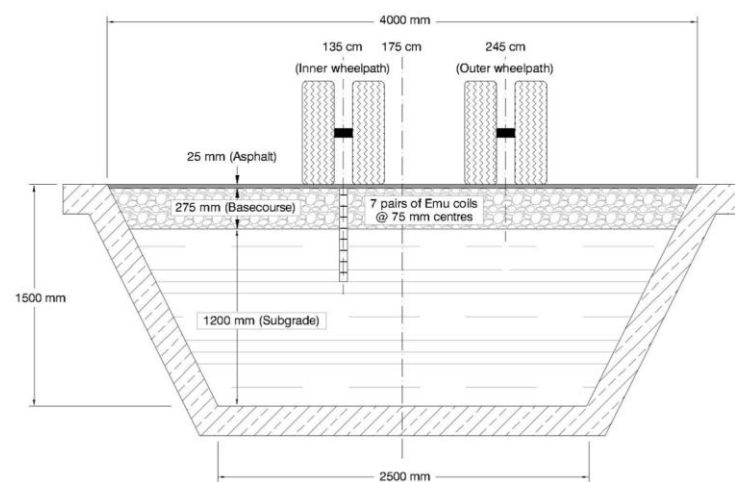
รูปที่ 22 โครงสร้างแบบจำลอง CAPTIF ของการทดสอบ PR3-0610

ที่มา : Arnold และคณะ (2009)



รูปที่ 23 โครงสร้างแบบจำลอง CAPTIF ของการทดสอบ PR3-0805

ที่มา : Arnold และคณะ (2009)



รูปที่ 24 โครงสร้างหน้าตัดแบบจำลอง CAPTIF

ที่มา : Arnold และคณะ (2009)

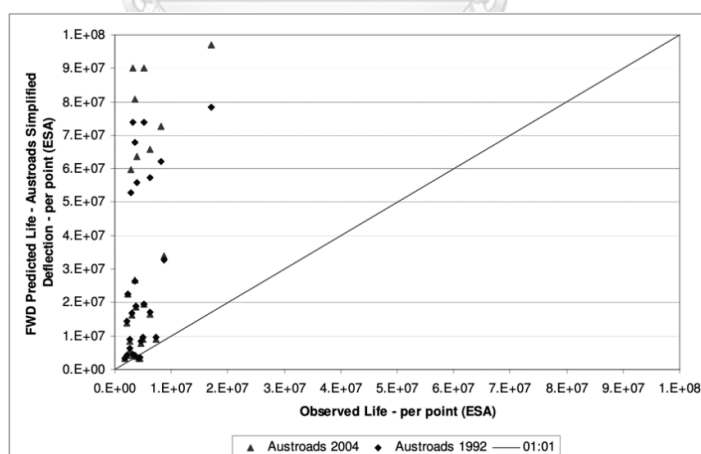
$$N = \left(\frac{10000}{\mu \varepsilon_s} \right)^6 \quad (52)$$

$$N = \left(\frac{10000}{K \mu \varepsilon_s} \right)^6 \quad (53)$$

โดยที่ N คืออายุของถนน (ESAs)
 $\mu \varepsilon_s$ คือความเครียดแนวตั้งด้านบนของชั้นดินเดิม มีหน่วยเป็น 10^{-6}
 K คือค่าปรับแก้ความเครียดสำหรับวิธี M-EP สมัยก่อน

การปรับแก้ค่า K ในแบบจำลองการทดสอบ CAPTIF มีการปรับแก้ทั้งหมด 2 วิธี ได้แก่ วิธีปรับอัตราส่วนระหว่างเปอร์เซ็นต์ไทล์ (Percentile) ที่ 10 ของอายุถนนจากการทดสอบ FWD และเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 10 ของอายุถนนจากข้อมูลสถานที่จริง โดยเรียงลำดับข้อมูลจากน้อยที่สุดไปมากที่สุด และวิธีปรับอัตราส่วนระหว่างเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ของอายุถนนจากการทดสอบ FWD และเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 10 ของอายุถนนจากข้อมูลสถานที่จริง โดยเรียงลำดับข้อมูลจากน้อยที่สุดไปมากที่สุด

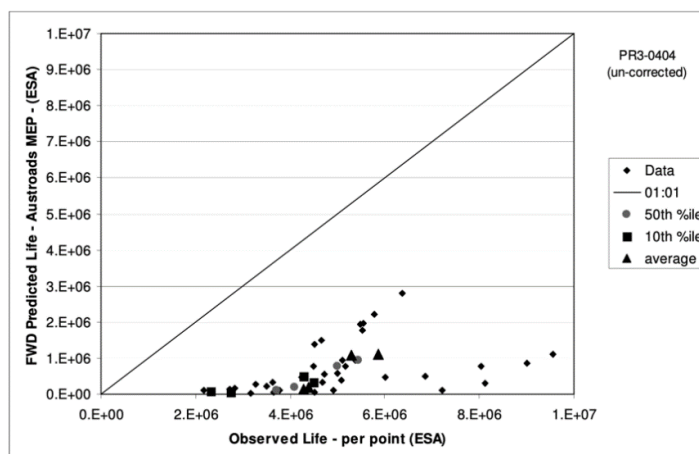
การทดสอบ FWD โดยใช้วิธีโดยตรง เมื่อเปรียบอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบและจากสถานที่จริง พบว่าอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD มีความแตกต่างและมีค่ามาก เมื่อเปรียบกับอายุคงเหลือของถนนจากสถานที่จริง แสดงดังรูปที่ 25



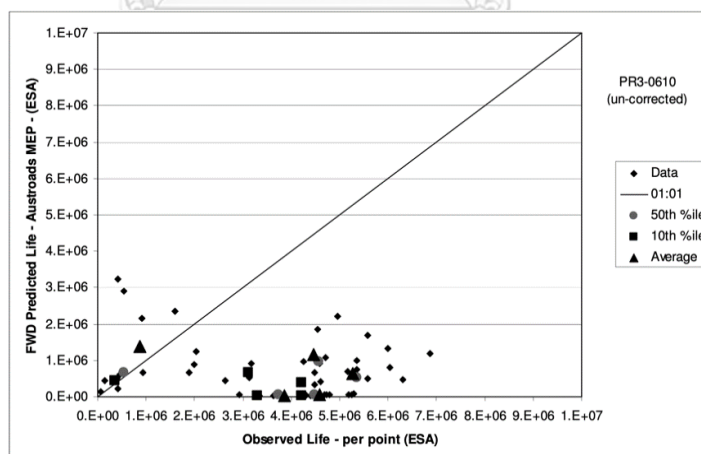
รูปที่ 25 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่จริงของการทดสอบ PR3-0404 โดยวิธีโดยตรง

ที่มา : Arnold และคณะ (2009)

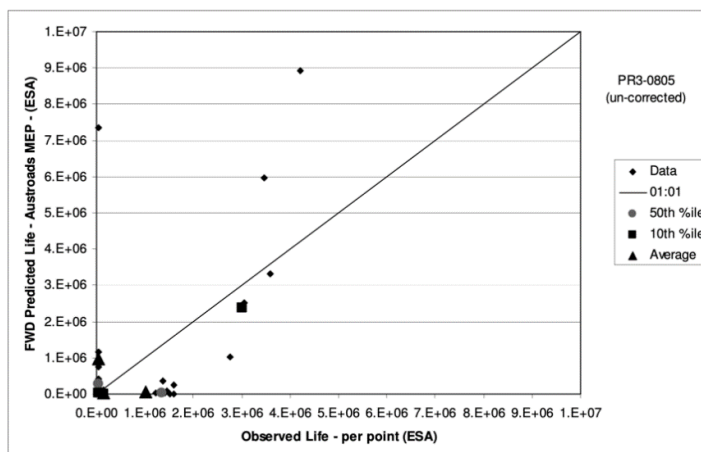
การทดสอบ FWD โดยใช้วิธี M-EP เมื่อเปรียบอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบและจากสถานที่จริง พบว่าส่วนมากอายุคงเหลือจากสถานที่จริงมีค่ามากกว่าอายุคงเหลือของถนนที่มาจากสมการทำนาย M-EP มีสาเหตุมาจากประเภทและคุณภาพของวัสดุในแต่ละชั้นทาง แสดงดังรูปที่ 26, รูปที่ 27 และรูปที่ 28



รูปที่ 26 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่จริงของการทดสอบ PR3-0404 โดยวิธี M-EP
ที่มา : Arnold และคณะ (2009)



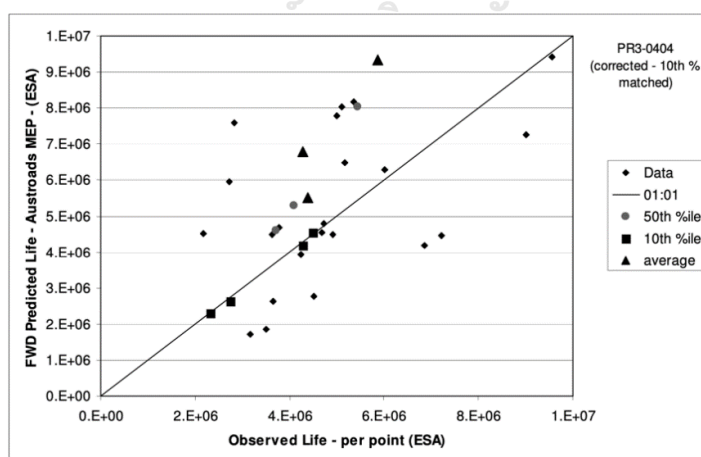
รูปที่ 27 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่จริงของการทดสอบ PR3-0610 โดยวิธี M-EP
ที่มา : Arnold และคณะ (2009)



รูปที่ 28 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่จริงของการทดสอบ PR3-0805 โดยวิธี M-EP

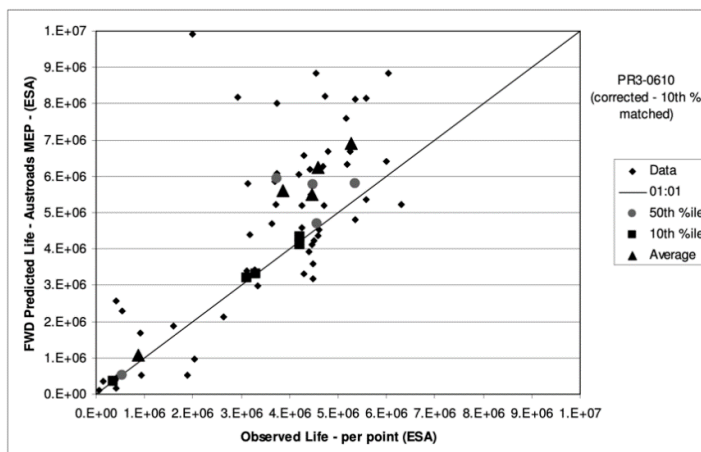
ที่มา : Arnold และคณะ (2009)

การทดสอบ FWD โดยใช้วิธีสมการ M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีปรับอัตราส่วนระหว่างเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 10 ของอายุถนนจากการทดสอบ FWD และเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 10 ของอายุถนนจากข้อมูลสถานที่จริงในแต่ละส่วนของโครงสร้างถนนที่ทดสอบ พบว่าข้อมูลการทดสอบ FWD สำหรับตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 10 มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลสถานที่จริงในตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 10 แต่ค่าเฉลี่ยอายุถนนจากการทดสอบ FWD มีค่าเกินจริงสำหรับค่าเฉลี่ยอายุถนนจากสถานที่จริง แสดงดังรูปที่ 29, รูปที่ 30 และรูปที่ 31



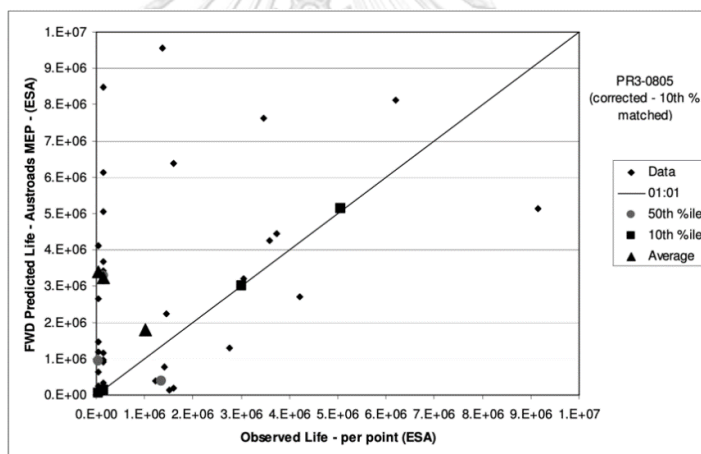
รูปที่ 29 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่จริงของการทดสอบ PR3-0404 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 10

ที่มา : Arnold และคณะ (2009)



รูปที่ 30 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่
จริงของการทดสอบ PR3-0610 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีเปอร์เซนไทล์ที่ 10

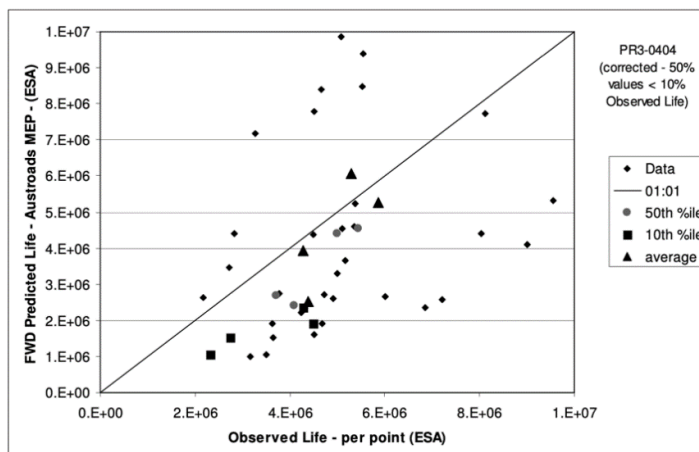
ที่มา : Arnold และคณะ (2009)



รูปที่ 31 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่
จริงของการทดสอบ PR3-0805 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีเปอร์เซนไทล์ที่ 10

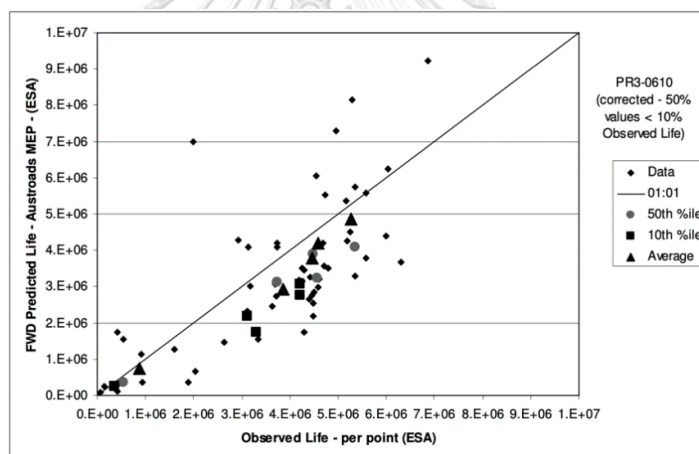
ที่มา : Arnold และคณะ (2009)

การทดสอบ FWD โดยใช้วิธีสมการ M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีปรับอัตราส่วนระหว่าง
เปอร์เซนไทล์ที่ 50 ของอายุถนนจากการทดสอบ FWD และเปอร์เซนไทล์ที่ 10 ของอายุถนนจาก
ข้อมูลสถานที่จริงในแต่ละส่วนของโครงสร้างถนนที่ทดสอบ พบว่าข้อมูลการทดสอบ FWD สำหรับ
ค่าเฉลี่ยอายุถนนจากการทดสอบ FWD มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยอายุถนนจากสถานที่จริง แสดงดัง
รูปที่ 32, รูปที่ 33 และรูปที่ 34



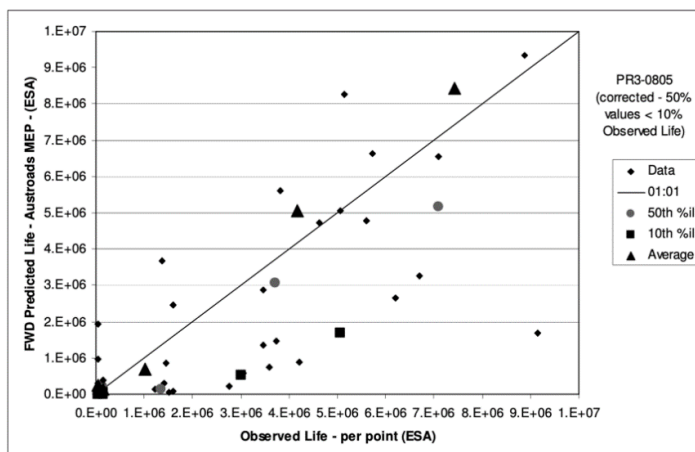
รูปที่ 32 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่
จริงของการทดสอบ PR3-0404 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีเปอร์เซนไทล์ที่ 50

ที่มา : Arnold และคณะ (2009)



รูปที่ 33 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่
จริงของการทดสอบ PR3-0610 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิธีเปอร์เซนไทล์ที่ 50

ที่มา : Arnold และคณะ (2009)



รูปที่ 34 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างอายุคงเหลือของถนนจากการทดสอบ FWD และสถานที่จริงของการทดสอบ PR3-0805 โดยวิธี M-EP สมัยก่อน ปรับแก้ค่า K วิถีเปอร์เซนไทล์ที่ 50

ที่มา : Arnold และคณะ (2009)

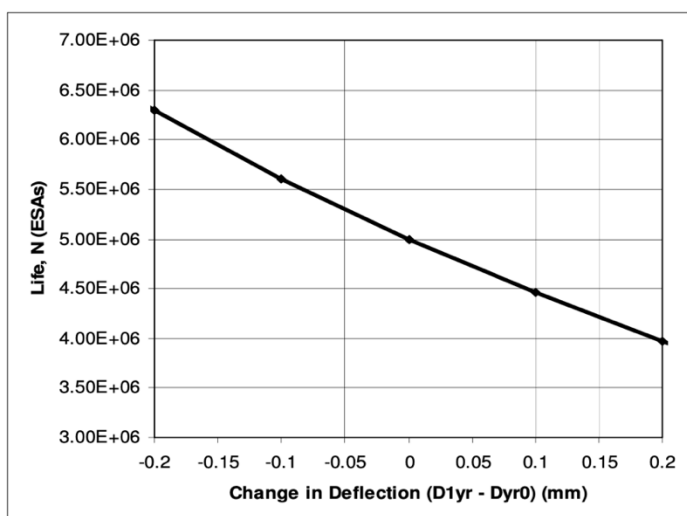
จากการทดสอบ FWD ในรูปแบบการจำลอง CAPTIF ดังกล่าว Arnold และคณะ (2009) ได้พัฒนาสมการการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางและอายุของถนนของ Werkmeister และ Alabaster (2007) โดยเปลี่ยนแปลงอายุของถนนเป็นการออกแบบอายุของถนน แสดงดังสมการที่ (54), สมการที่ (55) และสมการที่ (56) เมื่อเปลี่ยนรูปแบบสมการจากร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว สมการทำนายจะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องสำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวที่มีความแตกต่างมากกว่า 0.2 มม. สำหรับการทดสอบในรูปแบบจำลอง CAPTIF แสดงดังรูปที่ 35

$$N_d < 5,000,000e^{(-0.023\Delta d_0)} \quad (54)$$

$$\Delta d_0 = \text{mean}(\delta d_0) + 1.65\text{standard deviation}(\delta d_0) \quad (55)$$

$$\delta d_0 = \frac{d_{0yr1} - d_{0yr0}}{d_{0yr0}} \times 100 \quad (56)$$

โดยที่ N_d คืออายุของถนนที่ใช้ในการออกแบบ (ESAs)
 d_{0yr1} คือค่าการแอ่นตัวกึ่งกลางของปีที่ 1 (mm)
 d_{0yr0} คือค่าการแอ่นตัวกึ่งกลางของปีที่ 0 (mm)



รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวและอายุของถนน

ที่มา : Arnold และคณะ (2009)

2.12. สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงสร้างทางของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย มีโครงสร้างโดยทั่วไปทั้งหมด 4 ชั้น คือ ชั้นผิวทาง ชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง และชั้นดินเดิม โดยความแข็งแรงโครงสร้างทางสามารถบอกได้เป็นค่าการแอ่นตัว หรือค่าโมดูลัส ซึ่งค่าโมดูลัสที่ใช้ในงานวิจัยมีทั้งหมด 2 ตัวแปร ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น และโมดูลัสคั่นตัว ค่าโมดูลัสในทางปฏิบัติสามารถสมมติค่าโมดูลัสคั่นตัวเป็นโมดูลัสยืดหยุ่นได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number เป็นพารามิเตอร์ที่มีความเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงโครงสร้างทาง ซึ่งการทดสอบความแข็งแรงโครงสร้างทางสามารถทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย การทดสอบในประเทศไทยจะทำการทดสอบแบบแรงกระแทก โดยเครื่องมือในการทดสอบของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทจะเป็น Falling Weight Deflectometer ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าการแอ่นตัวจะเป็นประเภทโครงสร้างทาง แรงที่กระทำต่อผิวทาง อุณหภูมิและฤดูกาล (Smith และคณะ, 2017) นอกจากนี้งานวิจัยของ Fabricio, Adriana และ José (2017) พบว่าค่าการแอ่นตัวถาวร ส่งผลไปในทิศทางเดียวกันกับค่าการแอ่นตัว ซึ่งการแอ่นตัวถาวรส่งผลมาจากความหนาโครงสร้างทางในแต่ละชั้น และปริมาณเพลามาตรฐาน (ESAL) ดังนั้น ตัวแปรสำคัญที่ประยุกต์ใช้ในแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุ ได้แก่ ปริมาณ ESAL, ค่าโมดูลัสโครงสร้างทาง, ชนิดวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างทางแต่ละชั้น, อุณหภูมิ และฤดูกาล เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบ

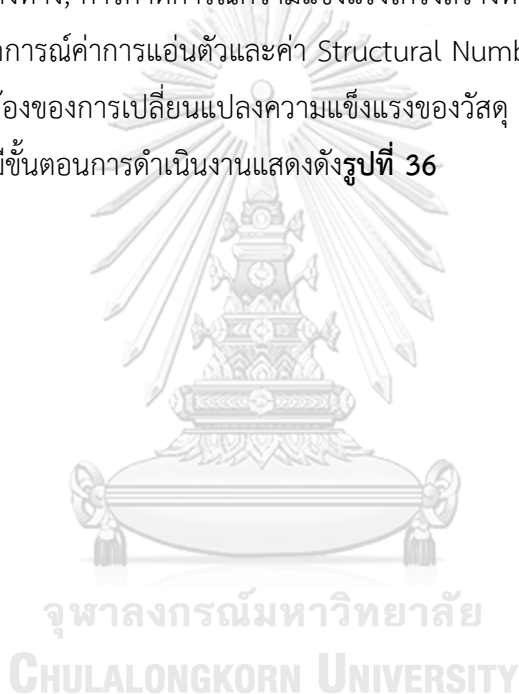
การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทางจากการทดสอบ FWD โดยสรุปการนำไปใช้ในงานวิจัยได้ดังนี้

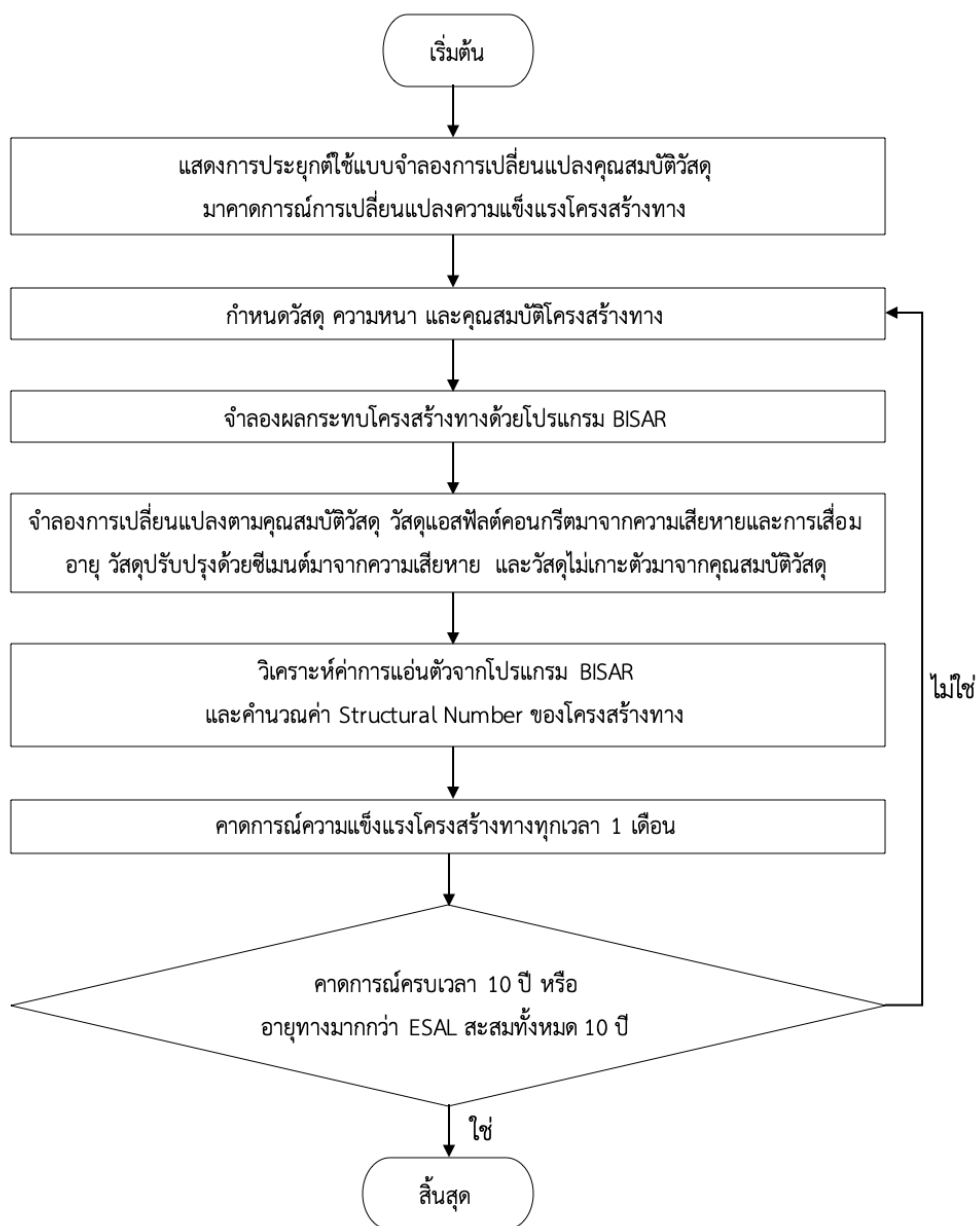
- 1) การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุ แบ่งเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จะใช้ทฤษฎี MEPDG และสมการจาก Pierce และคณะ (2017) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสมาจากความเสียหายแบบล้า และการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ ซึ่งความเสียหายแบบล้าจะใช้ปริมาณ ESAL และอายุทางของวัสดุ ส่วนการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์จะใช้การสั่นพ้องของแอสฟัลต์ อุณหภูมิแอสฟัลต์ อุณหภูมิอากาศ ความหนาทางแอสฟัลต์คอนกรีต และเวลาของการเสื่อมอายุ วัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ จะใช้ทฤษฎี MEPDG โดยการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสมาจากความเสียหายแบบล้า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะมีปัจจัยเหมือนกันกับการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มาจากความเสียหายแบบล้า และวัสดุไม่เกาะตัว มีปัจจัยมาจากความชื้นและแรงที่กระทำต่อชั้นทาง ซึ่งจะใช้ทฤษฎี MEPDG และสมการจาก Phommavone และ Sangpetngam (2018) และ Naji (2018) ส่วนการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุไม่เกาะตัวที่มาจากแรงกระทำต่อเนื่องของวัสดุ กำหนดเป็นไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งอ้างอิงจาก Rahman และ Erlingsson (2016) การจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดจะนำไปใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง ซึ่งจะเป็นค่าโมดูลัสของวัสดุแต่ละชนิด ค่าการแอ่นตัว และค่า Structural Number ของทางในแต่ละช่วงเวลา
- 2) ค่า Structural Number จะใช้ทฤษฎีของ AASHTO (1993) และสมการจาก Rohde และ Hartman (1996) โดยใช้ค่าโมดูลัสจากการจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งค่าโมดูลัสที่ได้จะคำนวณค่า SN ของทาง และการเปลี่ยนแปลงค่า SN ในแต่ละช่วงเวลา ส่วนค่า SN ที่ได้จากการทดสอบ FWD จะคำนวณจากการคำนวณย้อนกลับ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสชั้นดินเดิม ค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลาง และความหนาของโครงสร้างทาง
- 3) การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทาง จะอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของ Werkmeister และ Alabaster (2007) และ Arnold และคณะ (2009) เพื่อเป็นแนวทางในการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทางตามอายุการใช้งาน โดยใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงด้านคุณสมบัติวัสดุในแต่ละชั้นและการวิเคราะห์โครงสร้างทางอีลาสติกเชิงเส้นหลายชั้น และเพื่อทดสอบความถูกต้องของการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วยข้อมูลการทดสอบภาคสนามด้วยวิธี FWD ของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ผู้วิจัยได้กำหนดหัวข้อการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด 7 หัวข้อ ได้แก่ คุณสมบัติวัสดุที่ใช้การคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง, การคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง, การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างทาง การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number ของทาง, โปรแกรม BISAR, การทดสอบความถูกต้องของการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุ และการเก็บข้อมูลสายทางและการเก็บข้อมูล FWD มีขั้นตอนการดำเนินงานแสดงดังรูปที่ 36





รูปที่ 36 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1. คุณสมบัติวัสดุที่ใช้การคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง

คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง แบ่งรูปแบบวัสดุทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete, AC) วัสดุไม่เกาะตัว (Unbound) และ วัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (Cement-Treated Base, CTB) ใช้เพื่อในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ได้แก่ ค่าโมดูลัสของวัสดุในแต่ละช่วงเวลา ค่าการแอ่นตัว และค่า Structural Number พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง ได้แก่ โมดูลัสเริ่มต้นของวัสดุ หรือโมดูลัสออกแบบ และอัตราส่วนปัวซอง โดยมาตรฐานของวัสดุแต่ละชนิด อ้างอิงจากมาตรฐานงานทางของกรมทางหลวง การออกแบบวัสดุที่ใช้ในการออกแบบกำหนดแสดงดัง **ตารางที่ 10**

ตารางที่ 10 ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง

ชนิดวัสดุชั้นทาง	โมดูลัสออกแบบ (MPa)	อัตราส่วนปัวซอง (ν)
PMA และ AC 40 – 50	4,500	0.35
AC 60 – 70	2,500	0.35
วัสดุพื้นทางหินคลุก	350	0.35
วัสดุรองพื้นทาง	150	0.35
วัสดุคัดเลือก	100	0.35
ดินคันทาง หรือดินเดิม	10 x CBR (%)	0.35

หมายเหตุ PMA คือ Polymer Modified Asphalt

AC คือ Asphalt Concrete

CBR คือ California Bearing Ratio (%)

อุณหภูมิมาตรฐานในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในการจำลองคือ 35 °C

ที่มา : สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท (2561) และอัคคัพฒน์ สว่างสุริย์ และคณะ (2565)

สำหรับวัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์สามารถใช้ค่าโมดูลัสเริ่มต้นจากการออกแบบวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในทฤษฎี MEPDG โดยชั้นพื้นทางจะใช้วัสดุ Cement-Stabilized Aggregate และชั้นรองพื้นทางจะใช้ดินซีเมนต์ (Soil Cement) มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ได้แก่ โมดูลัสการออกแบบ โมดูลัสช่วงเวลาที่มีการทำลายสมบูรณ์ อัตราส่วนปัวซอง และโมดูลัสแตกหัก (Modulus of Rupture, MR) แสดงดัง**ตารางที่ 11**

