การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางในการวางแผนงานบำรุงทางโดยวิธีวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน

นายทวี ก่อพงศ์เจริญชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

APPLICATION OF STRUCTURAL DETERIORATION MODEL FOR PAVEMENT MAINTENANCE PLANNING BASED ON LIFE CYCLE COST ANALYSIS

Mr. Thawee Korpongcharoenchai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางในการวางแผนงานบำรุงทางโดยวิธีวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน
โดย	นายทวี ก่อพงศ์เจริญชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิศณุ ทรัพย์สมพล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชระ เพียรสุภาพ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิศณุ ทรัพย์สมพล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ภัทริน ศรุติพันธ์)

ทวี ก่อพงศ์เจริญชัย : การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางในการวางแผนงานบำรุงทางโดยวิธีวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน. (APPLICATION OF STRUCTURAL DETERIORATION MODEL FOR PAVEMENT MAINTENANCE PLANNING BASED ON LIFE CYCLE COST ANALYSIS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.วิศณุ ทรัพย์สมพล, 87 หน้า.

ปัจจุบันการวางแผนงบประมาณสำหรับงานเสริมผิวทาง และการบูรณะโครงสร้างทางในประเทศไทยใช้การพิจารณาจากค่าดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index, IRI) เป็นตัวชี้วัดระดับการให้บริการของสายทางเป็นหลัก รวมถึงข้อมูลความเสียหายผิวทาง อายุบริการและปริมาณการจราจร เป็นต้น อย่างไรก็ตามปัจจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความเสียหายในระดับผิวทางเท่านั้น โดยไม่สามารถสะท้อนให้เห็นถึงความแข็งแรงหรืออายุคงเหลือของโครงสร้างทางได้

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นพื้นทางในอนาคตโดยกำหนดให้ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (E2) เป็นตัวแทนสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางและนำเสนอกรอบวิธีคิดในการวิเคราะห์หารูปแบบวิธีการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากแนวทางการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเปรียบเทียบระหว่างแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวและการบูรณะโครงสร้างชั้นทาง โดยอาศัยข้อมูลจากแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทาง

จากผลการวิเคราะห์พบว่าสายทางที่กำหนดค่า IRI เป้าหมายสำหรับการซ่อมบำรุงเท่ากับ 3.00 การซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางจะมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำกว่าการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างชั้นทางในกรณีที่ช่วงปริมาณเพลามาตรฐานสะสม (NE4) น้อยกว่า 2.10 ล้านเพลาต่อช่องจราจร ส่วนสายทางที่กำหนดนโยบายค่า IRI เป้าหมายเท่ากับ 3.50 การซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางจะมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำกว่าการบูรณะโครงสร้างชั้นทางในกรณีที่มีปริมาณเพลามาตรฐานสะสมน้อยกว่า 1.90 ล้านเพลาต่อช่องจราจร ทั้งนี้เนื่องจากสายทางที่มีความถี่ในการเสริมผิวทางมากกว่า จะสามารถชะลอการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นทางเนื่องจากปัจจัยในเรื่องของความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2555

5270605821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : PAVEMENT MAINTENANCE / STRUCTURAL DETERIORATION / LIFE CYCLE COST ANALYSIS

THAWEE KORPONGCHAROENCHAI : APPLICATION OF STRUCTURAL DETERIORATION MODEL FOR PAVEMENT MAINTENANCE PLANNING BASED ON LIFE CYCLE COST ANALYSIS. ADVISOR : ASSOC. PROF. WISANU SUBSOMPON, Ph.D., 87 pp.

At present, budget planning for pavement overlay and road rehabilitation in Thailand is primarily based on International Roughness Index (IRI) as a key indicator of road serviceability level, as well as pavement distresses, pavement age, and traffic volume. However, these factors only present the damage at pavement surface, and do not reflect strength or remaining service life of pavement structure.

This research has developed structural deterioration model to predict structural condition in the future. An Elastic Modulus of Base Layer (E2) is used to represent structural condition. The purpose of this research is to provide analytical framework to select appropriate pavement treatment types between pavement overlay and rehabilitation by considering life-cycle cost, based on data from structural deterioration model.

The result of this research indicates that the road which has IRI trigger value for pavement maintenance at 3.00, pavement overlay would cost lower than rehabilitation when Cumulative Equivalent Single Axel Load (NE4) is lower than 2.10 msa./Lane. While road which has IRI trigger value at 3.50, pavement overlay would cost lower than rehabilitation when NE4 is lower than 1.90 msa./Lane. This is because more frequency of pavement overlay can help slow down structural deterioration which is effected by the increasing of asphalt surface thickness.

Department : Civil Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Civil Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012 .....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อรองศาสตราจารย์ ดร.วิศณุ ทรัพย์สมพล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด พร้อมทั้งช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่อย่างดีต่อผู้วิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ และกรุณาสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยโดยสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณต่อเจ้าหน้าที่ต่างๆ ของกรมทางหลวงที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกๆคนในครอบครัว ที่สนับสนุนการศึกษาและให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจนถึงครูบาอาจารย์ทุกท่านในอดีตที่ได้ให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะ จนทำให้ผู้วิจัยสามารถสำเร็จการศึกษาได้ในปัจจุบัน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 พฤติกรรมการเสื่อมสภาพของทาง 6
2.2 ระบบบริหารบำรุงทาง 7
2.3 ดัชนีชี้วัดพฤติกรรมของทาง 9
2.3.1 ค่าดัชนีสภาพทาง 9
2.3.2 ระดับสภาพบริการของทาง 10
2.3.3 ดัชนีสภาพบริการของทาง 10
2.3.4 ดัชนีความขรุขระสากล 10
2.4 แบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพ 11
2.5 วิธีการซ่อมบำรุงทางหลวง 14

หน้า

2.6 ค่าใช้จ่ายและผลกระทบหลังการซ่อมบำรุง 17
2.7 การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง 18
2.7.1 การคำนวณย้อนกลับ 20
2.7.2 โปรแกรม Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design 21
2.8 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทาง 22
2.9 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 25
2.10 สรุป 26

บทที่ 3 แนวทางการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ 27
3.1 การกำหนดดัชนีชี้วัดระดับการให้บริการสำหรับการวิเคราะห์ 27
3.2 แนวทางการวิเคราะห์ระดับความแข็งแรงที่ยอมรับได้ของโครงสร้างชั้นพื้นทาง 28
3.2.1 การควบคุมตัวแปรในการสำรวจ 30
3.2.2 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย 31
3.3 แนวทางการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของสายทาง 33
3.3.1 แนวทางการเลือกแบบจำลอง 34
3.3.2 แนวทางการเลือกแบบจำลองผลกระทบหลังการซ่อมบำรุง 37
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นพื้นทาง 39
3.5 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหพันธ์ 41
3.6 การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง 44
3.7 การทดสอบแบบจำลองโครงสร้างทาง 48
3.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของถนน 50
3.9 สรุป 51

บทที่ 4 การวิเคราะห์แนวทางการซ่อมบำรุงจากการประเมินค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 52
4.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 52

หน้า

4.2 การกำหนดเงื่อนไขและเกณฑ์ที่ใช้เป็นเป้าหมายในการวิเคราะห์ 55
4.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ 58
4.4 ผลการวิเคราะห์แนวทางการซ่อมบำรุงจากการประเมินต้นทุนค่าใช้จ่าย ตลอดอายุการใช้งาน 69
4.5 แนวทางการปรับปรุงการวิเคราะห์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบบริหารบำรุงทาง 74
4.6 ปัญหาและข้อจำกัดของข้อมูล 78
4.7 สรุป 79

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 80
5.1 สรุปผลการวิจัย 81
5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 83

รายการอ้างอิง 85

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 87

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ค่าเฉลี่ยโมดูลัสของวัสดุงานทางโดยทั่วไปของประเทศไทย 29
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม, (m) 36
3.3 ค่าความแข็งแรงโครงสร้างคาดการณ์จากประเภทชั้นทาง 37
3.4 สัดส่วนจำนวนข้อมูลของความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์ 40
3.5 สัดส่วนจำนวนข้อมูลของอายุสายทาง 40
3.6 สัดส่วนจำนวนข้อมูลของปริมาณการจราจร 40
3.7 สัดส่วนจำนวนข้อมูลของปริมาณรถบรรทุกหนัก 40
3.8 ขอบเขตและข้อจำกัดในการคัดเลือกข้อมูลตัวอย่างในการวิเคราะห์ 45
3.9 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆกับค่า E2 46
3.10 ผลการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง 47
3.11 ตัวอย่างการทดสอบแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง 49
4.1 การแบ่งประเภทชั้นทางตามปริมาณการจราจร 57
4.2 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ยานยนต์หนักในแต่ช่วงของประเภทชั้นทาง 57
4.3 ระดับความแข็งแรงที่ยอมให้ในแต่ละระดับชั้น 58
4.4 ตัวอย่างข้อมูลสายทาง 59
4.5 ตัวอย่างข้อมูลปริมาณตัวแทนยานพาหนะ 59
4.6 ตัวอย่างข้อมูลมาตรฐานการซ่อมบำรุง 60
4.7 ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่า IRI และ E2 กรณีซ่อมบำรุงตามกำหนดระยะเวลา ด้วยวิธีการเสริมผิว 63
4.8 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่า IRI และ E2 ตลอดอายุการใช้งาน 66
4.9 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ต้นทุนค่าซ่อมบำรุง เมื่อกำหนดให้ค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.50, $IRI_{เป้าหมายฉาบผิว}$ เท่ากับ 3.00, และ $E2_{เป้าหมาย}$ เท่ากับ 150 MPa. 68
4.10 ผลการวิเคราะห์ค่า EUAC เมื่อกำหนดปริมาณการจราจร 500 – 30,000 คันต่อวัน และ $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.00 เมตร/กิโลเมตร 70

ตารางที่ หน้า

4.11 ผลการวิเคราะห์ค่า EUAC เมื่อกำหนดปริมาณการจราจร 500 – 30,000 คันต่อวัน และ IRI $_{\text{เป้าหมายเสริมผิว}}$ เท่ากับ 3.50 เมตร/กิโลเมตร 71
4.12 การพิจารณาแนวทางการซ่อมบำรุงเมื่อต้นทุนค่าใช้จ่ายปรับเพิ่มขึ้นในอนาคต โดยกำหนด IRI $_{\text{เป้าหมายเสริมผิว}}$ 3.00 เมตรต่อกิโลเมตร 76
4.13 การพิจารณาแนวทางการซ่อมบำรุงเมื่อต้นทุนค่าใช้จ่ายปรับเพิ่มขึ้นในอนาคต โดยกำหนด IRI $_{\text{เป้าหมายเสริมผิว}}$ 3.50 เมตรต่อกิโลเมตร 77

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ภาพรวมของขั้นตอนการวิจัย 5
2.1 พฤติกรรมของดัชนีความขรุขระสากลที่เกิดจากปริมาณจราจรและความแข็งแรงของโครงสร้างทาง 8
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความขรุขระสากลกับสภาพความขรุขระของทาง 11
2.3 Dynatest Model 8000 19
2.4 การเปลี่ยนแปลงของค่าอีลาสติกโมดูลัสตลอดอายุการใช้งาน 20
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Structural Index Rutting และความแข็งแรงโครงสร้างทาง (SNP) 24
3.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระของผิวทาง 35
3.2 การกระจายของข้อมูล 4 ชุดที่มีค่ากลางและการกระจายเหมือนกันแต่ความสัมพันธ์แตกต่างกัน 42
3.3 แผนภาพการกระจายของข้อมูลที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นบวกและลบ 43
3.4 ระดับความสัมพันธ์สำหรับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 43
3.5 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติกโมดูลัสของโครงสร้างชั้นพื้นทางและปริมาณเพลามาตรฐานสะสมตลอดอายุการใช้งาน 45
4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์แนวทางการซ่อมบำรุงโดยพิจารณาจากต้นทุนค่าซ่อมบำรุงตลอดอายุการใช้งาน 56
4.2 ความสัมพันธ์ของค่า IRI ระหว่างแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางและบูรณะโครงสร้าง 67
4.3 ความสัมพันธ์ของค่า E2 ระหว่างแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางและบูรณะโครงสร้าง 67
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า EUAC และ NE4 โดยกำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.00 เมตร/กิโลเมตร 72
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า EUAC และ NE4 โดยกำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.50 เมตร/กิโลเมตร 72

บทที่1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันกรมทางหลวงมีสายทางลาดยางที่อยู่ในความรับผิดชอบกว่า 60,000 กิโลเมตร (กรมทางหลวง, 2555) โดยมีปริมาณของถนนลาดยางมากที่สุดคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 91.42 ของจำนวนสายทางทั้งหมดที่รับผิดชอบและใช้ระบบบริหารบำรุงทางที่เรียกว่า Thailand Pavement Management System (TPMS) เป็นเครื่องมือในการบริหารจัดการโครงข่ายสายทางเพื่อใช้ในการกำหนดแผนงานและนโยบายในการซ่อมบำรุงให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งระบบบริหารบำรุงทางอาศัยข้อมูลปริมาณการจราจร ปริมาณความเสียหายและอายุบริการ ในการพิจารณาและกำหนดเกณฑ์ที่ใช้ในการวางแผนงานและนโยบายการซ่อมบำรุงด้วยการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งกรมทางหลวงได้แบ่งนโยบายการซ่อมบำรุงออกเป็น 3 รูปแบบคือ บำรุงปกติ (Routine Maintenance) บำรุงตามกำหนดระยะเวลา (Periodic Maintenance) และบำรุงพิเศษ (Special Maintenance) ซึ่งครอบคลุมกิจกรรมงานซ่อมบำรุงที่ประกอบไปด้วย งานฉาบผิวทางลาดยาง (Seal) งานเสริมผิวทางลาดยาง (Overlay) และงานบูรณะโครงสร้างทาง (Rehabilitation) อย่างไรก็ตามในการพิจารณางานซ่อมบำรุงโดยการบูรณะโครงสร้างทางจะอาศัยข้อมูลอายุบริการ ปริมาณการจราจร และดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index : IRI) เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากการสำรวจโดยกรมทางหลวง แต่ข้อมูลดังกล่าวไม่สามารถสะท้อนถึงความแข็งแรงของโครงสร้างทางได้โดยตรง ปัจจุบันกรมทางหลวงได้ใช้ข้อมูลการทดสอบแบบไม่ทำลายจากเครื่องมือ FALLING WEIGHT DEFLECTROMETER (FWD) เพื่อช่วยการทดสอบและประเมินถึงสภาพความแข็งแรงทางโครงสร้างโดยเป็นข้อมูลช่วยในการกำหนดรูปแบบวิธีการซ่อมบำรุงได้ดียิ่งขึ้น แต่ด้วยข้อจำกัดในเรื่องของจำนวนเครื่องมือ บุคลากร และงบประมาณ ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนสายทางที่อยู่ในการดูแลของกรมทางหลวง ดังนั้นในการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางจึงออกมาใน

ลักษณะของการใช้งานเครื่องมือ FWD ในรูปแบบของการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นแล้วเท่านั้น แต่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงการวางแผนป้องกันปัญหา รวมถึงเป็นข้อมูลช่วยในการกำหนดแผนงานและนโยบายการซ่อมบำรุงทางในระดับโครงข่ายได้ จึงเป็นสาเหตุในการเลือกรูปแบบวิธีการซ่อมบำรุงที่ไม่สอดคล้องกับความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง ทำให้เสียงบประมาณไปโดยไม่คุ้มค่าในบางสายทางได้ แม้ว่าทางหลวงภายใต้การดูแลรับผิดชอบของกรมทางหลวงได้สุ่มเก็บข้อมูลค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางมาอย่างต่อเนื่องเป็นประจำทุกปี แต่ก็ยังไม่เพียงพอต่อจำนวนสายทางทั้งหมดในความรับผิดชอบ

ดังนั้นในระบบบริหารบำรุงทาง ควรที่จะสามารถประเมินถึงสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างทางในปัจจุบัน เพื่อที่จะคัดกรองสายทางที่มีค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางอยู่ในเกณฑ์เฝ้าระวังให้มีจำนวนที่ชัดเจนจากจำนวนสายทางทั้งหมดและพิจารณาถึงรูปแบบวิธีการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบกันระหว่างแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทาง และแบบบูรณะโครงสร้างทางด้วยวิธีการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานโดยอาศัยแบบจำลองการเสื่อมสภาพทางโครงสร้างทางมาใช้ในการพยากรณ์สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างทางภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆในอนาคต สำหรับสายทางที่ถูกคัดกรองแล้วพบว่าค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายหนักในระดับโครงสร้างทางก็จะซ่อมบำรุงตามนโยบาย เพื่อเป็นข้อมูลช่วยในการคัดกรองและกำหนดรูปแบบวิธีการบำรุงทางได้อย่างคุ้มค่าอีกทั้งยังสามารถกำหนดช่วงเวลาและงบประมาณในการบริหารบำรุงทางได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างกรอบวิธีคิดสำหรับวิเคราะห์หารูปแบบวิธีการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมระหว่างการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางและการบูรณะโครงสร้างทางด้วยวิธีการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานโดยพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างทางที่มีค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (Modulus of Base Layer : E2) เป็นตัวแทนสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบบริหารบำรุงทาง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาเฉพาะสายทางที่ผิวทางลาดยางแบบแอสฟัลต์ (Asphalt Pavement) และวัสดุชั้นพื้นทางเป็นหินคลุก (Crushed Rock) ที่มีการจัดเก็บข้อมูลความแข็งแรงทางโครงสร้างด้วยเครื่องมือ FWD ของกรมทางหลวงโดยพิจารณาร่วมกับข้อมูลปริมาณการจราจร และประวัติการซ่อมบำรุงในอดีต

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยได้แบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. รวบรวมข้อมูลเชิงเอกสารเบื้องต้น รวมถึงสัมภาษณ์ผู้ปฏิบัติงานถึงเกณฑ์ต่างๆและแนวทางการซ่อมบำรุงที่ใช้พิจารณาในการบริหารบำรุงทาง
2. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นทางอย่างมีนัยสำคัญ
3. รวบรวมข้อมูลสายทาง โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ
    3.1 ข้อมูลของค่าอีลาสติกโมดูลัสของโครงสร้างชั้นพื้นทาง ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้เก็บสำรวจโดยกรมทางหลวงด้วยเครื่องมือ FWD และค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI)
    3.2 ข้อมูลของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างทางอย่างมีนัยสำคัญที่ได้ศึกษามาในข้อที่ 2 เช่น ปริมาณการจราจร เปอร์เซ็นต์ยานยนต์หนัก ชนิดของวัสดุชั้นทาง ความหนาชั้นทาง สภาพแวดล้อม และประวัติการซ่อมบำรุงทาง เป็นต้น
4. พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางโดยอาศัยข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมในข้อ 3 มาใช้ในการวิเคราะห์
    4.1 คัดเลือกและตรวจสอบข้อมูล เป็นขั้นตอนการคัดเลือกสายทางชนิดผิวทางลาดยางและตรวจสอบข้อมูลของค่าเฉลี่ยโมดูลัสชั้นทางที่ยอมรับได้ โดยที่โมดูลัสแอสฟัลต์คอนกรีต ไม่เกิน 7,000 MPa. และโมดูลัสพื้นทางวัสดุหินคลุก (Crushed

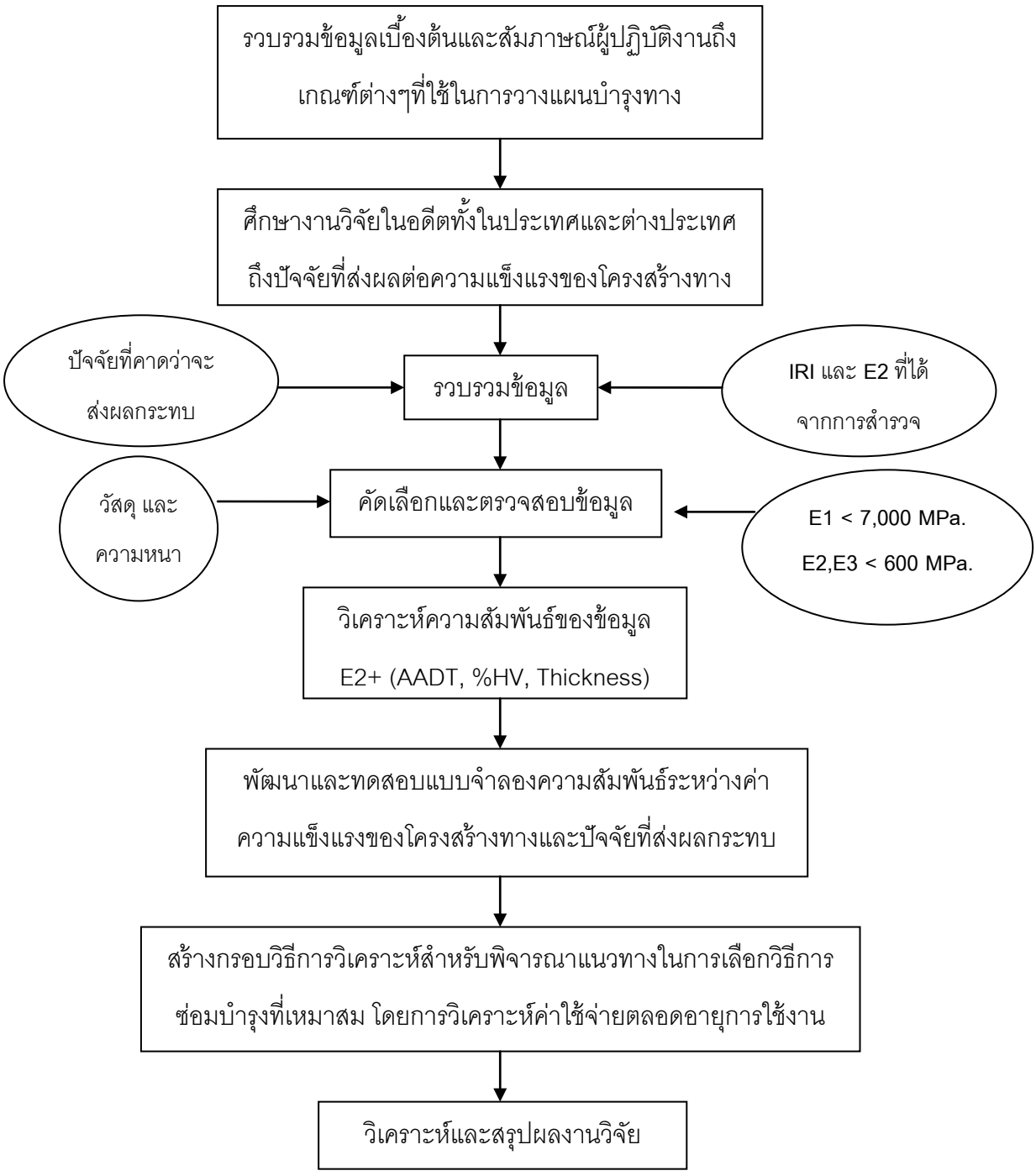
Rock) ไม่เกิน 600 MPa. และสายทางตัวอย่างจะต้องมีความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์ไม่เกิน 10 เซนติเมตร

4.2 พัฒนาและทดสอบแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของโครงสร้างพื้นทางและปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

5. นำเข้าข้อมูลค่าความแข็งแรงที่ได้จากแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงและปัจจัยที่ส่งผลกระทบ เพื่อใช้พิจารณาอายุคงเหลือของสายทาง
6. ประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงสร้างทางในการบริหารบำรุงทางโดยการเสนอแนวทางในการนำแบบจำลองความแข็งแรงของโครงสร้างทางไปประยุกต์ใช้กับระบบบริหารบำรุงทาง เช่น การวางแผนงานและกำหนดนโยบายซ่อมบำรุงในอนาคต และเป็นเครื่องมือช่วยในการคัดกรองจำนวนสายทางที่มีโอกาสเกิดความเสียหายหนักในอนาคตอันใกล้ และช่วยประกอบการตัดสินใจในการเลือกรูปแบบวิธีการซ่อมบำรุงให้คุ้มค่า โดยการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน
7. สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำกรอบวิธีการวิเคราะห์รูปแบบแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการคัดกรองข้อมูลจำนวนสายทางที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างต่ำ และมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายถึงระดับโครงสร้างชั้นทางในอนาคตอันใกล้เพื่อคอยสังเกตและเฝ้าระวังเป็นกรณีพิเศษและพิจารณาถึงแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมสอดคล้องกับสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้อย่างคุ้มค่า อีกทั้งช่วยในการวิเคราะห์วางแผนงบประมาณบริหารงานโครงข่ายทางในเชิงป้องกันได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 1.1 ภาพรวมของขั้นตอนการวิจัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถนนที่ถูกใช้งานจะมีการเสื่อมสภาพและความเสียหายเกิดขึ้นตามมา โดยกรมทางหลวงแบ่งกิจกรรมงานบำรุงทางออกเป็น งานบำรุงปกติ งานบำรุงตามกำหนดระยะเวลา และงานบำรุงพิเศษหรือบูรณะ โดยปัจจุบันกรมทางหลวงได้ใช้ระบบบริหารบำรุงทางเป็นเครื่องมือในการบริหารจัดการถนน วางแผนงานต่างๆ และบริหารจัดการงบประมาณในการซ่อมบำรุงให้เหมาะสมและครอบคลุมปริมาณสายทางในความรับผิดชอบ โดยระบบบริหารบำรุงทางของกรมทางหลวงใช้ดัชนีชี้วัดความขรุขระสากล (IRI) เป็นตัวประเมินระดับสภาพการให้บริการของทางซึ่งเป็นการประเมินจากสภาพผิวทางเท่านั้น ในปัจจุบันกรมทางหลวงได้นำเครื่องมือทดสอบค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางที่เรียกว่า Falling Weight Deflectometer (FWD) เข้ามาช่วยประเมินถึงค่าความแข็งแรงในระดับโครงสร้างชั้นทางแต่ด้วยข้อจำกัดในด้านจำนวนเครื่องมือ บุคลากร และงบประมาณ ซึ่งไม่เพียงพอต่อปริมาณสายทางที่มีมากกว่า 60,000 กิโลเมตรได้ ดังนั้นการพยากรณ์การเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นทางในอนาคตจึงเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการพิจารณาถึงแนวทางการซ่อมบำรุงได้อย่างเหมาะสมตามลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น และเป็นข้อมูลช่วยพิจารณาถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่ากับเงินลงทุนที่ใช้ซ่อมบำรุงด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

2.1 **พฤติกรรมการเสื่อมสภาพของทาง** (Road Deterioration)

ถนนทุกประเภทเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จและเปิดการจราจรไปชักระยะเวลาหนึ่งความชำรุดเสียหายก็จะเกิดขึ้นตามมา โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นมีสาเหตุอยู่ 2 ประการ

1) การเสื่อมสภาพตามธรรมชาติ เช่น ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม สภาพภูมิประเทศและสภาพอากาศ เป็นต้น

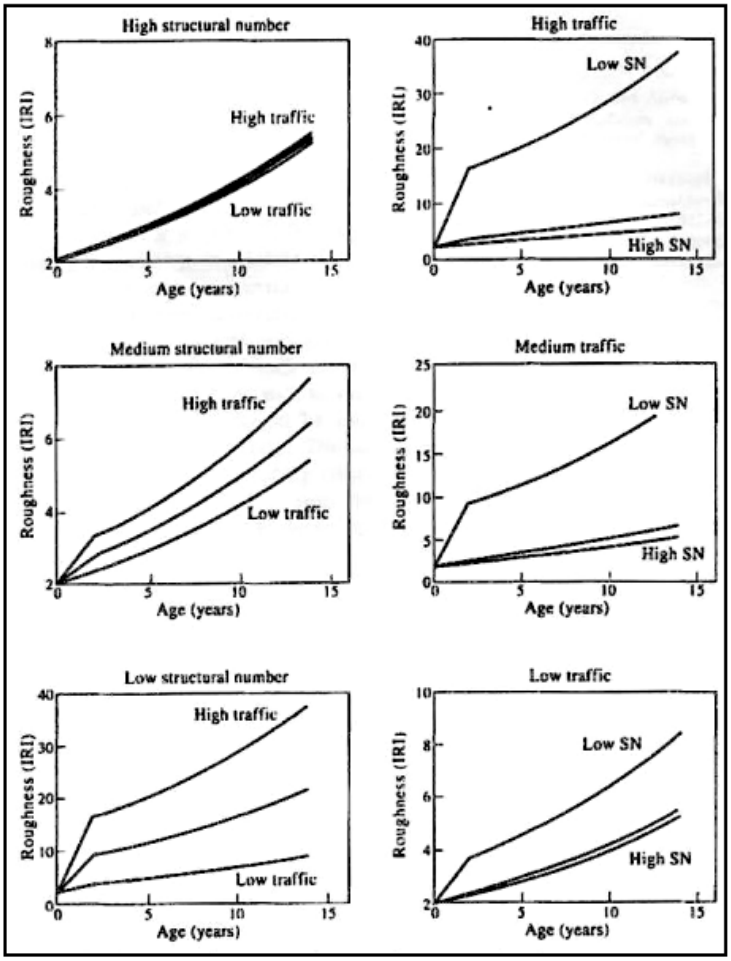
2) การเสื่อมสภาพเนื่องจากการบรรทุกน้ำหนัก ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากน้ำหนักของยานพาหนะ และปริมาณการจราจร เป็นต้น ดังนั้นเมื่อถนนถูกใช้งานไปตามระยะเวลาก็จะส่งผลให้คุณภาพในการให้บริการนั้นลดต่ำลงในเรื่องของความปลอดภัย ความสะดวกสบายของผู้ใช้ทาง กำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างและความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวทางเป็นต้น แต่ในทางกลับกันค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางและค่าบำรุงรักษาทางนั้นกลับมีค่าที่เพิ่มมากขึ้น โดยจากการศึกษาของธนาคารโลก (Haas, 1978) พบว่าการลดงบประมาณในการบำรุงรักษาทางลง 1หน่วย จะทำให้ค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางนั้นเพิ่มขึ้นประมาณ 2-3 หน่วย และการซ่อมบำรุงทางในระยะเวลาที่เหมาะสมจะทำให้สามารถใช้งานสายทางได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยต่อเนื่อง ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรต้องบำรุงทางให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดีอยู่ตลอดเวลา เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายในส่วนของผู้ใช้ทางและผู้รับผิดชอบในการซ่อมบำรุงทาง

Attoh-Okine (1994) ได้เปรียบเทียบการเสื่อมสภาพของทางระหว่างค่าความแข็งแรงของโครงสร้างที่ได้แบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ สูงหมายถึงสายทางที่มีค่า Structural Number (SN) SN > 3.5 กลาง SN มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 3.5 และความแข็งแรงต่ำมีค่า SN < 1.5 ปริมาณการจราจรที่แบ่งออกเป็น 3 ระดับเช่นกันคือ สูงหมายถึงสายทางที่มีปริมาณการจราจร ESAL > 0.10 (million ESAL/ lane/ year : msa) กลาง ESAL มีค่าอยู่ระหว่าง 0.05 – 0.10 msa. และต่ำ ESAL < 0.05 msa. โดยจากการศึกษาพบว่าปัจจัยทั้งสองต่างมีผลต่อการเสื่อมสภาพของทางแต่ในกรณีที่ปริมาณการจราจรเท่ากันพบว่าสายทางที่มีค่าความแข็งแรงของโครงสร้างต่ำจะมีอัตราการเสื่อมสภาพของผิวทางที่เร็วกว่าสายทางที่มีโครงสร้างชั้นทางที่แข็งแรงกว่าอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.2 ระบบบริหารบำรุงทาง (Pavement Management System, PMS)

ในปัจจุบันกรมทางหลวงมีความรับผิดชอบในการดูแลบริหารจัดการ ในเรื่องการให้บริการของทางหลวง การก่อสร้างทางหลวงตลอดจนการบำรุงรักษาและแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นบนทางหลวงที่มีมากกว่า 60,000 กิโลเมตรทั่วประเทศ การดูแลรักษาทางหลวงให้ทั่วถึงจึงมีข้อจำกัด

หลายประการ เช่น งบประมาณ เครื่องมือและจำนวนบุคลากร เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีเครื่องมือที่ช่วยในการบริหารจัดการได้อย่างเหมาะสม คุ้มค่าและมีประสิทธิภาพอีกทั้งสามารถเป็นข้อมูลในการจัดลำดับความสำคัญในการบำรุงดูแลรักษาตลอดจนถึงการก่อสร้างเพิ่มเติมได้ เพื่อเป็นข้อมูลช่วยในการตัดสินใจสำหรับการกำหนดนโยบายเกี่ยวกับงานทางต่างๆนั่นก็คือระบบบริหารบำรุงทาง Pavement Management System (PMS) ปัจจุบันกรมทางหลวงได้นำระบบบริหารงานซ่อมบำรุงรักษาทางหลวงที่เรียกว่า Thailand Pavement Management System (TPMS) โดยได้รับความช่วยเหลือจากธนาคารโลกตั้งแต่ปี พ.ศ.2527



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมของดัชนีความขรุขระสากลที่เกิดจากปริมาณจราจรและความแข็งแรงของโครงสร้างทาง (Attoh-Okine, 1994)

ในอดีตกรมทางหลวงได้นำระบบ HDM-4 (Highway Development and Management) ที่พัฒนาขึ้นโดยธนาคารโลกมาเป็นเครื่องมือช่วยงานวางแผนในการบริหารงานบำรุงทาง อีกทั้งได้พัฒนาวิธีการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือที่ทันสมัย เช่น การวิเคราะห์รอยแตกร้าวของผิวทางจากภาพถ่าย ทำให้การวิเคราะห์สภาพความเสียหายของผิวทางมีความแม่นยำมากขึ้นและลดระยะเวลาในการเก็บข้อมูลให้น้อยลง โดยจากการศึกษาระบบบริหารงานบำรุงทางทั้ง TPMS ของกรมทางหลวงและ HDM-4 พบว่าขั้นตอนการวิเคราะห์หาแผนการซ่อมบำรุงและงบประมาณในการซ่อมบำรุงมีความคล้ายคลึงกัน

2.3 **ดัชนีชี้วัดพฤติกรรมของทาง** (Pavement Performance Index)

องค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบบริหารบำรุงทาง (PMS) คือ ความสามารถในการประเมินสภาพของทางในปัจจุบันและสามารถพยากรณ์ถึงสภาพของทางในอนาคตได้ โดยการพยากรณ์ให้แม่นยำและน่าเชื่อถือนั้นจำเป็นต้องระบุและประเมินสภาพของทางและระดับความเสียหายจากดัชนีที่สะท้อนพฤติกรรมของทางที่เหมาะสม

2.3.1 **ค่าดัชนีสภาพทาง** (Pavement Condition Index, PCI)

การประเมินระดับสภาพความเสียหายของทางในรูปของ Pavement Condition Index (PCI) ได้ถูกพัฒนาโดย U.S. Army Corps of Engineer โดยที่ค่า PCI ได้จัดแบ่งระดับความเสียหายออกเป็นช่วง 0-100 สำหรับสภาพทางที่มีระดับความเสียหายรุนแรงมาก (Fail) ไปจนถึงสภาพที่มีความสมบูรณ์มากเช่นถนนสร้างใหม่ (Perfect) ตามลำดับ (Shahin, 1994) การคำนวณค่า PCI จะขึ้นอยู่กับผลที่ได้จากการประเมินสภาพที่สามารถพบเจอได้ด้วยตาเปล่า (Visual Condition) โดยแบ่งเป็นประเภทของความเสียหาย เช่น รอยแตกตามยาว รอยแตกหนังจระเข้ หลุมบ่อ เป็นต้น รวมถึงพิจารณาค่าระดับความรุนแรง และปริมาณความเสียหายแล้วจึงนำมาคำนวณค่าดัชนีสภาพทาง