ตารางที่ 11 ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางสำหรับพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์

ชนิดวัสดุ	Cement-Stabilized Aggregate	Soil Cement
โมดูลัสการออกแบบ (psi)	1,000,000	500,000
โมดูลัสช่วงเวลาที่มีการทำลายสมบูรณ์ (psi)	100,000	25,000
อัตราส่วนปัวซอง (ν)	0.2	0.2
โมดูลัสแตกหัก (MR) (psi)	200	100

หมายเหตุ 1 MPa = 145.038 psi

ที่มา : NCHRP 1-37A (2004)

สำหรับวัสดุไม่เกาะตัว การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงมีปัจจัยมาจากคุณสมบัติวัสดุและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุมาจากแรงที่กระทำต่อเนื่อง กรณีที่วัสดุไม่เกาะตัวได้รับแรงกระทำในระดับ A และ B ทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัวไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงที่กระทำต่อเนื่อง (Rahman และ Erlingsson, 2016) ดังนั้นจะกำหนดการเปลี่ยนแปลงจากแรงที่กระทำต่อเนื่องเป็นไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้โครงสร้างทางสำหรับชั้นวัสดุชนิดไม่เกาะตัวมีปัจจัยมาจากคุณสมบัติวัสดุเท่านั้น ซึ่งมีปัจจัยมาจากความชื้น ประเภทวัสดุ และแรงที่กระทำต่อวัสดุ ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุไม่เกาะตัวจะมีความถ่วงจำเพาะ ความชื้นที่เหมาะสม ความหนาแน่น และดัชนีพลาสติกของวัสดุ ซึ่งข้อมูลความถ่วงจำเพาะอ้างอิงจาก 911 Metallurgist (2013), สุกิจ นามพิชญ์ และคณะ (2549) และคณะวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2550) ส่วนข้อมูลตัวแปรความชื้นที่เหมาะสม ความหนาแน่นวัสดุ และดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) มีที่มาข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ แสดงดัง**ตารางที่ 12**

ตารางที่ 12 ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางสำหรับสำหรับวัสดุไม่เกาะตัว

ประเภทวัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	ความชื้นที่เหมาะสม (%)	ความหนาแน่นวัสดุ (t/m ³)	ดัชนีพลาสติก (PI) (%)
หินคลุก	2.65	5.54	2.289	0
รองพื้นทาง	2.85	7.30	2.084	6.48
คัตเลือก ก	2.85	9.52	1.918	6.29
คัตเลือก ข	2.66	4.92	1.966	4.45
ดินเดิม	2.75	11.04	2.001	23.78

ที่มา : 911 Metallurgist (2013), สุกิจ นามพิชญ์ และคณะ (2549) และคณะวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2550)

3.2. การคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง

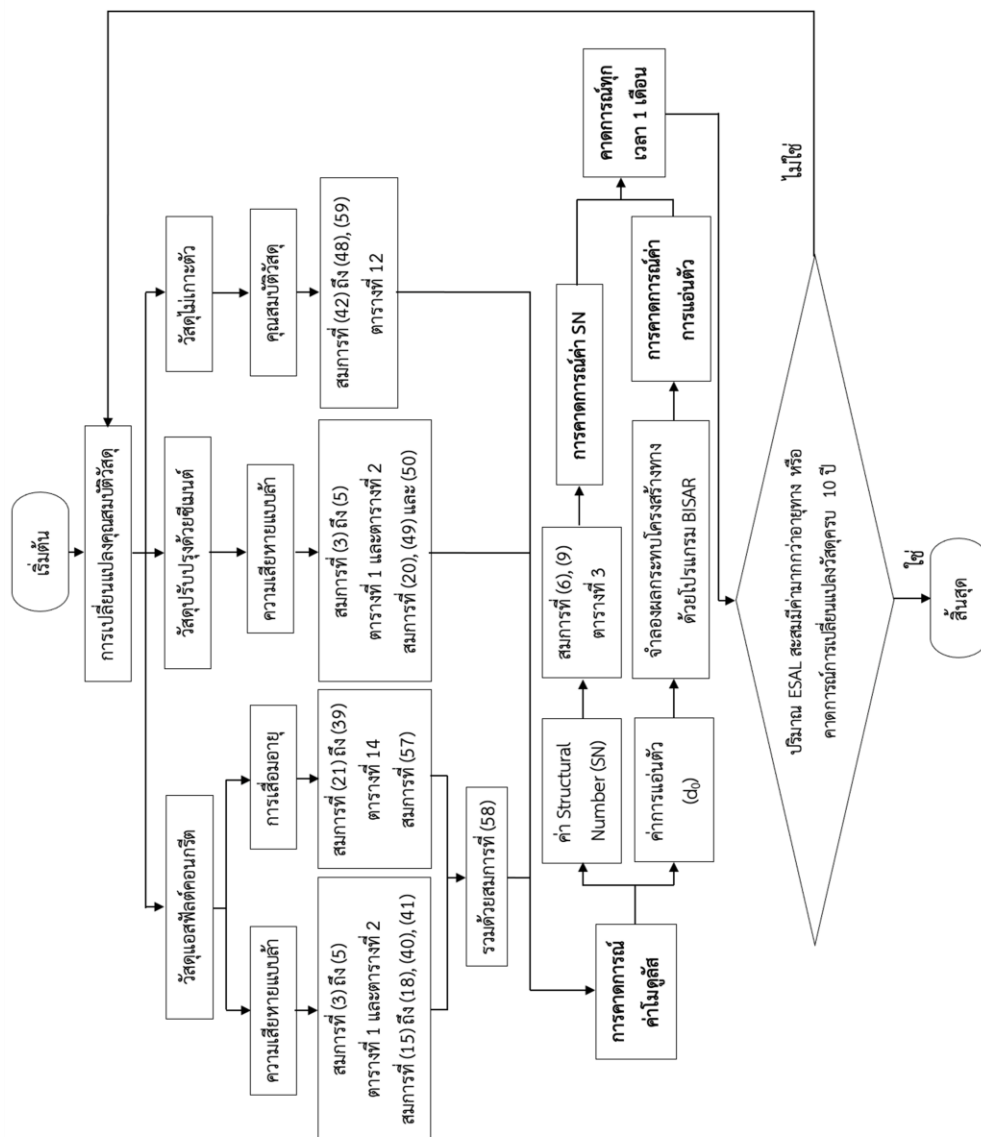
การคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง เริ่มจากการกำหนดรูปแบบชั้นทาง ใช้ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง แล้วจำลองผลกระทบโครงสร้างทางด้วยโปรแกรม BISAR ซึ่งจะได้ข้อมูลแรงที่กระทำแต่ละชั้นทาง และความเครียดแต่ละชั้นทาง แรงและความเครียดที่ได้จะนำไปประมาณอายุทางของวัสดุ แล้วนำอายุทางของวัสดุที่น้อยที่สุดเป็นอายุของโครงสร้างทาง ซึ่งชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตและวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะทำการประมาณอายุทางที่เป็นความเสียหายแบบล้าจากทฤษฎี MEPDG และชั้นดินเดิมจะใช้ความเครียดในการประมาณอายุทางที่เป็นความเสียหายแบบร่อนล้า โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่พัฒนาจาก Shell มาใช้ในการประมาณอายุทาง เมื่อได้อายุของโครงสร้างทางแล้วจะคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิด และกำหนดเวลาคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางที่มากที่สุดเป็น 10 ปี ซึ่งการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางจะเป็นค่าโมดูลัสของวัสดุในแต่ละช่วงเวลา แล้วคำนวณค่า Structural Number ของทาง และจำลองผลกระทบโครงสร้างทางในแต่ละช่วงเวลากับโปรแกรม BISAR เพื่อได้ค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลา จึงจะได้การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัว และการคาดการณ์ค่า Structural Number ในแต่ละช่วงเวลา การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุแบ่งชนิดวัสดุเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต วัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และวัสดุไม่เกาะตัว แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุดัง**ตารางที่ 13** และแผนภาพแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุแสดงดัง**รูปที่ 37**

ตารางที่ 13 การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุ

ประเภทวัสดุ	ประเภทของการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสวัสดุ	ปัจจัยการเปลี่ยนแปลง	ทฤษฎีหรืองานวิจัยที่ใช้
แอสฟัลต์คอนกรีต	ความเสียหายแบบล้า	แรงที่กระทำ ปริมาณ ESAL	AASHTO (1993) MEPDG
	การเสื่อมอายุ (Aging)	อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิแอสฟัลต์ ระยะเวลาการเสื่อมอายุ	MEPDG Pierce และคณะ (2017)
พื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์	ความเสียหายแบบล้า	แรงที่กระทำ ปริมาณ ESAL	MEPDG
ไม่เกาะตัว	คุณสมบัติวัสดุ	ความชื้น แรงที่กระทำ ชนิดของวัสดุ	MEPDG Naji (2018) Phommavone และ Sangpetngam (2018)
	แรงกระทำต่อเนื่อง	แรงที่กระทำต่อเนื่อง (คุณสมบัติวัสดุกำหนด ไม่เปลี่ยนแปลงจากแรง ดังกล่าว)	การเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติของวัสดุมาจาก แรงที่กระทำต่อเนื่อง

หมายเหตุ MEPDG คือ Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide

ESAL คือปริมาณเพลาสะสมมาตรฐาน



รูปที่ 37 แผนภาพแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุ

3.3. การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างทาง

การคาดการณ์ค่าโมดูลัสโครงสร้างทาง จะมีการคาดการณ์ 3 วัสดุ ได้แก่ วัสดุแอสฟัลต์ คอนกรีต วัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และวัสดุไม่เกาะตัว โดยที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมีปัจจัยจากความเสียหายและการเสื่อมอายุ วัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีปัจจัยมาจากความเสียหาย และวัสดุไม่เกาะตัวมีปัจจัยมาจากคุณสมบัติวัสดุ

3.3.1. วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต

วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตคาดการณ์ค่าโมดูลัสวัสดุแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ การคาดการณ์จากความเสียหายของแอสฟัลต์คอนกรีต และการคาดการณ์จากการเสื่อมอายุของวัสดุแอสฟัลต์ (Asphalt Aging) การคาดการณ์ค่าโมดูลัสจากความเสียหายของแอสฟัลต์คอนกรีต เป็นความเสียหายแบบล้า จะใช้ทฤษฎี MEPDG ในการคาดการณ์ค่าโมดูลัสวัสดุ โดยใช้ปริมาณ ESAL จากพื้นที่จริงมาคำนวณความเสียหายในแต่ละช่วงเวลา มีที่มาจากข้อมูลการทดสอบ FWD หรือข้อมูลปริมาณจราจร AADT ทั่วประเทศ ซึ่งมีฐานข้อมูลจากกรมทางหลวง และแพคเตอร์รถบรรทุกจากข้อมูลกรมทางหลวงในปี 2552 แล้วจะได้ปริมาณ ESAL มาจำลองค่าโมดูลัสที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งทฤษฎีที่ใช้ในการทำนายปริมาณ ESAL สะสมจะใช้ทฤษฎีของ AASHTO (1993) แล้วทำการคำนวณค่าโมดูลัสแต่ละช่วงเวลา ด้วยการใช้สมการที่ (3) ถึงสมการที่ (5) คำนวณ ซึ่งจะมีพารามิเตอร์เกี่ยวข้องกับปริมาณจราจร ได้แก่ การกระจายตัวรถบรรทุกในตารางที่ 1 และแพคเตอร์รถบรรทุกในตารางที่ 2 เมื่อคำนวณปริมาณ ESAL ที่เกิดขึ้นแล้วจะคาดการณ์ค่าโมดูลัสที่เกิดขึ้นจากปริมาณ ESAL โดยการใช้สมการการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของ Pierce และคณะ (2017) ในสมการที่ (40) และสมการที่ (41) คำนวณ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณ ESAL อายุทาง และค่าโมดูลัสวัสดุ อายุทางจะใช้สมการจากทฤษฎี MEPDG ในสมการที่ (15) ถึงสมการที่ (18) สำหรับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งจะมีความเครียดวัสดุ ค่าโมดูลัสวัสดุ และความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต ความเครียดวัสดุสามารถได้จากข้อมูลผลกระทบโครงสร้างทางด้วยค่าโมดูลัสวัสดุเริ่มต้นจากโปรแกรม BISAR การคาดการณ์ค่าโมดูลัสทางจะกำหนดอายุทางเป็นเวลามากที่สุด 10 ปี เมื่อคาดการณ์ความเสียหายทางแล้วยังไม่มีความเสียหายสมบูรณ์จากปริมาณ ESAL สะสมที่ใช้ทำนายเป็นเวลา 10 ปี

การคาดการณ์จากการเสื่อมอายุของวัสดุแอสฟัลต์ จะใช้ข้อมูลที่ใช้ในการคาดการณ์สำหรับการเสื่อมอายุใน MEPDG ซึ่งเลือกรูปแบบวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเป็น Medium Mix เนื่องจากวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทยมีความคล้ายกับข้อมูลการออกแบบโมดูลัสวัสดุของ MEPDG แล้วคาดการณ์โดยใช้สมการการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ของ MEPDG ในสมการที่ (21) ถึงสมการที่ (39) ซึ่งเริ่มจากขั้นตอนการคำนวณความหนืดแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส คำนวณความหนืดหลังจากการผสม และคำนวณความหนืดหลังจากการเสื่อมอายุในเวลาที่กำหนด หลังจากปรับแก้ช่องว่างอากาศ ซึ่งความหนืดที่ใช้จะเลือกตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีต จึงต้องปรับแก้ความหนืดดังกล่าวเป็นจุดที่กำหนด การเสื่อมอายุของแอสฟัลต์จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี ซึ่งกรมอุตุนิยมวิทยา (2565) กล่าวว่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีของประเทศไทยในปีพ.ศ. 2564 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 27.5 องศาเซลเซียส แล้วใช้ฐานข้อมูลจากเว็บ Weather Underground หาอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนในตำแหน่งที่เลือก แล้วนำมาเฉลี่ยเป็นอุณหภูมิรายปีในตำแหน่งที่เลือก และคำนวณเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีของประเทศไทยโดยนำส่วนต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีของตำแหน่งที่เลือกและอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีของประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 อุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยที่ใช้ในการจำลองการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์

ปีพ.ศ.	อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี (°C)	ปีพ.ศ.	อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี (°C)
2555	28.19	2561	27.00
2556	27.92	2562	27.78
2557	27.12	2563	27.72
2558	27.71	2564	27.50
2559	27.73	2565	27.24
2560	27.37		

เมื่อคำนวณความหนืดจากการเสื่อมอายุที่จุดกึ่งกลางแล้ว จะนำค่าดังกล่าวมาคำนวณค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์ โดยใช้สมการที่ (21) ถึงสมการที่ (25) หรือสมการ Master Curve ของ MEPDG มาใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งเป็นค่าโมดูลัสพลวัต (Dynamic Modulus) ในแต่ละเวลา ในงานวิจัยนี้กำหนดค่าโมดูลัสพลวัตของวัสดุเป็นค่าโมดูลัสในแต่ละช่วงเวลาจากการเสื่อมอายุ มีพารามิเตอร์เป็น $E_{AG,t}$ แล้วคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุของวัสดุแอสฟัลต์ในแต่ละเวลา กำหนดพารามิเตอร์เป็น $\Delta E_{AG,t}$ การคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุแอสฟัลต์แสดงดังสมการที่ (57)

$$\Delta E_{AG,t} = E_{AG,t} - E_{AG,0} \quad (57)$$

โดยที่ $\Delta E_{AG,t}$ คือการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสจากการเสื่อมอายุของวัสดุแอสฟัลต์ที่จุดกึ่งกลางเป็นเวลา t เดือน

$E_{AG,t}$ คือโมดูลัสของวัสดุแอสฟัลต์ที่จุดกึ่งกลางที่เสื่อมอายุเป็นเวลา t เดือน

$E_{AG,0}$ คือโมดูลัสของวัสดุแอสฟัลต์จากการก่อสร้างเสร็จที่จุดกึ่งกลางทาง

เมื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสทั้ง 2 รูปแบบแล้ว จะทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต โดยรวมกันระหว่างค่าโมดูลัสที่ได้จากความเสียหายของแอสฟัลต์คอนกรีต และการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสจากการเสื่อมอายุของวัสดุแอสฟัลต์ในแต่ละเวลา ค่าโมดูลัสที่ได้จากความเสียหายของแอสฟัลต์คอนกรีตมีที่มาจากค่าโมดูลัสของการคำนวณจาก Pierce และคณะ (2017) และได้กำหนดพารามิเตอร์ค่าโมดูลัสที่ได้จากความเสียหายของแอสฟัลต์คอนกรีตเป็น $E_{D,t}$ แสดงดังสมการที่ (58)

$$E_{AC,t} = E_{D,t} + \Delta E_{AG,t} \quad (58)$$

โดยที่ $E_{AC,t}$ คือโมดูลัสชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่เวลา t เดือน

$E_{D,t}$ คือโมดูลัสความเสียหายของแอสฟัลต์คอนกรีตในเวลา t เดือน

$\Delta E_{AG,t}$ คือการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสจากการเสื่อมอายุของวัสดุแอสฟัลต์ที่จุดกึ่งกลางเป็นเวลา t เดือน

3.3.2. วัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์

วัสดุพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะคาดการณ์ค่าโมดูลัสจากความเสียหายของวัสดุเท่านั้น ซึ่งความเสียหายของพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์เป็นความเสียหายแบบล้า การจำลองความเสียหายชั้นทางใช้ทฤษฎี MEPDG ในการคำนวณ จะใช้ค่า ESAL จากพื้นที่จริงมาคำนวณความเสียหายในแต่ละช่วงเวลา การคำนวณ ESAL จากพื้นที่จริงจะใช้สมการที่ (3) ถึงสมการที่ (5) คำนวณ และมีพารามิเตอร์เกี่ยวข้องกับปริมาณจราจร ได้แก่ การกระจายตัวรถบรรทุกในตารางที่ 1 และแฟคเตอร์รถบรรทุกในตารางที่ 2 โดยใช้ปริมาณจราจรที่ได้จากข้อมูลการทดสอบ FWD หรือข้อมูลปริมาณจราจร AADT ทั่วประเทศ แล้วทำการคำนวณค่าโมดูลัสแต่ละช่วงเวลานั้นขึ้นอยู่กับปริมาณ ESAL การคำนวณจะกำหนดอายุทางจากสมการที่ (20) ด้วยคุณสมบัติของวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์และความเค้นที่ด้านล่างชั้นทางที่ได้จากข้อมูลผลกระทบโครงสร้างทางด้วยค่า

โมดูลัสวัสดุเริ่มต้นจากโปรแกรม BISAR การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ จะใช้สมการที่ (49) และสมการที่ (50) ด้วยการใช้คุณสมบัติของวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ปริมาณ ESAL และอายุทาง การคาดการณ์ค่าโมดูลัสทางจะกำหนดอายุทางเป็นเวลามากที่สุด 10 ปี เมื่อคาดการณ์ความเสียหายทางแล้วยังไม่มีความเสียหายสมบูรณ์จากปริมาณ ESAL สะสมที่ใช้ ทำนายเป็นเวลา 10 ปี

3.3.3. วัสดุไม่เกาะตัว

วัสดุไม่เกาะตัวมีตัวแปรที่สำคัญคือ แรงที่กระทำ ความชื้นวัสดุ และการเปลี่ยนแปลงค่า โมดูลัสจากแรงที่กระทำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสำหรับชั้นวัสดุไม่เกาะตัวจะกำหนดเป็นไม่ เปลี่ยนแปลง อ้างอิงจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุมาจากแรงที่กระทำต่อเนื่อง สำหรับ วัสดุไม่เกาะตัวอ้างอิงจาก Rahman และ Erlingsson (2016) การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุไม่ เกาะตัวจะใช้สมการการคำนวณค่าโมดูลัสของ MEPDG ในแต่ละช่วงเวลาจะใช้สมการที่ (42) ถึง สมการที่ (46) และพารามิเตอร์ของ Naji (2018) ในตารางที่ 9 ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับโมดูลัสของ วัสดุ สำหรับโมดูลัสวัสดุที่ความชื้นเหมาะสมที่สุดจะใช้สมการการทำนายค่าโมดูลัสของ Phommavone และ Sangpetngam (2018) ในสมการที่ (47) สำหรับผิวละเอียด และสมการ ที่ (48) สำหรับวัสดุผิวหยาบ ซึ่งใช้ค่าแรงที่กระทำต่อวัสดุที่มาจากข้อมูลผลกระทบโครงสร้างทาง ด้วยค่าโมดูลัสวัสดุเริ่มต้นจากโปรแกรม BISAR และความชื้นชั้นทางจากคุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุ ไม่เกาะตัว เมื่อคำนวณค่าโมดูลัสที่ความชื้นเหมาะสมที่สุดของวัสดุไม่เกาะตัวแล้ว สามารถคำนวณ ค่าโมดูลัสในแต่ละช่วงเวลาได้ โดยใช้คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุเริ่มต้นจากตารางที่ 12 และ ปรับเปลี่ยนความชื้นตามความเหมาะสมของฤดูกาลในแต่ละพื้นที่ การคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่า โมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัวจะใช้ค่าความอิ่มตัว (Saturation) ในการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถคำนวณ ได้จากสมการที่ (59)

$$S = \frac{G_s w}{e} = \frac{G_s w}{\frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1} \quad (59)$$

โดยที่ S คือความอิมตัววัสดุ (%)

G_s คือความถ่วงจำเพาะวัสดุ

w คือความชื้นวัสดุ (%)

e คืออัตราส่วนช่องว่าง

γ_w คือความหนาแน่นน้ำ (อุณหภูมิ 20 °C ค่า $\gamma_w = 0.9982$)

γ_d คือความหนาแน่นวัสดุ

3.4. การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number ของทาง

การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number ของทาง จำเป็นต้องมีการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างทางก่อน จึงสามารถคาดการณ์ได้ โดยการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลาจะใช้ค่าโมดูลัสโครงสร้างทางที่ได้คาดการณ์แล้วมาทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางด้วยโปรแกรม BISAR รวมถึงคุณสมบัติวัสดุแต่ละชนิด เช่น อัตราส่วนปัวซอง และความหนาชั้นทาง สำหรับการคาดการณ์ค่า Structural Number จะใช้ค่าโมดูลัสโครงสร้างทางที่ได้มาคำนวณโดยการ ใช้สมการของ AASHTO (1993) ในสมการที่ (6) และสมการที่พัฒนาโดย Rohde และ Hartman (1996) ในสมการที่ (9) และค่าพารามิเตอร์ที่เป็นส่วนหนึ่งสำหรับการคำนวณค่า Structural Number ในตารางที่ 3

3.5. โปรแกรม BISAR

โปรแกรม BISAR พัฒนาโดย Shell ในช่วงต้นในคริสต์ทศวรรษที่ 1970 ซึ่งตัวโปรแกรม ถูกใช้ในการกำหนดการออกแบบของคู่มือ Shell Pavement Design Manual ในปีค.ศ. 1978 โปรแกรม BISAR เวอร์ชัน Release 1.0 ได้ใช้ในปีค.ศ. 1987 เป็นในรูปแบบคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้น Shell ได้พัฒนาโปรแกรม BISAR 1.0 เป็นโปรแกรม BISAR-PC 2.0 ซึ่งสามารถใช้ได้ในระบบปฏิบัติการดอส (Disk Operating System, DOS) ในปีค.ศ. 1995 และโปรแกรม BISAR 3.0 สำหรับ Windows 3.1, Windows 95, and Windows NT (Bitumen Business Group, 1998)

โปรแกรม BISAR เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์โครงสร้างทางอิลาสติกเชิงเส้นหลายชั้น หรือ Multi Layered Linear Elastic Analysis สามารถประมวลผลหรือจำลองผลกระทบโครงสร้างทางด้วยการกำหนดโครงสร้างทางที่ขึ้นกับชนิดโครงสร้างทาง ความหนา ด้วยแรงที่กระทำต่อโครงสร้างทางได้ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองจะเป็นค่าการแอ่นตัว ความเค้น และความเครียดในแต่ละตำแหน่งที่กำหนด

การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการประมวลผล จะมีทั้งหมด 2 ประเภท คือ โครงสร้างของถนนที่ใช้ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุ และแรงที่กระทำ โดยโครงสร้างถนนจะใช้ค่าโมดูลัสในแต่ละช่วงเวลา อัตราส่วนปัวซอง และความหนาการออกแบบในแต่ละชั้นทาง และแรงที่กระทำจะกำหนดเป็นแรงมาตรฐาน 707 kPa

3.6. การทดสอบความถูกต้องของการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุ

การทดสอบความถูกต้องของการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุจะเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรง 2 ประเภท ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว และการเปลี่ยนแปลงค่า SN ซึ่งเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ FWD การทดสอบความถูกต้องของการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุจะใช้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) จากการวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่นำข้อมูลที่ใช้ในวิเคราะห์สมการถดถอยแสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ข้อมูลที่ใช้ในวิเคราะห์สมการถดถอย

การเปลี่ยนแปลง	ข้อมูลการทดสอบ FWD	ข้อมูลการคาดการณ์ความแข็งแรง
ค่าการแอ่นตัว	การทดสอบโดยตรง	ผลกระทบโครงสร้างทางจาก BISAR
Structural Number (SN)	การคำนวณย้อนกลับในสมการที่ (10) สมการที่ (13) และสมการที่ (14)	การคาดการณ์ค่าโมดูลัสแต่ละชั้นทาง โดยใช้สมการที่(6) และสมการที่ (9)

ข้อมูลการทดสอบ FWD ในพื้นที่จริง การกำหนดแรงให้อยู่ในแรงมาตรฐานทำได้ยาก ส่งผลให้ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบมีความผิดพลาด ซึ่ง ASTM International (2020) ได้กำหนดการปรับแก้ค่าการแอ่นตัวให้อยู่ในแรงมาตรฐาน สามารถปรับแก้ได้จากสมการที่ (60)

$$\text{Normalized Deflection} = \text{Actual Deflection} \times \frac{\text{Reference Load}}{\text{Actual Load}} \quad (60)$$

สมมติการทดสอบ FWD ของสายทางหนึ่งทดสอบด้วยการใช้แรง 750 kPa ซึ่งเป็นค่า Actual Load มีค่าการแอ่นตัวที่ผิวทางแอสฟัลต์ขนาด 115.8 ไมโครเมตรซึ่งเป็นค่า Actual Deflection ต้องการปรับแรงทดสอบให้เป็นแรงทดสอบขนาด 707 kPa ซึ่งเป็นแรงมาตรฐานหรือ Reference Load ดังนั้นผิวทางจะมีค่าการแอ่นตัวขนาด 109.16 ไมโครเมตรที่แรงทดสอบขนาด 707 kPa

3.7. การเก็บข้อมูลสายทางและการเก็บข้อมูล FWD

การเก็บข้อมูลสายทางเพื่อใช้ในการคาดการณ์ค่าโมดูลัสเพื่อทดสอบความถูกต้องของการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว และค่า Structural Number ของทาง จะทำการคัดเลือกสายทางเป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเท่านั้น ชั้นพื้นทางจะเป็นวัสดุที่ไม่เกาะตัวหรือวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุที่ไม่เกาะตัวหรือวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในชั้นรองพื้นทาง และชั้นดินเดิมเป็นวัสดุที่ไม่เกาะตัว การเก็บข้อมูล FWD แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- 1) การเก็บข้อมูลค่าการแอ่นตัวที่มาจากการทดสอบ FWD โดยตรง จะเก็บข้อมูลการทดสอบจากกรมทางหลวง ข้อมูลการทดสอบจะเก็บในช่วงเวลา 9:00 - 16:00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาทำการเก็บข้อมูลของกรมทางหลวง การเลือกข้อมูลทดสอบ FWD จะเลือกข้อมูลเฉพาะสายทางที่มีการทดสอบ FWD หลายช่วงเวลาในตำแหน่งการทดสอบจุดเดียวกัน
- 2) การเก็บข้อมูลปริมาณจราจร จะเลือกข้อมูลจากฐานข้อมูลข้อมูลปริมาณจราจร AADT ทั่วประเทศสำหรับข้อมูล FWD ที่มีการทดสอบหลายช่วงเวลาในตำแหน่งการทดสอบจุดเดียวกัน หรือได้รับจากข้อมูลผลการทดสอบ FWD โดยตรงที่มาจากข้อมูลการทดสอบย้อนหลังของกรมทางหลวง ซึ่งข้อมูลที่เก็บจะเป็นปริมาณรถบรรทุกในแต่ละช่วงเวลา หรือเป็นปริมาณจราจรในแต่ละช่วงเวลา และร้อยละของรถบรรทุกหนัก

ข้อมูลจากการทดสอบ FWD มีช่วงเวลาของข้อมูลดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ช่วงเวลาข้อมูลการทดสอบ FWD

สายทาง (ช่วงหลัก กิโลเมตร)	ปีของข้อมูลการทดสอบค่าการ แอ่นตัวจาก FWD	ปีของข้อมูลปริมาณจราจร
2 (268.100 – 268.350)	2560 – 2561	2552 – 2565
4 (170.750 – 171.000)	2560 – 2561	2552 – 2565
4 (304.750 – 305.000)	2560 – 2561	2552 – 2565
24 (98.750 – 99.000)	2560 – 2561	2556 – 2560
117 (24.750 – 25.000)	2560 – 2561	2556 – 2560
323 (4.900 – 5.150)	2560 – 2561	2556 – 2560
344 (25.000 – 25.800)	2560 – 2564	2559 – 2563
344 (26.825 – 27.250)	2560 – 2564	2559 – 2563
344 (27.600 – 31.255)	2560 – 2564	2559 – 2563
344 (32.400 – 62.600)	2560 – 2564	2559 – 2563

สายทางที่ได้จากการเก็บข้อมูลการทดสอบ FWD มีข้อมูลโครงสร้างทางของวัสดุขึ้นอยู่กับประเภทวัสดุ ความหนาชั้นทาง โดยมีความแตกต่างของวัสดุที่ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง จึงได้กำหนดประเภทโครงสร้างทางทั้งหมด 4 ประเภท ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง แสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 รูปแบบของโครงสร้างทางที่ใช้ในการวิเคราะห์

วัสดุชั้นพื้นทาง	วัสดุชั้นรองพื้นทาง	สายทาง (ช่วงหลัก กิโลเมตร)	ตัวอย่างโครงสร้าง หน้าตัดสายทาง
Unbound	Unbound	2 (268.100 – 268.350) 4 (170.750 – 171.000) 4 (304.750 – 305.000) 24 (98.750 – 99.000) 323 (4.900 – 5.150)	รูปที่ 38
CTB	Unbound	4 (304.750 – 305.000) 117 (24.750 – 25.000) 344 (25.000 – 25.800) 344 (26.825 – 27.250) 344 (27.600 – 31.255) 344 (32.400 – 62.600)	รูปที่ 39
Unbound	CTB	24 (98.750 – 99.000)	รูปที่ 40
CTB	CTB	24 (98.750 – 99.000)	รูปที่ 41

AC	ผิวทางหนา 10 ซม.
พื้นทาง Unbound	พื้นทางหนา 20 – 30 ซม.
รองพื้นทาง Unbound	รองพื้นทางหนา 15 – 30 ซม.
วัสดุคัดเลือก	วัสดุคัดเลือกหนา 15 – 40 ซม.
ดินเดิม	ดินเดิม CBR 4.5%, 6%

รูปที่ 38 โครงสร้างหน้าตัดสายทางสำหรับชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็น Unbound