2.3.2 ระดับสภาพบริการของทาง (Pavement Serviceability Rating, PSR)

ระดับสภาพบริการของทางได้ถูกพัฒนาโดย AASHTO Road Test (Haas, 1978) เป็นการประเมินระดับการให้บริการของทางโดยใช้วิธีให้ผู้มีความรู้และชำนาญการประเมินสภาพทางตลอดจนถึงระดับการให้บริการต่อผู้ใช้ทางโดยจะแบ่งช่วงระดับสภาพบริการของทางออกเป็น 5 ระดับ ตั้งแต่ 0-5 โดย 0 หมายถึงสภาพการให้บริการที่แย่ที่สุด (Very Poor) ไปจนถึง 5 หมายถึงระดับสภาพการให้บริการที่ดีที่สุด (Excellent) โดยค่า Pavement Serviceability Rating (PSR) จากการประเมินจะสะท้อนถึงความพึงพอใจที่มีของผู้ใช้ทาง เช่น ความเรียบของผิวทาง

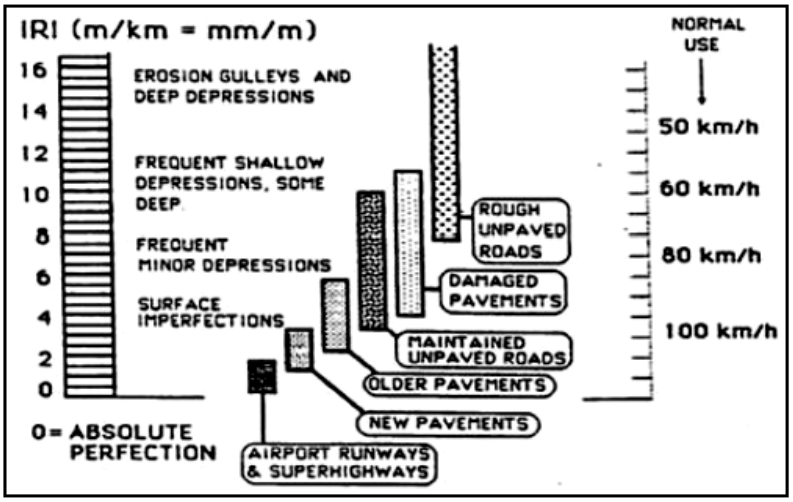
2.3.3 ดัชนีสภาพบริการของทาง (Pavement Serviceability Index, PSI)

สืบเนื่องมาจากการประเมินระดับสภาพบริการของทาง Pavement Serviceability Rating (PSR) จำเป็นต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้และเชี่ยวชาญเฉพาะด้านซึ่งมีจำนวนน้อยและไม่เพียงพอต่อปริมาณของถนนที่จะต้องประเมินแล้ว ผลการประเมินที่ได้ยังไม่มีเกณฑ์ที่เป็นตัวชี้วัดไปในแนวทางเดียวกันเนื่องจากค่าที่ประเมินได้มาจากประสบการณ์และความเห็นของผู้ประเมินในแต่ละคน (Inspector's Judgment) ดังนั้น PSR จึงมีข้อจำกัดอยู่ตรงที่ความล่าช้า และความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคล (Subjective Measurement) จึงเป็นสาเหตุให้ AASHTO (1993) ได้พัฒนาค่าดัชนีสภาพบริการของทาง Pavement Serviceability Index (PSI) ขึ้นมาเพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดที่เป็นตัวแทนสภาพบริการของทางโดยเปรียบเทียบกับค่า PSR เพื่อลดข้อจำกัดทางด้านความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคลโดยคำนวณค่าดัชนีสภาพบริการของทางลาดยางได้

2.3.4 ดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index, IRI)

ความขรุขระ (Roughness) เป็นตัวแทนสภาพความเสียหายที่สะท้อนถึงคุณภาพของผิวทางเนื่องจากทางที่มีสภาพความขรุขระสูงหมายถึงคุณภาพในการขับขี่ที่แย่ลงตามไปด้วย Paterson (1987) แสดงผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นกับทางอันเนื่องมาจากความขรุขระ เช่น ผลกระทบทางด้านค่าใช้จ่ายของยานพาหนะ (Vehicle Operating Costs) ความปลอดภัย การเพิ่มขึ้นทางด้านน้ำหนักแบบไดนามิคต่อผิวทาง และการเสื่อมสภาพของโครงสร้างผิวทางที่เร็วขึ้น ค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI) จึงเริ่มนำมาใช้โดยธนาคารโลกในปี 1986 ซึ่งการวัดค่าดัชนีความ

ขรุขระสากล (IRI) สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องมือ Bump – Integrator หรือ Laser Profilometer ที่ติดตั้งในรถยนต์ทำหน้าที่วัดค่า ซึ่งในประเทศไทยได้นำค่าดัชนีความขรุขระสากลเป็นตัวแทนสภาพความเสียหายของทางโดยนำมาปรับปรุงให้มีความเหมาะสมกับประเทศไทยซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความขรุขระสากลกับสภาพความขรุขระของทางแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความขรุขระสากลกับสภาพความขรุขระของทาง (Paterson, 1987)

2.4 **แบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพ** (Deterioration Model)

แบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพของทางมีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบบริหารบำรุงทาง ด้วยข้อมูลของสภาพทางที่หลากหลายโดยมีคุณลักษณะเฉพาะตัวเช่น ความเรียบ ความฝืด ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง และสภาพความเสียหายที่พบเจอ โดยดัชนีสภาพทางทั้งหลายนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อประเมินถึงปริมาณตามแต่ละคุณลักษณะเช่น International Roughness Index (IRI) สำหรับการวัดค่าความเรียบ หรือดัชนีที่อ้างอิงผลการทดสอบจากค่าการแอ่นตัวของทางโดยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายจะสะท้อนออกมาในรูปของค่าการแอ่นตัวที่มากที่สุดหรือพื้นที่บริเวณของการแอ่นตัวยกตัวอย่าง เช่น ดัชนีชี้วัดความแข็งแรง เป็นต้น โดยที่

แบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพทางได้ถูกใช้ทั้งในระดับโครงการไปจนถึงระดับโครงข่ายเพื่อวิเคราะห์ถึงสภาพบริการของทางไปจนถึงรูปแบบและความต้องการในการซ่อมบำรุงในอนาคตซึ่งแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยมีดังต่อไปนี้ (Shahin, 1994)

Mechanistic Model เป็นแบบจำลองที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการและวิเคราะห์ตามหลักการของ ฟิสิกส์ เคมี หรือความรู้ทางด้านวิศวกรรมเป็นต้น ยกตัวอย่างเช่น กฎของโอห์ม (Ohm's law) กฎของแก๊ส และ กฎของเคอร์ซอร์ฟ (Kirchhoff's laws) หรือการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) เป็นต้น

Empirical Model ในกรณีที่มีตัวแปรที่สัมพันธ์กันมากกว่าสองตัวขึ้นไปและแบบจำลอง Mechanistic Model ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้จากการทดลองได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างแบบจำลองที่มีความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ได้จากการออกสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติ

Mechanistic – Empirical Model เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหรืออ้างอิงมาจากทฤษฎีที่ได้จากแบบจำลอง Mechanistic Model เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดและค่าการแอ่นตัวเป็นต้น แต่ความสัมพันธ์เหล่านี้ไม่สามารถที่จะพยากรณ์ถึงการเสื่อมสภาพในอนาคตได้อย่างไรก็ตามตัวแปรอิสระที่ได้จากการวิเคราะห์ของแบบจำลอง Mechanistic Model สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์การถดถอยแบบ Empirical Model ซึ่งเป็นการนำสถิติมาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อพยากรณ์ถึงการเสื่อมสภาพในอนาคต เช่น อายุคงเหลือของถนนรวมถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่เป็นปัจจัยในการส่งผลกระทบ แบบจำลองดังกล่าวต้องมีการกำหนดขอบเขตและข้อจำกัดการนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับในแต่ละสถานการณ์

ธนาคารโลกได้พัฒนาระบบบริหารงานบำรุงทาง ซึ่งเรียกว่า HDM-4 (Highway Development and Management Tool) โดยอ้างอิงจากการศึกษาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของสายทางในอดีตมากมาย เช่น Peterson (1987), NDIL (1995) และได้พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางโดยใช้ดัชนีความขรุขระสากล (IRI) เป็นตัวแทนการเสื่อมสภาพของสายทาง

ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของทางมี 5 ปัจจัยหลัก คือ ความแข็งแรงของโครงสร้าง รอยแตกร้าว ปริมาณหลุมบ่อ ปริมาณรอยร่องล้อ และผลกระทบจากสภาพแวดล้อม

Zhang et al. (2003) ได้ศึกษาถึงการประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างทางด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) โดยแบ่งการให้คะแนนจากการประเมินสภาพทางออกเป็น 3 ประเภทคือ

1) คะแนนความเสียหายบนผิวทาง (Distress Score) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดจำนวนการเสื่อมสภาพของทางที่พบเจอได้ด้วยตาเปล่าโดยมีช่วงคะแนนอยู่ที่ 1 (the most distress) ถึง 100 (the best condition)
2) คะแนนของคุณภาพในการขับขี่ (Ride Score) เป็นตัวชี้วัดถึงความเรียบของผิวทาง โดยมีช่วงการให้คะแนนอยู่ที่ 0.1 (the roughest) ถึง 5.0 (the smoothest)
3) คะแนนสภาพผิวทาง (Condition Score) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดจากสภาพทางโดยรวมของคุณภาพในการขับขี่และความเสียหายบนผิวทาง ซึ่งมีช่วงการให้คะแนนอยู่ที่ 1(the worst condition) ถึง 100 (the best condition)

และได้มีความเห็นเพิ่มเติมว่าผิวทางจะมีจุดอ่อนอย่างมากถ้ามีค่าสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างต่ำ โดยมีปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการเสื่อมสภาพนั่นก็คือการจราจร โดยการออกแบบผิวทางเพื่อรองรับปริมาณจราจรโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบของจำนวนค่าเทียบเท่าน้ำหนักเพลามาตรฐาน Equivalent Single Axle Load (ESAL) ซึ่งในการประเมินคะแนนสภาพผิวทางที่ตำแหน่งเดิมทุกๆปีจะแสดงให้เห็นว่าที่ ESAL ต่างๆกันในแต่ละปีก็จะมีความแตกต่างของสภาพความแข็งแรงของทางด้วย แต่ถ้าไม่พิจารณาถึงปริมาณการจราจรจะทำให้เราไม่สามารถแยกแยะค่าความแข็งแรงสภาพทางได้อย่างชัดเจน เช่น ในการประเมินสภาพทางสองสายทางตัวอย่างที่มีสภาพแวดล้อมเหมือนกันทุกประการทั้งความเรียบและความเสียหายบนผิวแต่ไม่พิจารณาถึงปริมาณของจำนวนค่าเทียบเท่าน้ำหนักเพลามาตรฐาน (ESAL) จะทำให้ได้ค่าคะแนนสภาพผิวทางของทั้งสองตัวอย่างที่ประเมินมาได้เท่ากันในขณะที่แท้จริงแล้วอาจจะมี

หนึ่งตัวอย่างที่มีการรับปริมาณการจราจรมากกว่าจะเป็นการสรุปที่สวนทางว่าผิวทางที่รับน้ำหนักบรรทุกจาก ESAL มากกว่าจะมีค่าความแข็งแรงของโครงสร้างที่ดีกว่าซึ่งไม่ถูกต้องตามข้อเท็จจริง อีกทั้งในกรณีสายทางที่ทดสอบมีสภาพความขรุขระในตอนเริ่มแรกที่สูงแต่สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างที่ดีเยี่ยม ดังนั้นเพื่อให้เกิดความชัดเจนในการประเมินถนนที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างที่แย่กว่า ควรมีอัตราการเสื่อมสภาพที่มากกว่าจึงได้เสนอ Unit ESAL Deterioration ขึ้นมา

2.5 วิธีการซ่อมบำรุงทางหลวง

ในปัจจุบันแผนงานบำรุงรักษาของกรมทางหลวง (2551) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1) งานบำรุงปกติ (Routine Maintenance)
2) งานบำรุงตามกำหนดเวลา (Periodic Maintenance)
3) งานบำรุงพิเศษและบูรณะ (Special Maintenance and Rehabilitation)

1. **งานบำรุงปกติ (Routine Maintenance)** เป็นงานที่ต้องบำรุงรักษาเป็นประจำทุกปีซึ่งมีลักษณะกิจกรรมงานบำรุงทางดังวิธีต่อไปนี้

- วิธีการอุดรอยแตก (Crack Filling) คือการซ่อมแซมถนนที่เกิดความเสียหายในลักษณะการเกิดรอยแตก (Crack) ที่ไม่ต่อเนื่องกัน โดยการใช้แอสฟัลต์หรือแอสฟัลต์ผสมวัสดุละเอียดอุดรอยแตกนั้น เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านรอยแตกที่เกิดขึ้นในชั้นผิวทางลงไปสร้างความเสียหายแก่ชั้นโครงสร้างทางด้านล่าง และยังช่วยอุดช่องว่างระหว่างรอยแตกที่เกิดลึกลงไปถึงโครงสร้างชั้นทาง อีกทั้งเป็นการป้องกันหรือซ่อมแซมในรูปแบบชั่วคราวของถนนที่น้ำซึมผ่านชั้นผิวทางลงไปทำลายความแข็งแรงของวัสดุโครงสร้างทางไปบ้างแล้ว
- วิธีการฉาบผิวทางแบบฟ๊อกซีล (Fog Seal) เป็นการซ่อมแซมถนนที่เกิดความเสียหายเฉพาะผิวหน้าของชั้นผิวทางในลักษณะที่ปรากฏเป็นรอยร้าวเล็กๆเป็นบริเวณกว้างและต่อเนื่องแต่ไม่มีความกว้างและความลึกของรอยร้าว โดยการพ่นแอสฟัลต์ชนิดเหลวที่เป็นแอสฟัลต์

อิมัลชันประเภทเซ็ตตัวช้า (CSS) ปิดทับรอยร้าวนั้น เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้น้ำซึมเข้าไปในรอยร้าวที่เกิดขึ้นและไปสร้างความเสียหายแก่ชั้นผิวทาง อีกทั้งยังเป็นการเติมแอสฟัลต์ใหม่ลงไปทดแทนแอสฟัลต์เดิมที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานเป็นเวลานานอีกด้วย

- วิธีการฉาบผิวทางแบบชิพซีล (Chip Seal) เป็นการซ่อมแซมความเสียหายของผิวทางโดยการเตรียมผิวหน้าบนผิวทางเดิมด้วยการพ่นแอสฟัลต์ลงบนผิวทางก่อนแล้วเกลี่ยวัสดุหินย่อยหรือกรวดย่อยปิดทับ หลังจากนั้นบดทับให้เรียบ เป็นการซ่อมแซมเพื่อป้องกันความเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์ที่อาจจะเกิดขึ้น ได้แก่ ผิวทางมีรอยแตกแบบต่อเนื่อง ผิวลื่น ผิวหลุดร่อน หรือเสื่อมสภาพเฉพาะผิวหน้าโดยที่ความลาด ระดับ ของผิวทางเดิมยังไม่มีการทรุดตัวเป็นแอ่งหรือร่องล้อ โดยเป็นการเพิ่มความฝืด (Skid Resistance) ของผิวทาง

- วิธีการปะซ่อมผิวทาง (Skin Patching) คือการซ่อมแซมความเสียหาย โดยนำผิวทางเดิมที่เสียหายออกและนำส่วนผสมใหม่มาปรับให้เรียบ ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นเช่น รอยแตก ผิวหลุดร่อน ผิวชำรุดเป็นหลุมบ่อ ผิวทางเกิดการเคลื่อนตัว เป็นต้น โดยเป็นการซ่อมแซมที่คืนสภาพชั้นผิวทางของถนนให้กลับมาใช้งานได้ตามปกติ

- การขุดซ่อมผิวทาง (Deep Patching) คือการซ่อมแซมความเสียหายของถนนที่ความเสียหายเกิดขึ้นในระดับที่ลึกกว่าชั้นผิวทาง ดังนั้นจึงต้องขุดลงไปซ่อมแซมชั้นทางที่เสียหายนั้นก่อน แล้วจึงปูและปิดทับด้วยผิวทางแอสฟัลต์เพื่อคืนสภาพโครงสร้างชั้นทาง ใช้กับลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นเช่น รอยแตกแบบหนังจระเข้ (Alligator Cracks) การบวมแตก (Upheaval) ผิวหลุดร่อน (Disintegration) เป็นต้น เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายของโครงสร้างชั้นทางไม่ให้เกิดความเสียหายลุกลามเพิ่มขึ้น และเป็นการซ่อมแบบถาวรเพื่อปรับปรุงให้โครงสร้างถนนกลับมามีความแข็งแรงดังเดิม

2. **งานบำรุงตามกำหนดเวลา (Periodic Maintenance)** เป็นงานซ่อมบำรุงซึ่งจะปฏิบัติต่อเมื่อถึงเกณฑ์ตามที่ได้กำหนดเป้าหมายในการวางแผนงานซ่อมบำรุงตามกำหนดนโยบาย โดยมีกิจกรรมงานบำรุงทางดังต่อไปนี้

- วิธีการฉาบผิวทางแบบสเลอรี่ซีล (Slurry Seal) คือการซ่อมแซมความเสียหายของถนนที่เกิดความเสียหายเฉพาะชั้นผิวทาง ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นเช่น รอยแตก ในแบบที่

โครงสร้างทางยังไม่เสียหายหรือทรุดตัว, ผิวทางมียางเยิ้ม (Bleeding or Flushing), ผิวทางถูกขัดจนมัน (Polished Aggregatde), ผิวทางเดิมหลุดร่อน (Raveling) โดยนำเอาส่วนผสมของมวลรวม, แอสฟัลต์อิมัลชัน, น้ำ, Mineral Filler รวมทั้งอาจใช้สารผสมเพิ่มสำหรับลดหรือเร่งการแตกตัวของแอสฟัลต์อิมัลชัน มาฉาบปิดทับผิวทางเดิมที่เสียหาย