AC	ผิวทางหนา 10 – 19 ซม.
พื้นทาง CTB	พื้นทางหนา 20 – 25 ซม.
รองพื้นทาง Unbound	รองพื้นทางหนา 15 – 30 ซม.
วัสดุคัดเลือก	วัสดุคัดเลือกหนา 15 – 20 ซม. หรือไม่มีชั้นทาง
ดินเดิม	ดินเดิม CBR 6%, 10%

รูปที่ 39 โครงสร้างหน้าตัดสายทางสำหรับชั้นพื้นทางเป็น CTB และชั้นรองพื้นทางเป็น Unbound

AC	ผิวทางหนา 10 ซม.
พื้นทาง Unbound	พื้นทางหนา 20 ซม.
รองพื้นทาง CTB	รองพื้นทางหนา 25 ซม.
วัสดุคัดเลือก	วัสดุคัดเลือกหนา 40 ซม.
ดินเดิม	ดินเดิม CBR 6%

รูปที่ 40 โครงสร้างหน้าตัดสายทางสำหรับชั้นพื้นทางเป็น Unbound และชั้นรองพื้นทางเป็น CTB

AC	ผิวทางหนา 10 ซม.
พื้นทาง CTB	พื้นทางหนา 20 ซม.
รองพื้นทาง CTB	รองพื้นทางหนา 25 ซม.
วัสดุคัดเลือก	วัสดุคัดเลือกหนา 40 ซม.
ดินเดิม	ดินเดิม CBR 6%

รูปที่ 41 โครงสร้างหน้าตัดสายทางสำหรับชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็น CTB

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบของงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุพื้นทางบางส่วนเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD และการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number ระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง จะเป็นวัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และวัสดุพื้นทางบางส่วนเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

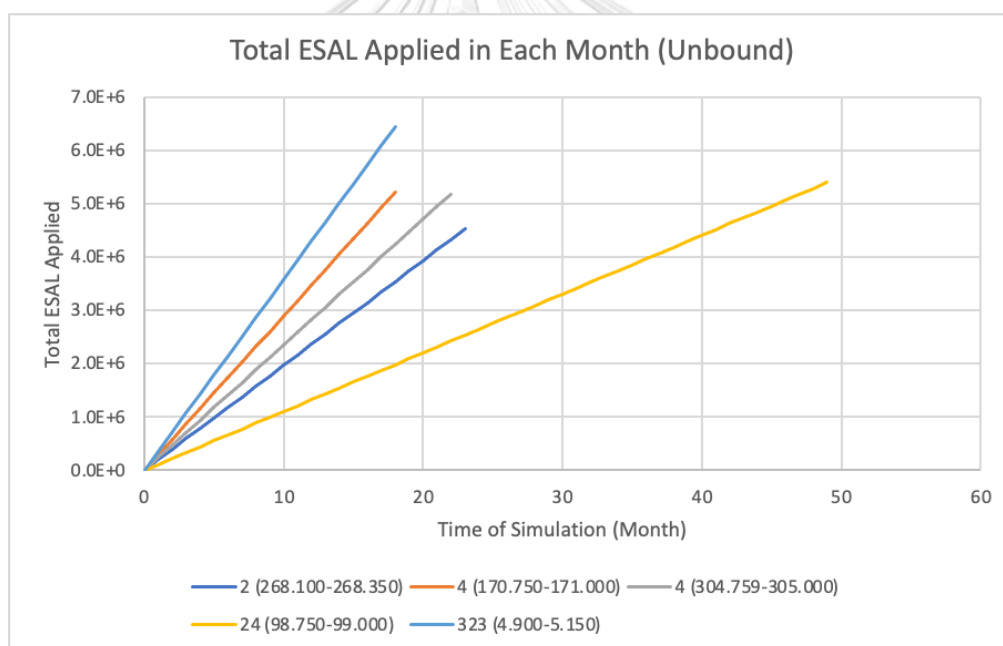
4.1. การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว

การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว ได้คาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุในแต่ละสายทางขึ้นอยู่กับความชื้น อุณหภูมิ ชนิดวัสดุโครงสร้างทาง และความหนาโครงสร้างทางที่กำหนด โดยกำหนดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุมาจากแรงที่กระทำต่อเนื้อเป็นไม่เปลี่ยนแปลง ได้กำหนดปริมาณ ESAL ด้วยการใช้สมการที่ (3) ถึงสมการที่ (5), ตารางที่ 1 และตารางที่ 2 โดยใช้ปริมาณจราจรในพื้นที่จริง แล้วนำมาคาดการณ์เวลาที่ใช้ในการจำลองโดยใช้อายุทางของวัสดุที่น้อยที่สุด ซึ่งจะมีอายุทางจากความเสียหายแบบล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตและอายุทางที่ชั้นดินเดิม การคำนวณอายุทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นความเสียหายแบบล้าจะคำนวณจากสมการที่ (15) ถึงสมการที่ (18) ด้วยคุณสมบัติวัสดุเริ่มต้นและผลทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางจากโปรแกรม BISAR ส่วนอายุทางที่ชั้นดินเดิม จะใช้การคำนวณอายุทางจากสมการที่ (19) และใช้พารามิเตอร์ด้วยผู้พัฒนา Shell ในตารางที่ 6 เนื่องจากโปรแกรมที่ทดสอบผลกระทบโครงสร้างคือ BISAR ซึ่ง Shell เป็นผู้พัฒนาโปรแกรม การคำนวณเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางแสดงดังสมการที่ (61)

$$\text{Min}(T, 10 \text{ Year}) = \frac{\text{Min}(N_f, N_r)}{\text{ESAL}(R)} \quad (61)$$

โดยที่	T	คือเวลาทั้งหมดของการคาดการณ์โครงสร้างทาง (ปี)
	ESAL(R)	คือปริมาณจราจรสะสมต่อปี (ESAL/ปี)
	N_f	คืออายุทางของความเสียหายแบบล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตหรือวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (ESAL)
	N_r	คืออายุทางของความเสียหายแบบร่องล้อของชั้นดินเดิม (ESAL)

ผลการคำนวณเวลาของการคาดการณ์ พบว่าในสาย 24 ช่วงกิโลเมตรที่ 98.750 – 99.000 มีเวลาของการจำลองมากที่สุด 49 เดือน โดยทั่วไปของเวลาที่การคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 18 เดือน ถึง 23 เดือน แสดงดังรูปที่ 42



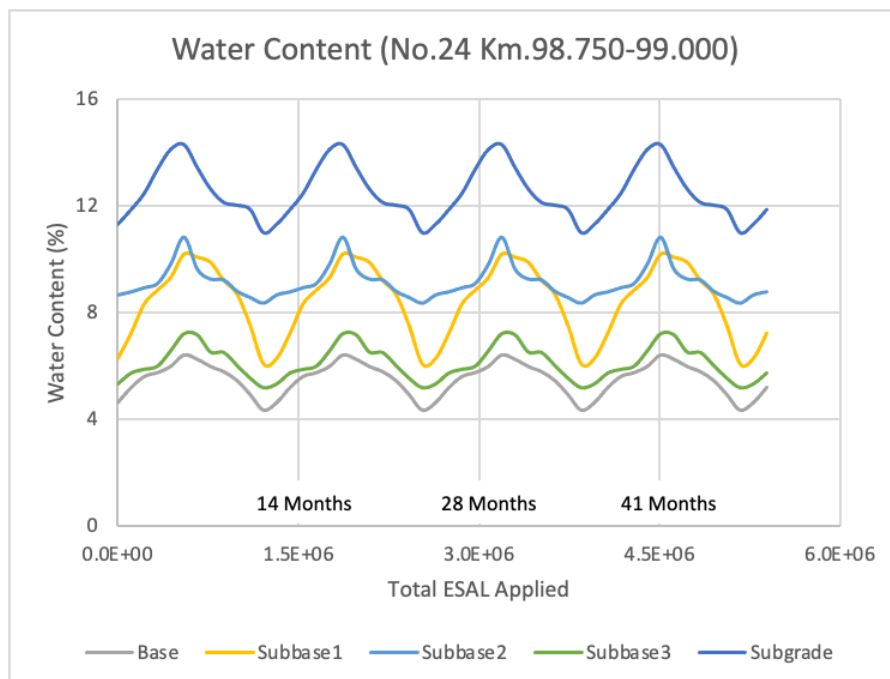
รูปที่ 42 เวลาของการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

การคาดการณ์ค่าโมดูลัสในของวัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว ชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะใช้ค่าโมดูลัสจากการคำนวณ**สมการที่ (58)** ในการคาดการณ์ค่าโมดูลัสแอสฟัลต์คอนกรีต โดยจะมีการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ จะใช้**สมการที่ (21) ถึงสมการที่ (39)** และความเสียหายแบบล้าของแอสฟัลต์ที่มาจากปริมาณ ESAL จะใช้**สมการที่ (40) ถึงสมการที่ (41)** การเปลี่ยนแปลงที่ผิวทางพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนถึงช่วงเวลานึงจะมีค่าลดลงเล็กน้อย มาจากการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นแล้วมีค่าลดลงในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุมีค่ามากกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการทำลายซึ่งมีความเสียหายแบบล้า มาจากปริมาณ ESAL ที่สะสมในการคาดการณ์มากขึ้นตามเวลาที่ใช้คาดการณ์

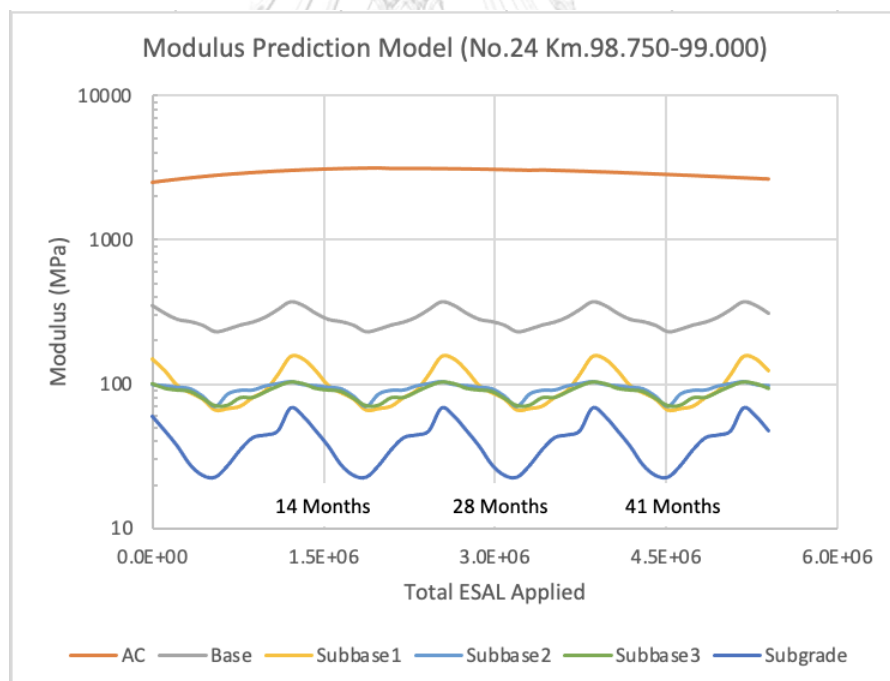
สำหรับวัสดุไม่เกาะตัวค่าโมดูลัสมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นเป็นรอบ ซึ่งอ้างอิงจากการคำนวณค่าโมดูลัสที่ขึ้นกับความชื้นใน**สมการที่ (42)** ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสของวัสดุในแต่ละรูปแบบที่ได้จาก**สมการที่ (47) และสมการที่ (48)** และการกำหนดความชื้นจะกำหนดให้มีความเหมาะสมกับฤดูกาลของพื้นที่จริง พบว่าผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสที่ได้มีแนวโน้มที่คล้ายกันทุกรูปแบบความหนาที่ได้กำหนดเหมือนกับพื้นที่จริง โดยความหนาชั้นทางที่กำหนดจะมีความหนาเหมือนกับพื้นที่จริง จะมีสายทางที่คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงโมดูลัสวัสดุแล้วมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสที่คล้ายกันแสดงดัง**ตารางที่ 18** ความชื้นของวัสดุไม่เกาะตัวในโครงสร้างทางแสดงดัง**รูปที่ 43** ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสโครงสร้างทางแสดงดัง**รูปที่ 44**

ตารางที่ 18 สายทางที่มีการคาดการณ์ค่าโมดูลัสคล้ายกัน (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

สายทาง (ช่วงหลักกิโลเมตร) ที่ คาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง	สายทาง (ช่วงหลักกิโลเมตร) ที่มีการ เปลี่ยนแปลงโมดูลัสชั้นทางที่คล้ายกัน
24 (98.750 – 99.000)	2 (268.100 – 268.350) 4 (170.750 – 171.000) 4 (304.750 – 305.000, Unbound Base) 323 (4.900 – 5.150)



รูปที่ 43 ความชื้นของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)



รูปที่ 44 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

4.2. การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุพื้นทางบางส่วนเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุพื้นทางบางส่วนเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ จะมีชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ได้คาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุในแต่ละสายทางขึ้นอยู่กับความชัน อุณหภูมิ ชนิดวัสดุโครงสร้างทาง และความหนาโครงสร้างทางที่กำหนด โดยกำหนดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุมาจากแรงที่กระทำต่อเนื่องเป็นไม่เปลี่ยนแปลง ได้กำหนดปริมาณ ESAL ด้วยการใช้สมการที่ (3) ถึงสมการที่ (5), ตารางที่ 1 และตารางที่ 2 แล้วนำมาคาดการณ์เวลาที่ใช้ในการจำลองโดยใช้อายุทางของวัสดุที่น้อยที่สุด ซึ่งจะมีอายุทางจากความเสียหายแบบล้าของวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ การคำนวณอายุทางคำนวณจากสมการที่ (20) ด้วยคุณสมบัติวัสดุเริ่มต้นในตารางที่ 11 และผลกระทบโครงสร้างทางจากโปรแกรม BISAR และอายุทางที่ชั้นดินเดิม จะใช้การคำนวณอายุทางจากสมการที่ (19) และใช้พารามิเตอร์ด้วยผู้พัฒนา Shell ในตารางที่ 6 แล้วนำมาคำนวณเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางในสมการที่ (61) ซึ่งการคาดการณ์จะแบ่งประเภทขึ้นอยู่กับวัสดุชั้นรองพื้นทาง แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และวัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

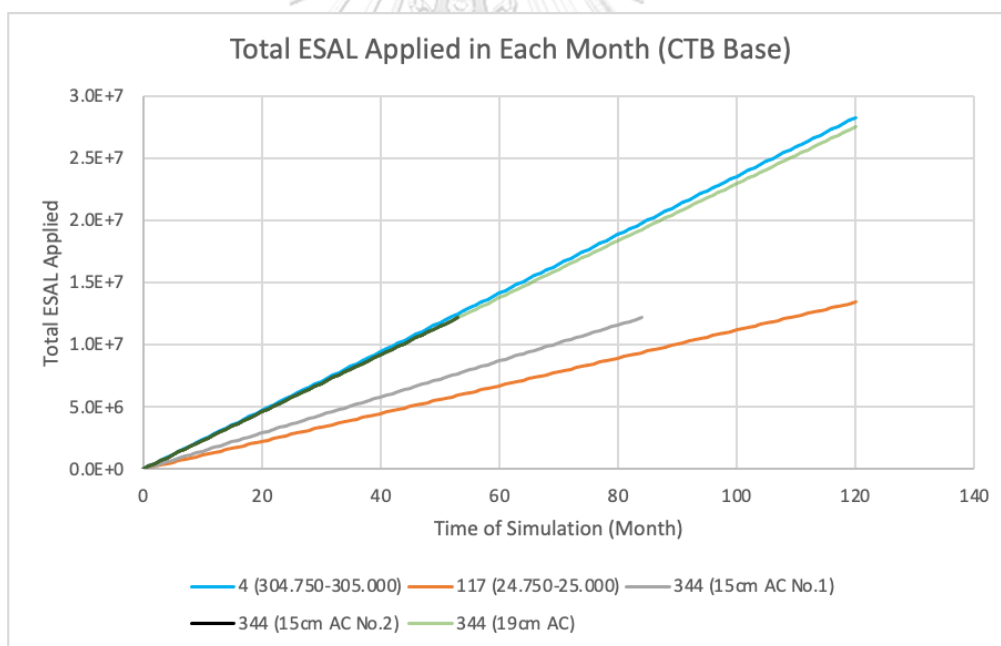
4.2.1. วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว

วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัวจะมีชั้นพื้นทางจะเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์เท่านั้น จะมีถนนสาย 4 ช่วงกิโลเมตรที่ 304.750 – 305.000 สาย 117 ช่วงกิโลเมตรที่ 24.750 – 25.000 และถนนสาย 344 สำหรับถนนสาย 344 ข้อมูลโครงสร้างทางพื้นที่จริงในแต่ละช่วงมีความหนาชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตและปริมาณ ESAL ที่ใช้ในการจำลองไม่เหมือนกันในแต่ละช่วง จึงได้กำหนดช่วงตำแหน่งสำหรับโครงสร้างทางเหมือนกับพื้นที่จริงด้วยความหนาชั้นทางและปริมาณ ESAL แสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ช่วงของถนนสาย 344 ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณจราจรและความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต

รูปแบบ	สายทาง 344 ช่วงหลักกิโลเมตร	ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต (ชม.)	ปริมาณ ESAL ต่อปี
1	25.000 – 25.800	15	1,736,880
	26.825 – 27.250		
	27.600 – 31.255		
2	32.400 – 34.000	15	2,751,707
	36.225 – 62.600		
3	34.000 – 36.225	19	2,751,707

ผลการคำนวณเวลาของการคาดการณ์ พบว่าโดยทั่วไปมีเวลาของการจำลองมากที่สุด 120 เดือน หรือ 10 ปี ยกเว้นสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 15 ชม. ทั้ง 2 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 45



รูปที่ 45 เวลาของการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง (ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

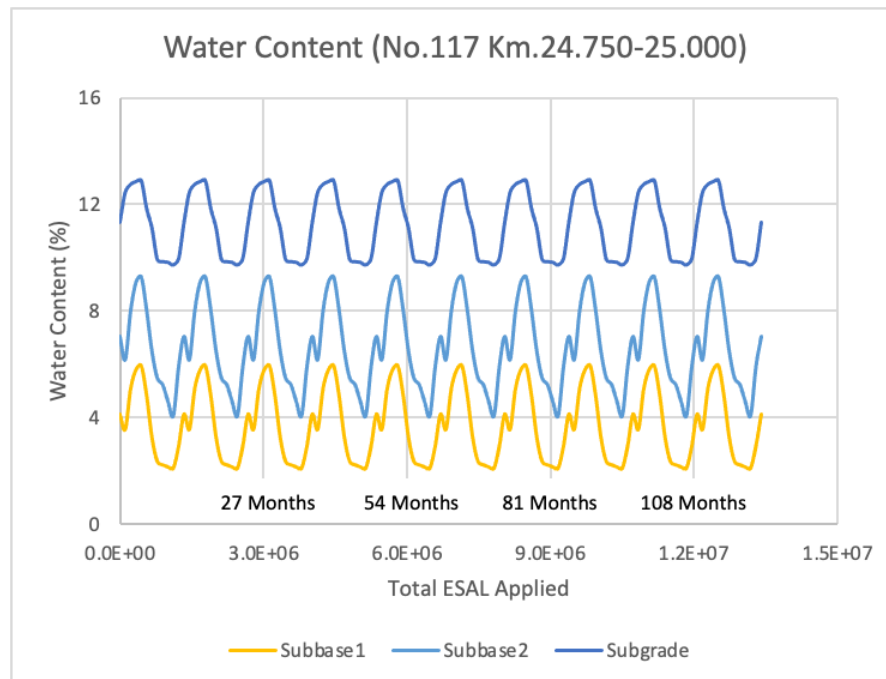
การคาดการณ์ค่าโมดูลัส ในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะใช้ค่าโมดูลัสจากการคำนวณ **สมการที่ (58)** ในการคาดการณ์ค่าโมดูลัสแอสฟัลต์คอนกรีต โดยจะมีการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ จะใช้ **สมการที่ (21) ถึงสมการที่ (39)** และความเสียหายแบบล้าของแอสฟัลต์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากความเสียหายแบบล้าของแอสฟัลต์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เพราะตำแหน่งที่รองรับจะเป็นชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์แทน การเปลี่ยนแปลงที่ผิวทางพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนถึงช่วงเวลาหนึ่งจะมีค่าลดลงเล็กน้อย มาจากการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นแล้วมีค่าลดลงในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

สำหรับพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะใช้ **สมการที่ (49) และสมการที่ (50)** โดยการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับคุณสมบัติวัสดุใน **ตารางที่ 11** ปริมาณ ESAL และอายุทาง พบว่าในช่วงแรกค่าโมดูลัสจะลดลงเล็กน้อย เมื่อมีปริมาณ ESAL กระทำสะสมถึงร้อยละ 20 ของอายุทาง ค่าโมดูลัสจะมีค่าลดลงมากจนถึงปริมาณ ESAL กระทำสะสมถึงร้อยละ 70 ของอายุทาง หลังจากนั้นค่าโมดูลัสจะมีค่าลดลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสมาจากปริมาณ ESAL ที่สะสมในการคาดการณ์มากขึ้นตามเวลาที่ใช้คาดการณ์

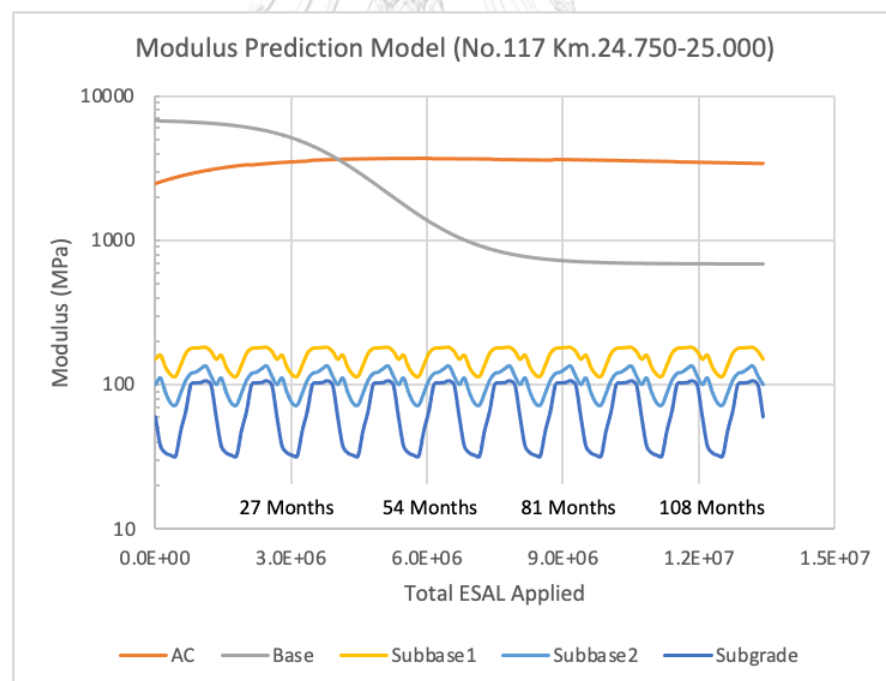
สำหรับวัสดุไม่เกาะตัวค่าโมดูลัสมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นเป็นรอบ ซึ่งอ้างอิงจากการคำนวณค่าโมดูลัสที่ขึ้นกับความชื้นใน **สมการที่ (42)** ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสของวัสดุในแต่ละรูปแบบที่ได้จาก **สมการที่ (47) และสมการที่ (48)** และการกำหนดความชื้นจะกำหนดให้มีความเหมาะสมกับฤดูกาลของพื้นที่จริง พบว่าผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสที่ได้มีแนวโน้มที่คล้ายกันทุกรูปแบบความหนาที่ได้กำหนดเหมือนกับพื้นที่จริง โดยความหนาชั้นทางที่กำหนดจะมีความหนาเหมือนกับพื้นที่จริง จะมีสายทางที่คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงโมดูลัสแล้วมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสที่คล้ายกันแสดงดัง **ตารางที่ 20** ความชื้นของวัสดุไม่เกาะตัวในโครงสร้างทางแสดงดัง **รูปที่ 46** และผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสโครงสร้างทางแสดงดัง **รูปที่ 47**

ตารางที่ 20 สายทางที่มีการคาดการณ์ค่าโมดูลัสคล้ายกัน (วัสดุพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

สายทาง (ช่วงหลักกิโลเมตร) ที่ คาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง	สายทาง (ช่วงหลักกิโลเมตร) ที่มีการ เปลี่ยนแปลงโมดูลัสชั้นทางที่คล้ายกัน
117 (24.750 – 25.000)	344 (25.000 – 25.800)
	344 (26.825 – 27.250)
	344 (27.600 – 31.255)

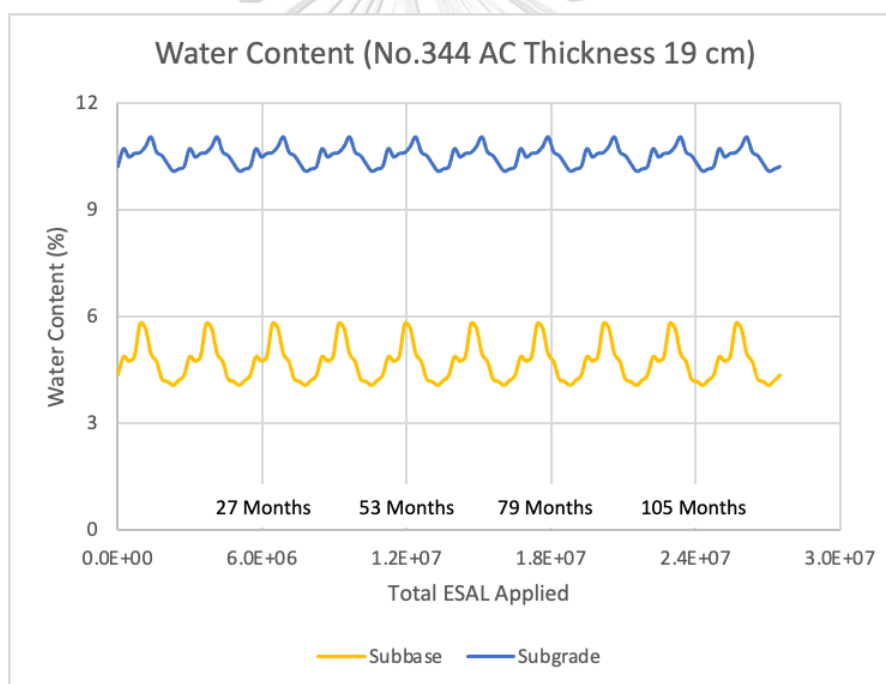


รูปที่ 46 ความชื้นของถนนสาย 117 กม. 24.750 – 25.000

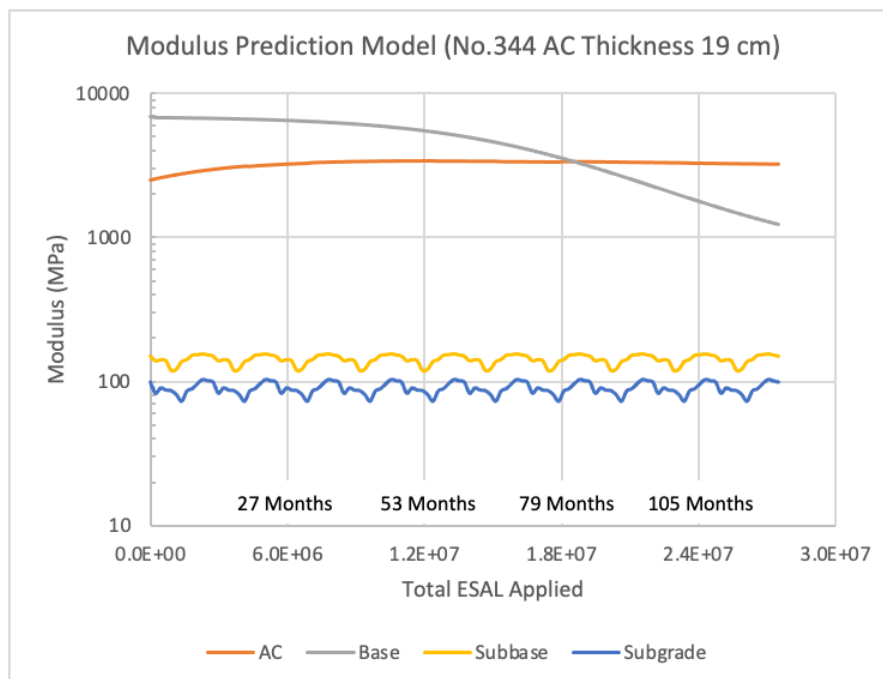


รูปที่ 47 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของถนนสาย 117 กม. 24.750 – 25.000

ค่าโมดูลัสในชั้นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์บางสายของชั้นพื้นทาง เช่นสายทาง 4 ช่วงกิโลเมตร ที่ 304.750 – 305.000 และสายทาง 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. ช่วงกิโลเมตรที่ 34.000 – 36.225 พบว่าเมื่อคาดการณ์เป็นเวลา 10 ปีแล้วค่าโมดูลัสของชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่เหมือนกับสาย 117 ช่วงกิโลเมตรที่ 24.750 – 25.000 เพราะการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ยังไม่มีควมเสียหายสมบูรณ์ มาจากการกำหนดเวลาในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางใน **สมการที่ (61)** ซึ่งได้กำหนดเวลาการคาดการณ์มากที่สุดเป็น 10 ปี แต่อายุทางจากการคำนวณอายุทางใน **สมการที่ (20)** ด้วยข้อมูลผลกระทบโครงสร้างทางจากโปรแกรม BISAR เมื่อคำนวณแล้วมีอายุทางมากกว่าปริมาณ ESAL สะสมทั้งหมดที่ใช้ในการคาดการณ์เป็นเวลา 10 ปี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสายทางทั้ง 2 สายทางมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสคล้ายกัน ความชื้นของวัสดุไม่เกาะตัวในโครงสร้างทางแสดงดัง **รูปที่ 48** และผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสโครงสร้างทางแสดงดัง **รูปที่ 49**



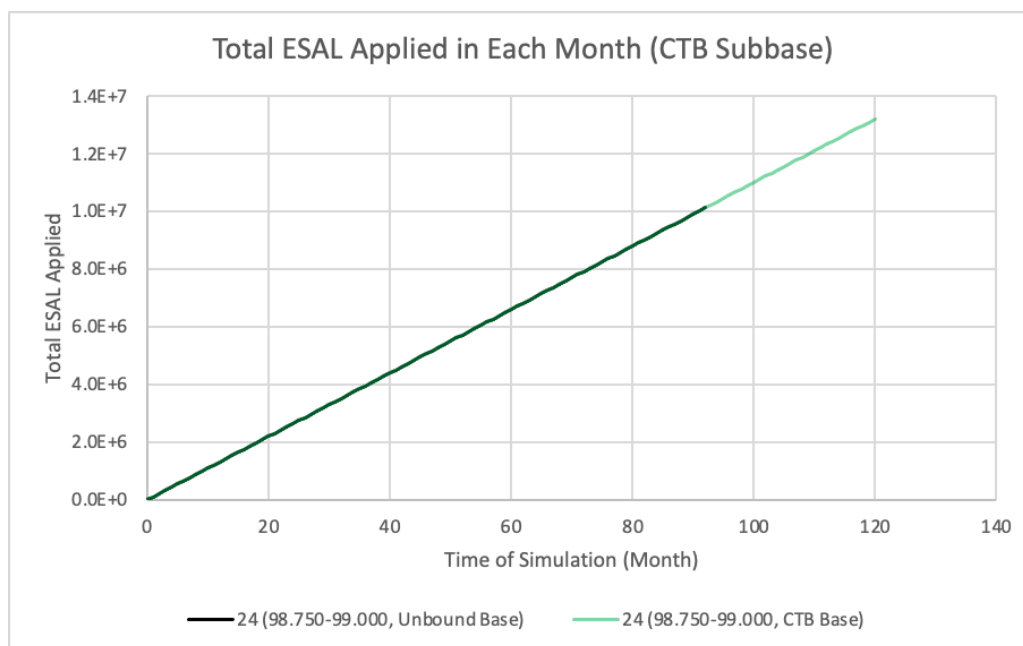
รูปที่ 48 ความชื้นของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.



รูปที่ 49 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.

4.2.2. วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

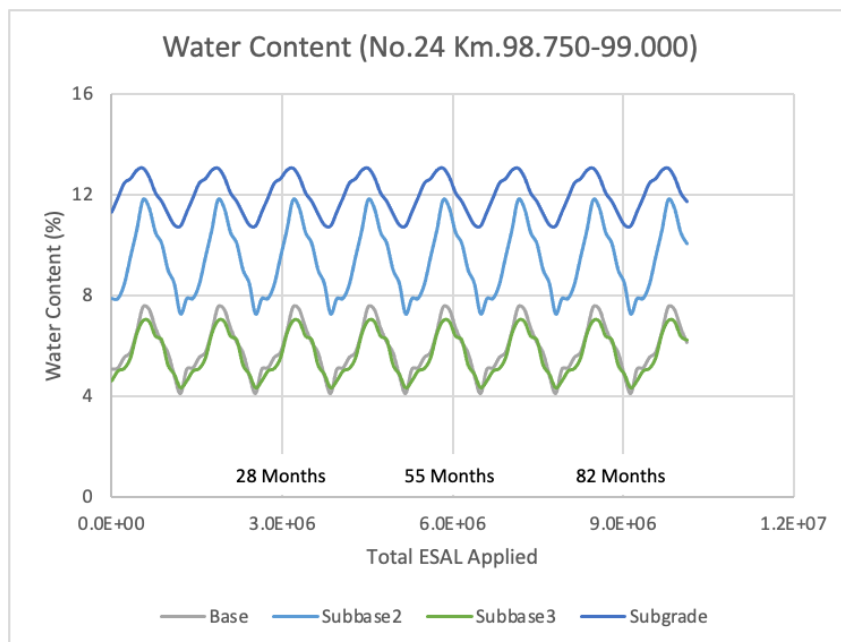
วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัวจะมีชั้นรองพื้นทางจะเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์เท่านั้น โดยที่ชั้นพื้นทางจะเป็นวัสดุไม่เกาะตัวหรือวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะมีถนนสาย 24 ช่วง กิโลเมตรที่ 98.750 – 99.000 มีผลการคำนวณเวลาของการคาดการณ์ พบว่าชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัวมีเวลาของการจำลองมากที่สุด 92 เดือน และชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีเวลาของการจำลองมากที่สุด 120 เดือน หรือ 10 ปี แสดงดังรูปที่ 50



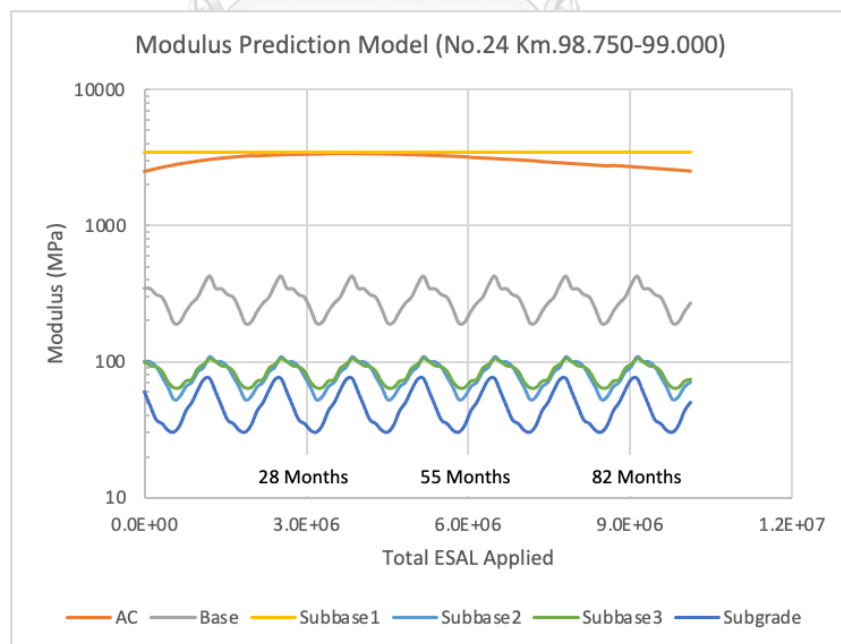
รูปที่ 50 เวลาของการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง (ชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

ถนนสาย 24 สำหรับชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ เมื่อทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางด้วย BISAR พบว่าจุดที่รองรับปริมาณ ESAL จะเป็นชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต มีสาเหตุมาจากค่าความเครียดที่ใต้ชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจากผลกระทบโครงสร้างทางจากโปรแกรม BISAR เป็นความเครียดดึง จึงทำให้สามารถประมาณอายุทางของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ การคำนวณอายุทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นความเสียหายแบบล้าจะคำนวณจากสมการที่ (15) ถึงสมการที่ (18) ด้วยคุณสมบัติวัสดุเริ่มต้นและผลทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางจากโปรแกรม BISAR เมื่อมีการเปรียบเทียบระหว่างอายุทางของชั้นผิวทาง ชั้นรองพื้นทางที่เป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และชั้นดินเดิม พบว่าอายุทางชั้นผิวทางมีอายุทางน้อยที่สุด ทำให้การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสชั้นผิวทางจะมีการเปลี่ยนแปลงจากการเสื่อมอายุและความเสียหายแบบล้าที่มาจากปริมาณ ESAL ด้วยการคำนวณในสมการที่ (58) การเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ จะใช้สมการที่ (21) ถึงสมการที่ (39) และความเสียหายแบบล้าของแอสฟัลต์ที่มาจากปริมาณ ESAL จะใช้สมการที่ (40) ถึงสมการที่ (41) การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุผิวทางและวัสดุไม่เกาะตัวมีลักษณะที่เหมือนกับการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของวัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัวจะอ้างอิงจากการคำนวณค่าโมดูลัสที่ขึ้นกับความชื้นในสมการที่ (42) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสของวัสดุในแต่ละรูปแบบที่ได้จากสมการที่ (47) และสมการที่ (48)

ความชื้นของถนนสาย 24 ที่มีโครงสร้างทางกลาวดังข้างต้นแสดงดังรูปที่ 51 และผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสโครงสร้างทางแสดงดังรูปที่ 52

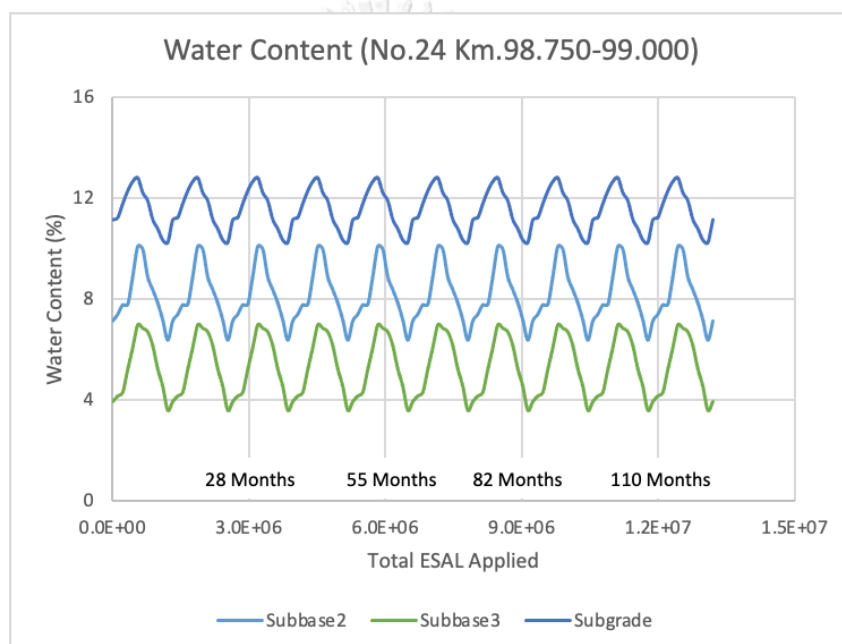


รูปที่ 51 ความชื้นของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

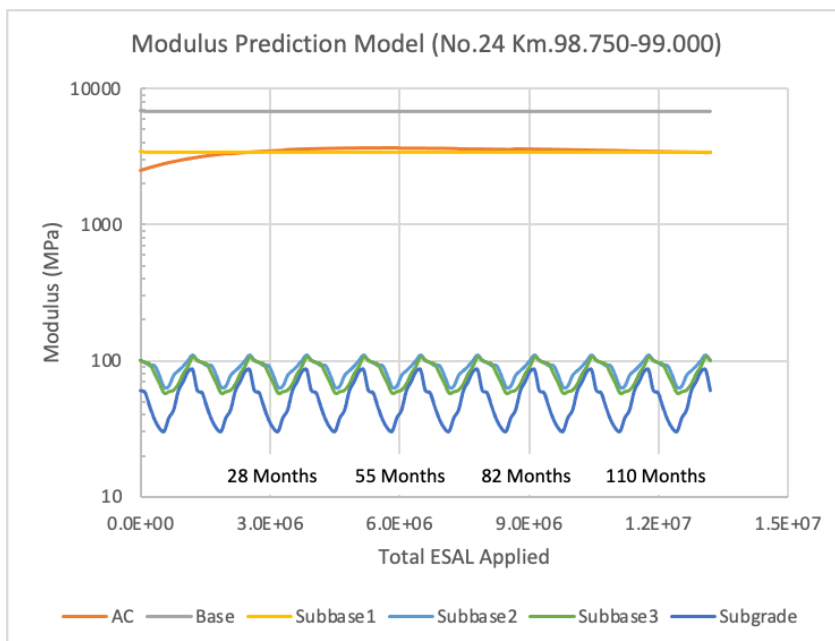


รูปที่ 52 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

ถนนสาย 24 สำหรับชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสชั้นพื้นทางจะไม่เปลี่ยนแปลง เพราะตำแหน่งที่รองรับจะเป็นตำแหน่งชั้นรองพื้นทางแทนชั้นพื้นทาง ซึ่งส่งผลให้ชั้นรองพื้นทางมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัส และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสเหมือนกับชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และวัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว แต่ค่าโมดูลัสชั้นรองพื้นทางมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพราะอายุทางชั้นรองพื้นทางมีค่ามากกว่าปริมาณ ESAL สะสมทั้งหมดที่ใช้ในการคาดการณ์เป็นเวลา 10 ปีความขึ้นของถนนสาย 24 ที่มีโครงสร้างทางกล่าวข้างต้นแสดงดังรูปที่ 53 และผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสโครงสร้างทางแสดงดัง รูปที่ 54



รูปที่ 53 ความขึ้นของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)



รูปที่ 54 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

4.3. การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number

การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัว จะได้จากผลการทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางจากโปรแกรม BISAR ด้วยการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างทาง โปรแกรม BISAR จะใช้แรงที่กระทำต่อโครงสร้างทาง ค่าโมดูลัสจากการคาดการณ์ อัตราส่วนปัวซอง และความหนาชั้นทาง โดยแรงที่กระทำต่อโครงสร้างทางจะใช้แรงขนาด 707 kPa ในการทดสอบผลกระทบ อัตราส่วนปัวซองจะได้จากคุณสมบัติวัสดุที่ใช้การคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง และความหนาชั้นทางจะได้จากข้อมูลโครงสร้างทางในพื้นที่จริง ส่วนการคาดการณ์ค่า Structural Number (SN) ของโครงสร้างทางจะใช้ค่าโมดูลัสจากการคาดการณ์ค่าโมดูลัสโครงสร้างทาง แล้วคำนวณค่า SN ของโครงสร้างทางด้วยสมการที่ (6) ,สมการที่ (9) และตารางที่ 3 การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า SN สามารถแบ่งโครงสร้างทางได้ทั้งหมด 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และวัสดุชั้นพื้นทางบางส่วนเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

4.3.1. วัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม้เกาะตัว

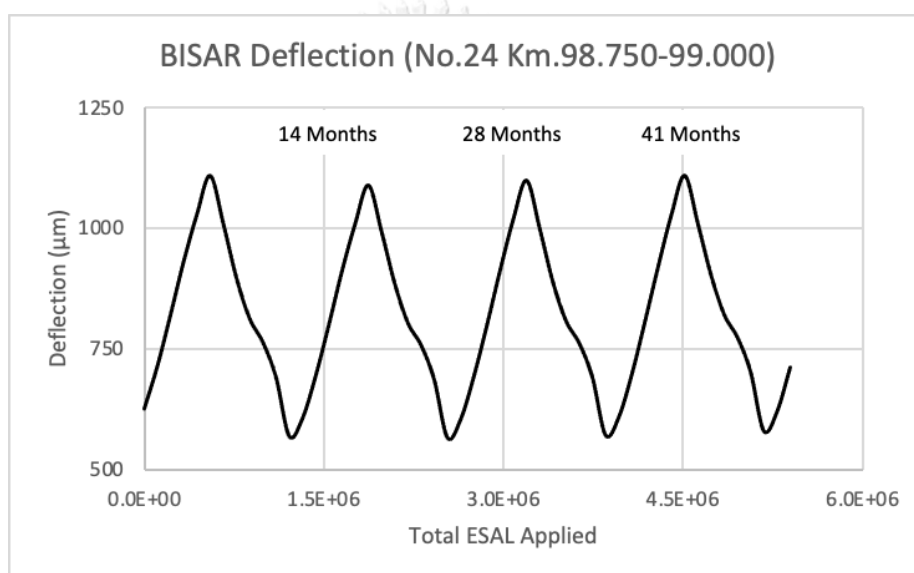
การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวของวัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม้เกาะตัว พบว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นค่าการแอ่นตัวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งค่าการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้น มาจากค่าโมดูลัสของชั้นผิวทางมีค่าเพิ่มขึ้น ในเวลาต่อมาค่าโมดูลัสชั้นผิวทางมีค่าลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสในช่วงแรก การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุมีค่ามากกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการทำลายซึ่งมีความเสียหายแบบล้า ในเวลาต่อมาการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุมีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการทำลาย และค่าการแอ่นตัวมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ มาจากค่าโมดูลัสชั้นวัสดุไม้เกาะตัวมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ซึ่งมาจากความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลามีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับฤดูกาล

การคาดการณ์ค่า SN ของวัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม้เกาะตัว พบว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นค่า SN มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งค่า SN มีค่าลดลง มาจากค่าโมดูลัสของชั้นผิวทางมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสในช่วงแรก การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุมีค่ามากกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการทำลายซึ่งมีความเสียหายแบบล้า ในเวลาต่อมาการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุมีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการทำลาย ในเวลาต่อมาค่าโมดูลัสชั้นผิวทางมีค่าลดลง และค่า SN มีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ มาจากค่าโมดูลัสของวัสดุไม้เกาะตัวมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ซึ่งมาจากความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลามีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับฤดูกาล

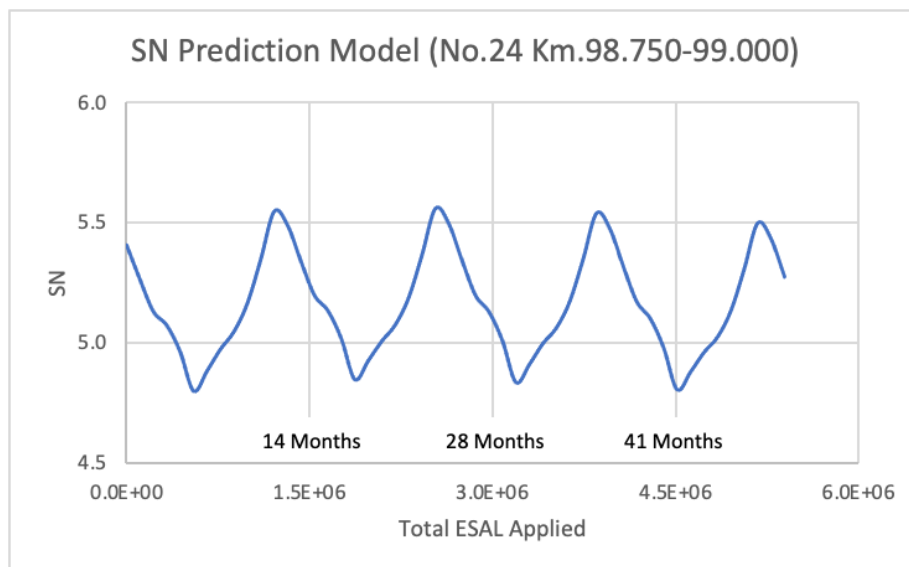
การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า SN ที่ได้มีสายทางที่คาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า SN แล้วมีแนวโน้มที่คล้ายกันแสดงดังตารางที่ 26 ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวโครงสร้างทางแสดงดังรูปที่ 55 และผลการคาดการณ์ค่า SN โครงสร้างทางแสดงดังรูปที่ 56

ตารางที่ 21 สายทางที่มีการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number คล้ายกัน (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

สายทาง (ช่วงหลักกิโลเมตร) ที่คาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า SN โครงสร้างทาง	สายทาง (ช่วงหลักกิโลเมตร) ที่คาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า SN โครงสร้างทางคล้ายกัน
24 (98.750 – 99.000)	2 (268.100 – 268.350) 4 (170.750 – 171.000) 4 (304.750 – 305.000, Unbound Base) 323 (4.900 – 5.150)



รูปที่ 55 ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)



รูปที่ 56 ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number ของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

4.3.2. วัสดุชั้นพื้นทางบางส่วนเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

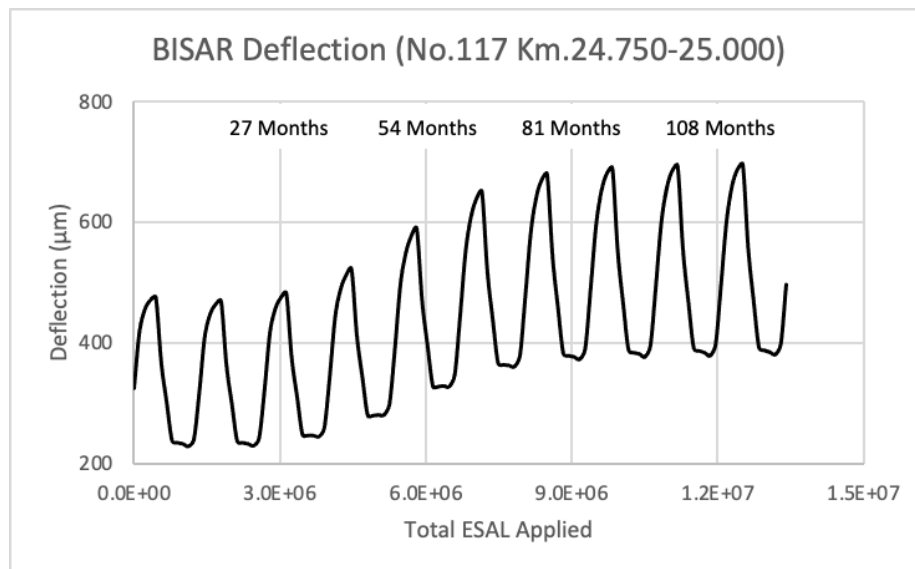
การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวของชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์พบว่ามีความลดลงเล็กน้อยหลังจากการก่อสร้าง เมื่อมีปริมาณ ESAL กระทำสะสมถึงร้อยละ 20 ของอายุทาง ค่าการแอ่นตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากจนถึงปริมาณ ESAL กระทำสะสมถึงร้อยละ 70 ของอายุทาง หลังจากนั้นค่าการแอ่นตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง มาจากค่าโมดูลัสของชั้นผิวทางมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก ทำให้ค่าการแอ่นตัวลดลง ส่วนค่าการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นมากในช่วงปริมาณ ESAL สะสมถึงร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 70 ของอายุทาง มาจากค่าโมดูลัสของชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากพัฒนาการการแตกร้าวในชั้นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์แล้วค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากช่วงปริมาณ ESAL สะสมมากกว่าร้อยละ 70 ของอายุทาง มาจากชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์อาจมีความเสียหายสมบูรณ์ หรือค่าโมดูลัสลดลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง และค่าโมดูลัสของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าลดลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ มาจากค่าโมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัวมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ซึ่งมาจากความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลามีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับฤดูกาล

การคาดการณ์ค่า SN ของชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์พบว่ามีความเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากการก่อสร้าง เมื่อมีปริมาณ ESAL กระทำสะสมถึงร้อยละ 20 ของอายุทาง ค่า SN จะมีค่าลดลงมากจนถึงปริมาณ ESAL กระทำสะสมถึงร้อยละ 70 ของอายุทาง หลังจากนั้นค่า SN จะมีค่าลดลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง มาจากค่าโมดูลัสของชั้นผิวทางมีความเพิ่มขึ้นในช่วงแรก ทำให้ค่าการแอ่นตัวลดลง ส่วนค่าการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นมากในช่วงปริมาณ ESAL สะสมถึงร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 70 ของอายุทาง มาจากค่าโมดูลัสของชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากพัฒนาการการแตกร้าวในชั้นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ แล้วค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากช่วงปริมาณ ESAL สะสมมากกว่าร้อยละ 70 ของอายุทาง มาจากชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์อาจมีความเสียหายสมบูรณ์ หรือค่าโมดูลัสลดลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง และค่าโมดูลัสของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าลดลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง ค่า SN มีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ มาจากค่าโมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัวมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ซึ่งมาจากความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลามีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับการฤดูกาล

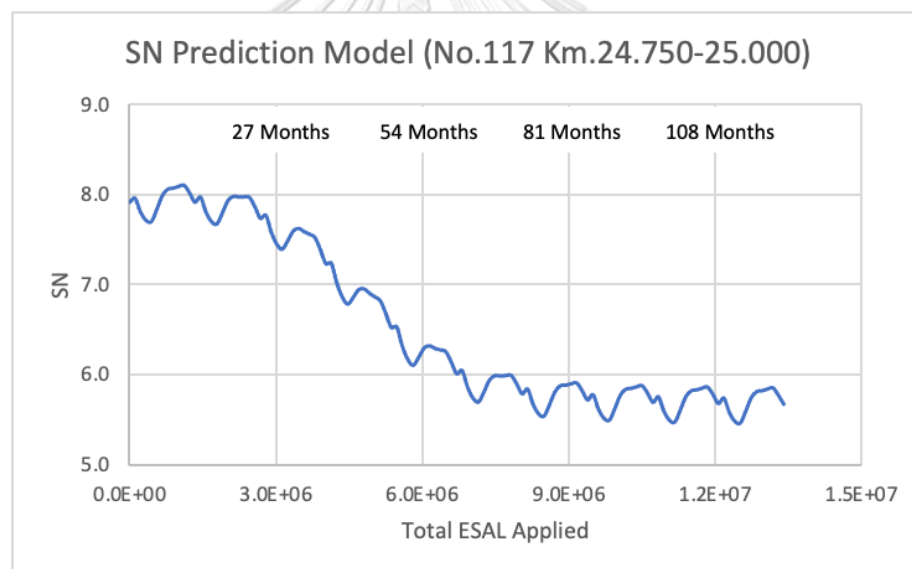
การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า SN ที่ได้มีสายทางที่คาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า SN แล้วมีแนวโน้มที่คล้ายกัน ซึ่งวัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะมีถนนสาย 344 ซึ่งมีความหนาชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตและปริมาณ ESAL ที่ใช้ในการจำลองไม่เหมือนกันในแต่ละช่วง จะใช้การแบ่งประเภทขึ้นกับช่วงสายทางจากตารางที่ 19 สายทางที่มีการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า SN ที่คล้ายกันแสดงดังตารางที่ 22 ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวโครงสร้างทางแสดงดังรูปที่ 57 และผลการคาดการณ์ค่า SN โครงสร้างทางแสดงดังรูปที่ 58

ตารางที่ 22 สายทางที่มีการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า Structural Number คล้ายกัน (วัสดุพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

สายทาง (ช่วงหลักกิโลเมตร) ที่คาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า SN โครงสร้างทาง	สายทาง (ช่วงหลักกิโลเมตร) ที่คาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและค่า SN โครงสร้างทางคล้ายกัน
117 (24.750 – 25.000)	344 (25.000 – 25.800)
	344 (26.825 – 27.250)
	344 (27.600 – 31.255)

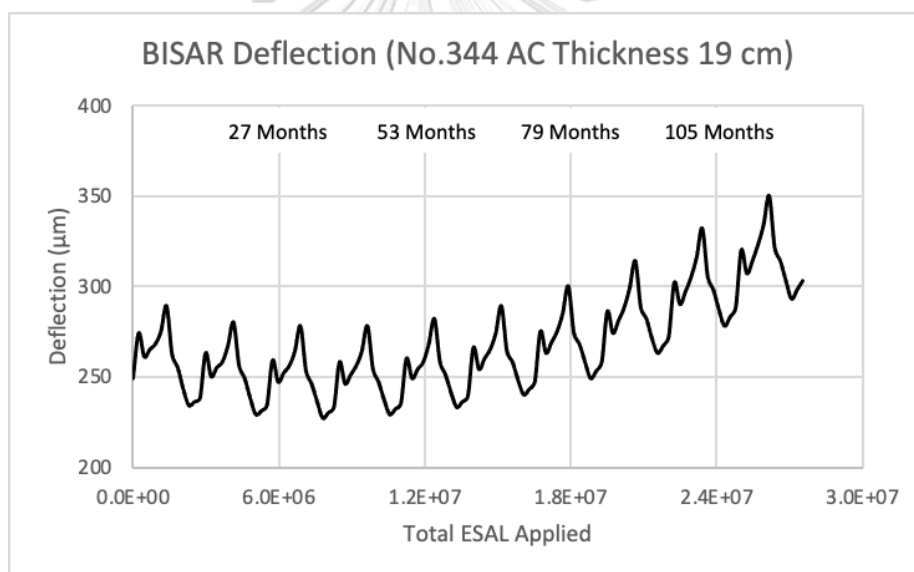


รูปที่ 57 ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 117 กม. 24.750 – 25.000

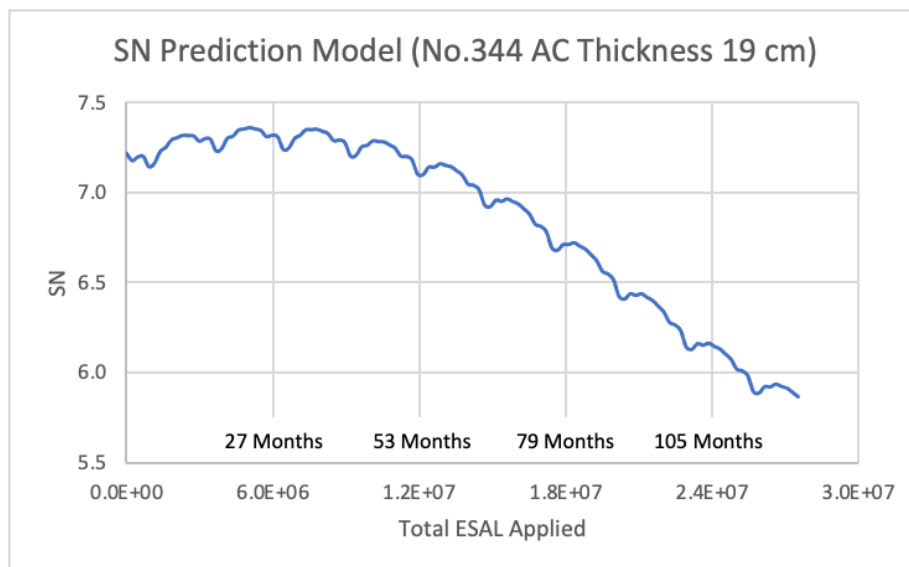


รูปที่ 58 ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number ของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้น
พื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

การคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวและ SN ของโครงสร้างทาง เช่นสายทาง 4 ช่วงกิโลเมตรที่ 304.750 – 305.000 และสายทาง 34 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. ช่วงกิโลเมตรที่ 34.000 – 36.225 พบว่าเมื่อคาดการณ์เป็นเวลา 10 ปีแล้วค่าการแอ่นตัวและ SN โครงสร้างทางมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่เหมือนกับสาย 117 ช่วงกิโลเมตรที่ 24.750 – 25.000 เพราะการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสชั้นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ยังไม่มีควมเสียหายสมบูรณ์ มาจากการกำหนดเวลาในการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางใน**สมการที่ (61)** ซึ่งได้กำหนดเวลาการคาดการณ์มากที่สุดเป็น 10 ปี แต่อายุทางจากการคำนวณอายุทางใน**สมการที่ (20)** ด้วยข้อมูลผลกระทบโครงสร้างทางจากโปรแกรม BISAR เมื่อคำนวณแล้วมีอายุทางมากกว่าปริมาณ ESAL สะสมทั้งหมดที่ใช้ในการคาดการณ์เป็นเวลา 10 ปี ค่าการแอ่นตัวและ SN โครงสร้างทางของสายทางทั้ง 2 สายทางมีแนวโน้มคล้ายกัน ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวโครงสร้างทางแสดงดัง**รูปที่ 59** และผลการคาดการณ์ค่า SN โครงสร้างทางแสดงดัง**รูปที่ 60**

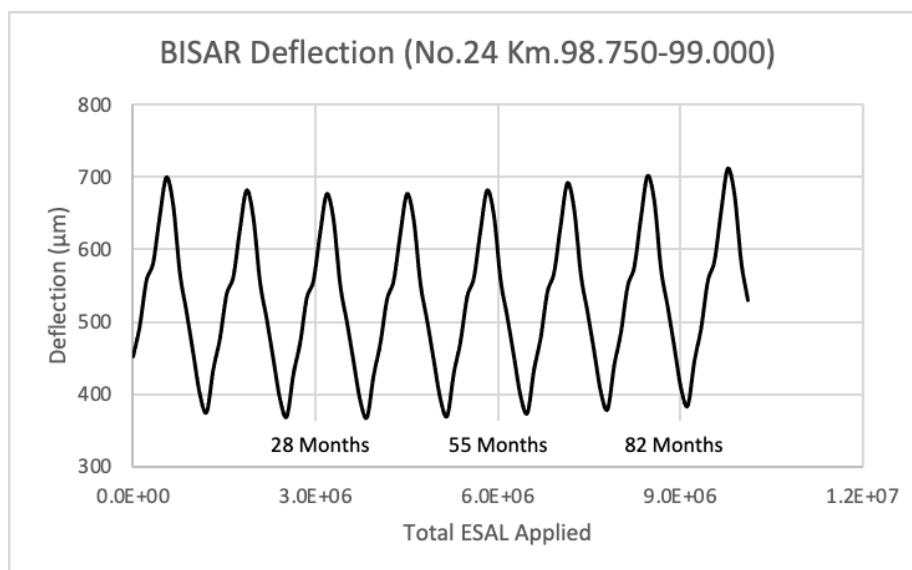


รูปที่ 59 ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.

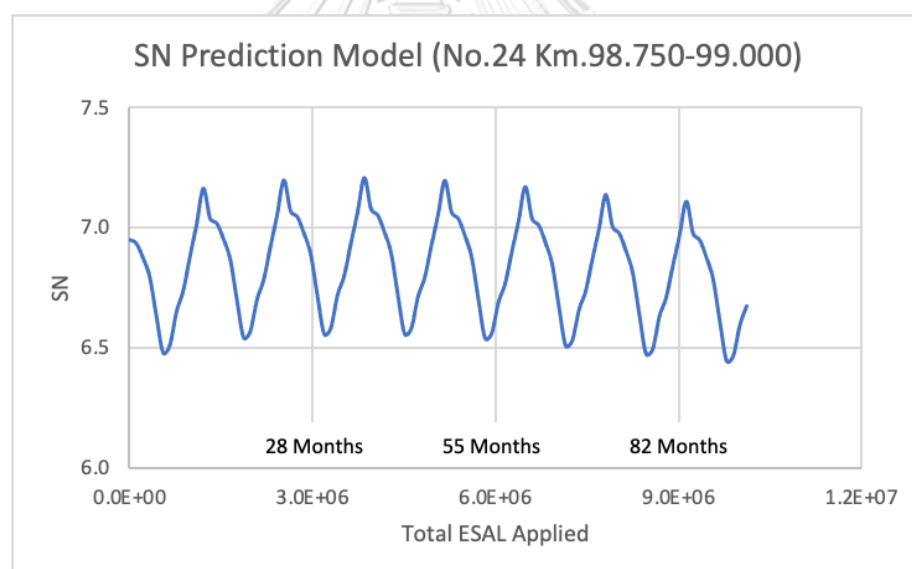


รูปที่ 60 ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.

สำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ซึ่งเป็นถนนสาย 24 ขึ้นอยู่กับวัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัวหรือวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ พบว่าแนวโน้มของสายทางทั้ง 2 รูปแบบ มีแนวโน้มค่าการแอ่นตัวและค่า SN มีลักษณะที่คล้ายกับวัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว โดยค่าการแอ่นตัวในช่วงเวลาเริ่มต้นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งค่าการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่า SN ในช่วงเวลาเริ่มต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งค่า SN มีค่าลดลง ค่าการแอ่นตัวและค่า SN มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าวมีผลมาจากค่าโมดูลัสของชั้นผิวทางมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นค่าโมดูลัสชั้นผิวทางมีค่าลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในเวลาต่อมาการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุมีแนวโน้มลดลง สำหรับถนนสาย 24 ที่ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว นอกจากมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุแล้ว จะมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการทำลายด้วย และค่า SN มีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ มาจากค่าโมดูลัสของวัสดุไม่เกาะตัวมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ นอกจากนั้นพัฒนาการการแตกร้าวในชั้นวัสดุรองพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีผลต่อค่าการแอ่นตัวเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวโครงสร้างทางของวัสดุรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์แสดงดังรูปที่ 59 และผลการคาดการณ์ค่า SN โครงสร้างทางของวัสดุรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์แสดงดังรูปที่ 60



รูปที่ 61 ผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)



รูปที่ 62 ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number ของถนนสาย 24 กม. 98.750 – 99.000 (ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

4.4. การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD

การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวสามารถเปรียบเทียบระหว่างค่าการแอ่นตัวช่วงต้นและช่วงสุดท้าย ตัวอย่างเช่น กำหนดช่วงต้นเป็นเดือนที่ 1 และกำหนดช่วงสุดท้ายเป็นเดือนที่ 11 จะเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวเป็นระยะเวลา 10 เดือน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (62)

$$\Delta d_{0t} = \frac{d_{0L} - d_{0F}}{d_{0F}} \times 100 \quad (62)$$

โดยที่ Δd_{0t} คือร้อยละของการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวระยะเวลา t เดือน
 d_{0L} คือค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของช่วงสุดท้ายที่กำหนด (mm)
 d_{0F} คือค่าการแอ่นตัวกึ่งกลางของช่วงต้นที่กำหนด (mm)

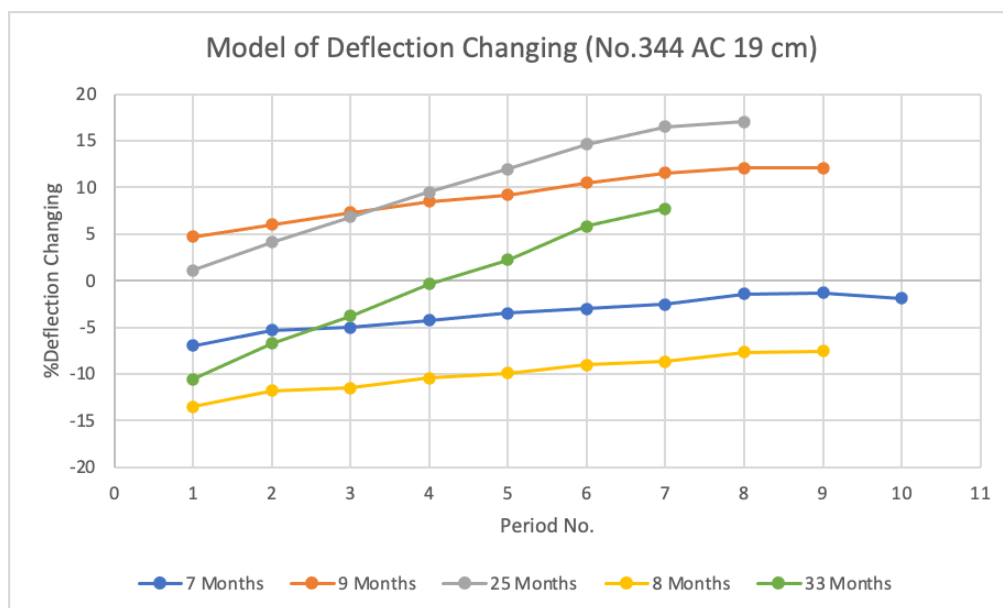
การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจะกำหนดช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับช่วงเวลาการทดสอบ FWD ของพื้นที่จริง ซึ่งมีช่วงระยะเวลาการทดสอบข้อมูล FWD ที่ขึ้นอยู่กับสายทางแสดงดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ช่วงเวลาของการทดสอบ FWD ในแต่ละสายทาง

สายทาง (ช่วงหลักกิโลเมตร)	ช่วงเวลาของข้อมูลการทดสอบ FWD เรียงลำดับ ช่วงเวลาตามข้อมูลการทดสอบ FWD (เดือน)
2 (268.100 – 268.350)	5
4 (170.750 – 171.000)	6,5
4 (304.750 – 305.000)	5,6
24 (98.750 – 99.000)	5
117 (24.750 – 25.000)	6,5
323 (4.900 – 5.150)	4,7
344 (25.000 – 25.800)	7,9,25,10
344 (26.825 – 27.250)	7,9,25,10
344 (27.600 – 31.255)	7,9,25,10
344 (32.400 – 62.600, เลนซ้าย)*	7,9,25,8
344 (32.400 – 62.600, เลนขวา)*	7,9,33

หมายเหตุ * คือในบางตำแหน่งของการทดสอบ ช่วงระยะเวลาของข้อมูลการทดสอบไม่เท่ากัน สำหรับเลนซ้ายจะมีระยะเวลา 16 เดือน แทนช่วงเวลา 7,9 เดือน และ 34 เดือนแทนช่วงเวลา 25,9 เดือน ส่วนเลนขวามีระยะเวลา 16 เดือน แทนช่วงเวลา 7,9 เดือน และมี 49 เดือนแทน 7,9,33 เดือน

ข้อมูล FWD สาย 344 จะมีความหนาแน่นแอสฟัลต์คอนกรีตต่างกันในแต่ละจุดการทดสอบ ซึ่งได้กำหนดช่วงตามความหนาแน่นแอสฟัลต์คอนกรีตในตารางที่ 19 มีการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวโครงสร้างทางของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 63

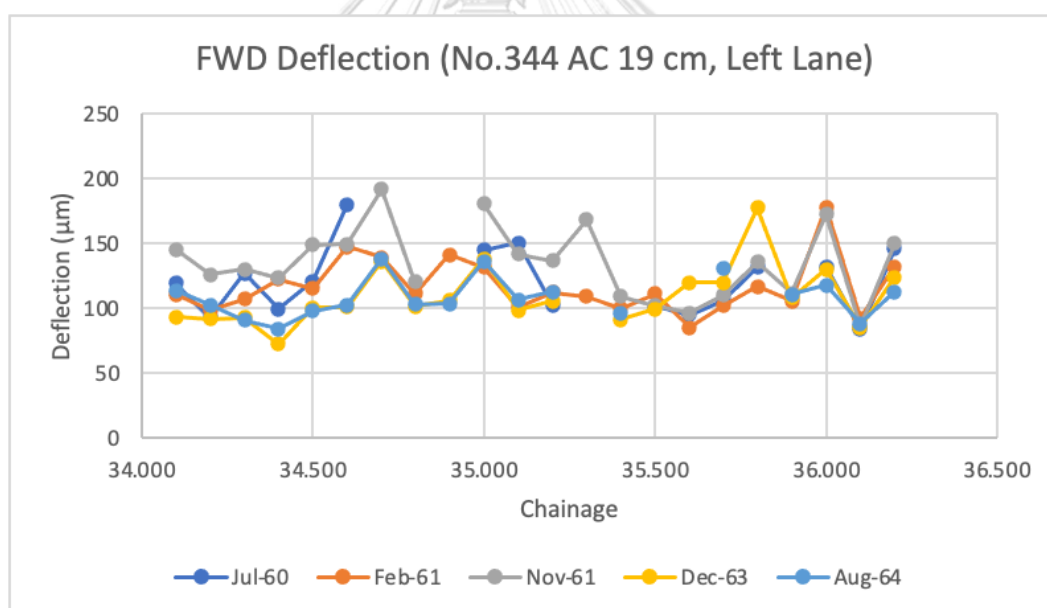


รูปที่ 63 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.

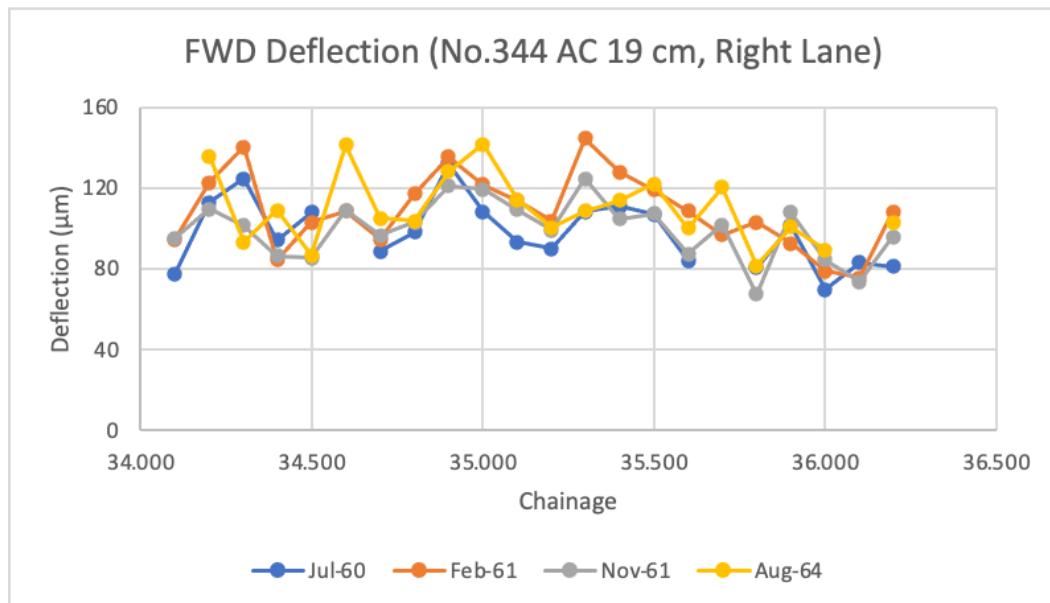
การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว จะใช้ข้อมูลการทดสอบ FWD ในการเปรียบเทียบ ซึ่งจะใช้เวลาของข้อมูลการทดสอบ FWD ที่ได้กำหนดในตารางที่ 23 และคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากสมการที่ (62) ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดหน่วยแรงให้มีขนาดเท่ากัน ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดหน่วยแรงมาตรฐานเป็น 707 kPa และสามารถปรับแก้ค่าการแอ่นตัวที่มาจากหน่วยแรงได้จากสมการที่ (60) จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากข้อมูล FWD แสดงดังตารางที่ 24 ตัวอย่างค่าการแอ่นตัวจากข้อมูล FWD แสดงดังรูปที่ 64 และรูปที่ 65 และการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากข้อมูล FWD แสดงดังรูปที่ 66 และรูปที่ 67

ตารางที่ 24 จำนวนข้อมูลของการทดสอบ FWD ในแต่ละสายทาง

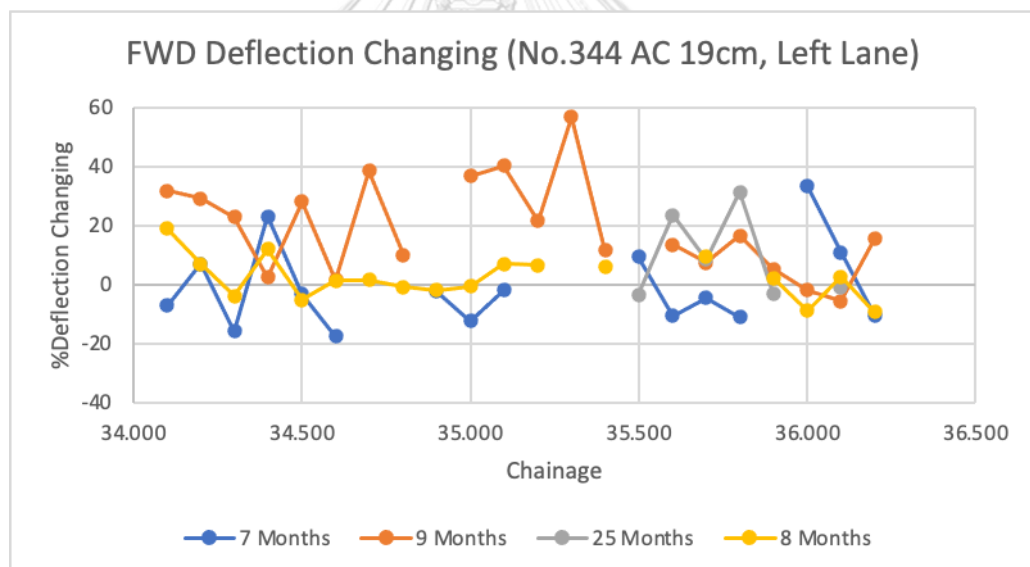
สายทาง (ช่วงหลักกิโลเมตร)	จำนวนข้อมูลการทดสอบ FWD
2 (268.100 – 268.350)	22
4 (170.750 – 171.000)	33
4 (304.750 – 305.000)	33
24 (98.750 – 99.000)	22
117 (24.750 – 25.000)	33
323 (4.900 – 5.150)	33
344 (25.000 – 25.800)	61
344 (26.825 – 27.250)	24
344 (27.600 – 31.255)	167
344 (32.400 – 62.600)	2210



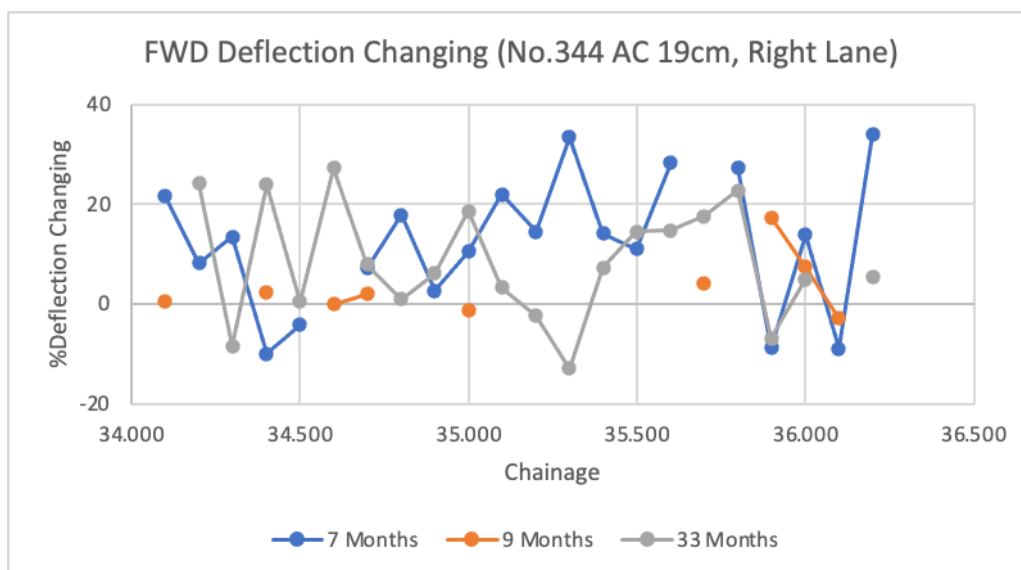
รูปที่ 64 ข้อมูลค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนซ้าย)



รูปที่ 65 ข้อมูลค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนขวา)

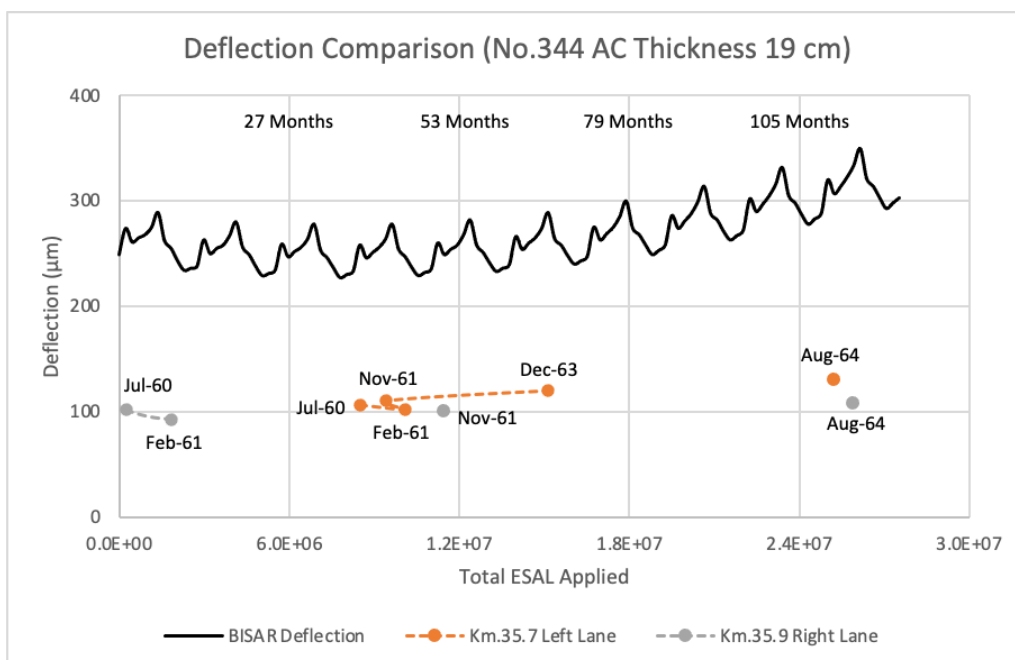


รูปที่ 66 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.
(เลนซ้าย)



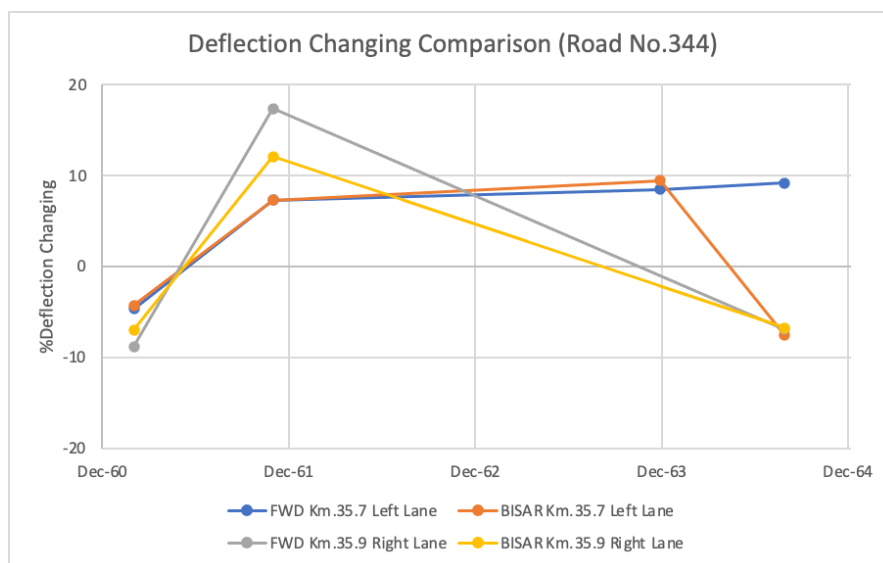
รูปที่ 67 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.
(เลนขวา)

เมื่อเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวระหว่างผลการคาดการณ์ค่าการแอ่นตัวจากโปรแกรม BISAR และข้อมูลการทดสอบ FWD พบว่าค่าการแอ่นตัวจากผลการคาดการณ์ด้วยโปรแกรม BISAR มีค่ามากกว่าค่าการแอ่นตัวของข้อมูลการทดสอบ FWD ประมาณ 100 – 200 ไมโครเมตร ซึ่งมีความแตกต่างกันมาก จึงใช้การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวแทนค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลา ผลการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวระหว่างผลการคาดการณ์จากโปรแกรม BISAR และข้อมูลการทดสอบ FWD แสดงดังรูปที่ 68



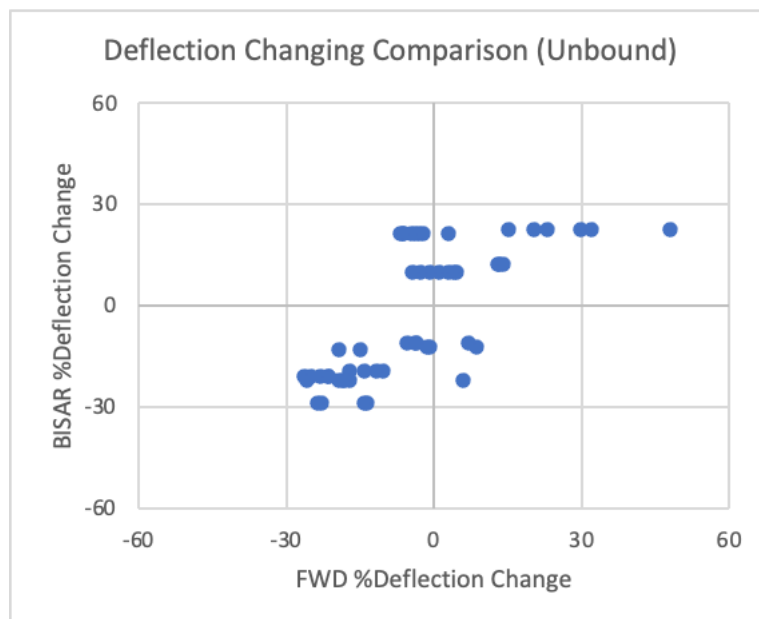
รูปที่ 68 ผลการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.

การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากข้อมูลการทดสอบ FWD ไม่ได้บอกอายุทางเริ่มต้นของสายทางจริงในข้อมูล FWD ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวอยู่ในช่วงเวลาใดในแต่ละจุดของการทดสอบ จึงเลือกการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของการทดสอบ FWD ที่มีค่าใกล้เคียงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD ที่ขึ้นอยู่กัช่วงเวลาแสดงดังรูปที่ 69



รูปที่ 69 ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวสำหรับวัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว โดยใช้ข้อมูลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวระหว่างข้อมูลจากแบบจำลองจากการจำลองโครงสร้างทางด้วยการใช้โปรแกรม BISAR และข้อมูลการทดสอบ FWD ในช่วงการเปลี่ยนแปลงที่ร้อยละ -30 ถึง 60 ซึ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวคล้ายกับ Arnold และคณะ (2009) แล้วทำการพัฒนาการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD เป็นสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง มีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นปรับแก้ (Adjusted R Square) ที่ร้อยละ 51.5 และแบบจำลองมีค่านัยสำคัญ (Significant) ที่ร้อยละ 0 โดยกำหนดค่านัยสำคัญที่รับได้ในแบบจำลองที่ร้อยละ 5 จึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองไม่มีความแตกต่างกับการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากข้อมูลการทดสอบ FWD และสามารถใช่แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวสำหรับโครงสร้างทางรูปแบบนี้ได้ การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวมีค่าเป็น 0.62 เท่าของการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบ FWD เพราะว่าสภาพแวดล้อมส่งผลต่อค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลา เช่น ความชื้น และอุณหภูมิ และปริมาณ ESAL สะสมในพื้นที่จริงมีค่าที่แตกต่างจากแบบจำลอง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวมาก แสดงแผนภาพการกระจายตัวของ การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวที่มาจากแบบจำลองและผลการทดสอบ FWD ดังรูปที่ 70 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นแสดงดังตารางที่ 25 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) แสดงดังตารางที่ 26 และผลการวิเคราะห์ถดถอยแสดงดังตารางที่ 27



รูปที่ 70 แผนภาพการกระจายตัวของ การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

ตารางที่ 25 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

Model Summary

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.724 ^a	.524	.515	11.40745

a. Predictors: DeltaD0_BISAR1

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ตารางที่ 26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	7318.188	1	7318.188	56.238	.000 ^c
	Residual	6636.628	51	130.130		
	Total	13954.816 ^d	52			

a. Dependent Variable: DeltaD0_FWD1

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: DeltaD0_BISAR1

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

ตารางที่ 27 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

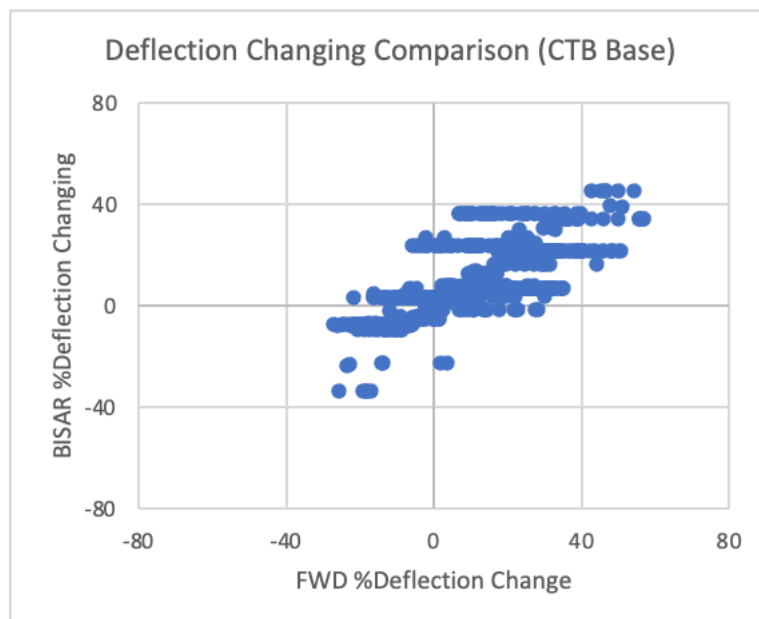
Coefficients^{a,b}

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1 DeltaD0_BISAR1	.620	.083	.724	7.499	.000

a. Dependent Variable: DeltaD0_FWD1

b. Linear Regression through the Origin

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวสำหรับวัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง มีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นปรับแก้ที่ร้อยละ 56.6 และแบบจำลองมีค่านัยสำคัญที่ร้อยละ 0 โดยกำหนดค่านัยสำคัญที่รับได้ในแบบจำลองที่ร้อยละ 5 จึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองไม่มีความแตกต่างกับการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากข้อมูลการทดสอบ FWD และสามารถใช่แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวสำหรับโครงสร้างทางรูปแบบนี้ได้ การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวมีค่าเป็น 0.931 เท่าของการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบ FWD เพราะว่าสภาพแวดล้อมส่งผลต่อค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลา และปริมาณ ESAL สะสมในพื้นที่จริงมีค่าที่แตกต่างจากแบบจำลอง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวในพื้นที่จริง และการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวในพื้นที่จริง แสดงแผนภาพการกระจายตัวของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวที่มาจากแบบจำลองและผลการทดสอบ FWD ดังรูปที่ 71 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นแสดงดังตารางที่ 28 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 29 และผลการวิเคราะห์การถดถอยแสดงดังตารางที่ 30



รูปที่ 71 แผนภาพการกระจายตัวของ การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

ตารางที่ 28 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.752 ^a	.566	.566	10.50918

a. Predictors: (Constant), DeltaD0_BISAR2

ตารางที่ 29 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	137469.401	1	137469.401	1244.710	.000 ^b
	Residual	105362.555	954	110.443		
	Total	242831.957	955			

a. Dependent Variable: DeltaD0_FWD2

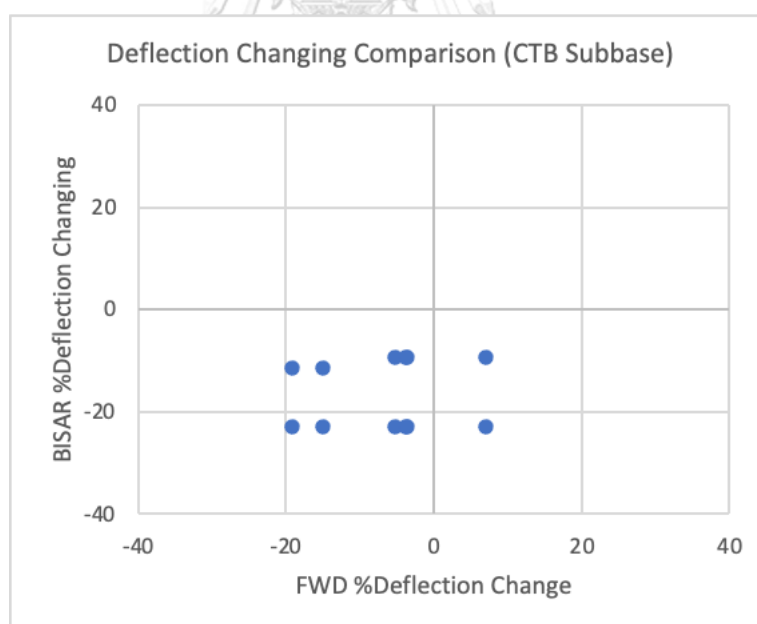
b. Predictors: (Constant), DeltaD0_BISAR2

ตารางที่ 30 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

Coefficients ^a					
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	Sig.
		B	Std. Error	Beta	
1	(Constant)	1.452	.403		3.598
	DeltaD0_BISAR2	.931	.026	.752	35.280

a. Dependent Variable: DeltaD0_FWD2

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวสำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ พบว่าแบบจำลองมีค่านัยสำคัญที่ร้อยละ 82.4 โดยกำหนดค่านัยสำคัญที่รับได้ในแบบจำลองที่ร้อยละ 5 จึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองมีความแตกต่างกับการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากข้อมูลการทดสอบ FWD และไม่สามารถใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวสำหรับโครงสร้างทางรูปแบบนี้ได้ แสดงแผนภาพการกระจายตัวของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวที่มาจากแบบจำลองและผลการทดสอบ FWD ดังรูปที่ 72 และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 31



รูปที่ 72 แผนภาพการกระจายตัวของการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

ตารางที่ 31 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว (วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	4.479	1	4.479	.052	.824 ^b
	Residual	860.012	10	86.001		
	Total	864.491	11			

a. Dependent Variable: DeltaD0_FWD3

b. Predictors: (Constant), DeltaD0_BISAR3

4.5. การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number ระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD

การเปลี่ยนแปลงค่า SN สามารถเปรียบเทียบระหว่างค่า SN ช่วงต้นและช่วงสุดท้าย ตัวอย่างเช่น กำหนดช่วงต้นเป็นเดือนที่ 1 และกำหนดช่วงสุดท้ายเป็นเดือนที่ 11 จะเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าการ SN เป็นระยะเวลา 10 เดือน โดยการเปลี่ยนแปลงค่า SN สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (63)