- วิธีการเสริมผิวแอสฟัลต์ (Asphalt Overlay) คือการซ่อมแซมถนนเดิมโดยการเสริมวัสดุผิวทางแอสฟัลต์บนผิวทางเดิม เพื่อแก้ไขความเสียหายของผิวทางและเสริมความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างถนน โดยมีวัตถุประสงค์ในการแก้ไขผิวทางเดิม ได้แก่ ปรับแก้รูปทรงทางเรขาคณิตให้ได้มาตรฐาน เช่น ความลาดเอียงตามขวางและตามยาว (Crown Slope & Profile Grade) รูปตัดของถนน (Cross Section), ปรับปรุงความเรียบของการขับขี่ (Ride Smoothness), ปรับระดับผิวทางที่ทรุดตัวเป็นแอ่ง (Depression), ร่องล้อ (Rutting) หรือผิวหลุดร่อน, ปรับปรุงเพิ่มความฝืดของผิวทาง (Skid Resistance) และเพื่อเสริมเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างถนนเดิม เป็นการยืดอายุการใช้งานของถนน

3. **งานบำรุงพิเศษและบูรณะ** (Special Maintenance and Rehabilitation) เป็นการซ่อมบำรุงทางหลวงที่มีความเสียหายรุนแรงจนไม่สามารถแก้ไขด้วยการซ่อมบำรุงปกติ หรือบำรุงตามกำหนดเวลาได้เนื่องจากความเสียหายรุนแรงจนลึกไปถึงระดับโครงสร้างพื้นทางและรองพื้นทาง ดังนั้นลักษณะการซ่อมบำรุงทางที่มีความเสียหายรุนแรงขนาดนี้จึงต้องใช้วิธีที่สามารถซ่อมบำรุงถึงระดับโครงสร้างชั้นทางได้ซึ่งมีกิจกรรมบำรุงทางดังต่อไปนี้

- วิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) คือการซ่อมแซมถนนที่มีความเสียหายที่เกิดขึ้นในระดับชั้นพื้นทาง (Base Course) โดยนำวัสดุชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำไปใช้งานใหม่โดยการขุดลอกผิวทางเดิมถึงโครงสร้างชั้นพื้นทางที่มีความเสียหายและนำวัสดุเหล่านี้ไปปรับปรุงและเพิ่มเติมส่วนผสม เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แอสฟัลต์ และสารผสมเพิ่มอื่นๆ เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพแล้วจึงนำกลับมาใช้ใหม่ หลังจากนั้นจึงเสริมผิวแอสฟัลต์ทับอีกชั้นหนึ่ง เพื่อเป็นการซ่อมแซมความเสียหายในโครงสร้างชั้นทางให้กลับมามีสภาพดีดังเดิม วิธีการนี้เหมาะกับในกรณีที่ตำแหน่งความเสียหายอยู่ไกลจากแหล่งผลิตวัสดุก่อสร้างเพราะสามารถทำได้เองบริเวณหน้างาน

- วิธีการก่อสร้างใหม่ (Reconstruction) คือการซ่อมแซมถนนที่มีความเสียหายอย่างรุนแรงในโครงสร้างชั้นทางตั้งแต่ ชั้นรองพื้นทาง (Subbase Course) ชั้นดินคันทาง (Subgrade) โดยวิธีการซ่อมแซมแบบปกตินั้นไม่สามารถที่จะคืนสภาพโครงสร้างชั้นทางเหล่านี้ได้ และจะไม่สามารถยืดอายุสายทางออกไปได้จึงต้องบูรณะโดยขุดรื้อไล่ตั้งแต่ผิวทางไปจนถึงโครงสร้างชั้นทางที่เสียหาย จากนั้นจึงก่อสร้างถนนใหม่ เพื่อแทนที่ถนนเก่าที่มีความเสียหายอย่างหนัก

2.6 **ค่าใช้จ่ายและผลกระทบหลังการซ่อมบำรุง** (Cost and Road Work Effects)

การประเมินต้นทุนค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงทางในปัจจุบันจะไม่มีราคาต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ตายตัวเนื่องจากการประเมินต้นทุนค่าซ่อมบำรุงประกอบไปด้วยปัจจัยในหลายๆด้าน เช่น รูปแบบวิธีการซ่อมบำรุง ค่าแรงงาน ค่าเช่าอุปกรณ์หรือเครื่องจักร ปัจจัยเหล่านี้จะมีต้นทุนในการซ่อมบำรุงที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ภูมิภาคและสภาวะแวดล้อม ระยะทางของแหล่งวัสดุจนถึงบริเวณสายทาง อีกทั้งปัจจัยที่แปรผันตามสภาวะเศรษฐกิจของปีที่มีการซ่อมบำรุงทาง เช่น ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

กชกร โง้วศิริ และ วิศณุ ทรัพย์สมพล (2544) ได้รวบรวมข้อมูลจากกรมทางหลวงเพื่อวิเคราะห์แบบจำลองค่าใช้จ่าย ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติสามารถแบ่งประเภทของแบบจำลองค่าใช้จ่ายในงานซ่อมบำรุงได้ 4 ประเภท ได้แก่ งานซ่อมบำรุงปกติ งานฉาบผิวทาง งานเสริมผิวทาง และงานบูรณะ

การศึกษาผลกระทบหลังการซ่อมบำรุงพบว่า การซ่อมด้วยวิธีการฉาบผิวทาง การเสริมผิวทาง และการบูรณะโครงสร้างทางเป็นวิธีการซ่อมบำรุง ที่ส่งผลให้ค่าดัชนีความขรุขระสากลของผิวทาง (IRI) ลดลง เนื่องจากลักษณะการซ่อมจะซ่อมตลอดพื้นที่ผิวการจราจร ซึ่งผลการศึกษาของ NDIL (1995) พบว่าค่า IRI หลังการฉาบผิวทาง มีความสัมพันธ์กับ ค่า IRI ก่อนการฉาบผิว ความหนาในการฉาบผิว ซึ่งแบบจำลองการคำนวณแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1

$$IRI_a = IRI_b - MAX[0, MIN\{ a_0 \times (IRI_b - a_1), (a_2 \times Hsl)\}] \quad (2.1)$$

โดยที่ IRI_a = IRI หลังการฉาบผิวทาง (ม./กม.)

IRI_b = IRI ก่อนการฉาบผิวทาง (ม./กม.)

Hsl = ความหนาของการฉาบผิวทาง (มิลลิเมตร)

a_0 a_1 และ a_2 = ค่าคงที่ของสมการ มีค่าเท่ากับ 0.1 2.5 และ 0.03 ตามลำดับ

Odoki และ Henry (2000) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของค่า IRI หลังการเสริมผิวทางลาดยาง พบว่าความหนาในการเสริมผิวทางที่ต่างกันจะส่งผลให้ค่า IRI หลังการเสริมผิวทางต่างกัน และกรณีเสริมผิวทางลาดยางด้วยความหนาที่เท่ากัน เมื่อค่า IRI ก่อนการเสริมผิวทางต่างกันจะส่งผลให้ค่า IRI หลังการเสริมผิวทางแตกต่างกัน โดยแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.2

$$dIRI = max[0, 0.9\{min(a_1, IRI_b) - a_2\} + a_3 \times max\{0, (IRI_b - a_1)\}] \quad (2.2)$$

โดยที่ dIRI = ค่า IRI ที่ลดลงหลังการการเสริมผิวทาง (ม./กม.)

a_1 = $max[4, 2.1 \times e^{(0.019 \times HSNEW)}]$

a_2 = $1 + 0.018\ max[0, (100 - HSNEW)]$

a_3 = $min\{a_0, max[0.9, (0.01 \times HSNEW - 0.15)]\}$

IRI_b = ค่า IRI ก่อนการเสริมผิวทาง (ม./กม.)

HSNEW = ความหนาของการเสริมผิวทาง (ม./กม.)

2.7 การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง

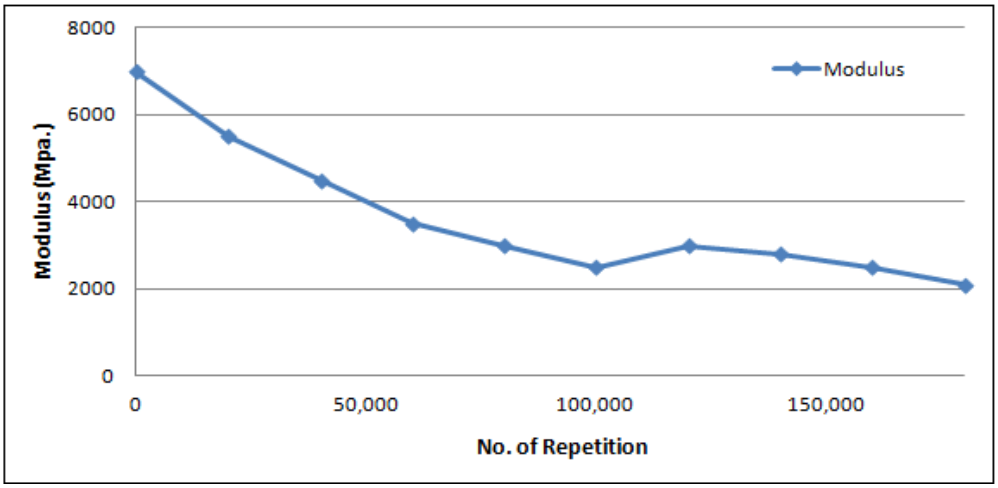
ในปัจจุบันการทดสอบแบบไม่ทำลายกำลังเป็นที่แพร่หลายอย่างมากเนื่องจากการทำงานที่สะดวกและรวดเร็วอีกทั้งผลการทดสอบที่ได้ก็เป็นที่น่าพอใจและยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในระยะยาว โดยเครื่องมือที่กำลังเป็นที่นิยมใช้กันก็คือเครื่องมือวัดค่าการแอ่นตัวแบบน้ำหนักตกกระแทก Falling Weight Deflectometer (FWD) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เพราะสามารถเก็บข้อมูลได้

อย่างรวดเร็วตอบสนองต่อจำนวนสายทางที่มีอยู่มากในการรับผิดชอบของแต่ละหน่วยงาน ปัจจุบันกรมทางหลวงได้ใช้เครื่องมือชนิดนี้ในการเก็บข้อมูลด้านความแข็งแรงของโครงสร้างโดยนำค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ (Deflection) ประกอบกับความหนาชั้นทาง และอุณหภูมิที่วัดได้ในบริเวณทดสอบ มาคำนวณย้อนกลับ (Back – Calculation) ด้วยโปรแกรม Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (ELMOD) เพื่อหาค่าอีลาสติกโมดูลัส (Modulus) ของชั้นทางแต่ละชั้น ซึ่งจะแสดงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างทางในแต่ละชั้น

Yeo et al. (2008) ได้ทดสอบ Accelerated Pavement Testing (APT) ในห้องปฏิบัติการโดยจำลองสถานการณ์โครงสร้างถนนและให้น้ำหนักบรรทุกซ้ำกลับไปกลับมาเพื่อศึกษาถึงลักษณะความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในถนนที่ได้รับน้ำหนักจากปริมาณการจราจรสะสมอย่างสม่ำเสมอในส่วนหนึ่งของงานวิจัยได้นำข้อมูลที่ได้ทดสอบหาค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD

รูปที่ 2.3 Dynatest Model 8000 (กรมทางหลวง)

ที่ติดตั้งไว้ภายในเครื่องจำลองการให้น้ำหนักบรรทุกโดยได้เก็บข้อมูลในแต่ละช่วงเวลาและจึงนำข้อมูลการแอ่นตัวมาวิเคราะห์ค่าอีลาสติกโมดูลัสด้วยการคำนวณแบบย้อนกลับ (Back - Calculation) ด้วยโปรแกรม EVERCAL เพื่อศึกษาพฤติกรรมของค่าอีลาสติกโมดูลัสต่อน้ำหนักกระทำซ้ำโดยพบว่าค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นผิวทางจะลดลงเมื่อมีการสะสมของน้ำหนักบรรทุกดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของค่าอีลาสติกโมดูลัสตลอดอายุการใช้งาน

2.7.1 **การคำนวณย้อนกลับ** (Back – Calculation)

Odemark (1949) เป็นผู้พัฒนาวิธีการนี้ขึ้นเพื่อหาค่าการแอ่นตัวที่ผิวทางสำหรับโครงสร้างทางหลายชั้นโดยมีสมมุติฐานว่า สำหรับโครงสร้างทางหลายชั้นที่มีค่าโมดูลัส E_i และความหนา h_i หลายค่านั้น สามารถแทนที่ได้ด้วยโครงสร้างทางชั้นเดียวเทียบเท่าที่มีความหนาเทียบเท่าเป็น H และมีค่าโมดูลัสเทียบเท่าเป็น E_0 ซึ่งเรียกว่าวิธี Equivalent layer methods โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3

$$H = \sum_{1-i}^{m} Ch_i \left(\frac{E_i}{E_0}\right)^{1/3} \qquad (2.3)$$

โดยที่ C = ค่าคงที่มีค่าประมาณ 0.8 ถึง 0.9

E_i = ค่าโมดูลัสในแต่ละชั้นของทางที่มีโครงสร้างหลายชั้น (psi)

E_0 = ค่าโมดูลัสเทียบเท่าของโครงสร้างทางหลายชั้น (psi)

h_i = ค่าความหนาโครงสร้างชั้นทาง (mm.)

การตั้งสมมุติฐานเช่นนี้สามารถนำไปใช้กับทฤษฎีของ Boussinesq ในการหาค่าความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และการเคลื่อนที่ (Displacement) ที่จุดกึ่งกลางชั้นสำหรับโครงสร้างทางแบบชั้นเดียว ซึ่งจะเหมือนกับที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางหลายชั้น ที่มีระยะตามแนวรัศมีเท่ากัน และที่ตำแหน่งความลึกที่สมมูลย์กัน ในการคำนวณวิธีนี้ได้ถูกพัฒนาเป็นสองแนวทางดังนี้

1) แนวทางที่เสนอโดย Ullidts (1987) ซึ่งมีการใช้คุณสมบัติด้านการเสียรูปแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear stress-strain relation) ในชั้น Subgrade การหาค่าร่องล้อ (Rutting) และอายุการเกิดการล้า (Fatigue Life) ของผิวทางจะใช้ค่าความเครียด (Strain) และค่าการแอ่นตัว (Deflection) ผลที่ได้จากวิธีการนี้พบว่าให้ค่าที่สมจริงรวมทั้งการวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสจะได้ค่าที่สมเหตุสมผลสำหรับโครงสร้างที่มีค่าสติฟเนสที่ลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น

2) แนวทางที่เสนอโดย Lytton (1979) ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยมีความซับซ้อนมากกว่าสมมุติฐานของ Odemark (1949) โดยเปลี่ยนโครงสร้างทางหลายชั้นให้เป็นโครงสร้างทางชั้นเดียวที่วางอยู่บนชั้นรองลักษณะไม่ยืดหยุ่น (Rigid) โดยแทนที่สมการจะอยู่ในรูปของ $(E_i / E_0)^{1/3}$ ค่าเลขยกกำลัง (n) จะหามาจากวิธี Nonlinear regression analysis โดยขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นที่มีความแข็งแรงมากกว่าด้านบน จากการศึกษาในการทำแปลงทดสอบ 22 แห่ง โดยใช้อุปกรณ์ Dynaflect วัดการแอ่นตัวที่ผิวทางและที่ระดับความลึกต่างๆแล้วจึงวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวเพื่อหาค่าโมดูลัสโดยการปรับปรุงสมการ ที่ใช้หาค่าการแอ่นตัวในแนวดิ่งข้อดีของวิธีนี้คือเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากสามารถใช้ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ในการวิเคราะห์ได้

2.7.2 **โปรแกรม** Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (ELMOD)

ด้วยการทดสอบจากเครื่องมือวัดค่าการแอ่นตัว ของกรมทางหลวงค่าการแอ่นตัวที่เก็บทดสอบจะถูกนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม ELMOD ด้วยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back – Calculation) ซึ่งโปรแกรม ELMOD สามารถคำนวณย้อนกลับได้ 2 แนวทางดังต่อไปนี้

1) Radius of Curvature เป็นการใช้ค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งศูนย์กลางประกอบกับรัศมีความโค้งของการแอ่นตัวภายใต้แรงกระทำมาใช้ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่า

โมดูลัสของชั้นทางต่างๆตั้งแต่ผิวทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง โดยในส่วนของค่าโมดูลัสของชั้นดินคันทางจะได้จากการปรับเทียบกับความเค้นที่ได้ โดยตรวจสอบกับค่าการแอ่นตัวนอกสุด

2) Deflection Basin Fit เป็นการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่วัดได้ กับค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการประมาณค่าโมดูลัสของแต่ละชั้นโดยการลองผิดลองถูก (Trial and Error) จนกว่าจะได้ค่าการแอ่นตัวที่มีค่าใกล้เคียงที่ยอมรับได้

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลค่าโมดูลัสที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธี Radius of Curvature ซึ่งเป็นแนวทางที่สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ใช้ในการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสในปัจจุบันตามคำแนะนำของผู้พัฒนาโปรแกรม ELMOD เนื่องจากสามารถคำนวณย้อนกลับได้รวดเร็วกว่าวิธี Deflection Basin Fit และให้ค่าโมดูลัสที่ยอมรับได้และมีวิธีการที่สัมพันธ์กับสภาพความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง

2.8 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทาง

โดยปกติแล้วชั้นผิวทางจะมีหน้าที่รับน้ำหนักจากยานพาหนะแล้วถ่ายลงสู่ชั้นทางด้านล่างไล่ไปตั้งแต่ชั้นพื้นทาง รองพื้นทาง และชั้นดินคันทาง โดยความสามารถในการรับน้ำหนักขึ้นอยู่กับหลายๆปัจจัย เช่น ชนิดของวัสดุซึ่งมีค่าความแข็งแรงตามคุณสมบัติของตัววัสดุที่ไม่เท่ากันแล้ว ยังรวมไปถึงลักษณะวิธีการก่อสร้าง และความหนาของโครงสร้างชั้นทางแต่ละชั้น โดยที่แต่ละชั้นทำหน้าที่รับน้ำหนักจากชั้นที่อยู่ด้านบนและกระจายลงสู่ชั้นที่อยู่ด้านล่าง โดยชั้นที่อยู่ด้านล่างความเข้มของแรง หรือความเค้น (Stress) ก็จะเบาบางลงไปตามการกระจายแรงที่ได้รับจากชั้นทางด้านบนตามลำดับ

Lekarp et al. (2000) ได้สรุปปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นพื้นทางไว้ 2 กลุ่มใหญ่ๆดังนี้

1) ผลกระทบจากการจราจร (Effect of Traffic)
    - ผลกระทบของแรงเค้นจากน้ำหนักบรรทุก (Effect of Stress)

- ผลกระทบของประวัติการรับน้ำหนักบรรทุก (Effect of Stress History and Number of Load Cycles)

2) ผลกระทบจากคุณสมบัติของวัสดุ (Effect of Material)

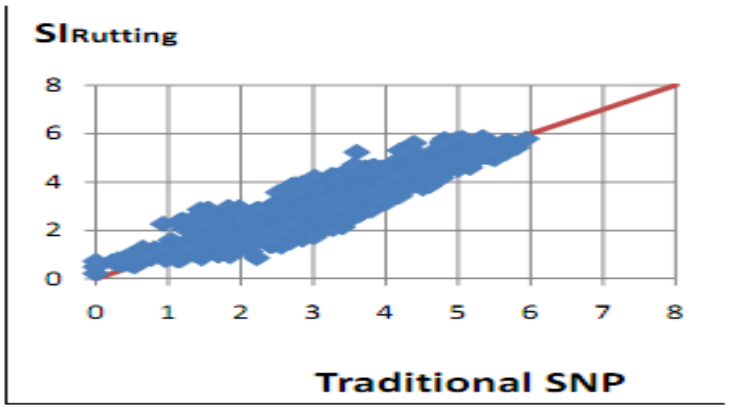
- ผลกระทบจากชนิดของวัสดุ (Effect of Aggregate Type and Particle Shape)
- ผลกระทบจากขนาดของวัสดุ (Effect of Grading, Fines Content)
- ผลกระทบจากความชื้น (Effect of Moisture Content)
- ผลกระทบจากความหนาแน่น (Effect of Density)

Attoh-Okine (1994) ได้ทดสอบถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นทางและวัสดุชั้นทางที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างทางโดยประมาณค่าอายุคงเหลือของสายทาง โดยนำเอาข้อมูลถนนของ Kansas Department of Transportation (KDOT) มาแบ่งกลุ่มตัวอย่างโดยแยกประเภทตามกลุ่มปริมาณการจราจร และวัสดุชั้นทางเพื่อเป็นกลุ่มตัวอย่างที่นำมาศึกษา โดยใช้การเก็บข้อมูลความหนาของโครงสร้างชั้นทางแบ่งออกเป็นสองวิธีคือ 1. เครื่องมือ Ground Penetrating Radar (GPR) และ 2.การเจาะสำรวจ (Core) และความหนาที่ได้จากกลุ่มสายทางตัวอย่างรวมถึงการทดสอบค่าการแอ่นตัวถูกนำไปคำนวณเพื่อตรวจสอบอายุคงเหลือของสายทาง และได้สรุปผลการทดสอบว่า อายุคงเหลือของสายทางจะแปรผันตามค่าความหนาที่ได้โดยไม่ว่าจะได้ผลการทดสอบความหนาด้วยวิธีใดก็ตาม ถ้าวิธีไหนให้ค่าความหนาชั้นทางที่มากกว่าผลการคำนวณอายุคงเหลือของสายทางก็จะมากกว่าผลการทดสอบความหนาอีกวิธีที่ให้ค่าความหนาชั้นทางที่น้อยกว่า

Hoffman (2003) ได้ศึกษาวิธีการหาค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางโดยใช้เครื่องมือการทดสอบวัดค่าการแอ่นตัว (Falling Weight Deflectometer) โดยการศึกษามีอยู่ขั้นตอนหนึ่งในการปรับแก้ค่าอุณหภูมิของค่าการแอ่นตัวที่ทดสอบได้เนื่องจากการทดสอบบริเวณสายทางเดียวกันตั้งแต่ช่วงเวลาเช้าไปจนถึงช่วงบ่ายนั้นพบว่าอุณหภูมิของผิวทางที่ความลึก 5 เซนติเมตรมีอุณหภูมิแตกต่างกันถึง 60 เปอร์เซ็นต์ และค่าการแอ่นตัวที่มากที่สุดมีความแตกต่างกันถึง 20 เปอร์เซ็นต์ จึงต้องมีการปรับแก้ค่าความแข็งแรงให้เป็นมาตรฐานเดียวกันในสายทางเดียวกัน โดย

อุณหภูมิมาตรฐานของแต่ละประเทศจะไม่เท่ากัน โดยกรมทางหลวงได้ใช้อุณหภูมิมาตรฐานสำหรับประเทศไทยที่ 35 องศาเซลเซียส

Stevens et al. (2009) ได้ศึกษาการปรับปรุงค่าความแข็งแรง Adjust Structural Number (SNP) เพื่อใช้ในระบบบริหารบำรุงทางของประเทศนิวซีแลนด์ โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ของความเสียหายบนผิวทางและค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงโครงสร้างทางอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ความเสียหายแบบร่องล้อ (Rutting) เนื่องจากเป็นลักษณะความเสียหายที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของชั้นดินคันทาง (Subgrade) ซึ่งมีระดับที่รุนแรงกว่าความเสียหายบนผิวทางโดยจากการทดสอบพบว่าความเสียหายแบบร่องล้อมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 รวมถึงรูปแบบความเสียหายอย่างอื่นที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างทางได้แก่ ความเสียหายแบบเฉือน หรือการเลื่อนตัวของผิวทาง และความเรียบของผิวทางที่สะท้อนออกมาในรูปแบบความเสียหายเช่น รอยแตกร้าวบนผิวทาง ถ้าได้รับน้ำฝนซึมลงไปก็อาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายในรูปแบบหลุมบ่อตามมาได้



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Structural Index Rutting และความแข็งแรงโครงสร้างทาง SNP (Stevens et al., 2009)

2.9 **การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน** (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA)

การวิเคราะห์ Life-Cycle Cost เป็นวิธีทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานซึ่งประกอบไปด้วย ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงทาง ตลอดจนค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทาง จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมอย่างหนึ่งสำหรับใช้ในการตัดสินใจด้านงานบำรุงทาง โดยช่วยให้ผู้มีอำนาจตัดสินใจสามารถพิจารณาแผนการซ่อมบำรุงในแต่ละทางเลือกได้ โดยการวิเคราะห์ Life Cycle Cost ของสายทาง แบ่งประเภทดัชนีทางด้านเศรษฐศาสตร์ดังนี้

- มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV)
- อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR)
- อัตราส่วนระหว่างผลตอบแทนต่อค่าใช้จ่าย (Benefit-Cost Ratio, B/C)
- ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period)

สำหรับการประยุกต์ดัชนีทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อใช้พิจารณาตัดสินใจเลือกโครงการซ่อมบำรุง โดยทั่วไปนิยมใช้ค่า NPV เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของสายทางและแสดงผลอยู่ในรูปของมูลค่าปัจจุบัน ซึ่งผู้วิเคราะห์สามารถใช้เปรียบเทียบแผนการลงทุน หรือใช้เปรียบเทียบในกรณีที่กำหนดอัตราผลตอบแทนในแต่ช่วงระยะเวลาต่างๆ แตกต่างกัน ในส่วนของการวิเคราะห์ค่า IRR เป็นการพิจารณาอัตราผลตอบแทนเพื่อพิจารณาความน่าสนใจในการลงทุน โดยเปรียบเทียบกับอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่กำหนดไว้ ซึ่งวิธีการนี้อาจจะไม่เหมาะในการใช้สำหรับเปรียบเทียบและคัดเลือกแผนการซ่อมบำรุง ส่วนการวิเคราะห์ค่า B/C เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุน ซึ่งเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการซ่อมบำรุงกรณีที่มีแผนงานซ่อมแตกต่างกัน ในส่วนของระยะเวลาในการวิเคราะห์สำหรับถนนส่วนใหญ่จะกำหนดให้อยู่ระหว่าง 20 - 25 ปี และนอกเหนือจากการใช้ค่า NPV แล้วยังสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของ Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC) เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนในเรื่องของระยะเวลาของแต่โครงการที่ไม่เท่ากัน

2.10 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทบทวนงานวิจัยในอดีตทั้งในประเทศและต่างประเทศถึงการศึกษาเกี่ยวกับดัชนีชี้วัดสภาพบริการของทางที่ใช้ในระบบบริหารบำรุงทาง เช่น ดัชนีสภาพทาง (PCI) ระดับสภาพบริการของทาง (PSR) ดัชนีสภาพบริการของทาง (PSI) และดัชนีความขรุขระสากล (IRI) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าดัชนีชี้วัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ได้มาจากการประเมินจากสภาพผิวทางเท่านั้น โดยปัจจุบันกรมทางหลวงได้นำเครื่องมือ FWD ซึ่งเป็นเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลายเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back – Calculation) จากนั้นศึกษาถึงเกณฑ์และแนวทางการซ่อมทางหลวงในปัจจุบัน ได้แก่ งานบำรุงปกติ (Routine) งานบำรุงตามกำหนดเวลา (Periodic Maintenance) งานบำรุงพิเศษและบูรณะ (Special Maintenance) ตลอดจนการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่างๆ ซึ่งแนวทางการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (LCCA) มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าในระดับโครงการ และเพื่อขจัดปัญหาในเรื่องของระยะเวลาหรืออายุการใช้งานที่ไม่เท่ากันในการเปรียบเทียบโดยแปลงให้อยู่ในรูปของ Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC) และจากการศึกษาถึงพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของทางและปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้แก่ จำนวนน้ำหนักเพลามาตรฐาน (ESAL) ความหนาชั้นทาง (Thickness) วัสดุโครงสร้างชั้นทาง (Material) อุณหภูมิ (Temperature) และความชื้น (Moisture Content) ประกอบกับปัจจุบันกรมทางหลวงได้มีการสำรวจสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางเป็นประจำทุกปี ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทาง โดยพิจารณาร่วมกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบริหารบำรุงทางโดยขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

แนวทางการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการพัฒนากรอบวิธีการวิเคราะห์หาแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมในระดับโครงการ โดยพิจารณาจากต้นทุนการซ่อมบำรุงตลอดอายุการใช้งานของสายทาง ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นทางในระบบบริหารบำรุงทาง และสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการคัดกรองสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางที่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายหนักที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้และช่วยในการวางแผนงานบำรุงทางในระดับโครงข่ายได้

3.1 การกำหนดดัชนีชี้วัดระดับการให้บริการสำหรับการวิเคราะห์

การกำหนดตัวแทนดัชนีชี้วัดระดับการให้บริการของโครงสร้างชั้นทางในงานวิจัยนี้ ได้เลือกค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง Elastic Modulus of Base Layer (E2) เป็นตัวแทนสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นพื้นทาง เนื่องจากเป็นดัชนีชี้วัดที่สามารถสะท้อนถึงค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางและมีเครื่องมือที่สามารถจัดเก็บข้อมูลอีกทั้งเป็นดัชนีที่ใช้ในการกำหนดค่าความแข็งแรงในการออกแบบงานทางซึ่งสอดคล้องกับหลักปฏิบัติของกรมทางหลวงอีกทั้งเป็นชั้นทางที่มีโครงสร้างอยู่ถัดจากชั้นผิวทางลงมา ดังนั้นในการเสื่อมสภาพของโครงสร้างในระดับชั้นพื้นทางจะส่งผลกระทบต่อเนื่องไปถึงชั้นผิวทางได้โดยตรง อีกทั้งยังเป็นดัชนีชี้วัดที่สามารถจัดเก็บได้ด้วยเครื่องมือ FWD และได้เลือกค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI) เป็นตัวแทนสภาพความเสียหายในระดับผิวทางโดยใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดแผนงานซ่อมบำรุง แบบเสริมผิวทาง และฉาบผิวทางในระบบบริหารบำรุงทาง ถึงแม้ค่า IRI จะมีความเหมาะสมหลายประการในการเลือกนำมาเป็นดัชนีตัวแทนสภาพการให้บริการของสายทาง แต่ค่า IRI ก็ยังคงมีข้อจำกัด คือ ไม่สะท้อนลักษณะและประเภทของความเสียหายของสายทางทั้งหมด ซึ่งการตัดสินใจเลือกวิธีการซ่อมบำรุงในระดับโครงการ (Project Level) จำเป็นต้องรู้ชนิดหรือประเภทความเสียหายอื่นๆ ประกอบด้วย โดยใน

งานวิจัยนี้ได้ใช้ค่า E2 ประกอบเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง ดังนั้นการเลือกค่าดัชนีเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์โดยใช้ค่า IRI เป็นเกณฑ์การซ่อมบำรุงตามปกติในระบบบริหารบำรุงทาง และใช้ค่า E2 ที่ได้จากแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นทาง วิเคราะห์อายุคงเหลือของสายทางและเป็นข้อมูลช่วยในการประกอบการตัดสินใจวางแผนงานซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง

3.2 แนวทางการวิเคราะห์ระดับความแข็งแรงที่ยอมรับได้ของโครงสร้างชั้นพื้นทาง

จากการศึกษาถึงพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นทาง รวมถึงลักษณะความเสียหายบนผิวทางที่สะท้อนถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในการสำรวจ พบว่าลักษณะความเสียหายแบบร่องล้อและแบบหลุมบ่อเป็นลักษณะของความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นโดยมีสาเหตุเริ่มต้นมาจากความเสียหายในระดับโครงสร้างชั้นพื้นทางก่อน จากนั้นจึงส่งผลกระทบต่อไปถึงชั้นผิวทาง และจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญของกรมทางหลวงถึงเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาคัดกรองสายทางที่คาดว่ามีความเสียหายในโครงสร้างชั้นพื้นทางที่พบโดยส่วนใหญ่มาจากประสบการณ์ โดยอ้างอิงข้อมูลจากการทดสอบ FWD ในการคัดกรองขั้นตอนแรกจะใช้พิจารณาจากค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งน้ำหนักศูนย์กลางของเครื่องมือ D_0 มีค่ามากกว่า 600 microns. แล้วจึงพิจารณาค่า E2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการคำนวณย้อนกลับว่ามีค่าต่ำกว่า 150 MPa. หรือไม่ ถ้าในตำแหน่งทดสอบใดมีค่าดังกล่าวเข้าเกณฑ์ทั้งสองก็จะออกสำรวจอย่างละเอียดอีกครั้งบริเวณหน้างานตามช่วงกิโลเมตรที่สนใจ โดยจะทดสอบโดยละเอียดบริเวณหน้างานด้วยวิธี Dynamic Cone Penetration (DCP) หรืออาจสุ่มเปิดหน้าผิวทางเพื่อตรวจสอบสภาพโครงสร้างชั้นพื้นทาง เป็นต้น ดังนั้นแนวทางในการวิเคราะห์ระดับการให้บริการโดยใช้ค่า E2 เป็นตัวแทนสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นพื้นทาง จะเริ่มจากการควบคุมตัวแปรในการสำรวจ จากนั้นคัดเลือกสายทางที่มีค่า E2 ในช่วงต่างๆ เพื่อสำรวจเก็บข้อมูลค่าความแข็งแรง และลำดับสุดท้ายเป็นการพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทางตามกลุ่มตัวอย่างที่ได้คัดเลือกและเก็บข้อมูลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบริหารบำรุงทาง โดยกรมทางหลวงได้เฉลี่ยค่าโมดูลัสของวัสดุงาน

ทางทั่วประเทศไทยเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ประกอบการตัดสินใจซ่อมบำรุงในปัจจุบันดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยโมดูลัสของวัสดุงานทางโดยทั่วไปของประเทศไทย (N.D. Lea ,1992)

Pavement Materials	Asphalt Grade/Cement Content	Elastic Modulus at 35°c (MPa.)
Asphalt Materials		
Surface Treatment	AC 60/70 or 80/100	0
	Cutback RC 3000 or	0
Cold Mixed Asphalt	800	0
Asphalt Concrete	Asphalt Emulsion	3000
AC surface on stabilized based layers	AC 25/35 or 40/70	2000
Unbound Granular Base		
Crushed rock base		250 – 650
Steel slag		300 – 400
Crushed gravel base		150 – 500
Natural gravel base		120 – 300
Cement-modified base		
Mod. Crushed rock	2%	200 – 400
Mod. Gravel	2%	150 – 300
Stabilized soil cement	4%	100 – 400
Stabilized laterite		300 – 600
Subbase Materials		
Sand		100 – 150
Clay		10 × CBR(%)

3.2.1 การควบคุมตัวแปรในการสำรวจ

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างทางเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องควบคุมสำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อค่าความแข็งแรงที่ยอมรับได้ของสภาพการให้บริการที่ได้จากการสำรวจด้วยเครื่องมือ FWD ได้แก่ น้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ วัสดุก่อสร้างชั้นทาง ความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์ อุณหภูมิขณะทดสอบ เครื่องมือและโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับรายละเอียดของการควบคุมตัวแปรในแต่ละค่ามีดังนี้