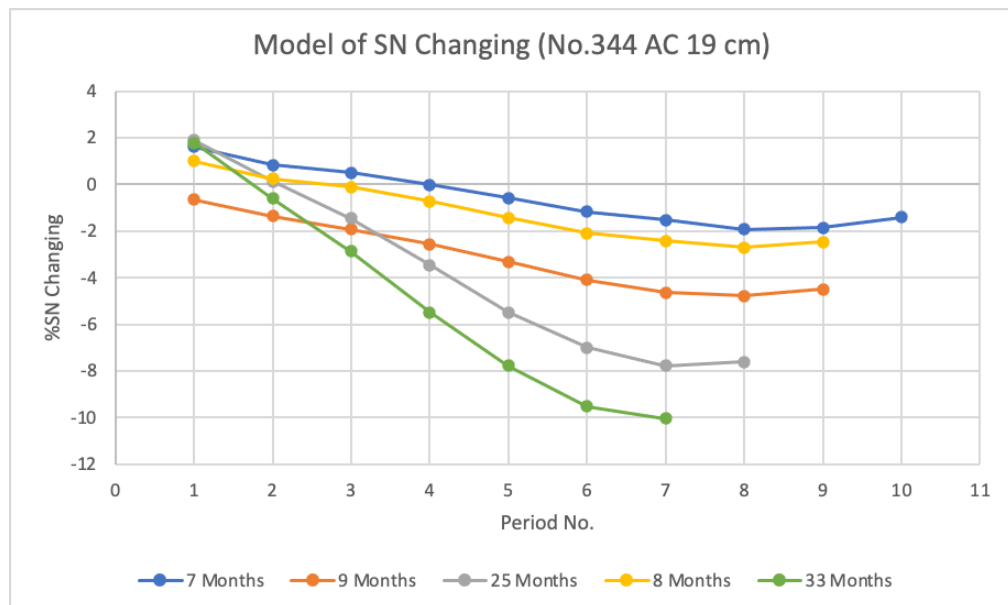
$$\Delta SN_{ot} = \frac{SN_L - SN_F}{SN_F} \times 100 \quad (63)$$

โดยที่ ΔSN_{ot} คือร้อยละของการเปลี่ยนแปลงค่า SN ระยะเวลา t เดือน

SN_L คือ SN ของช่วงสุดท้ายที่กำหนด

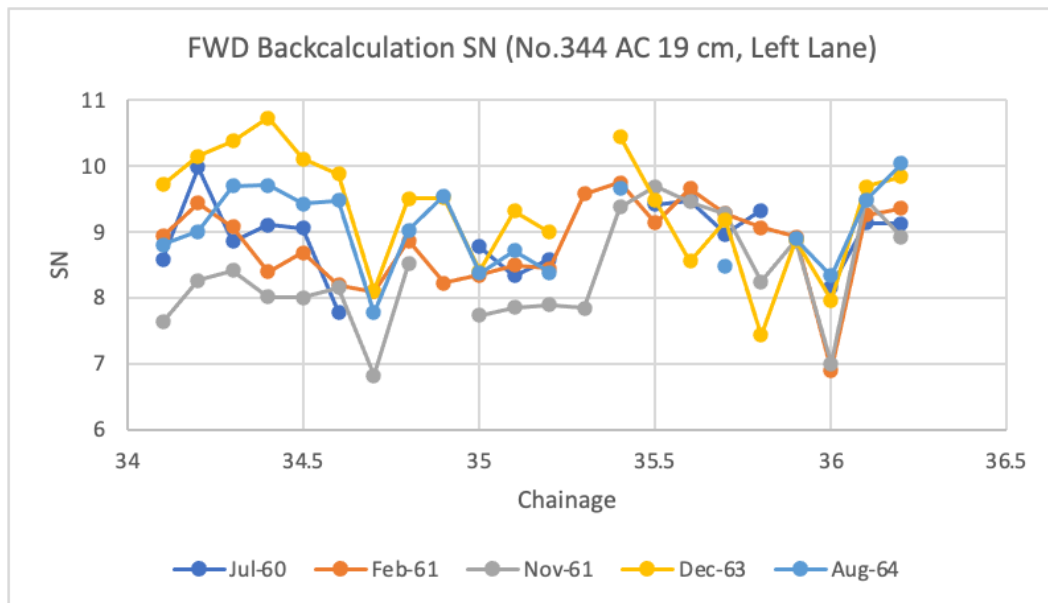
SN_F คือ SN ของช่วงต้นที่กำหนด

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า SN จะใช้ข้อมูลการทดสอบ FWD ในการเปรียบเทียบ ซึ่งจะใช้เวลาของข้อมูลการทดสอบ FWD ที่ได้กำหนดในตารางที่ 23 ซึ่งค่า SN จากข้อมูล FWD จะได้จากการคำนวณย้อนกลับในสมการที่ (10), สมการที่ (13) และสมการที่ (14) แล้วคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่า SN จากสมการที่ (63) โดยใช้ช่วงเวลาของข้อมูล FWD จากตารางที่ 23 สำหรับข้อมูลการคำนวณย้อนกลับของผลการทดสอบ FWD สาย 344 จะมีความหนาแอสฟัลต์คอนกรีตต่างกันในแต่ละจุดการทดสอบ ซึ่งได้กำหนดช่วงตามความหนาแอสฟัลต์คอนกรีตในตารางที่ 19 และมีการเปลี่ยนแปลงค่า SN โครงสร้างทางของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 73

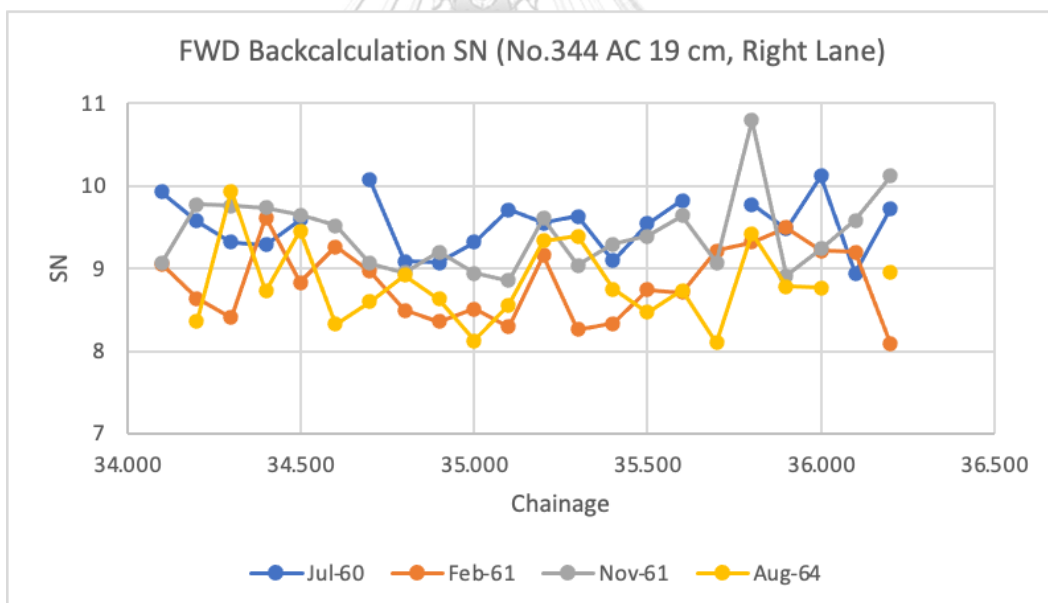


รูปที่ 73 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์
คอนกรีต 19 ซม.

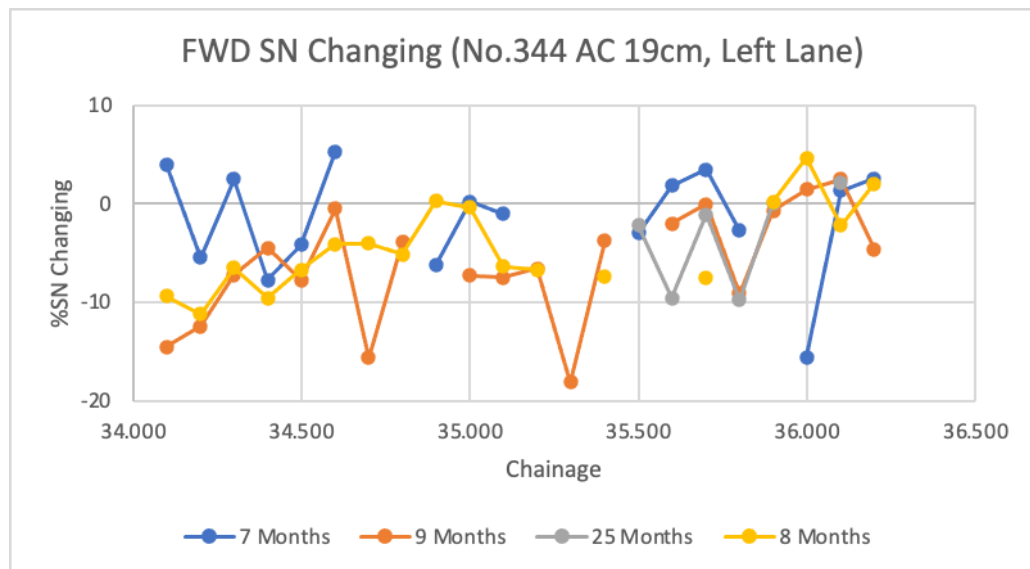
สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า SN ของผลการทดสอบ FWD มีจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ
การเปลี่ยนแปลงค่า SN แสดงในตารางที่ 24 มีตัวอย่างผลการคำนวณย้อนกลับค่า SN จากข้อมูล
FWD แสดงดังรูปที่ 74 และรูปที่ 75 และการเปลี่ยนแปลงค่า SN ของข้อมูลการทดสอบ FWD แสดง
ดังรูปที่ 76 และรูปที่ 77



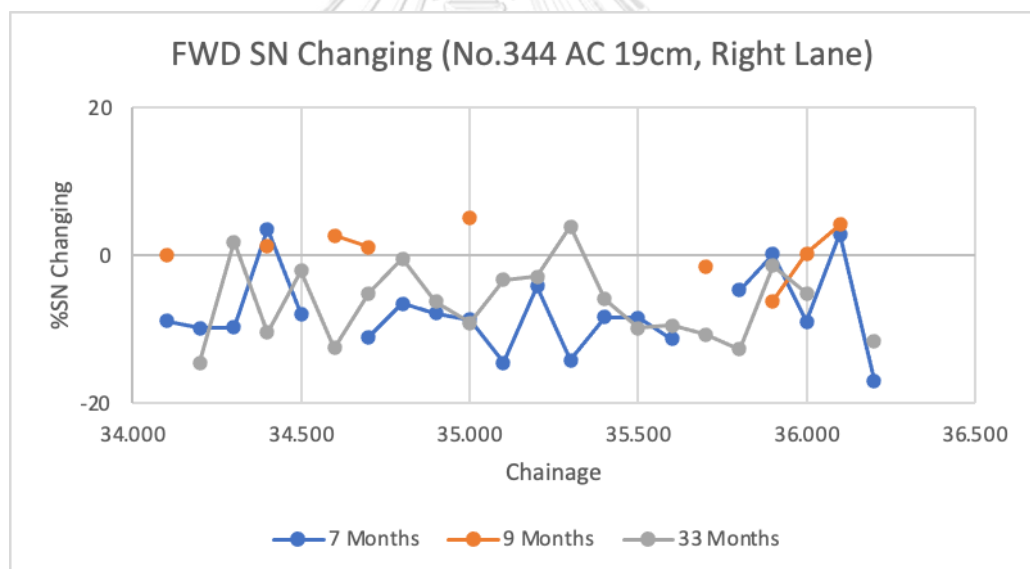
รูปที่ 74 ผลการคำนวณค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนซ้าย)



รูปที่ 75 ผลการคำนวณค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม. (เลนขวา)

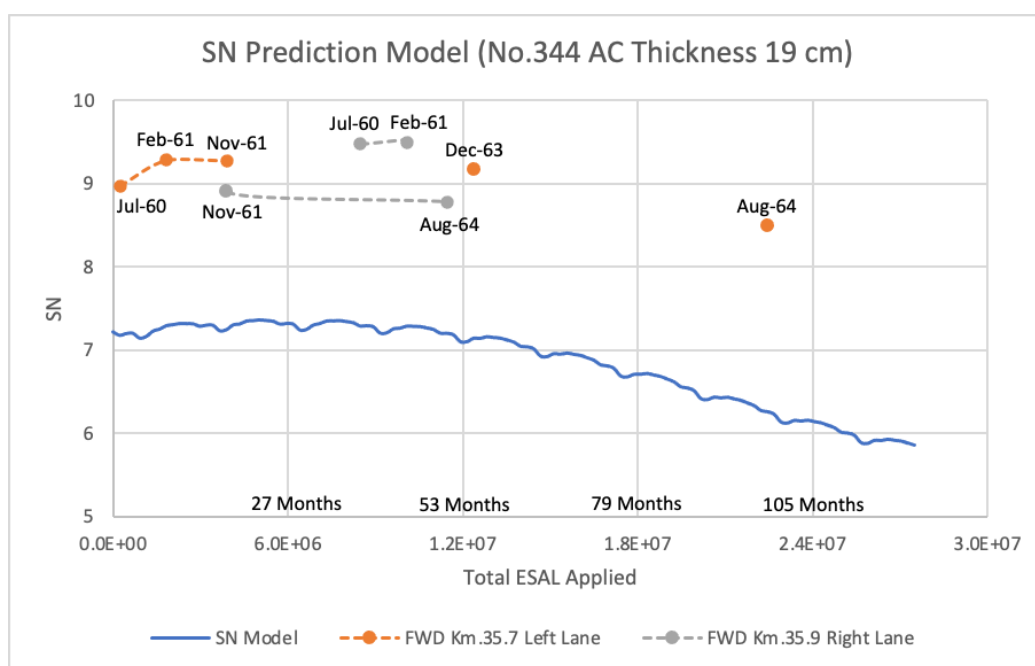


รูปที่ 76 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์
คอนกรีต 19 ซม. (เลนซ้าย)



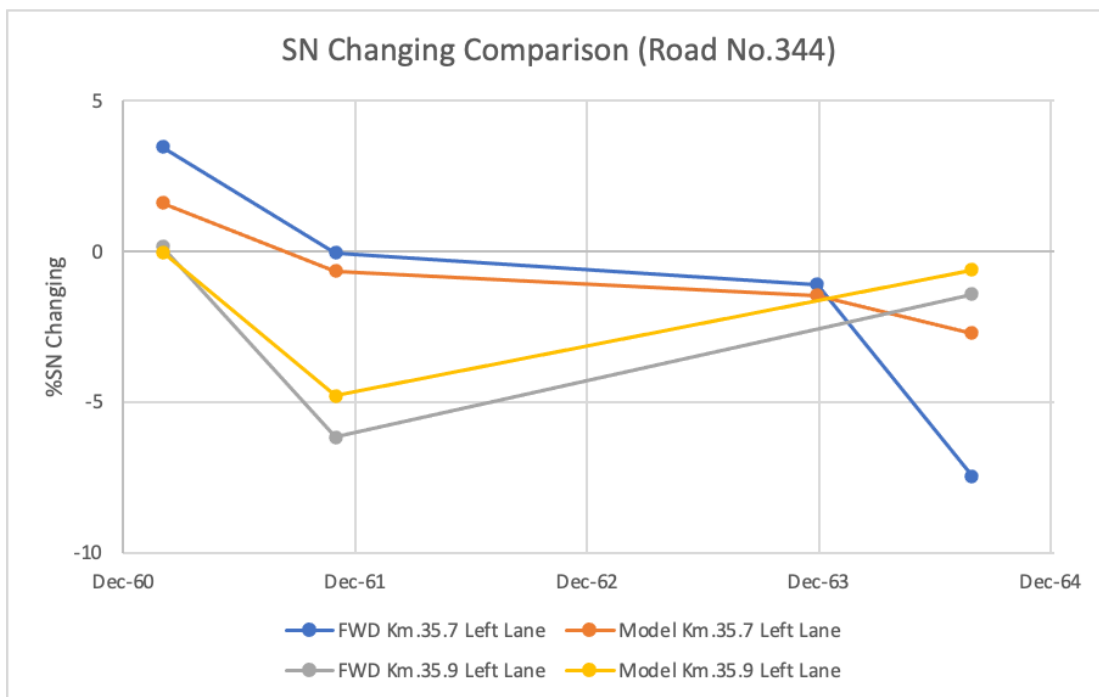
รูปที่ 77 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์
คอนกรีต 19 ซม. (เลนขวา)

เมื่อเปรียบเทียบค่า SN ระหว่างผลการคาดการณ์ค่า SN ของโครงสร้างทางและการคำนวณย้อนกลับจากข้อมูลการทดสอบ FWD พบว่าค่าผลการคาดการณ์ SN ของโครงสร้างทางมีค่ามากกว่าค่า SN ของข้อมูลการทดสอบ FWD ประมาณ 1.5 – 2.5 ซึ่งมีความแตกต่างมาก จึงใช้การเปลี่ยนแปลงค่า SN แทนค่า SN ในแต่ละช่วงเวลา ผลการเปรียบเทียบค่า SN ระหว่างผลการคาดการณ์ค่า SN ของโครงสร้างทางและการคำนวณย้อนกลับจาก ข้อมูลการทดสอบ FWD แสดงดังรูปที่ 78



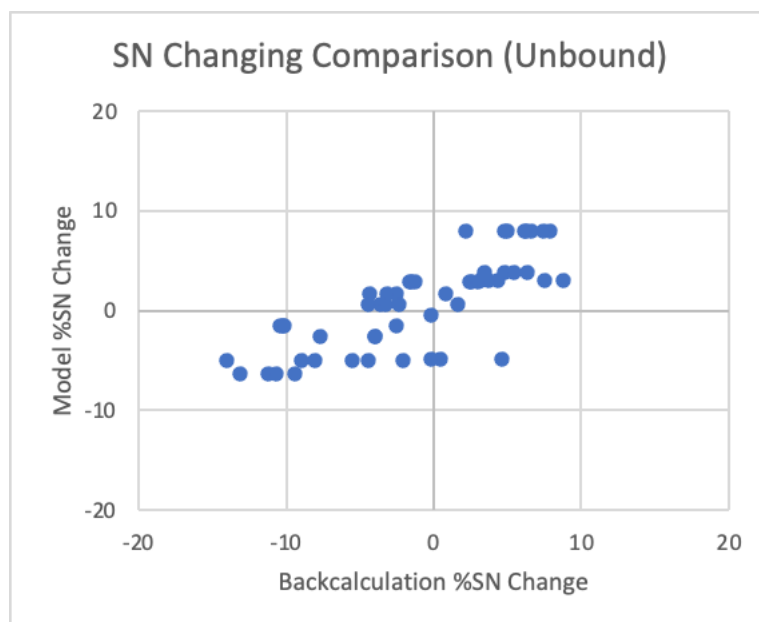
รูปที่ 78 ผลการเปรียบเทียบค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.

การเปลี่ยนแปลงค่า SN จากการคำนวณย้อนกลับของข้อมูลการทดสอบ FWD ไม่ได้บอกอายุทางเริ่มต้นของสายทางจริงในข้อมูล FWD ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าการเปลี่ยนแปลง SN อยู่ในช่วงเวลาใดในแต่ละจุดของการทดสอบ จึงเลือกการเปลี่ยนแปลงค่า SN ของการทดสอบ FWD ที่มีค่าใกล้เคียงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสำหรับค่า SN ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า SN ระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD ที่ขึ้นอยู่กัช่วงเวลาแสดงดังรูปที่ 79



รูปที่ 79 ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number ของถนนสาย 344 ความหนาแอสฟัลต์คอนกรีต 19 ซม.

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า SN สำหรับวัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว โดยใช้ข้อมูลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า SN ระหว่างข้อมูลจากแบบจำลองจากการจำลองโครงสร้างทางด้วยการใช้โปรแกรม BISAR และข้อมูลการทดสอบ FWD ในช่วงร้อยละ -20 ถึง 10 แล้วทำการพัฒนาการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า SN ระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD เป็นสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง มีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นปรับแก้ที่ร้อยละ 59.4 และแบบจำลองมีค่านัยสำคัญที่ร้อยละ 0 โดยกำหนดค่านัยสำคัญที่รับได้ในแบบจำลองที่ร้อยละ 5 จึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า SN จากแบบจำลองไม่มีความแตกต่างกับการเปลี่ยนแปลงค่า SN จากข้อมูลการทดสอบ FWD และสามารถ ใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่า SN สำหรับโครงสร้างทางสำหรับรูปแบบนี้ได้ การเปลี่ยนแปลงค่า SN มีค่าเป็น 1.055 เท่าของการเปลี่ยนแปลงค่า SN จากการทดสอบ FWD เพราะว่าสภาพแวดล้อมส่งผลต่อค่า SN ในแต่ละช่วงเวลา เช่น ความชื้น และอุณหภูมิ และปริมาณ ESAL สะสมในพื้นที่จริงมีค่าที่แตกต่างจากแบบจำลอง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า SN แสดงแผนภาพการกระจายตัวของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวที่มาจากแบบจำลองและผลการทดสอบ FWD ดังรูปที่ 80 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นแสดงดังตารางที่ 32 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 33 และผลการวิเคราะห์การถดถอยแสดงดังตารางที่ 34



รูปที่ 80 แผนภาพการกระจายตัวของการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number จากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

ตารางที่ 32 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.776 ^a	.602	.594	3.91085

a. Predictors: (Constant), DeltaSN_Model1

ตารางที่ 33 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1178.904	1	1178.904	77.079	.000 ^b
	Residual	780.033	51	15.295		
	Total	1958.937	52			

a. Dependent Variable: DeltaSN_FWD1

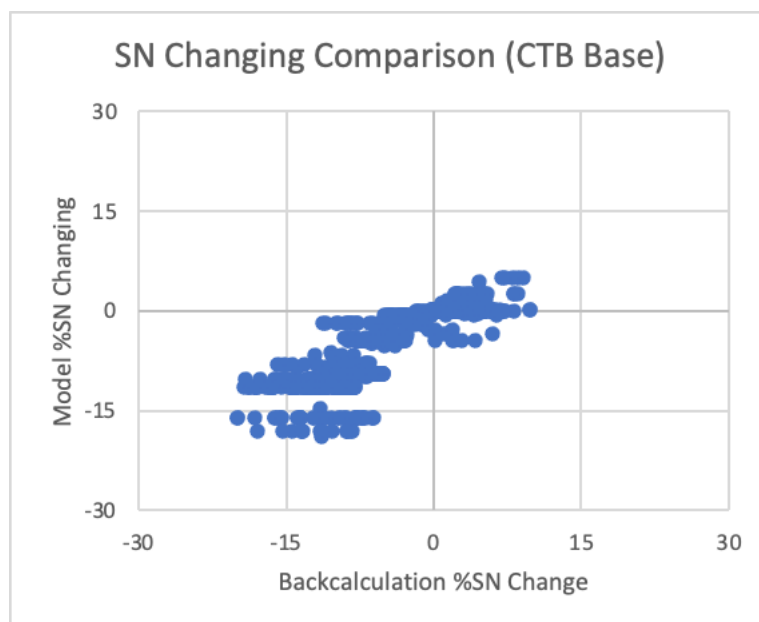
b. Predictors: (Constant), DeltaSN_Model1

ตารางที่ 34 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว)

Coefficients ^a					
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1					
(Constant)	-1.793	.544		-3.297	.002
DeltaSN_Model1	1.055	.120	.776	8.779	.000

a. Dependent Variable: DeltaSN_FWD1

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า SN สำหรับวัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง มีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นปรับแก้ที่ร้อยละ 56.6 และแบบจำลองมีค่านัยสำคัญที่ร้อยละ 0 โดยกำหนดค่านัยสำคัญที่รับได้ในแบบจำลองที่ร้อยละ 5 จึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า SN จากแบบจำลองไม่มีความแตกต่างกับการเปลี่ยนแปลงค่า SN จากข้อมูลการทดสอบ FWD และสามารถใช่แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่า SN สำหรับโครงสร้างทางสำหรับรูปแบบนี้ได้ การเปลี่ยนแปลงค่า SN มีค่าเป็น 0.992 เท่าของการเปลี่ยนแปลงค่า SN จากการทดสอบ FWD เพราะว่าสภาพแวดล้อมส่งผลต่อค่า SN ในแต่ละช่วงเวลา และปริมาณ ESAL สะสมในพื้นที่จริงมีค่าที่แตกต่างจากแบบจำลอง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า SN ในพื้นที่จริง และการเปลี่ยนแปลงค่า SN จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงค่า SN ในพื้นที่จริง แสดงแผนภาพการกระจายตัวของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวที่มาจากแบบจำลองและผลการทดสอบ FWD ดังรูปที่ 81 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นแสดงดังตารางที่ 35 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 36 และผลการวิเคราะห์การถดถอยแสดงดังตารางที่ 37



รูปที่ 81 แผนภาพการกระจายตัวของการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number จากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

ตารางที่ 35 สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.857 ^a	.735	.734	3.18998

a. Predictors: (Constant), DeltaSN_Model2

ตารางที่ 36 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	26509.316	1	26509.316	2605.086	.000 ^b
	Residual	9575.602	941	10.176		
	Total	36084.918	942			

a. Dependent Variable: DeltaSN_FWD2

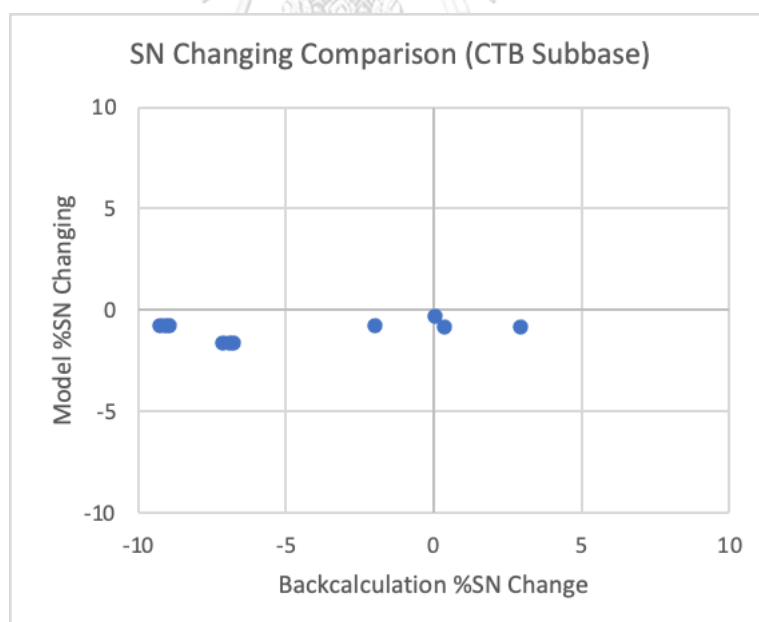
b. Predictors: (Constant), DeltaSN_Model2

ตารางที่ 37 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

Coefficients ^a					
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	Sig.
		B	Std. Error	Beta	
1	(Constant)	.531	.143		3.710
	DeltaSN_Model2	.992	.019	.857	51.040

a. Dependent Variable: DeltaSN_FWD2

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า SN สำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ พบว่าแบบจำลองมีค่าร้อยละที่ร้อยละ 27.3 โดยกำหนดค่าร้อยละที่ได้รับในแบบจำลองที่ร้อยละ 5 จึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า SN จากแบบจำลองมีความแตกต่างกับการเปลี่ยนแปลงค่า SN จากข้อมูลการทดสอบ FWD และไม่สามารถใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่า SN สำหรับโครงสร้างทางสำหรับรูปแบบนี้ได้ แสดงแผนภาพการกระจายตัวของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวที่มาจากแบบจำลองและผลการทดสอบ FWD ดังรูปที่ 82 และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 38



รูปที่ 82 แผนภาพการกระจายตัวของการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number จากแบบจำลองและข้อมูลการทดสอบ FWD (วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

ตารางที่ 38 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Structural Number (วัสดุชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์)

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	27.608	1	27.608	1.384	.273 ^b
	Residual	159.547	8	19.943		
	Total	187.155	9			

a. Dependent Variable: DeltaSN_FWD3

b. Predictors: (Constant), DeltaSN_Model3



บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1. สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการที่นำมาใช้คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทาง และได้นำผลการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบ FWD ที่ทดสอบบนทางหลวงสายเดิม ณ เวลาต่างๆ ในช่วงปี พ.ศ. 2560-2564 โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทาง มีปัจจัยมาจากชนิดโครงสร้างทาง คุณสมบัติวัสดุ ความหนาวัสดุ ปริมาณ ESAL ที่สะสม ในงานวิจัยนี้ได้จำลองโครงสร้างทาง 3 ประเภท ตามชนิดวัสดุทาง ได้แก่ โครงสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว โครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และได้ผลสรุปดังนี้

- 1) พารามิเตอร์ที่ได้นำมาใช้แสดงความแข็งแรงของโครงสร้างทางคือ ค่าการแอ่นตัว (deflection) ที่ศูนย์กลางน้ำหนักทดสอบ และค่า Structural Number (SN)
- 2) การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวโครงสร้างทางสำหรับวัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัวมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งเริ่มจากค่าการแอ่นตัวลดลงเล็กน้อยหลังการก่อสร้าง แล้วมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในภายหลัง ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของชั้นผิวทางในแต่ละช่วงเวลา
- 3) การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวโครงสร้างทางสำหรับชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อยช่วงหลังการก่อสร้าง แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก หลังจากนั้นค่าการแอ่นตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- 4) การเปลี่ยนแปลงค่า SN ของโครงสร้างทางสำหรับวัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัวมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งเริ่มจากค่า SN เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังการก่อสร้าง แล้วมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลดลงเล็กน้อยในภายหลัง
- 5) การเปลี่ยนแปลงค่า SN ของโครงสร้างทางสำหรับชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยช่วงหลังการก่อสร้าง แล้วมีค่าลดลงอย่างมาก หลังจากนั้นค่า SN จะมีค่าลดลงเล็กน้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง

- 6) การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวและการเปลี่ยนแปลงค่า SN โครงสร้างทางสำหรับชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวสำหรับวัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดเป็นวัสดุไม่เกาะตัว
- 7) การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบ FWD ของในแต่ละสายที่ขึ้นอยู่กับการประเภทโครงสร้างทาง ความหนาโครงสร้างทาง และปริมาณ ESAL และเปรียบเทียบโดยใช้การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวในช่วงร้อยละ -30 ถึง 60 พบว่าแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวโครงสร้างทางสามารถใช้แบบจำลองได้สำหรับชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว
- 8) การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า SN เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบ FWD ของในแต่ละสายที่ขึ้นอยู่กับการประเภทโครงสร้างทางและความหนาโครงสร้างทาง การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบ FWD ของในแต่ละสายที่ขึ้นอยู่กับการประเภทโครงสร้างทาง ความหนาโครงสร้างทาง และปริมาณ ESAL และเปรียบเทียบโดยใช้การเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัวในช่วงร้อยละ -20 ถึง 10 พบว่าแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่า SN ของโครงสร้างทางสามารถใช้แบบจำลองได้สำหรับชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว และชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์และชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว

5.2. ข้อจำกัดของการวิจัย

การนำแบบจำลองที่ประยุกต์นำไปใช้งานจริง มีข้อควรระวังคือแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุในงานวิจัยกำหนดเวลาการจำลองเป็นเวลา 10 ปี แต่แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุสามารถจำลองทางเป็นเวลามากกว่า 10 ปีได้ และแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุจะจำลองเป็นถนนที่สร้างเสร็จใหม่ รวมถึงไม่มีการซ่อมบำรุงทางในการจำลอง

การคาดการณ์ค่าโมดูลัสสำหรับชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสในแต่ละช่วงเวลาของการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ รวมถึงอุณหภูมิของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างทาง ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการแอ่นตัว และการเปลี่ยนแปลงค่า SN ดังนั้นต้องกำหนดอุณหภูมิให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่จำลอง และชั้นวัสดุไม่เกาะตัวมีการเปลี่ยนแปลงมาจากความชื้น การกำหนดความชื้นในแต่ละช่วงเวลาต้องมีความเหมาะสมกับฤดูกาลของประเทศไทยในแต่ละพื้นที่

ข้อมูลการทดสอบ FWD ที่ใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองในบางสายทาง ไม่มีค่าการแอ่นตัวที่ระยะห่าง 1200 มม. ซึ่งเป็นค่าการแอ่นตัวที่ใช้ในการหาโมดูลัสชั้นดินเดิม ส่งผลกับการจำลองทางชั้นดินเดิมและค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแบบจำลองในแต่ละช่วงเวลา และข้อมูลบางตำแหน่งหรือสถานที่ที่มีการทดสอบค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลาน้อย เช่นการทดสอบ FWD ทดสอบในเดือนกันยายน และเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งมีช่วงการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทาง 1 ช่วง ทำให้การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโครงสร้างทางไม่มีความหลากหลายในการเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลอง

5.3. ข้อเสนอแนะ

กรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทสามารถนำแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุไปทำนายความแข็งแรงโครงสร้างทางได้ ซึ่งความแข็งแรงของโครงสร้างทางจากการคาดการณ์มีที่มาจากทฤษฎีพฤติกรรมของวัสดุภายใต้การใช้งานที่คาดการณ์ไว้ ในการนำการคาดการณ์ดังกล่าวไปใช้ประโยชน์สามารถนำไปใช้ได้ 2 แนวทางคือ

- 1) เมื่อมีการทดสอบความแข็งแรงโครงสร้างทางในภาคสนาม หน่วยงานสามารถนำค่าการแอ่นตัวหรือค่า SN ที่คำนวณได้จากผลการทดสอบ FWD มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคาดการณ์ หากผลมีความแตกต่างกันมากอาจแปลความหมายได้ว่าโครงสร้างทางดังกล่าวอยู่ในสภาพที่แปลกไปจากสภาวะการใช้งานปกติ
- 2) ผลการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทาง สามารถนำไปใช้ในการวางแผนการซ่อมบำรุงทางเพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างทางในอนาคตได้

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กรมอุตุนิยมวิทยา. (2565). *ลักษณะอากาศรายปี พ.ศ. 2564*. สืบค้นเมื่อ 23 มกราคม จาก

<http://climate.tmd.go.th/content/file/2355>

คณะวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2550). *Specific gravity of soil*. ศูนย์วิจัยและ

พัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก. สืบค้นเมื่อ 7 พฤศจิกายน จาก

https://www.gerd.eng.ku.ac.th/Cai/Ch05/ch053_theory.htm

ฉันทิน สวัสดิ์สานต์, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, นวพล พรหมจารี และจตุพร ทิพย์ทอง. (2551). *การ*

สำรวจสภาพความเสียหายและหาสาเหตุของความเสียหายหลักของถนนลาดยางในประเทศไทย

(รายงานฉบับที่ วพ.261). สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม.