1. น้ำหนักที่ใช้ทดสอบสำหรับสายทางที่เป็นผิวทางลาดยางควบคุมที่กับ 707 kPa.
2. คุณสมบัติและวัสดุก่อสร้างของสายทางตัวอย่างจะคัดเลือกเฉพาะสายทางที่มีผิวทางเป็นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตและมีความหนาไม่เกิน 10 เซนติเมตร และวัสดุชั้นพื้นทางเป็นหินคลุกและมีความหนาอยู่ระหว่าง 200 – 250 เซนติเมตร ด้วยเหตุผลที่เป็นตัวแทนคุณสมบัติและวัสดุก่อสร้างของถนนลาดยางส่วนใหญ่ของกรมทางหลวง
3. เครื่องมือ FWD ที่ใช้สำรวจความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้ใช้เครื่องมือของกรมทางหลวงคือ Dynatest Model 8000 และใช้โปรแกรมคำนวณย้อนกลับที่เรียกว่า Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (ELMOD) ในการคำนวณค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นทาง
4. ธันวิน สวัสดิศานต์ และคณะ (2551) ได้วิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และพบว่าโครงสร้างชั้นพื้นทางที่เคยซ่อมบำรุงด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) จะส่งผลให้ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นทางมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นขอบเขตในงานวิจัยนี้จึงมีเฉพาะตัวอย่างที่ไม่เคยได้รับการซ่อมบำรุงด้วยวิธีหมุนเวียนวัสดุกลับมาใช้ใหม่โดยกำหนดค่าอีลาสติกโมดูลัสของสายทางที่นำมาเป็นตัวอย่างจะต้องมีค่าอีลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบในแต่ละชั้นทางไม่เกินค่าดังต่อไปนี้ สำหรับชั้นผิวทาง (E1) < 7,000 MPa. ชั้นพื้นทาง (E2) และรองพื้นทาง และ (E3) < 600 MPa. ตามลำดับ

5. อุณหภูมิขณะทดสอบจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงที่ได้จากการสำรวจ (Hoffman, 2003) ดังนั้นในการแปลงค่าอีลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการสำรวจทั้งหมดจะอ้างอิงอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยที่ 35 องศาเซลเซียส

3.2.2 **ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย**

งานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง โดยครอบคลุมปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นทางดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ปริมาณการจราจร ความหนาผิวทางแอสฟัลต์หรือความหนาในการเสริมผิวทาง คุณสมบัติและวัสดุในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทาง ประวัติการซ่อมบำรุง ค่าอีลาสติกโมดูลัสที่ได้จากการสำรวจด้วยเครื่องมือ FWD

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง เพื่อใช้ในการพยากรณ์อัตราการเสื่อมสภาพของชั้นพื้นทาง โดยพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่า E2 และปัจจัยที่ส่งผลกระทบ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ลักษณะของแบบจำลองพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของทางมีความแตกต่างกันตามสภาพของแหล่งข้อมูลที่มีความเหมาะสมจะนำไปใช้งาน ดังนั้นการคัดเลือกปัจจัยสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและพัฒนาแบบจำลอง จึงคัดเลือกปัจจัยซึ่งมีความเหมาะสมกับสภาพข้อมูลในประเทศไทย ที่มีการเก็บรวบรวมข้อมูลไว้อย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดความถูกต้องของข้อมูล สำหรับปัจจัยที่เหมาะสมกับข้อมูลในประเทศไทย และใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระต่างๆ ได้แก่ อายุการใช้งานผิวทาง อายุการใช้งานโครงสร้างทาง ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี ปริมาณรถบรรทุกหนัก โครงสร้างชั้นผิวทาง และชั้นพื้นทางเดิม ที่มีผลต่อค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (E2) ซึ่งกำหนดให้เป็นตัวแปรตาม รายละเอียดเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆมีดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลอายุการใช้งานของผิวทาง แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือประวัติการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทาง (Pavement Overlay) ประวัติการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง (Rehabilitation) รวมถึงปีที่เริ่มก่อสร้างสายทาง ข้อมูลดังกล่าวได้รวบรวมจากรายงานการบำรุงรักษาทางของแขวงการทางในพื้นที่สายทางที่รับผิดชอบ

2. ข้อมูลคุณสมบัติและวัสดุก่อสร้างชั้นผิวทางและพื้นทาง โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเฉพาะผิวทางชนิดลาดยาง และวัสดุพื้นทางเป็นหินคลุก โดยข้อมูลดังกล่าวทราบได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Borescope ประกอบกับข้อมูลประวัติการซ่อมบำรุงและแบบขออนุญาตก่อสร้างสายทาง
3. ข้อมูลปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (Average Annual Daily Traffic, AADT) เป็นข้อมูลที่ฝ่ายสถิติและสารสนเทศข้อมูล สำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวงได้เก็บข้อมูลปริมาณการจราจร โดยกำหนดประเภทตัวแทนยานพาหนะได้ดังนี้
    - จักรยานยนต์ และสามล้อเครื่อง (Motorcycle)
    - รถยนต์นั่งไม่เกิน 7 คน (Car $\leq$ 7 Person)
    - รถยนต์นั่งเกิน 7 คน (Car > 7 Person)
    - รถโดยสารขนาดเล็ก (Light Bus)
    - รถโดยสารขนาดกลาง (Medium Bus)
    - รถโดยสารขนาดใหญ่ (Heavy Bus)
    - รถบรรทุกขนาดเล็ก (4ล้อ) (Light Truck)
    - รถบรรทุกขนาด 2 เพลา (6ล้อ) (Medium Truck)
    - รถบรรทุกขนาด 3 เพลา (10ล้อ) (Heavy Truck)
    - รถบรรทุกพ่วง (มากกว่า 3 เพลา) (Full Trailer)
    - รถบรรทุกกึ่งพ่วง (มากกว่า 3 เพลา) (Semi Trailer)

ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวัน (Average Daily Traffic, ADT) หมายถึง ปริมาณการจราจรทั้งหมดในช่วงใดช่วงหนึ่งที่สำรวจ หารด้วยจำนวนวันที่สำรวจ

$$ADT = \frac{\text{ปริมาณการจราจรทั้งหมดที่สำรวจได้}}{\text{จำนวนวันที่สำรวจ}}$$

ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (Average Annual Daily Traffic, AADT) หมายถึง ผลรวมของปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวัน ที่สำรวจใน 1 ปี หารด้วยจำนวนครั้งที่สำรวจ

$$\text{AADT} = \frac{\text{ผลรวมของปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันที่สำรวจได้ในหนึ่งปี}}{\text{จำนวนครั้งที่สำรวจ}}$$

ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ยานยนต์หนัก (%HV) หมายถึง ผลรวมของรถหนักหารด้วยปริมาณการจราจรทั้งหมด

$$\%\text{HV} = \frac{\left(\text{รถโดยสาร } 6 \text{ ล้อขึ้นไป} + \text{รถบรรทุก } 6 \text{ ล้อ } 10 \text{ ล้อ รวมถึงรถพ่วง}\right) \times 100}{\text{ปริมาณการจราจรทั้งหมด}}$$

3.3 แนวทางการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของสายทาง

แบบจำลองที่นำมาพัฒนาสำหรับการวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน ได้แก่ แบบจำลองการเสื่อมสภาพของสายทาง (Deterioration Model) โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ แบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทาง และแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างพื้นทาง แบบจำลองผลกระทบจากการซ่อมบำรุง (Road Work Effect Model) และการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis) ซึ่งแบบจำลองทั้งหมดที่กล่าวมามีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกัน โดยเริ่มจากการเตรียมข้อมูลนำเข้าที่จำเป็นโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ ข้อมูลสายทาง ข้อมูลตัวแทนยานพาหนะ และข้อมูลมาตรฐานการซ่อมบำรุง จากนั้นเป็นการวิเคราะห์สภาพความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตของผิวทางและโครงสร้างพื้นทาง ซึ่งในส่วนของแบบจำลองการเสื่อมสภาพของสายทาง จะวิเคราะห์สภาพความขรุขระของผิวทาง (Roughness) โดยใช้ค่า IRI เป็นตัวแทน และวิเคราะห์สภาพความแข็งแรงของโครงสร้างพื้นทาง โดยใช้ค่า E2 เป็นตัวแทน เมื่อสามารถทำนายสภาพผิวทางและโครงสร้างพื้นทางได้แล้ว ลำดับต่อมาเป็นการเลือกวิธีการซ่อมบำรุง โดยใช้แบบจำลองผลกระทบจากการซ่อมบำรุงเป็นตัวกำหนดสภาพผิวทางหลังการซ่อมและ

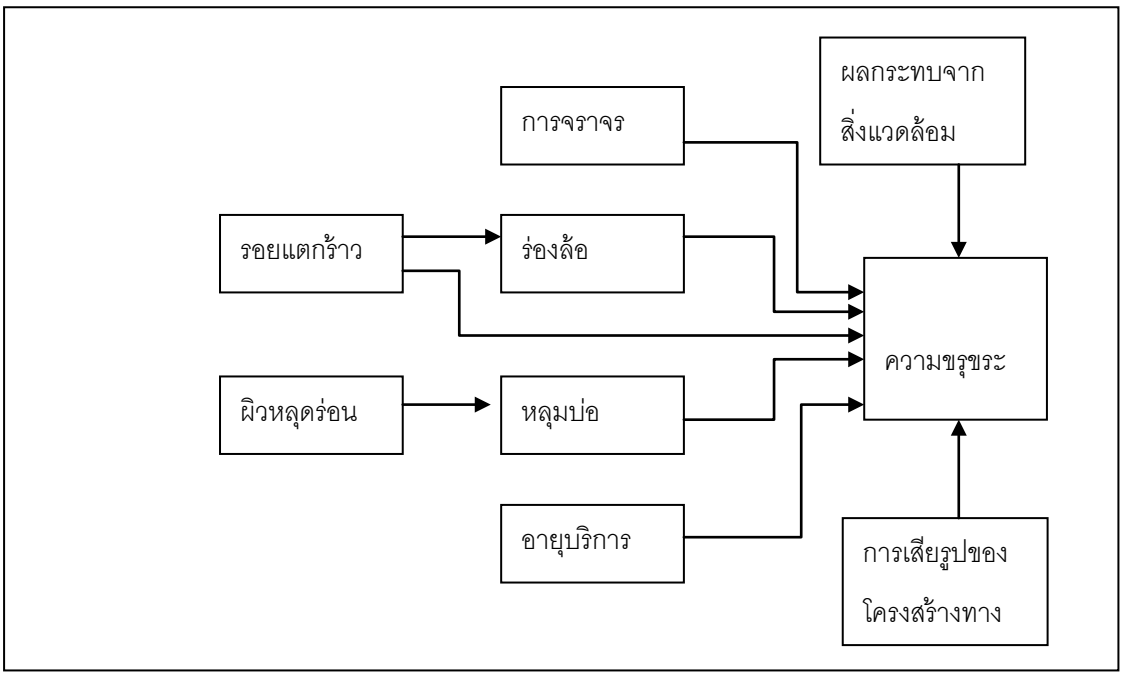
ค่าใช้จ่ายในการซ่อม โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบสองแนวทางการซ่อมบำรุงคือ 1) ซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทาง (Overlay) และ 2) ซ่อมบำรุงแบบบูรณะผิวทาง (Rehabilitation) โดยใช้แนวทางการพิจารณาต้นทุนค่าซ่อมบำรุงตลอดอายุการใช้งาน (LCCA) เพื่อสามารถวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนซ่อมบำรุงในแต่ละแนวทาง โดยไม่พิจารณาถึงผลประโยชน์ของผู้ใช้ทางเนื่องจากเป็นการเปรียบเทียบแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิว และบูรณะในระดับโครงการจะพิจารณาปีที่ซ่อมบำรุงปีเดียวกัน ดังนั้นการเริ่มต้นของค่า IRI หลังจากการซ่อมบำรุงจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งงานวิจัยนี้ตั้งสมมุติฐานให้มีค่าเท่ากันเมื่อนำค่า IRI ที่ได้ไปวิเคราะห์ถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทาง โดยดัชนีที่ใช้ชี้วัดความคุ้มค่าคือ ต้นทุนในการซ่อมบำรุงตลอดอายุการใช้งาน สำหรับเลือกแผนการซ่อมบำรุงที่ส่งผลให้เกิดค่าซ่อมบำรุงน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งานโดยคิดเฉลี่ยเป็นต้นทุนค่าซ่อมบำรุงต่อปี (Equivalent Uniform Annual Cost : EUAC) เพื่อเปรียบเทียบแนวทางการซ่อมบำรุงที่ทำให้อายุบริการของสายทางต่างกัน

3.3.1 แนวทางการเลือกแบบจำลอง

แนวทางการคัดเลือกแบบจำลองการเสื่อมสภาพของสายทาง เริ่มจากการทบทวนงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความเสียหายของทาง เช่น สภาพโครงสร้างของสายทาง สภาพผิวทางในระยะเริ่มต้น ปริมาณการจราจร สภาพสิ่งแวดล้อม และปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการเสื่อมสภาพ เป็นต้น ซึ่งการนำแบบจำลองมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ พิจารณาจากความเหมาะสมและความเพียงพอของปริมาณข้อมูลต่างๆ ที่มีการเก็บสำรวจรวบรวมของหน่วยงานในประเทศไทย เนื่องจากปริมาณของข้อมูลมีผลต่อการเลือกรูปแบบของสมการทางสถิติและความน่าจะเป็นที่เหมาะสม

จากการศึกษาแบบจำลองการเสื่อมสภาพและผลกระทบหลังการซ่อมบำรุงสายทาง (Road Deterioration and Work Effects) ของ HDM-4 พบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีความขรุขระสากล มีหลายปัจจัยประกอบไปด้วย ปริมาณจราจร สภาพแวดล้อม อายุและค่าการยุบตัวของโครงสร้างทาง นอกจากนั้นความแตกต่างของสภาพความเสียหายที่ต่างกัน เช่น ปริมาณรอยแตกร้าว ปริมาณผิวทางหลุดร่อน จำนวนหลุมบ่อ ตลอดจนค่าความลึกของร่องล้อ ที่แตกต่างกันย่อมส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า IRI แตกต่างกันด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.1

จากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่า IRI ที่กล่าวข้างต้น หากนำปัจจัยทุกประเภทมาร่วมวิเคราะห์ทำนายค่า IRI อาจจะไม่เหมาะสม เนื่องจากปริมาณข้อมูลความเสียหายในแต่ละประเภทของหน่วยงานทางในประเทศไทยยังมีไม่เพียงพอ และในแต่ละองค์ประกอบของอัตราการเปลี่ยนแปลงความขรุขระต่างๆ มีแบบจำลองย่อยในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นแนวทางการ



รูปที่ 3.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระของผิวทาง

เลือกแบบจำลองสภาพความเสียหายของสายทาง จึงได้เลือกแบบจำลองของ Rodrigo (2008) ซึ่งได้ปรับแก้แบบจำลองสภาพความเสียหายของ HDM-4 ให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย โดยพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่า IRI อย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อายุผิวทาง ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทาง ค่า IRI ก่อนการเริ่มต้นวิเคราะห์ และสภาพแวดล้อมของสายทาง ซึ่งความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ แสดงดังสมการที่ 3.1

$$dIRI = K_{gp} \times (a_0 \times Exp(K_{gm} \times m \times AGE) \times [(1 + SNC \times a_1)]^{-5} \times YE4 + a_2 \times AGE) + (K_{gm} \times m \times IRI_b) \quad (3.1)$$

โดย dIRI = อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า IRI ในปีที่วิเคราะห์ (ม./กม.)

AGE = อายุสายทางตั้งแต่มีการเสริมผิว การบูรณะ หรือก่อสร้างใหม่ (ปี)

IRI_b = ค่าความขรุขระสากลเริ่มต้น (ม./กม.)

m = ค่าสัมประสิทธิ์ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม ดังตารางที่ 3.2

a_0 = 134 เป็นค่าคงที่ของสมการ

a_1 = 0.755 เป็นค่าคงที่ของสมการ

a_2 = 0.0121 เป็นค่าคงที่ของสมการ

SNC = ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางตั้งแต่มีการก่อสร้าง การเสริมผิวทาง การบูรณะ หรือการก่อสร้างใหม่ครั้งล่าสุด

YE4 = จำนวนเพลามาตรฐาน (ล้านเพลา / ช่องจราจร / ปี)

K_{gp} = ค่าปรับแก้อัตราการเสื่อมสภาพของความขรุขระผิวทาง

K_{gm} = ค่าปรับแก้ของค่าสัมประสิทธิ์ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม, (m)

ระดับความชื้น	ระดับอุณหภูมิ				
	Tropical	Sub-tropical Hot	Sub-tropical cool	Temperate cool	Temperate Freeze
Arid	0.005	0.010	0.015	0.020	0.030
Semi-Arid	0.010	0.015	0.020	0.030	0.040
Sub-Humid	0.020	0.025	0.030	0.040	0.050
Humid	0.025	0.030	0.040	0.050	0.060
Pre-Humid	0.030	0.040	0.050		

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลค่าการแอ่นตัวจากการวัดด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam หรือ Falling Weight Deflectometer ให้พิจารณาใช้ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างตามโครงสร้างชั้น

ทางจากการออกแบบเพื่อให้สามารถรองรับน้ำหนักจากปริมาณการจราจรได้ โดยจำแนกตามปริมาณการจราจรดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าความแข็งแรงโครงสร้างคาดการณ์จากประเภทชั้นทาง

ประเภทชั้นทาง	AADT	ความหนาผิวทาง (cm.)	ความหนาพื้นทาง (cm.)	ความหนารองพื้นทาง (cm.)	ความหนาชั้นดินเดิม (cm.)	SNC
พิเศษ	> 10,000	10	30	30	30	6.38
1	5,000 - 10,000	10	25	30	30	5.49
2	2,000 – 5,000	10	20	30	30	5.04
3	1,000 – 2,500	5	25	30	30	4.55
4	$\leq$ 1,000	5	20	30	30	3.50

และในส่วนของแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง ในงานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลสายทางที่มีผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และคัดเลือกตามขอบเขตดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นของงานวิจัย ซึ่งได้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 79 ตัวอย่างมาจาก 26 สายทาง ซึ่งผลการทดสอบในแต่ละตัวอย่างเป็นค่าเฉลี่ยในระยะทางรวม 1 กิโลเมตรจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ต่อเนื่องทุกๆ 200 เมตร และพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง E2 และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่า E2 อย่างมีนัยสำคัญที่ได้จากการศึกษางานวิจัยในอดีต ได้แก่ จำนวนเพลามาตรฐานสะสม (NE4) มีหน่วยเป็นล้านเพลา/ช่องจราจร และ ความหนาชั้นผิวทาง (AC Thickness) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

3.3.2 แนวทางการเลือกแบบจำลองผลกระทบหลังการซ่อมบำรุง

โดยทั่วไปการซ่อมบำรุงสายทางจะส่งผลให้ค่า IRI ของสายทางลดลง เนื่องจากวิธีการซ่อมส่วนใหญ่เป็นการปรับปรุงสภาพผิวทางให้เรียบและดีขึ้น ซึ่งแนวทางการเลือกแบบจำลองที่ส่งผลกระทบหลังการซ่อมบำรุงได้พิจารณาเฉพาะวิธีการซ่อมบำรุงที่ส่งผลให้ IRI ของสายทาง

ลดลงอย่างมีนัยสำคัญหรือเป็นการปรับสภาพผิวทางใหม่ โดยไม่นำวิธีการซ่อมที่ส่งผลให้มีการปรับค่าเริ่มต้นของอายุสายทางมาร่วมพิจารณา เนื่องจากขอบเขตของระยะเวลาในการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายต่างๆ พิจารณาเพียงหนึ่งรอบของอายุการใช้บริการของสายทาง ซึ่งโดยทั่วไปมีระยะเวลาประมาณ 20-25 ปี ดังนั้นแบบจำลองที่เลือกนำมาร่วมในการวิเคราะห์ได้แก่ แบบจำลองผลกระทบหลังการฉาบผิวทางลาดยาง (Sealing) และการเสริมผิวทางลาดยาง (Overlay) สำหรับในส่วนของแบบจำลองสภาพสายทางหลังการบูรณะสายทาง (Rehabilitation) ไม่นำมาร่วมพิจารณา เนื่องจากหลังการบูรณะสายทางมีผลต่อการปรับค่าเริ่มต้นของอายุการใช้งาน โดยแต่ละประเทศจะมีเกณฑ์ค่า IRI หลังการบูรณะที่ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับการควบคุมมาตรฐานการก่อสร้างและวัตถุประสงค์ตามแต่ละยุทธศาสตร์สายทาง

แบบจำลองผลกระทบหลังการฉาบผิวทางในงานวิจัยนี้อ้างอิงแบบจำลองของ NDLI (1995) ตามที่ได้กล่าวในบทที่ 2 และเมื่อวิเคราะห์แบบจำลอง โดยกำหนดให้ความหนาในการฉาบผิวทางเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความหนาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน (กรมทางหลวง, 2551) ผลลัพธ์ที่ได้คือ IRI ก่อนการฉาบผิวทางมีค่าต่ำกว่า 2.0 เมตร/กิโลเมตร การฉาบผิวทางจะไม่ส่งผลให้ค่า IRI ลดลง กรณีที่ก่อนฉาบผิวทางค่า IRI อยู่ในช่วงตั้งแต่ 2.0-5.0 หลังจากการฉาบผิวทางแล้วค่า IRI จะลดลง โดยค่า IRI ที่ลดลงจะแปรผันตามค่า IRI ก่อนการฉาบผิวทาง และกรณีที่ก่อนฉาบผิวทางมีค่า IRI ตั้งแต่ 5.00 เมตร/กิโลเมตร ขึ้นไป การฉาบผิวทางจะส่งผลให้ค่า IRI ลดลงได้มากที่สุด 0.9 เมตร/กิโลเมตร

สำหรับแบบจำลองผลกระทบหลังการเสริมผิวทางได้อ้างอิงแบบจำลองของ Odoki และ Henry (2000) โดยข้อมูลที่ต้องใช้ในสมการนี้คือ ค่า IRI ก่อนการเสริมผิวทาง (IRI_b) ความหนาของการเสริมผิวทาง (HSNEW) ส่วนผลลัพธ์ที่ได้จากสมการนี้คือค่า IRI ที่ลดลงหลังการการเสริมผิวทาง (ΔRI_a) จากการทดสอบแบบจำลองด้วยการแทนค่า IRI ก่อนการเสริมผิวทาง ตั้งแต่ 3.0 เมตร/กิโลเมตร ไปจนถึง 9.0 เมตร/กิโลเมตร พบว่าได้การลดของค่า IRI หลังการเสริมผิวทางด้วยความหนา 50 มิลลิเมตร อยู่ในช่วง 0.99 - 4.43 เมตร/กิโลเมตร และการลดของค่า IRI หลังการเสริมผิวทางด้วยความหนา 100 มิลลิเมตร อยู่ในช่วง 1.8 - 7.2 เมตร/กิโลเมตร

ทั้งนี้แบบจำลองที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นได้อ้างอิงมาจากระบบบริหารบำรุงทางของกรมทางหลวงในปัจจุบันซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีการพัฒนาให้เหมาะสมกับสภาพถนนในประเทศไทยและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางเข้ากับระบบบริหารบำรุงทางในประเทศไทยอีกด้วย

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นพื้นทาง

เป็นการวิเคราะห์ด้วยการนำข้อมูลอายุการใช้งานของสายทาง ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี ปริมาณรถบรรทุกหนัก โครงสร้างชั้นพื้นทางเดิม และความหนาของชั้นผิวทางแอสฟัลต์ มาคำนวณปริมาณเพลาสะสม (NE4) ที่กระทำตั้งแต่เริ่มเปิดใช้ถนนหรือการบูรณะครั้งล่าสุด เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (E2) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ของกรมทางหลวง เพื่อพิสูจน์ว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างทาง ซึ่งนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองในขั้นตอนต่อไป การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของพื้นทาง จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง และการทดสอบแบบจำลอง

เพื่อเป็นการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างจากจำนวนประชากรทั้งหมดในกรณีที่มีการนำเข้าข้อมูลตัวอย่างที่อาจจะมีการแจกแจงแบบปกติ หรือไม่มีการแจกแจงแบบปกติ ไปทดสอบทางสถิติอิงพารามิเตอร์ เช่น การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ การวิเคราะห์ความถดถอย สามารถตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของข้อมูลตัวอย่างที่นำมาทดสอบโดยอาศัยการทดสอบความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างของข้อมูลที่สามารถนับได้ (Finite Population) ในส่วนของงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดขอบเขตของตัวอย่างที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือ FWD ที่มีความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบสูงในสายทางที่มีการบูรณะโครงสร้างแบบหมุนเวียนวัสดุ (ธันวิน สวัสดิศานต์ และคณะ, 2551) รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างชั้นผิวทางและพื้นทาง จึงเป็นสาเหตุให้จำนวนข้อมูลของประชากรทั้งหมดไม่สามารถทราบได้อย่างแน่ชัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงอาศัยการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

ตัวอย่างที่นำมาทดสอบซึ่งรายละเอียดของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.4, 3.5, 3.6 และ 3.7

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนจำนวนข้อมูลของความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์

ความหนาชั้นผิวทาง (เซนติเมตร)	น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร (%)	มากกว่า 50 มิลลิเมตร (%)
สัดส่วน	25	75

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนจำนวนข้อมูลของอายุสายทาง

อายุสายทาง (ปี)	1-3 (%)	4-7 (%)	>7 (%)
สัดส่วน	39	38	23

ตารางที่ 3.6 สัดส่วนจำนวนข้อมูลของปริมาณการจราจร

ปริมาณการจราจร (คัน / วัน / ปี)	< 5,000 (%)	5,000 – 10,000 (%)	10,000 – 20,000 (%)	>20,000 (%)
สัดส่วน	20	25	39	16

ตารางที่ 3.7 สัดส่วนจำนวนข้อมูลของปริมาณรถบรรทุกหนัก

ปริมาณรถบรรทุก (%)	1-10 (%)	11-20 (%)	21-30 (%)	31-40 (%)	>40 (%)
สัดส่วน	7	11	33	43	6

โดยการทดสอบความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างของข้อมูลที่ไม่สามารถนับได้ (Infinite Population) ซึ่งการวิเคราะห์ดังสมการที่ 3.2

.

$$n = [P \times (1-P) \times Z^2] / d^2 \quad (3.2)$$

โดยที่ n = จำนวนข้อมูลของการสุ่มตัวอย่าง

d = ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่าง

P = เปอร์เซ็นต์ที่ต้องการสุ่มจากประชากร

Z = สัดส่วนความเชื่อมั่นที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ

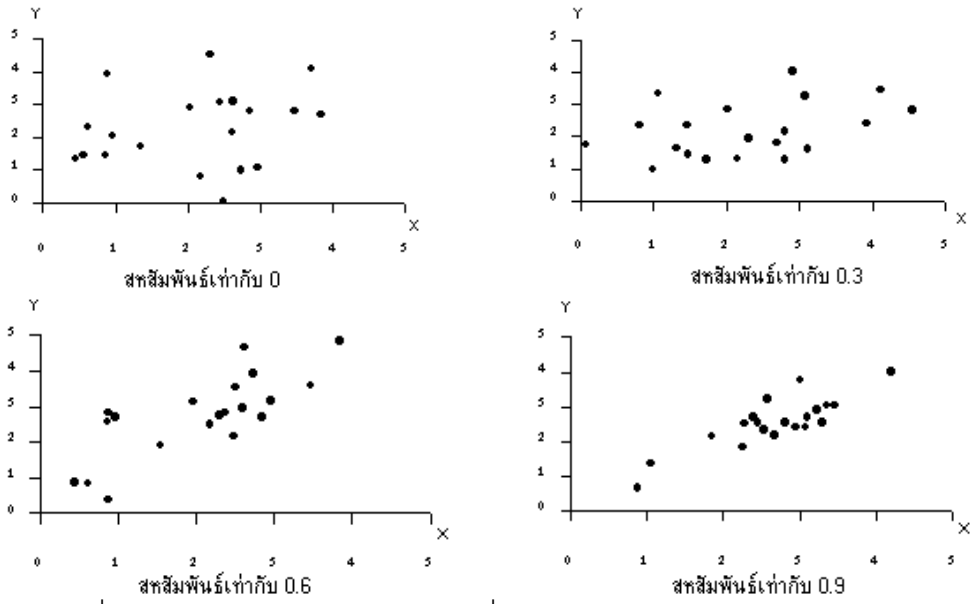
3.5 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เป็นค่าชี้วัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีการเกาะกลุ่มของจุดรอบๆ แนวเส้นตรงใกล้ชิดหรือกระจายห่างออกจากเส้นตรง และบอกถึงระดับความสัมพันธ์ว่ามากหรือน้อย เช่น

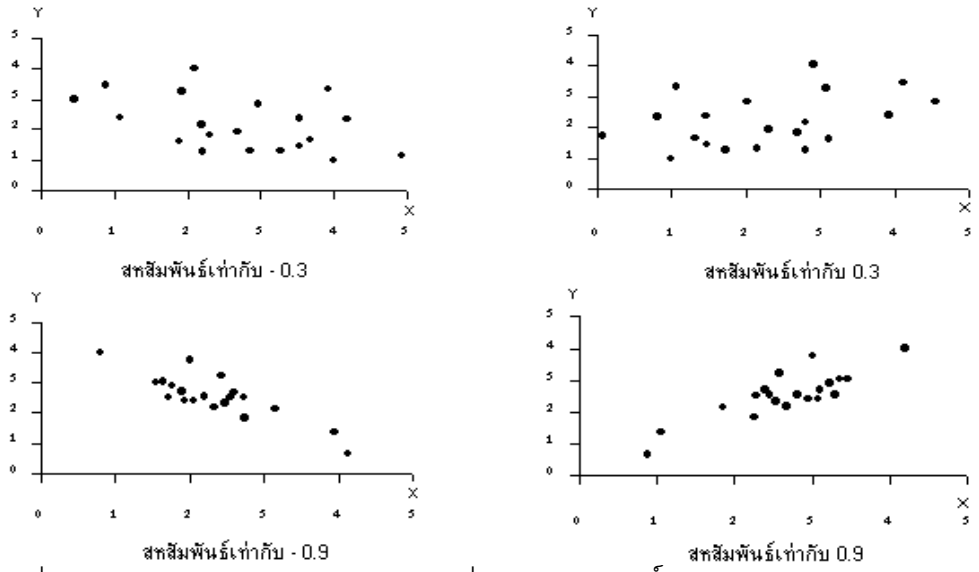
- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0 การกระจายของจุดกระจัดกระจายไม่เกาะกลุ่มรอบเส้นตรง แม้ทราบค่าตัวแปร x ก็ไม่ช่วยให้ทราบค่าตัวแปร y เพราะตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันในรูปแบบเส้นตรง
- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ประมาณ 0.3 การกระจายของจุดเกาะกลุ่มเริ่มเห็นรูปแบบของเส้นตรงบ้างเล็กน้อย ค่าตัวแปร x และค่าตัวแปร y มีความสัมพันธ์กันอย่างอ่อนๆ
- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ประมาณ 0.6 การกระจายของจุดเกาะกลุ่มเห็นรูปแบบของเส้นตรงชัดเจนมากขึ้น ค่าตัวแปร x และค่าตัวแปร y มีความสัมพันธ์กันมากขึ้น
- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 การกระจายของจุดเกาะกลุ่มแน่นขึ้นในแนวเส้นตรง ยิ่งค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้นเท่าใด ความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรก็ยิ่งมากขึ้น

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าไม่เกิน 1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่าเท่ากับ 1 เรียกว่า สหสัมพันธ์อย่างสมบูรณ์ โดยจุดทั้งหมดจะตกลงบนแนวเส้นตรงพอดี ตัวแปรจึงมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงอย่างแท้จริง คือถ้าทราบค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งก็สามารถทำนายค่าตัวแปรอีกตัวหนึ่งได้อย่างถูกต้อง ตัวอย่างการกระจายของข้อมูลดังแสดงรูปที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่กล่าวมาเป็นค่าที่บอกระดับความสัมพันธ์ในทางบวก เมื่อค่าตัวแปร x เพิ่มขึ้นค่าตัวแปร y จะเพิ่มขึ้นและเมื่อค่าตัวแปร x ลดลงค่าตัวแปร y จะลดลง แต่ตัวแปรอาจมีความสัมพันธ์ในเชิงลบได้ กล่าวคือเมื่อค่าตัวแปร x เพิ่มขึ้นค่าตัวแปร y จะลดลง และค่าตัวแปร x ลดลงค่าตัวแปร y จะเพิ่มขึ้น

ความสัมพันธ์ทางลบจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เป็นลบ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เข้าใกล้ -1 จุดจะเกาะกลุ่มกันแน่นเป็นแนวเส้นตรงในแผนภาพการกระจาย โดยเส้นตรงนั้นเป็นเส้นตรงที่ลาดลงจากมุมบนซ้ายไปยังมุมล่างขวา คือถ้าเส้นตรงชัดสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าเป็นบวก และถ้าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ลาดลงจะมีความสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าเป็นลบ หากจุดทุกลงตกลงบนเส้นตรงที่ลาดลง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น -1 นั้นคือ ตัวแปรมีความสัมพันธ์เป็นลบอย่างสมบูรณ์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เล็กน้อยทางลบ ก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ใกล้ศูนย์ทางลบ เช่น -0.3 แสดงดังรูปที่ 3.3

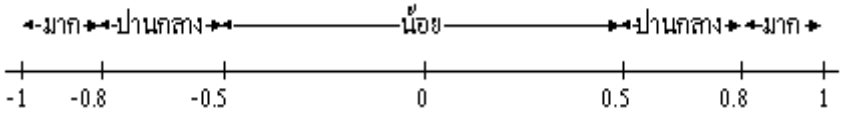


รูปที่ 3.2 การกระจายของข้อมูล 4 ชุดที่มีค่ากลางและการกระจายเหมือนกัน แต่ละความสัมพันธ์แตกต่างกัน (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2550)



รูปที่ 3.3 แผนภาพการกระจายของข้อมูลที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นบวกและลบ (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2550)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าระหว่าง 1 และ -1 เสมอ และเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย ขนาดของค่าบอกถึงระดับความสัมพันธ์ว่าสูงหรือต่ำเพียงใด โดยที่ขนาดของค่าไม่ขึ้นกับหน่วยวัดของตัวแปร โดยรูปที่ 3.4 แสดงการแบ่งช่วงของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่บอกความสัมพันธ์ระดับต่างๆ เครื่องหมายของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บอกทิศทางความสัมพันธ์กัน ซึ่งค่าเป็นบวกเมื่อตัวแปรหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นอีกตัวแปรก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และค่าเป็นลบเมื่อตัวแปรหนึ่งมีค่าลดลดลงและตัวแปรอีกตัวแปรหนึ่งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.4 ระดับความสัมพันธ์สำหรับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2550)

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง ดังนั้นจึงตรวจสอบปัจจัยต่างๆ เช่น อายุการใช้งานของทาง ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี ปริมาณรถบรรทุกหนัก ประเภทโครงสร้างชั้นพื้นทางเดิม ที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของชั้นพื้นทาง โดยวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้ในการ

วิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ ได้แก่ ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง กับปัจจัยต่างๆดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ใช้โปรแกรม Statistical Pack for the Social Sciences, SPSS เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และเลือกใช้การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยวิธี Pearson Correlation ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นของตัวแปร 2 ตัวที่ไม่คำนึงถึงตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้อง โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยวิธี Pearson Correlation ต้องมีการแจกแจงแบบปกติดังกล่าวมาแล้วข้างต้น การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางและปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าอีลาสติกโมดูลัส โดยปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณเพลามาตรฐานสะสม (Number of Standard Axel Load, NE4) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สะท้อนจากการคำนวณร่วมกันของหลายๆปัจจัยระหว่างปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (AADT) ปริมาณรถบรรทุกหนัก (HV) และ อายุการบริการของทาง (AGE)