ฉันทิน สวัสดิ์สานต์, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ และอภิสิทธิ์ กล้าเหม็ง. (2551). *การทดสอบหาค่าโมดูลัส*

คืนตัวของวัสดุโครงสร้างทางชนิดวัสดุผสมรวมที่ไม่เกาะตัว (รายงานฉบับที่ วพ.260). สำนักวิจัย

และพัฒนาทาง, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม.

นวพล พรหมจารี, อภิชัย อิสริยานุกุล และสาธิต อินนามเพ็ง. (2557). *การปรับแก้ผลกระทบของ*

อุณหภูมิผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีต่อการประเมินความแข็งแรงของถนนลาดยาง (รายงาน

ฉบับที่ วพ.306). สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม.

ภัทรพล สีดอกบวบ, อัศพนันท์ สว่างสุริย์, ธนกฤต เพือกทอง และสาคร ชูแก้ว. (2557). *การศึกษา*

ประเมินรูปแบบโครงสร้างถนนลาดยางสำหรับรถบรรทุกหนักและปริมาณการจราจรสูง

(รายงานฉบับที่ วพ.307). สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม.

วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน. (2556). *โครงการศึกษาพิกัดน้ำหนักรถบรรทุก*. มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศการขนส่งและจราจร. (2562). *รายงานโครงสร้างพื้นฐานคมนาคม พ.ศ.*

2561. สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, กระทรวงคมนาคม.

สมศักดิ์ ธรรมจารุศิริ, ชูชัย พันธ์อัมพร, ลาวัลย์ ขวาลาทิพย์, คุณมาศ พันธุ์เดชะ, กิตติ มโนคั่น, จอม

ติระวณิชย์, ธนิต วิทย์เมธ, ครรชิต อิมสมบัติ, ธงชัย วรวิทย์ธาดา, โกศล จันมนหา, เรวัตน์ สุข

ข้า, ปฎิมาพร ธนินชินเกษม และจิรายุ เชื้อสุข. (2561). *รายงานประจำปี 2561 ของสำนักบำรุง*

ทาง. สำนักบำรุงทาง, กรมทางหลวงชนบท, กระทรวงคมนาคม.

สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท. (2561, 8 มีนาคม). *การประเมินความแข็งแรงโครงสร้างทางด้วย
ดัมพ์น้ำหนักกระแทก (FWD) สำหรับงานออกแบบซ่อมบำรุงถนนด้วยวิธีเชิงกล*. กรมทางหลวง
ชนบท. สืบค้นเมื่อ 16 กันยายน จาก [https://maintenance.drr.go.th/wp-
content/uploads/2019/12/drr-2019-12-26_08-40-07_299845.pdf](https://maintenance.drr.go.th/wp-content/uploads/2019/12/drr-2019-12-26_08-40-07_299845.pdf)

สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท. (2563, 9 มกราคม). *การสำรวจค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ
FWD*. กลุ่มพัฒนาระบบบริหารงานบำรุง. สืบค้นเมื่อ 6 กรกฎาคม จาก
[https://maintenance.drr.go.th/wp-content/uploads/2020/01/drr-2020-01-09_04-
12-31_184743.pdf](https://maintenance.drr.go.th/wp-content/uploads/2020/01/drr-2020-01-09_04-12-31_184743.pdf)

สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวงชนบท. (2561). *แบบมาตรฐานงานทาง*.

<https://drive.google.com/file/d/1TWHoZnje29hiUMKyLLu4H01dH21wHjtr/view>

สุกิจ นามพิชญ์, ชุศักดิ์ ศิริรัตน์, เอกรัตน์ รวยรวย, ศุภสิทธิ พงศ์วิเศษสถิตย์, สุธิ ปิยะพิพัฒน์, วิชา สุธาสิส
และสมศักดิ์ คำปลิว. (2549). *คู่มือการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์*. สำนักงานกองทุนการวิจัย
แห่งชาติ (สกว.).

อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์, อธิภัทร์ ศิริรัตนฉัตร, ดนัยณัฐ ถาวร, สุรนนท์ เยื้องยงค์ และอรรถพล หายทุกข์.
(2565). *การวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง*.
สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม.

ภาษาอังกฤษ

911 Metallurgist. (2013, 19 June). *List Table of Specific Gravity of Minerals*. Retrieved 7
November from [https://www.911metallurgist.com/blog/list-table-of-specific-
gravity-of-minerals](https://www.911metallurgist.com/blog/list-table-of-specific-gravity-of-minerals)

AASHTO. (1993). *AASHTO guide for design of pavement structures, 1993* (Vol. 1). The
Association.

AASHTO. (2011). *Mechanistic-empirical pavement design guide : a manual of practice*.
American Association of State Highway and Transportation Officials.

Arnold, G., Salt, G., Steven, D., Werkmeister, S., Alabaster, D., & Vanblerk, G. (2009).
*Compliance testing using the Falling Weight Deflectometer for pavement
construction, rehabilitation and area-wide treatments* (NZ Transport Agency
research report 381). New Zealand Transport Agency.

Asphalt Institute. (1982). *Research and development of the Asphalt Institute's thickness
design manual (MS-1) ninth edition*. Asphalt Institute.

- ASTM International. (2020). *ASTM D5858-96 Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory*. West Conshohocken, PA.
- Bitumen Business Group. (1998). *BISAR 3.0 User Manual*.
- Christopher, B. R., Schwartz, C., Boudreau, R., Ryan R. Berg & Associates, & National Highway Institute (U.S.). (2006). *Geotechnical aspects of pavements - reference manual / participant workbook* (NHI-05-037). W. Federal Highway Administration, DC. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/05037/>
- Darter, M. I., Becker, J. M., Snyder, M. B., & Smith, R. E. (1985). *PORTLAND CEMENT CONCRETE PAVEMENT EVALUATION SYSTEM (COPEs)* (NCHRP Report 277).
- Fabricio, L. V., Adriana, V. N., & José, P. A. (2017). Permanent deformation and deflection relationship from pavement condition assessment. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(4), 352-359.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.005>
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design*. Pearson Education.
- Lytton, R. L., Moore, W. M., & Mahoney, J. P. (1975). *PAVEMENT EVALUATION: PHASE I PAVEMENT EVALUATION EQUIPMENT* (FHWA-RD-75-78). W. Federal Highway Administration, DC.
- Naji, K. (2018). Resilient modulus–moisture content relationships for pavement engineering applications. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(7), 651-660.
- NCHRP 1-37A. (2004). *Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Transportation Research Board, National Research Council.
- Pavement Interactive. (2010). *Deflection*. Retrieved 24 December from <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-evaluation/deflection/>
- Phommavone, C., & Sangpetngam, B. (2018). Influences of Moisture Content on Resilient Modulus of Unbound Crushed Limestone. *Engineering Journal*, 22, 39-49.

- Pierce, L. M., Bruinsma, J. E., Smith, K. D., Wade, M. J., Chatti, K., & Vandenbossche, J. M. (2017). *Using Falling Weight Deflectometer Data With Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and Interpretation* (FHWA-HRT-16-011). Federal Highway Administration.
- Rahman, M. S., & Erlingsson, S. (2016). Influence of Post Compaction on the Moisture Sensitive Resilient Modulus of Unbound Granular Materials. *Procedia Engineering*, 143, 929-936.
- Rohde, G. T., & Hartman, A. (1996). COMPARISON OF PROCEDURES TO DETERMINE STRUCTURAL NUMBER FROM FWD DEFLECTIONS. COMBINED 18TH ARRB TRANSPORT RESEARCH CONFERENCE AND TRANSIT NEW ZEALAND LAND TRANSPORT SYMPOSIUM, 2-6 SEPTEMBER 1996, CHRISTCHURCH, NEW ZEALAND PART 4.,
- Silimanotham, H., & Sangpetngam, B. (2020). Effects of crumbed para rubber on permanent deformation resistance of hot mix asphalt. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 849, 012060.
- Smith, K. D., Bruinsma, J. E., Wade, M. J., Chatti, K., Vandenbossche, J. M., & Yu, H. T. (2017). *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume I: Final Report* (FHWA-HRT-16-009). Federal Highway Administration.
- Von Quintus, H. L., & Simpson, A. L. (2002). *Back-Calculation of Layer Parameters For LTPP Test Sections, Volume II: Layered Elastic Analysis for Flexible and Rigid Pavements* (FHWA-RD-01-113). W. Federal Highway Administration, DC.
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpp/reports/011113/011113a.cfm>
- Werkmeister, S., & Alabaster, D. (2007). Estimation of Remaining Pavement Life of Low-Volume Roads with Falling Weight Deflectometer Results: A Practical Method. *Transportation Research Record*, 1989-2(1), 261-269.
- Werkmeister, S., Dawson, A. R., & Wellner, F. (2001). Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and the Shakedown Concept. *Transportation Research Record*, 1757(1), 75-81.

Wu, Z., & Gaspard, K. (2009). *Mechanistic flexible pavement overlay design program* (FHWA/LA.08/454). Louisiana Transportation Research Center.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



การทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางของวัสดุจะใช้โปรแกรม BISAR ในการทดสอบ ค่าโมดูลัสชั้นทางเริ่มต้นจะใช้ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการคาดการณ์ในหัวข้อที่ 3.1 และความหนาชั้นทาง แล้วนำไปใช้ในการทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางของวัสดุเพื่อได้ค่าความเค้นและความเครียดในแต่ละชั้นทางด้วยโปรแกรม BISAR ชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเลือกที่ตำแหน่งผิวทางและด้านล่างสุดของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต วัสดุไม่เกาะตัวที่ไม่ใช่ชั้นดินเดิมเลือกที่ตำแหน่งชั้นกึ่งกลางของชั้นทาง วัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะเลือกตำแหน่งที่ด้านล่างสุดของชั้นทาง และชั้นดินเดิมจะเลือกที่ตำแหน่งด้านบนสุดของชั้นทาง โปรแกรม BISAR ที่ใช้จะเป็น BISAR 2.0 มีรายละเอียดการทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางดังนี้

- 1) ไฟล์ที่จะใช้จะมีทั้งหมด 3 ไฟล์ ได้แก่ ไฟล์ BIS.dat ไฟล์ BIS.out และ Bisar.exe โดยการรันโปรแกรมจะใช้ Bisar.exe ในการทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางด้วยการใช้ไฟล์ BIS.dat ซึ่งเมื่อจำลองแล้วจะได้ไฟล์ BIS.OUT มา โดย Bisar.exe จะใช้ข้อมูลที่มีไฟล์ชื่อ BIS.dat เท่านั้น
- 2) ไฟล์ BIS.dat ในโปรแกรมจะมีการใส่ข้อมูลตามลำดับดังนี้ แถวที่ 1 ชื่อไฟล์ แถวที่ 2 ให้เป็น 1 แถวที่ 3 เลข 4 คือจำนวนชั้นทาง และเลข 1 คือการคำนวณแบบ Smooth แถวที่ 4 – 7 ลำดับจากซ้ายไปขวาจะเป็นค่าโมดูลัส (P_a) อัตราส่วนปัวซอง และความหนาชั้นทาง (m) แถวที่ 8 จำนวนแรงที่กระทำ ซึ่งกำหนดเป็น 1 ในการจำลองทาง แถวที่ 9 คือหน่วยแรงที่กระทำ (P_a) และรัศมีของหน่วยแรงที่กระทำ (m) แถวที่ 10 คือต้องการค่าอะไรในการทดสอบ ซึ่งการกำหนด UR UT UZ SRR จะได้ค่าการแอ่นตัว ความเค้นและความเครียดทั้งหมด 3 แกน แถวที่ 11 คือจำนวนชั้นทางที่ทดสอบ และแถวที่ 12 –16 ลำดับจากซ้ายไปขวาคือ ชั้นทางที่ ระยะแกน x ระยะแกน y และระยะแกน z มีหน่วยเป็นเมตร (m) มีตัวอย่างการใส่ข้อมูลลงในโปรแกรม BISAR แสดงดังรูปที่ ก-1

แถว (ไม่ต้องใส่ในการรันโปรแกรม)				
1				1
1				2
4	1			3
2.500E+09	0.35	0.19		4
6.895E+09	0.2	0.2		5
1.500E+08	0.35	0.3		6
1.000E+08	0.35			7
1				8
STRS	7.07E+05	0.15		9
UR	UT	UZ	SRR	10
5				11
1	0	0	0	12
1	0	0	0.19	13
2	0	0	0.39	14
3	0	0	0.54	15
4	0	0	0.69	16

รูปที่ ก-1 รูปแบบข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโปรแกรม BISAR

- 3) เมื่อทดสอบผลกระทบโครงสร้างแล้วจะได้ไฟล์ BIS.OUT จะมีบอกรายละเอียดข้อมูล แสดงดังรูปที่ ก-2 และจะบอกผลทดสอบของข้อมูลจากไฟล์ BIS.dat ซึ่งความเค้นและความเครียดมีหน่วยเป็น Pa ค่าการแอ่นตัวมีหน่วยเป็น m ส่วนค่าเป็น + คือแรงดึง และ - คือแรงอัด แสดงตัวอย่างผลการทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางแสดงดังรูปที่ ก-3

LAYER NUMBER	CALCULATION METHOD	YOUNG'S MODULUS	POISSON'S RATIO	THICKNESS	INTERFACE SPRINGCOMPL
1	SMOOTH	0.2500E+10	0.3500E+00	0.1900E+00	0.0000E+00
2	SMOOTH	0.6895E+10	0.2000E+00	0.2000E+00	0.0000E+00
3	SMOOTH	0.1500E+09	0.3500E+00	0.3000E+00	0.0000E+00
4		0.1000E+09	0.3500E+00		

LOAD NUMBER	NORMAL STRESS	SHEAR STRESS	RADIUS OF LOADED AREA	LOAD - POSITION X	LOAD - POSITION Y	SHEAR DIRECTION
1	0.7070E+06	0.0000E+00	0.1500E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00▲

รูปที่ ก-2 รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโปรแกรม BISAR

```

POSITION NUMBER  1

LAYER NUMBER  1

COORDINATES
      X      Y      Z
0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00

DISTANCE TO LOAD-AXIS( 1)      THETA
0.0000E+00                      0.0000E+00

DISPLACEMENTS
RADIAL      TANGENTIAL      VERTICAL
0.0000E+00      0.0000E+00      0.2491E-03
STRESSES
RADIAL      TANGENTIAL      VERTICAL      RAD./TANG.      RAD./VERT.      TANG./VERT.
-0.6830E+06      -0.6830E+06      -0.7070E+06
STRAINS
RADIAL      TANGENTIAL      VERTICAL      RAD./TANG.      RAD./VERT.      TANG./VERT.
-0.7859E-04      -0.7860E-04      -0.9157E-04

      XX      YY      ZZ      YZ      XZ      XY      UX      UY      UZ
TOTAL STRESS  -0.683E+06  -0.683E+06  -0.707E+06
TOTAL STRAIN  -0.786E-04  -0.786E-04  -0.916E-04
TOTAL DISPLACEMENT      0.000E+00  0.000E+00  0.249E-03

```

รูปที่ ก-3 ผลการทดสอบโครงสร้างทางด้วยโปรแกรม BISAR

การกำหนดวัสดุโครงสร้างทางที่ได้จากข้อมูลโครงสร้างทางในพื้นที่จริงแสดงดังตารางที่ ก-1 และมีข้อมูลผลกระทบโครงสร้างทางโดยใช้ข้อมูลโครงสร้างทางจริงแสดงดังตารางที่ ก-2

ตารางที่ ก-1 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุโครงสร้างทางและปริมาณจราจรจากการทำนาย

ลำดับ	ถนนสาย	กิโลเมตร		วัสดุพื้นทาง/ รองพื้นทาง	Thickness (cm)					Modulus (MPa)						AC Temperature (°C)	ESAL/Year	
		เริ่มต้น	สุดท้าย		h1	h2	h3	h4	h5	E1	E2	E3	E4	E5	E6			
1	2	268.100	268.350	U/U	10	20	15	15			3500	350	150	100		60	35	2358653
2	4	170.750	171.000	U/U	10	20	25	25			2500	350	150	100		60	35	3471143
3	4	304.750	305.000	U/U	10	20	15	15			2500	350	150	100		60	35	3471143
4	4	304.750	305.000	CTB/U	15	25	15	15			2500	6895	150	100		60	35	3471143
5	24	98.750	99.000	U/U	10	20	25	20	20		2500	350	150	100	100	60	35	1320285
6	24	98.750	99.000	CTB/U	10	20	25	20	20		2500	6895	3447	100	100	60	35	1320285
7	24	98.750	99.000	CTB/CTB	10	20	25	20	20		2500	350	3447	100	100	60	35	1320285
8	117	24.750	25.000	CTB/U	10	25	30	20			2500	6895	150	100		60	35	1340314
9	323	4.900	5.150	U/U	10	30	30	30			2500	350	150	100		45	35	4292533
10	344	25.000	62.600	CTB/U	15	20	30				2500	6895	150			100	35	1736880
11	344	25.000	62.600	CTB/U	15	20	30				2500	6895	150			100	35	2751707
12	344	25.000	62.600	CTB/U	19	20	30				2500	6895	150			100	35	2751707

หมายเหตุ

U

คือพื้นทางวัสดุไม่เกาะตัวหรือ Unbound

CTB

คือพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์หรือ Cement-Treated Base

AC

คือ Asphalt Concrete

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบผลกระทบโครงสร้างทางโปรแกรม BISAR

ลำดับ	AC Strain (μStrain)	CTB Stress (kPa)	CTSB Stress (kPa)	Base Stress (kPa)			Subbase1 Stress (kPa)			Subbase2 Stress (kPa)			Subbase3 Stress (kPa)			Subgrade Stress (kPa)		
				X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-276.00			-48.30	-48.30	161.00	-3.93	-3.93	60.30	-19.00	-19.00	33.80				-2.19	-2.19	26.70
2	-296.00			-33.00	-33.00	193.00	-14.10	-14.10	56.80	-7.51	-7.51	24.00				-2.03	-2.03	17.60
3	-299.00			-39.10	-39.10	188.00	-22.80	-22.80	63.70	-12.60	-12.60	34.50				-3.30	-3.30	27.50
4	9.36	-452.00					-3.73	-3.73	14.00	-2.08	-2.08	9.95				0.19	0.19	8.81
5	-296.00			-31.00	-31.00	194.00	-11.40	-11.40	59.20	-3.37	-3.36	28.50	-2.93	-2.92	17.70	-4.28	-4.27	14.40
6	12.40	-142.00	-97.50							-0.80	-0.80	7.79	-1.29	-1.29	5.63	0.04	0.04	4.99
7	-252.00		-268.00	54.90	54.90	283.00				-0.46	-0.45	14.80	-1.98	-1.98	9.90	0.01	0.01	8.45
8	23.60	-528.00					-2.79	-2.79	15.80	-2.32	-2.32	9.45				-0.14	-0.14	8.18
9	-282.00			-20.10	-20.10	158.00	-11.20	-11.20	36.10	-7.16	-7.16	14.10				-1.35	-1.35	10.00
10/11	9.76	-534.00					-0.77	-0.77	19.20							0.49	0.49	14.30
12	31.90	-455.00					-0.73	-0.73	16.50							0.46	0.46	12.40

หมายเหตุ ลำดับจะอ้างอิงจากตารางที่ ก-1

CTSB คือ Cement Stabilized Material in Subbase

แรงหรือความเคียดเป็น - คือแรงหรือความเคียดแบบดึงที่กระทำขึ้นทาง และแรงเป็น + คือแรงหรือความเคียดแบบกดที่กระทำขึ้นทาง



ภาคผนวก ข

การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างทาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

การคาดการณ์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างทาง เป็นส่วนหนึ่งของการคาดการณ์ความแข็งแรงในแต่ละช่วงเวลา มีขั้นตอนการคาดการณ์ความแข็งแรงโครงสร้างทางแสดงในตารางที่ 13 และรูปที่ 37 และแบ่งการเปลี่ยนแปลงวัสดุทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต วัสดุไม่เกาะตัว และวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

1) วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete Material, AC Material)

วัสดุชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต จะแบ่งการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การเสื่อมอายุแอสฟัลต์ (Asphalt Aging) และความเสียหายจากปริมาณ ESAL ซึ่งการเสื่อมอายุแอสฟัลต์จะใช้สมการที่ (21) ถึงสมการที่ (39), สมการที่ (57) และสมการที่ (58) โดยใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 7, ตารางที่ 8 และตารางที่ 14 ซึ่งจะใช้อัตราส่วนผสมแบบ Medium Mix แสดงการคำนวณได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการหาค่า t_r เพื่อใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสแต่ละช่วงเวลาด้วยสมการที่ (21) และใช้พารามิเตอร์รูปแบบ Medium Mix จากตารางที่ 7

$$\log(2500 \times 145.038) = 2.8234 + \frac{3.9435}{1 + e^{-0.7920 + 0.313351 \log t_r}}$$

$$t_r = 0.8263 \text{ s}$$

ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาค่า $\log \log \eta$ โดยการใช้อุณหภูมิของแอสฟัลต์คอนกรีต หน่วยเป็น Rankine ซึ่งอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 554.67 Rankine และอุณหภูมิ 77 องศาฟาเรนไฮต์มีค่าเท่ากับ 536.67 Rankine ด้วยสมการที่ (26) ซึ่งจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบจากตารางที่ 7

$$\log \log \eta (35C) = 11.01 - 3.701 \log(554.67)$$

$$\log \log \eta (35C) = 0.8543$$

$$\log \log \eta (77F) = 11.01 - 3.701 \log(536.67)$$

$$\log \log \eta (77F) = 0.9074$$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการหาค่า $\log\log(\eta_{t=0})$ ด้วยสมการที่ (27) ถึงสมการที่ (29) โดยใช้ค่าความแข็งเป็น 0 มีค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 8

$$a_0 = 0.054405 + 0.004082 \times 0 = 0.054405$$

$$a_1 = 0.972035 + 0.010886 \times 0 = 0.972035$$

$$\log\log(\eta_{t=0}) = 0.054405 + 0.972035 \times 0.8543$$

$$\log\log(\eta_{t=0}) = 0.8848$$

ขั้นตอนที่ 4 ทำการหาค่า $\log\log(\eta_{\text{aged}})$ ในแต่ละช่วงเวลา โดยจะใช้อุณหภูมิแอสฟัลต์คอนกรีต, อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนแบบหน่วยฟาเรนไฮต์ และเวลาของการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ด้วยการใช้สมการที่ (30) ถึงสมการที่ (34) ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนในแต่ละปีใช้จากตารางที่ 14 มาคำนวณ และตัวแปร A จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน

$$C = 10^{274.4946 - 193.831 \log(554.67) + 33.9366 \log(554.67)^2}$$

$$C = 0.0141$$

$$D = -14.5521 + 10.47662 \log(554.67) - 1.88161 \log(554.67)^2$$

$$D = 0.0281$$

$$A = -0.004166 + (1.41213 \times 0.0141) + \log\left(\left(28.19 \times \frac{9}{5}\right) + 32\right) + (0.0281 \times 0.8848)$$

$$A = 0.0676$$

$$B = 0.197725 + 0.068384 \log(0.0141)$$

$$B = 0.0711$$

$$\log\log(\eta_{\text{aged-0}}) = \frac{0.8848 + 0.0676 \times 0}{1 + 0.0711 \times 0}$$

$$\log\log(\eta_{\text{aged-0}}) = 0.8848$$

$$\log\log(\eta_{\text{aged-1}}) = \frac{0.8848 + 0.0676 \times 1}{1 + 0.0711 \times 1}$$

$$\log\log(\eta_{\text{aged-1}}) = 0.8893$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการหาค่า η_{aged} ในแต่ละช่วงเวลา โดยจะใช้ช่องว่างอากาศเริ่มต้น, อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนแบบหน่วยฟาเรนไฮต์ และเวลาของการเสื่อมอายุของแอสฟัลต์ด้วยการใช้สมการที่ (35) ถึงสมการที่ (37) โดยใช้ช่องว่างอากาศจากการออกแบบในตารางที่ 7

$$VA(0) = \frac{7+0.011(0)-2}{1+4.24 \times 10^{-4}(0)\left((28.19 \times \frac{9}{5})+32\right)+1.169 \times 10^{-3}\left(\frac{0}{10^{10} 0.9074}\right)} + 2$$

$$VA(0) = 7$$

$$VA(1) = \frac{7+0.011(1)-2}{1+4.24 \times 10^{-4}(1)\left((28.19 \times \frac{9}{5})+32\right)+1.169 \times 10^{-3}\left(\frac{1}{10^{10} 0.9074}\right)} + 2$$

$$VA(1) = 6.837$$

$$F_{v-0} = \frac{1+1.0367 \times 10^{-4}(7)(0)}{1+6.1798 \times 10^{-4}(0)}$$

$$F_{v-0} = 1$$

$$F_{v-1} = \frac{1+1.0367 \times 10^{-4}(6.837)(1)}{1+6.1798 \times 10^{-4}(1)}$$

$$F_v = 1.000$$

$$\log \log(\eta_{aged-0})' = 1 \times 0.8848$$

$$\log \log(\eta_{aged-0})' = 0.8848$$

$$\log \log(\eta_{aged-1})' = 1.000 \times 0.8893$$

$$\log \log(\eta_{aged-1})' = 0.8893$$

ขั้นตอนที่ 6 ทำการหาค่า η_{tz} ในแต่ละช่วงเวลา อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนแบบหน่วยฟาเรนไฮต์ และความลึกชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยสมการที่ (38) และสมการที่ (39) ซึ่งกำหนดความลึกที่จุดกึ่งกลางของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต

$$E = 23.83e^{(-0.0308 \times (28.19 \times \frac{9}{5}) + 32)}$$

$$E = 1.8636$$

$$\eta_{0,mid} = \frac{\left(\frac{10^{10} 0.8848}{10^6} \times 0.01\right) \times (4 + 1.8636) - 1.8636 \times \left(\frac{10^{10} 0.8848}{10^6} \times 0.01\right) \left(1 - \left(4 \times \frac{10}{2 \times 2.54}\right)\right)}{4 \left(1 + \left(1.8636 \times \frac{10}{2 \times 2.54}\right)\right)}$$

$$\eta_{0,mid} = 0.4686 \text{ MP}$$

$$\eta_{1,\text{mid}} = \frac{\left(\frac{10^{10^{0.8893}} \times 0.01}{10^6}\right) \times (4 + 1.8636) - 1.8636 \times \left(\frac{10^{10^{0.8848}} \times 0.01}{10^6}\right) \left(1 - \left(4 \times \frac{10}{2 \times 2.54}\right)\right)}{4 \left(1 + \left(1.8636 \times \frac{10}{2 \times 2.54}\right)\right)}$$

$$\eta_{1,\text{mid}} = 0.4979 \text{ MP}$$

ขั้นตอนที่ 7 ทำการหาการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสจากการเสื่อมอายุ ซึ่งจะมีค่า δ และ β เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัเวลา โดยการใช้สมการที่ (21) ถึงสมการที่ (25) และสมการที่ (57) และพารามิเตอร์จากตารางที่ 7

กำหนดให้ $S_1 = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4$

$$\delta = S_1 - 0.058097V_a - 0.802208 \left[\frac{V_{\text{beff}}}{V_{\text{beff}} + V_a} \right]$$

$$2.8234 = S_1 - (0.058097 \times 7) - 0.802208 \left[\frac{11}{11 + 7} \right]$$

$$S_1 = 3.7203$$

$$\delta(t_1) = 3.7203 - (0.058097 \times 6.837) - 0.802208 \left[\frac{11}{11 + 6.837} \right]$$

$$\delta(t = 1) = 2.8284$$

$$\beta(t_1) - \beta(t_0) = -0.603313 - 0.393532 \log(\eta_{t_{1r}}) - (-0.603313 - 0.393532 \log(\eta_{t_{0r}}))$$

$$\beta(t_1) = \beta(t_0) - 0.393532 \log(\eta_{t_{1r}}) + 0.393532 \log(\eta_{t_{0r}})$$

$$\beta(t_1) = -0.7920 - 0.393532 \log(0.4979) + 0.393532 \log(0.4686)$$

$$\beta(t_1) = -0.8024$$

$$\log\left(\frac{E^*(t_0)}{145.038}\right) = 2.8234 + \frac{3.9435}{1 + e^{-0.7920 + 0.313351 \log(0.8263)}}$$

$$E^*(t_0) = 2047.455 \text{ MPa}$$

$$\log\left(\frac{E^*(t_1)}{145.038}\right) = 2.8234 + \frac{3.9435}{1 + e^{-0.7920 + 0.313351 \log(0.8263)}}$$

$$E^*(t_1) = 2111.551 \text{ MPa}$$

$$\Delta E_{AG,1} = 2111.551 - 2047.455 = 64.097 \text{ MPa}$$

การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่มาจากปริมาณ ESAL จะต้องใช้อายุโครงสร้างทางและปริมาณ ESAL ในแต่ละช่วงเวลา โดยโครงสร้างทางที่ต้องใช้ในการคำนวณอายุถนนจะนำไปใช้สำหรับโครงสร้างทางที่มีชั้นพื้นทางและรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว ความเสียหายหลักของโครงสร้างทางเป็นความเสียหายแบบล้า และค่า ESAL ในแต่ละช่วงเวลา จะใช้ค่า ESAL ต่อปีจากตารางที่ โดยเปลี่ยนหน่วยต่อปีเป็นต่อเดือน การคำนวณจะใช้สมการที่ (15) ถึงสมการที่ (18), สมการที่ (40) และสมการที่ (41) ซึ่งแสดงขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการหาค่าอายุถนนชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้สมการที่ (15) ถึงสมการที่ (18)

$$C = 10^{4.84\left(\frac{11}{7+11}-0.69\right)}$$

$$C = 0.415$$

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{\left(11.02 - \left(3.49 \times \frac{10}{2.54}\right)\right)}}$$

$$C_H = 264.731$$

$$N_{f-HMA} = (0.007566)(0.415)(264.731)(1)(-(-296 \times 10^{-6}))^{(-3.9492)(1)}(2500 \times 145.038)^{(1)(-1.281)}$$

$$N_{f-HMA} = 5,417,584 \text{ ESAL}$$

ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตจากการทำลายโดยการใช้สมการที่ (40) และสมการที่ (41)

$$D(t_1) = \frac{\left(1 \times \frac{1320285}{12}\right)}{5417584} = 0.020$$

$$\frac{E_{\text{dam},t_1}^*}{145.038} = 10^{2.8234} + \frac{(2500 \times 145.038) - 10^{2.8234}}{1 - e^{(-0.3+5 \log(0.020))}}$$

$$E_{\text{dam},t_1}^* = 2499.609 \text{ MPa}$$

เมื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสจากการเสื่อมอายุและความเสียหายที่มาจากปริมาณ ESAL แล้ว จะทำการรวมกันเพื่อได้ค่าโมดูลัสของโครงสร้างทางชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตในแต่ละช่วงเวลาด้วย**สมการที่ (58)** โดยการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของโครงสร้างทางแสดงตัวอย่างการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในแต่ละช่วงเวลาดัง**ตารางที่ ข-1**

$$E_{AC,1} = 2499.609 + 64.097 = 2563.706 \text{ MPa}$$



ตารางที่ ข-1 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

Time (Month)	Total ESAL	Damage	Damage Modulus (MPa)	Aging Modulus (MPa)	Total Modulus (MPa)
0	1	1.85E-07	2500.000		2500.000
1	110024	0.020	2499.609	64.097	2563.706
2	220048	0.041	2498.240	127.232	2625.473
3	330071	0.061	2495.760	188.947	2684.707
4	440095	0.081	2492.093	248.888	2740.981
5	550119	0.102	2487.189	306.801	2793.990
6	660143	0.122	2481.013	362.511	2843.524
7	770167	0.142	2473.545	410.699	2884.244
8	880190	0.162	2464.772	461.042	2925.814
9	990214	0.183	2454.691	509.031	2963.722
10	1100238	0.203	2443.308	554.681	2997.989
11	1210262	0.223	2430.635	598.033	3028.667
12	1320285	0.244	2416.690	639.140	3055.831
13	1430309	0.264	2401.500	678.071	3079.571
14	1540333	0.284	2385.094	714.898	3099.992
15	1650357	0.305	2367.509	749.701	3117.211
16	1760381	0.325	2348.785	782.562	3131.347
17	1870404	0.345	2328.967	813.563	3142.530
18	1980428	0.366	2308.103	842.785	3150.888
19	2090452	0.386	2286.245	835.701	3121.946
20	2200476	0.406	2263.448	860.528	3123.976
21	2310500	0.426	2239.767	883.879	3123.647
22	2420523	0.447	2215.262	905.824	3121.086
23	2530547	0.467	2189.992	926.431	3116.423
24	2640571	0.487	2164.018	945.765	3109.783

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

Time (Month)	Total ESAL	Damage	Damage Modulus (MPa)	Aging Modulus (MPa)	Total Modulus (MPa)
25	2750595	0.508	2137.400	963.889	3101.289
26	2860619	0.528	2110.201	980.861	3091.062
27	2970642	0.548	2082.480	996.739	3079.220
28	3080666	0.569	2054.299	1011.576	3065.876
29	3190690	0.589	2025.717	1025.424	3051.141
30	3300714	0.609	1996.791	1038.330	3035.121
31	3410737	0.630	1967.578	1082.536	3050.114
32	3520761	0.650	1938.134	1094.048	3032.182
33	3630785	0.670	1908.510	1104.725	3013.235
34	3740809	0.690	1878.759	1114.607	2993.366
35	3850833	0.711	1848.928	1123.733	2972.661
36	3960856	0.731	1819.064	1132.139	2951.203
37	4070880	0.751	1789.212	1139.860	2929.072
38	4180904	0.772	1759.412	1146.929	2906.341
39	4290928	0.792	1729.704	1153.378	2883.082
40	4400952	0.812	1700.124	1159.235	2859.359
41	4510975	0.833	1670.707	1164.529	2835.236
42	4620999	0.853	1641.483	1169.287	2810.771
43	4731023	0.873	1612.484	1174.629	2787.112
44	4841047	0.894	1583.735	1178.392	2762.127
45	4951071	0.914	1555.260	1181.691	2736.952
46	5061094	0.934	1527.084	1184.548	2711.632
47	5171118	0.955	1499.225	1186.982	2686.207
48	5281142	0.975	1471.701	1189.015	2660.716
49	5391166	0.995	1444.530	1190.664	2635.194

2) วัสดุไม่เกาะตัว (Unbound Material)

วัสดุไม่เกาะตัว เริ่มจากการค่าโมดูลัสที่จุดความชื้นที่เหมาะสมมากที่สุด ซึ่งจะกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสตามทฤษฎี Shakedown เป็นไม่เปลี่ยนแปลง ด้วยการใช้สมการที่ (42) ถึงสมการที่ (48) และสมการที่ (59) และพารามิเตอร์จากตารางที่ 9 และตารางที่ 12 มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการหาค่า M_{ropt} ของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งจะใช้แรงจากผลการทดสอบแบบจำลองจากตารางที่ ก-1 มาคำนวณ ด้วยการใช้สมการที่ (44), สมการที่ (45) และสมการที่ (47) สำหรับผิวละเอียด หรือสมการที่ (48) สำหรับวัสดุผิวหยาบ และค่าความชื้นของวัสดุแต่ละชนิดจากตารางที่ 12

$$\theta = -11.4 - 11.4 + 59.2 = 36.4 \text{ kPa}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(-11.4 + 11.4)^2 + (-11.4 - 59.2)^2 + (-11.4 - 59.2)^2} = 33.281 \text{ kPa}$$

$$M_{Ropt}(\text{MPa}) = 252 \left(\frac{36.4}{101.3} \right)^{0.086} \left(\frac{33.281}{101.3} + 1 \right)^{1.107} (7.30)^{-0.479} = 121.960 \text{ MPa}$$

ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาค่า S_{opt} ของวัสดุแต่ละชนิดด้วยการใช้สมการที่ (59) ซึ่งจะใช้ความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนักดิน (Unit Weight) และค่าความชื้นของวัสดุแต่ละชนิดจากตารางที่ 12

$$S_{opt} = \frac{2.85 \times 7.30}{\frac{2.85 \times 0.9982}{0.95 \times 2.084} - 1} = 47.60\%$$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการหาค่า M_r ของวัสดุแต่ละชนิดในช่วงเริ่มต้นด้วยการใช้สมการที่ (42) โดยใช้พารามิเตอร์ของ Naji (2018) ในตารางที่ 9 และสมการที่ (46) แล้วทำการหาความชื้นด้วยสมการที่ (59) ซึ่งจะใช้ความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนักดิน และค่าความชื้นของวัสดุแต่ละชนิดจากตารางที่ 12

$$\log \frac{k_m}{121.960} = a + \frac{0.4 - 0.59}{1 + e^{\left(\ln \left(-\frac{0.4}{-0.59} \right) + (5.891)(S - 47.60) \right)}}$$

$$S = 40.89\%$$

$$40.89 = \frac{2.85 \times w}{\frac{2.85 \times 0.9982}{0.95 \times 2.084} - 1}$$

$$w = 6.27\%$$

หลังจากนั้นจำลองขึ้นอยู่กับความขึ้นที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา โดยเมื่อครบรอบ 12 เดือนแล้วจะใช้ค่าความขึ้นเดือนที่เดือนที่ 0 ใหม่อีกครั้ง แสดงผลการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสที่ขึ้นอยู่กับความขึ้นแสดงดังตารางที่ ข-2



ตารางที่ ข-2 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสที่มาจากความชื้นสำหรับวัสดุไม่เกาะตัว

Time (Month)	Base			Subbase1			Subbase2			Subbase3			Subgrade		
	w (%)	S (%)	E (MPa)	w (%)	S (%)	E (MPa)	w (%)	S (%)	E (MPa)	w (%)	S (%)	E (MPa)	w (%)	S (%)	E (MPa)
0	4.60	56.34	350.00	6.27	40.89	150.00	8.67	44.01	100.00	5.34	33.67	100.00	11.32	70.09	60.00
1	5.16	63.22	309.13	7.21	47.03	124.30	8.78	44.59	98.27	5.74	36.22	92.82	11.86	73.48	47.49
2	5.58	68.31	280.43	8.32	54.25	97.87	8.94	45.39	95.90	5.88	37.11	90.45	12.48	77.27	37.05
3	5.72	70.07	270.86	8.83	57.61	87.47	9.10	46.20	93.53	6.00	37.86	88.47	13.38	82.84	27.50
4	5.96	72.99	255.64	9.31	60.71	79.01	9.83	49.92	83.09	6.59	41.55	79.39	14.12	87.42	23.16
5	6.38	78.14	230.46	10.18	66.40	66.19	10.83	54.97	70.36	7.22	45.55	70.73	14.28	88.46	22.46
6	6.22	76.15	239.92	10.06	65.63	67.73	9.63	48.89	85.90	7.17	45.25	71.35	13.43	83.16	27.12
7	5.95	72.86	256.29	9.87	64.37	70.37	9.26	47.01	91.18	6.53	41.20	80.22	12.63	78.21	35.02
8	5.76	70.47	268.77	9.19	59.94	81.01	9.23	46.85	91.64	6.51	41.08	80.50	12.13	75.11	42.55
9	5.42	66.40	290.98	8.68	56.59	90.49	8.81	44.71	97.91	6.03	38.02	88.06	12.03	74.48	44.38
10	4.89	59.91	328.53	7.49	48.87	117.07	8.57	43.52	101.48	5.55	34.98	96.25	11.86	73.47	47.51
11	4.32	52.85	371.25	6.06	39.50	156.03	8.36	42.46	104.69	5.19	32.75	102.67	11.00	68.13	68.54
12	4.60	56.34	350.00	6.27	40.89	150.00	8.67	44.01	100.00	5.34	33.67	100.00	11.32	70.09	60.00

3) วัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

วัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ มีการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสขึ้นอยู่กับปริมาณจราจรที่กระทำ โดยการเปลี่ยนแปลงจะใช้สำหรับชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทางเป็นพื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ด้วยการใช้สมการที่ (20), สมการที่ (49) และสมการที่ (50) แสดงขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการหาค่า N_{f-CTB} ของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งจะใช้แรงจากผลการทดสอบแบบจำลองจากตารางที่ ก-1 มาคำนวณ ด้วยการใช้สมการที่ (20) เมื่อมีชั้นพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2 ชั้นเช่นสาย 24 ที่มีชั้นพื้นทางและรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ จะเลือกอายุทางของชั้นทางที่มีอายุน้อยที่สุดเป็นอายุของโครงสร้างทาง

$$\log(N_{f-CTB}) = \frac{0.972(1) - \left(\frac{534}{200}\right)}{0.0825(1)}$$

$$N_{f-CTB} = 12,242,485 \text{ ESAL}$$

ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัส โดยการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของโครงสร้างทางจะขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสการออกแบบและทำลายสมบูรณ์ ของวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ปริมาณ ESAL สะสมโครงสร้างทางและอายุโครงสร้างทางในแต่ละช่วงเวลาด้วยการใช้สมการที่ (49) และสมการที่ (50) แสดงตัวอย่างการคาดการณ์ค่าโมดูลัสในแต่ละช่วงเวลาดังตารางที่ ข-3

$$D = \frac{\left(\frac{2751707}{12}\right)}{12242485} = 0.019$$

$$\frac{E_{CSM}(1)}{145.038} = 100000 + \frac{(6895 \times 145.038) - 100000}{1 - e^{(-4 + (14 \times 0.019))}}$$

$$E_{CSM}(1) = 6750.700 \text{ MPa}$$

ตารางที่ ข-3 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสสำหรับวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

Time (Month)	Total ESAL	AC			CTB	
		Modulus (MPa)	Aging Modulus (MPa)	Total Modulus (MPa)	Damage	Modulus (MPa)
0	1	2500		2500.000	0.000	6895.000
1	229309	2500	52.890	2552.890	0.019	6750.700
2	458618	2500	104.973	2604.973	0.037	6708.734
3	687927	2500	155.941	2655.941	0.056	6655.047
4	917236	2500	205.546	2705.546	0.075	6586.678
5	1146544	2500	253.600	2753.600	0.094	6500.118
6	1375853	2500	299.963	2799.963	0.112	6391.333
7	1605162	2500	340.217	2840.217	0.131	6255.874
8	1834471	2500	382.366	2882.366	0.150	6089.135
9	2063780	2500	422.668	2922.668	0.169	5886.774
10	2293089	2500	461.122	2961.122	0.187	5645.358
11	2522398	2500	497.747	2997.747	0.206	5363.174
12	2751707	2500	532.574	3032.574	0.225	5041.105
13	2981016	2500	565.646	3065.646	0.243	4683.365
14	3210325	2500	597.014	3097.014	0.262	4297.794
15	3439633	2500	626.731	3126.731	0.281	3895.486
16	3668942	2500	654.857	3154.857	0.300	3489.673
17	3898251	2500	681.452	3181.452	0.318	3094.049
18	4127560	2500	706.578	3206.578	0.337	2720.974
19	4356869	2500	700.803	3200.803	0.356	2380.038
20	4586178	2500	722.211	3222.211	0.375	2077.295

ตารางที่ ข-3 (ต่อ) ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสสำหรับวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

Time (Month)	Total ESAL	AC			CTB	
		Modulus (MPa)	Aging Modulus (MPa)	Total Modulus (MPa)	Damage	Modulus (MPa)
21	4815487	2500	742.388	3242.388	0.393	1815.249
22	5044796	2500	761.388	3261.388	0.412	1593.399
23	5274105	2500	779.268	3279.268	0.431	1409.074
24	5503414	2500	796.077	3296.077	0.450	1258.303
25	5732722	2500	811.867	3311.867	0.468	1136.548
26	5962031	2500	826.686	3326.686	0.487	1039.236
27	6191340	2500	840.579	3340.579	0.506	962.103
28	6420649	2500	853.590	3353.590	0.524	901.365
29	6649958	2500	865.762	3365.762	0.543	853.784
30	6879267	2500	877.135	3377.135	0.562	816.661
31	7108576	2500	915.431	3415.431	0.581	787.788
32	7337885	2500	925.629	3425.629	0.599	765.388
33	7567194	2500	935.113	3435.113	0.618	748.043
34	7796502	2500	943.918	3443.918	0.637	734.632
35	8025811	2500	952.076	3452.076	0.656	724.275
36	8255120	2500	959.617	3459.617	0.674	716.282
37	8484429	2500	966.571	3466.571	0.693	710.120
38	8713738	2500	972.965	3472.965	0.712	705.370
39	8943047	2500	978.827	3478.827	0.730	701.711
40	9172356	2500	984.181	3484.181	0.749	698.893

ตารางที่ ข-3 (ต่อ) ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสสำหรับวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

Time (Month)	Total ESAL	AC			CTB	
		Modulus (MPa)	Aging Modulus (MPa)	Total Modulus (MPa)	Damage	Modulus (MPa)
41	9401665	2500	989.052	3489.052	0.768	696.723
42	9630974	2500	993.462	3493.462	0.787	695.053
43	9860283	2500	998.377	3498.377	0.805	693.767
44	10089591	2500	1001.933	3501.933	0.824	692.778
45	10318900	2500	1005.089	3505.089	0.843	692.017
46	10548209	2500	1007.865	3507.865	0.862	691.431
47	10777518	2500	1010.279	3510.279	0.880	690.980
48	11006827	2500	1012.347	3512.347	0.899	690.633
49	11236136	2500	1014.085	3514.085	0.918	690.366
50	11465445	2500	1015.510	3515.510	0.937	690.161
51	11694754	2500	1016.636	3516.636	0.955	690.003
52	11924063	2500	1017.476	3517.476	0.974	689.881
53	12153372	2500	1018.044	3518.044	0.993	689.788



การคำนวณค่า Structural Number ของทางจะใช้ค่าโมดูลัสจากการคาดการณ์ค่าโมดูลัสโครงสร้างทางในแต่ละช่วงเวลาจากตารางที่ ข-1 ถึงตารางที่ ข-3 ด้วยการใช้สมการที่ (6) และสมการที่ (9) โดยใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 3 และความหนาในการออกแบบโครงสร้างทางจากตารางที่ ก-1 ในการคำนวณ แสดงขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการหาค่า a_i แต่ละชั้นทาง ซึ่งจะค่าโมดูลัสจากแบบจำลองชั้นทางจากตารางที่ ข-1 ถึงตารางที่ ข-3 มาคำนวณ ด้วยการใช้สมการที่ (9) และใช้พารามิเตอร์ตามชนิดของชั้นทางและวัสดุจากตารางที่ 3

$$a_1 = 0.44 \times \left(\frac{2500}{3100} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.295$$

$$a_2 = 0.14 \times \left(\frac{350}{207} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.167$$

$$a_3 = 0.11 \times \left(\frac{150}{104} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.124$$

$$a_4 = 0.11 \times \left(\frac{100}{104} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.109$$

ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาค่า SN ในแต่ละช่วงเวลา ด้วยการใช้สมการที่ (6) และใช้ความหนาของชั้นทางจากการออกแบบจากตารางที่ ก-1

$$SN = \left(0.295 \times \frac{10}{2.54} \right) + \left(0.167 \times \frac{20}{2.54} \right) + \left(0.124 \times \frac{25}{2.54} \right) + \left(0.109 \times \frac{20}{2.54} \right) = 5.406$$

ค่าการแอ่นตัวจะได้มาจากการจำลองด้วยโปรแกรม BISAR โดยใช้ค่าโมดูลัส อัตราส่วนปัวซอง และความหนาชั้นทาง ผลการจำลองค่า Structural Number และค่าการแอ่นตัวที่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแสดงดังตารางที่ ค-1 และตารางที่ ค-2

ตารางที่ ค-1 ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number และค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลาสำหรับชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว

Time (Month)	Modulus (MPa)						Layer Coefficient						AC Deflection (μm)
	AC	Base	Subbase1	Subbase2	Subbase3	Subgrade	a1	a2	a3	a4	a5	SN	
0	2500.000	350.000	150.000	100.000	100.000	60.000	0.295	0.167	0.124	0.109	0.109	5.406	626
1	2563.706	309.129	124.295	98.272	92.819	47.489	0.297	0.160	0.117	0.108	0.106	5.263	715
2	2625.473	280.425	97.865	95.900	90.445	37.050	0.300	0.155	0.108	0.107	0.105	5.130	822
3	2684.707	270.860	87.470	93.530	88.465	27.501	0.302	0.153	0.104	0.106	0.104	5.072	933
4	2740.981	255.635	79.006	83.092	79.386	23.159	0.304	0.150	0.100	0.102	0.101	4.962	1030
5	2793.990	230.457	66.185	70.361	70.734	22.462	0.306	0.145	0.095	0.097	0.097	4.800	1110
6	2843.524	239.915	67.734	85.901	71.346	27.119	0.308	0.147	0.095	0.103	0.097	4.884	1010
7	2884.244	256.290	70.374	91.184	80.221	35.018	0.309	0.150	0.097	0.105	0.101	4.974	897
8	2925.814	268.768	81.012	91.642	80.504	42.551	0.311	0.153	0.101	0.105	0.101	5.047	813
9	2963.722	290.979	90.485	97.909	88.063	44.379	0.312	0.157	0.105	0.108	0.104	5.165	764
10	2997.989	328.532	117.065	101.482	96.245	47.509	0.313	0.163	0.114	0.109	0.107	5.348	691
11	3028.667	371.250	156.032	104.692	102.667	68.537	0.314	0.170	0.126	0.110	0.110	5.546	569
12	3055.831	350.000	150.000	100.000	100.000	60.000	0.315	0.167	0.124	0.109	0.109	5.487	606
13	3079.571	309.129	124.295	98.272	92.819	47.489	0.316	0.160	0.117	0.108	0.106	5.336	694

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number และค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลาสำหรับชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว

Time (Month)	Modulus (MPa)						Layer Coefficient						AC Deflection (μm)
	AC	Base	Subbase1	Subbase2	Subbase3	Subgrade	a1	a2	a3	a4	a5	SN	
14	3099.992	280.425	97.865	95.900	90.445	37.050	0.317	0.155	0.108	0.107	0.105	5.197	800
15	3117.211	270.860	87.470	93.530	88.465	27.501	0.317	0.153	0.104	0.106	0.104	5.133	912
16	3131.347	255.635	79.006	83.092	79.386	23.159	0.318	0.150	0.100	0.102	0.101	5.016	1010
17	3142.530	230.457	66.185	70.361	70.734	22.462	0.318	0.145	0.095	0.097	0.097	4.848	1090
18	3150.888	239.915	67.734	85.901	71.346	27.119	0.318	0.147	0.095	0.103	0.097	4.926	994
19	3121.946	256.290	70.374	91.184	80.221	35.018	0.317	0.150	0.097	0.105	0.101	5.007	886
20	3123.976	268.768	81.012	91.642	80.504	42.551	0.317	0.153	0.101	0.105	0.101	5.074	804
21	3123.647	290.979	90.485	97.909	88.063	44.379	0.317	0.157	0.105	0.108	0.104	5.186	758
22	3121.086	328.532	117.065	101.482	96.245	47.509	0.317	0.163	0.114	0.109	0.107	5.364	686
23	3116.423	371.250	156.032	104.692	102.667	68.537	0.317	0.170	0.126	0.110	0.110	5.558	566
24	3109.783	350.000	150.000	100.000	100.000	60.000	0.317	0.167	0.124	0.109	0.109	5.494	604
25	3101.289	309.129	124.295	98.272	92.819	47.489	0.317	0.160	0.117	0.108	0.106	5.339	693
26	3091.062	280.425	97.865	95.900	90.445	37.050	0.316	0.155	0.108	0.107	0.105	5.196	800

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number และค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลาสำหรับชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว

Time (Month)	Modulus (MPa)						Layer Coefficient						AC Deflection (µm)
	AC	Base	Subbase1	Subbase2	Subbase3	Subgrade	a1	a2	a3	a4	a5	SN	
27	3079.220	270.860	87.470	93.530	88.465	27.501	0.316	0.153	0.104	0.106	0.104	5.128	914
28	3065.876	255.635	79.006	83.092	79.386	23.159	0.315	0.150	0.100	0.102	0.101	5.008	1020
29	3051.141	230.457	66.185	70.361	70.734	22.462	0.315	0.145	0.095	0.097	0.097	4.836	1100
30	3035.121	239.915	67.734	85.901	71.346	27.119	0.314	0.147	0.095	0.103	0.097	4.911	1000
31	3050.114	256.290	70.374	91.184	80.221	35.018	0.315	0.150	0.097	0.105	0.101	4.997	889
32	3032.182	268.768	81.012	91.642	80.504	42.551	0.314	0.153	0.101	0.105	0.101	5.062	808
33	3013.235	290.979	90.485	97.909	88.063	44.379	0.314	0.157	0.105	0.108	0.104	5.171	762
34	2993.366	328.532	117.065	101.482	96.245	47.509	0.313	0.163	0.114	0.109	0.107	5.347	691
35	2972.661	371.250	156.032	104.692	102.667	68.537	0.312	0.170	0.126	0.110	0.110	5.538	571
36	2951.203	350.000	150.000	100.000	100.000	60.000	0.311	0.167	0.124	0.109	0.109	5.472	609
37	2929.072	309.129	124.295	98.272	92.819	47.489	0.311	0.160	0.117	0.108	0.106	5.316	699
38	2906.341	280.425	97.865	95.900	90.445	37.050	0.310	0.155	0.108	0.107	0.105	5.170	809
39	2883.082	270.860	87.470	93.530	88.465	27.501	0.309	0.153	0.104	0.106	0.104	5.101	923

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number และค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลาสำหรับชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุไม่เกาะตัว

Time (Month)	Modulus (MPa)						Layer Coefficient					AC Deflection (µm)	
	AC	Base	Subbase1	Subbase2	Subbase3	Subgrade	a1	a2	a3	a4	a5		SN
40	2859.359	255.635	79.006	83.092	79.386	23.159	0.308	0.150	0.100	0.102	0.101	4.979	1030
41	2835.236	230.457	66.185	70.361	70.734	22.462	0.307	0.145	0.095	0.097	0.097	4.806	1110
42	2810.771	239.915	67.734	85.901	71.346	27.119	0.306	0.147	0.095	0.103	0.097	4.879	1010
43	2787.112	256.290	70.374	91.184	80.221	35.018	0.306	0.150	0.097	0.105	0.101	4.960	903
44	2762.127	268.768	81.012	91.642	80.504	42.551	0.305	0.153	0.101	0.105	0.101	5.024	821
45	2736.952	290.979	90.485	97.909	88.063	44.379	0.304	0.157	0.105	0.108	0.104	5.132	774
46	2711.632	328.532	117.065	101.482	96.245	47.509	0.303	0.163	0.114	0.109	0.107	5.307	702
47	2686.207	371.250	156.032	104.692	102.667	68.537	0.302	0.170	0.126	0.110	0.110	5.497	580
48	2660.716	350.000	150.000	100.000	100.000	60.000	0.301	0.167	0.124	0.109	0.109	5.431	620
49	2635.194	309.129	124.295	98.272	92.819	47.489	0.300	0.160	0.117	0.108	0.106	5.274	712

ตารางที่ ค-2 ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number และค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลาสำหรับชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

Time (Month)	Modulus (MPa)				Layer Coefficient				AC Deflection	
	AC	Base	Subbase	Subgrade	a1	a2	a3	SN	(µm)	
0	2500.000	6895.000	150.000	100.000	0.295	0.450	0.124	6.755	264	
1	2552.890	6750.700	134.365	82.732	0.297	0.447	0.120	6.689	294	
2	2604.973	6708.734	141.730	94.086	0.299	0.446	0.122	6.719	272	
3	2655.941	6655.047	140.318	93.324	0.301	0.445	0.122	6.716	273	
4	2705.546	6586.678	136.757	92.521	0.303	0.444	0.121	6.703	274	
5	2753.600	6500.118	130.499	87.109	0.304	0.442	0.119	6.676	283	
6	2799.963	6391.333	108.182	83.303	0.306	0.439	0.111	6.582	295	
7	2840.217	6255.874	109.594	87.312	0.307	0.436	0.112	6.572	287	
8	2882.366	6089.135	128.977	93.247	0.309	0.432	0.118	6.623	273	
9	2922.668	5886.774	133.515	105.808	0.310	0.427	0.120	6.610	255	
10	2961.122	5645.358	158.370	108.500	0.312	0.421	0.127	6.654	249	
11	2997.747	5363.174	153.519	104.470	0.313	0.414	0.125	6.590	256	
12	3032.574	5041.105	150.000	100.000	0.314	0.406	0.124	6.519	264	
13	3065.646	4683.365	134.365	82.732	0.315	0.396	0.120	6.395	298	

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number และค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลาสำหรับชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

Time (Month)	Modulus (MPa)				Layer Coefficient				AC Deflection (µm)
	AC	Base	Subbase	Subgrade	a1	a2	a3	SN	
14	3097.014	4297.794	141.730	94.086	0.316	0.385	0.122	6.339	280
15	3126.731	3895.486	140.318	93.324	0.317	0.372	0.122	6.243	285
16	3154.857	3489.673	136.757	92.521	0.318	0.359	0.121	6.130	292
17	3181.452	3094.049	130.499	87.109	0.319	0.345	0.119	6.003	308
18	3206.578	2720.974	108.182	83.303	0.320	0.330	0.111	5.809	329
19	3200.803	2380.038	109.594	87.312	0.320	0.316	0.112	5.700	328
20	3222.211	2077.295	128.977	93.247	0.321	0.302	0.118	5.667	319
21	3242.388	1815.249	133.515	105.808	0.321	0.289	0.120	5.583	306
22	3261.388	1593.399	158.370	108.500	0.322	0.276	0.127	5.573	303
23	3279.268	1409.074	153.519	104.470	0.323	0.265	0.125	5.473	317
24	3296.077	1258.303	150.000	100.000	0.323	0.256	0.124	5.388	331
25	3311.867	1136.548	134.365	82.732	0.324	0.247	0.120	5.271	376
26	3326.686	1039.236	141.730	94.086	0.324	0.240	0.122	5.242	356

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number และค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลาสำหรับชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

Time (Month)	Modulus (MPa)				Layer Coefficient				AC Deflection (μm)
	AC	Base	Subbase	Subgrade	a1	a2	a3	SN	
27	3340.579	962.103	140.318	93.324	0.325	0.234	0.122	5.192	363
28	3353.590	901.365	136.757	92.521	0.325	0.229	0.121	5.143	371
29	3365.762	853.784	130.499	87.109	0.325	0.225	0.119	5.091	388
30	3377.135	816.661	108.182	83.303	0.326	0.221	0.111	4.982	411
31	3415.431	787.788	109.594	87.312	0.327	0.219	0.112	4.974	403
32	3425.629	765.388	128.977	93.247	0.327	0.216	0.118	5.033	383
33	3435.113	748.043	133.515	105.808	0.328	0.215	0.120	5.038	362
34	3443.918	734.632	158.370	108.500	0.328	0.214	0.127	5.112	349
35	3452.076	724.275	153.519	104.470	0.328	0.213	0.125	5.091	358
36	3459.617	716.282	150.000	100.000	0.328	0.212	0.124	5.074	367
37	3466.571	710.120	134.365	82.732	0.329	0.211	0.120	5.018	408
38	3472.965	705.370	141.730	94.086	0.329	0.211	0.122	5.041	381
39	3478.827	701.711	140.318	93.324	0.329	0.210	0.122	5.034	384

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ผลการคาดการณ์ค่า Structural Number และค่าการแอ่นตัวในแต่ละช่วงเวลาสำหรับชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุปรับปรุงด้วยซีเมนต์

Time (Month)	Modulus (MPa)				Layer Coefficient				AC Deflection (μ m)
	AC	Base	Subbase	Subgrade	a1	a2	a3	SN	
40	3484.181	698.893	136.757	92.521	0.329	0.210	0.121	5.021	387
41	3489.052	696.723	130.499	87.109	0.329	0.210	0.119	4.998	401
42	3493.462	695.053	108.182	83.303	0.329	0.210	0.111	4.913	421
43	3498.377	693.767	109.594	87.312	0.330	0.210	0.112	4.918	411
44	3501.933	692.778	128.977	93.247	0.330	0.209	0.118	4.992	389
45	3505.089	692.017	133.515	105.808	0.330	0.209	0.120	5.008	366
46	3507.865	691.431	158.370	108.500	0.330	0.209	0.127	5.091	352
47	3510.279	690.980	153.519	104.470	0.330	0.209	0.125	5.075	360
48	3512.347	690.633	150.000	100.000	0.330	0.209	0.124	5.064	368
49	3514.085	690.366	134.365	82.732	0.330	0.209	0.120	5.011	409
50	3515.510	690.161	141.730	94.086	0.330	0.209	0.122	5.037	382
51	3516.636	690.003	140.318	93.324	0.330	0.209	0.122	5.032	384
52	3517.476	689.881	136.757	92.521	0.330	0.209	0.121	5.020	387

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธนพล เทพวงษ์
วัน เดือน ปี เกิด	9 กุมภาพันธ์ 2541
สถานที่เกิด	นครสวรรค์
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผลงานตีพิมพ์	Development of Model for Predicting the Flexible Pavement Strength ในวารสารเอกสารรวมการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28 (28th National Convention on Civil Engineering) ฉบับที่ 28 ปีที่พิมพ์ 2566 หน้า TRL-69