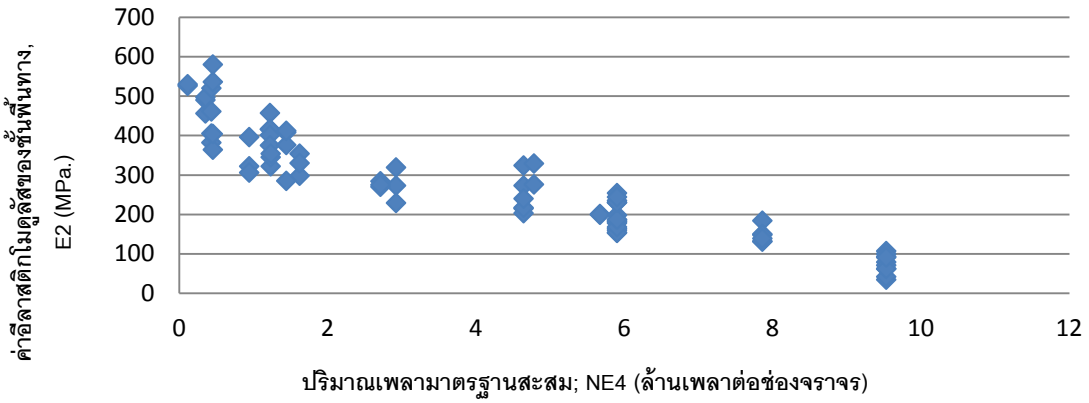
3.6 การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง

การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทางโดยอาศัยข้อมูลค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง ซึ่งเก็บรวบรวมโดยกรมทางหลวง จากการทดสอบทุกๆ 200 เมตร จำนวนทั้งสิ้น 395 ข้อมูล จากจำนวน 26 สายทางมาเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่างละ 1 กิโลเมตรได้จำนวนทั้งสิ้น 79 ตัวอย่าง โดยข้อมูลถนนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จะต้องไม่เคยมีประวัติการซ่อมบำรุงแบบวิธีการหมุนเวียนวัสดุโดยสามารถตรวจสอบได้จากการคัดกรองตามขอบเขตของงานวิจัยดังตารางที่ 3.8 ซึ่งข้อจำกัดดังกล่าวทำให้ไม่สามารถทราบถึงข้อมูลจำนวนประชากรทั้งหมด ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์ข้อมูลจำเป็นอย่างยิ่งต้องมีการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างของข้อมูลเช่นเดียวกับการพัฒนาแบบจำลอง โดยอาศัยการวิเคราะห์ดังสมการที่ 3.2 จากข้อมูลค่าอีลาสติกโมดูลัสของโครงสร้างชั้นพื้นทางซึ่งจัดเก็บโดยกรมทางหลวงพบข้อมูลของค่าการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างทางที่ตรงกับสมมุติฐานของ

งานวิจัยจำนวน 79 ตัวอย่าง (กิโลเมตร) พบว่ามีความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มตัวอย่างร้อยละ 4.8 หรือมีระดับความเชื่อมั่นของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับร้อยละ 95.2 จากการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และในส่วนของการวิเคราะห์ได้สร้างแผนภูมิความสัมพันธ์แบบกระจายตัวระหว่างตัวแปร 2 ตัวได้แก่แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางและปริมาณเพลามาตรฐานสะสมดังแสดงในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.8 ขอบเขตและข้อจำกัดในการคัดเลือกข้อมูลตัวอย่างในการวิเคราะห์

วัสดุ	ชั้นผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีต	ชั้นพื้นทาง หินคลุก	ชั้นรองพื้นทาง กรวด, ทราย
ความหนา (มิลลิเมตร)	0-100	200 – 250	200 - 300
ค่าอีลาสติกโมดูลัส (MPa.)	< 7000	< 600	< 600



รูปที่ 3.5 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติกโมดูลัสของโครงสร้างชั้นพื้นทางและปริมาณเพลามาตรฐานสะสมตลอดอายุการใช้งาน

ขั้นตอนในการตรวจสอบว่าข้อมูลค่า E2 และปัจจัยต่างๆ มีความสัมพันธ์กันโดยการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เลือกใช้การวิเคราะห์โดยวิธี Pearson Correlation สำหรับจำนวนตัวอย่างจำนวนทั้งสิ้น 79 ตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.9 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson Correlation) ระหว่าง E2 กับค่าปริมาณเพลามาตรฐานสะสม (NE4) และความหนาชั้น

ผิวทางแอสฟัลต์ (HSOLD) เท่ากับ 0.894 และ 0.431 ตามลำดับซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปริมาณเพลามาตรฐานสะสม (NE4) และความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์ (HSOLD) เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (E2) โดยที่ปัจจัยของความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์ (HSOLD) มีความสัมพันธ์กับค่า E2 อย่างอ่อนๆ เนื่องจากข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ได้มีการกำหนดขอบเขตของความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์ที่ไม่เกิน 100 มิลลิเมตร จึงทำให้ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์กระจายตัวอยู่ไม่ชัดเจน

ตาราง 3.9 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆกับค่า E2

ข้อมูล	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์	
	Pearson Correlation	N
NE4 (ล้านเพลา/ช่องจราจร)	-.894	79
HSOLD (มิลลิเมตร)	.408	79

ภายหลังการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมาพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง โดยข้อมูลที่นำไปวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุต้องมีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นพบว่า ปัจจัยที่สามารถนำมาวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุได้แก่ ปริมาณเพลามาตรฐานสะสมและความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์

ดังนั้นในการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุกำหนดให้ตัวแปรตามคือค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง และตัวแปรอิสระ ได้แก่ ปริมาณเพลามาตรฐานสะสมและความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยในอดีต (Yeo et al., 2008) พบว่าปัจจัยทั้งสองมีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นทางในอนาคตรูปแบบของฟังก์ชั่นเอกซ์โพเนนเชียล และสอดคล้องกับข้อมูลตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จากการเก็บสำรวจโดยกรมทางหลวงดังแสดงในรูปที่ 3.5 ข้างต้น ดังนั้นจึงจัดรูปแบบของแบบจำลองตามฟังก์ชั่นดังกล่าว ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$E2 = \left[x_1 \times e^{(-x_2 \times (NE4 \div HSOLD))}\right] + x_3 \quad (3.3)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ x_1, x_2, และ x_3 จากสมการที่ 3.3 ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ ซึ่งผลการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุแสดงดังตารางที่ 3.10

จากตารางที่ 3.10 ค่า x_1 x_2 และ x_3 คือ สัมประสิทธิ์ความถดถอยในแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง ซึ่งแบบจำลองมีขอบเขตล่างของค่า E2 เท่ากับ 118 MPa. ดังสัมประสิทธิ์ x_3 และขอบเขตบนมีค่าเท่ากับ 495 MPa. และค่าระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตามซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.790 โดยเมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์ ค่า x_1 x_2 และ x_3 จะได้แบบจำลองดังสมการที่ 3.4

ตารางที่ 3.10 ผลการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง

Parameter	Estimate	R^2	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
x_1	376.921	0.790	23.524	330.069	423.773
x_2	23.177		4.458	14.298	32.057
x_3	118.085		23.259	71.760	164.410

$$E2 = \left[377 \times e^{(-23 \times (NE4 \div HSNEW))}\right] + 118 \quad (3.4)$$

โดยที่ E2 = ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (MPa.)

NE4 = ปริมาณเพลามาตรฐานสะสม (ล้านเพลา/ช่องจราจร)

HSNEW = ความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (มิลลิเมตร)

และได้มีการพัฒนาแบบจำลองให้อยู่ในรูปของอัตราการเสื่อมสภาพของค่าอีลาสติกโมดูลัสในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นผิวทางจากการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิว ซึ่งได้พัฒนาต่อเนื่องมาจากสมการที่ 3.4 ดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$rE2 = (-9048 \div HSNEW) \times (e^{(-23NE4 \div HSNEW)}) \quad (3.5)$$

โดยที่ rE2 = อัตราการเสื่อมสภาพของอีลาสติกโมดูลัสชั้นพื้นทาง (MPa.)

HSNEW = ความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหลังการซ่อมบำรุง (mm.)

3.7 การทดสอบแบบจำลองโครงสร้างทาง

การทดสอบแบบจำลองเป็นขั้นตอนในการทดสอบความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยการนำข้อมูลค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางที่ถูกเก็บรวบรวมจริงโดย กรมทางหลวง ทั้งหมด 10 ตัวอย่าง (10 กิโลเมตร) เปรียบเทียบกับค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (E2) ที่พยากรณ์ได้จากแบบจำลอง การทดสอบแบบจำลองได้อาศัยการทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองดังสมการที่ 3.6

$$\text{ร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง} = \frac{(E2_{\text{สำรวจ}} - E2_{\text{แบบจำลอง}})}{E2_{\text{สำรวจ}}} \times 100 \quad (3.6)$$

ผลการทดสอบร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองคือ ค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนแบบจำลอง เกิดจากการนำค่าสัมบูรณ์ของร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองหารด้วยจำนวนตัวอย่างที่นำมาทดสอบดังสมการที่ 3.7 ซึ่งผลของการทดสอบบอกถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกรณีที่นำแบบจำลองไปพยากรณ์ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง

ผลการทดสอบบอกถึงร้อยละความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกรณีที่นำแบบจำลองไปพยากรณ์ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (E2) โดยค่าสูงสุดทางด้านบวกแสดงถึงค่า E2 ที่พยากรณ์น้อยกว่าค่าอีลาสติกโมดูลัสที่เกิดขึ้นจริง และค่าสูงสุดทางด้านลบหมายถึงค่า E2 ที่พยากรณ์มากกว่าค่าอีลาสติกโมดูลัสที่เกิดขึ้นจริงซึ่งผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทางแสดงดังตารางที่ 3.11

$$\text{ค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง} = \frac{\left|\text{ร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง}\right|}{\text{จำนวนตัวอย่างที่ทดสอบ}} \times 100 \quad (3.7)$$

สรุปผลการทดสอบซึ่งประกอบไปด้วยค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุดทางด้านบวก และค่าสูงสุดทางด้านลบของร้อยละความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทางมีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 16.15 ความคลาดเคลื่อนสูงสุดทางด้านบวกเท่ากับร้อยละ 43.43 และความคลาดเคลื่อนสูงสุดทางด้านลบร้อยละ 16.38

ตารางที่ 3.11 ตัวอย่างการทดสอบแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง

ลำดับ	รหัสสายทาง	ค่า E2 ที่ได้จากการสำรวจ (MPa.)	ค่า E2 ที่ได้จากแบบจำลอง (MPa.)	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	ค่าสัมบูรณ์ร้อยละความคลาดเคลื่อน
1	0107-0203-0	337	303	10.09	10.09
2	0105-0101-0	445	317	28.76	28.76
3	0105-0101-0	355	317	-4.51	4.51
4	0105-0101-0	470	317	21.06	21.06
5	1289-0101-0	489	476	2.66	2.66
6	1289-0101-0	446	476	-6.73	6.73
7	1289-0101-0	409	476	-16.38	16.38
8	0021-0200-1	202	181	10.38	10.38
9	0021-0200-1	203	181	10.83	10.83
10	0021-0200-1	320	181	43.43	43.43

จากการพิจารณาผลการทดสอบแบบจำลอง พบว่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสูงสุดทั้งด้านบวกที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีปริมาณการจารจรและปริมาณรถบรรทุกหนักสูง ทำให้ค่า E2 ที่พยากรณ์ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าค่า E2 ที่เกิดขึ้นจริง ขณะเดียวกับพบว่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสูงสุดทางด้านลบเกิดขึ้นจากตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีปริมาณการจราจรและปริมาณรถบรรทุกหนักที่ต่ำอีกทั้งอายุบริการของสายทางที่น้อยทำให้ค่า E2 ที่พยากรณ์ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง

3.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของถนน

Life Cycle Cost Analysis (LCCA) เป็นกระบวนการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิธีหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดการใช้งานให้อยู่ในรูปของมูลค่าปัจจุบัน (Present Value) ซึ่งมีสมมุติฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์ได้แก่

- ระยะเวลาในการวิเคราะห์ (Planning Horizon) โดยปกติสำหรับงานถนนลาดยางจะมีช่วงเวลาในการวิเคราะห์โครงการประมาณ 20-30 ปี แต่สำหรับถนนที่อ้างอิงจากมาตรฐานของ AASHTO (1993) ส่วนใหญ่จะถูกกำหนดอายุการใช้งานไว้ที่ 25 ปี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะยึดตามค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางที่ยอมรับได้ (Acceptable Level of E2) ตามเป้าหมายที่กำหนดเป็นเกณฑ์ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการเปรียบเทียบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานในการซ่อมบำรุงระหว่างแนวทางซ่อมบำรุงเสริมผิวทาง และแนวทางซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางในการพยากรณ์ค่า E2 ในอนาคต
- อัตราผลตอบแทนขั้นต่ำของโครงการ (Minimum Attractive Rate of Return, MARR) ในการวิเคราะห์ใช้อัตราผลตอบแทนที่ 12 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นเกณฑ์ที่กรมทางหลวงใช้ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมโครงการต่างๆ
- ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นทั้งหมดตลอดอายุการใช้งานของสายทางทั้งสองแนวทางการซ่อมบำรุงซึ่งต้องแปลงให้อยู่ในรูปของมูลค่าปัจจุบัน (NPV) ดังสมการที่ 3.8 จากนั้นจึงแปลงให้อยู่ในรูปของ Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC) เพื่อขจัดปัญหาที่เกิดจากความแตกต่างของอายุการใช้งาน อันเป็นผลมาจากการกำหนดแผนและนโยบายซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลาที่แตกต่างกันดังสมการที่ 3.9

-

$$NPV = C_m + \sum_{t=1}^{N} \frac{C_{mt}}{(1+i)^t} \quad (3.8)$$

โดยที่ C_m = ต้นทุนค่าซ่อมบำรุง ณ ปีปัจจุบัน

t = ปีที่ซ่อมบำรุงในอนาคต

i = อัตราผลตอบแทนภายใน (เปอร์เซ็นต์)

C_{mt} = ต้นทุนค่าซ่อมบำรุงในอนาคต ณ ปีที่ t

$$EUAC = CRF \times NPV \quad (3.9)$$

โดยที่ $$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N-1}$$

เกณฑ์การกำหนดระยะเวลาในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของสายทางมาจากคำแนะนำของวิศวกรผู้เชี่ยวชาญฝ่ายออกแบบและซ่อมบำรุงทางจากกรมทางหลวง ซึ่งสอดคล้องกับวิธีปฏิบัติจริงและใช้ข้อมูลจากเครื่องมือ FWD ช่วยในการประกอบการตัดสินใจ โดยพบว่าสายทางที่มีความเสียหายรุนแรงถึงระดับโครงสร้างชั้นพื้นทางนั้นเมื่อสำรวจด้วยเครื่องมือ FWD ของกรมทางหลวงแล้วจะพบว่าค่าอีลาสติกโมดูลัสที่ได้ของชั้นพื้นทางจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 150 MPa. ทำให้ได้ข้อสรุปในการตั้งสมมุติฐานของงานวิจัยนี้ว่าขอบเขตของระดับการให้บริการที่ยอมรับได้ของโครงสร้างทางควรจะอยู่ที่ค่าอีลาสติกโมดูลัสประมาณ 150 MPa. จะถือว่าเป็นความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นภายในอนาคตอันใกล้หรืออาจจะเกิดขึ้นแล้วก็ได้ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ประกอบเช่น ความหนาของชั้นผิวทาง และปริมาณเพลาที่สะสม เป็นต้น ดังนั้นเมื่อค่าอีลาสติกโมดูลัส ถึงเกณฑ์ระดับขั้นต่ำที่ยอมรับได้แนวทางการซ่อมบำรุงจะถูกกำหนดเป็นการบูรณะ

3.9 สรุป

การวิเคราะห์รูปแบบวิธีการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม สำหรับงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทางโดยใช้ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (E2) เป็นตัวแทนสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นพื้นทาง ซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีความสัมพันธ์แบบมีนัยสำคัญกับค่า E2 ได้แก่ อายุการใช้งาน ปริมาณการจราจร ปริมาณรถบรรทุกหนัก และวัสดุโครงสร้างชั้นทางเดิม โดยแบบจำลองได้ถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบของอัตราการเสื่อมสภาพของค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (rE2) เมื่อมีจำนวนเพลามาตรฐานสะสม (NE4) มากขึ้นในอนาคต ซึ่งแบบจำลองนี้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบริหารบำรุงทางเพื่อกำหนดค่าความแข็งแรงที่เป็นเป้าหมายในการซ่อมบำรุงโดยพิจารณาถึงค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางและพิจารณาควบคู่กับค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI) ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินถึงค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (LCCA) เพื่อกำหนดนโยบายการซ่อมบำรุงได้อย่างเหมาะสม คุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ

บทที่ 4

การวิเคราะห์แนวทางการซ่อมบำรุงจากการประเมินค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนวิธีวิเคราะห์แนวทางประเมินต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของสายทางที่น้อยที่สุดโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงสร้างทางเพื่อประเมินถึงสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างทางและประยุกต์ใช้กับระบบบริหารบำรุงทางซึ่งจะใช้ค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI) เป็นดัชนีชี้วัดในการกำหนดเกณฑ์และเงื่อนไขในการซ่อมบำรุงโดยประเมินจากความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งการประยุกต์ใช้จะพิจารณาค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางโดยมีค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (E2) เป็นเกณฑ์ในการกำหนดนโยบายการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง สำหรับการเปรียบเทียบแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมระหว่างการเสริมผิวทางและการบูรณะโครงสร้างทางด้วยวิธีการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่พิจารณาจากค่า IRI จะให้ผลลัพธ์ที่ได้เป็นการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางเสมอ เนื่องจากการซ่อมบำรุงทั้งสองแนวทางนั้นจะส่งผลให้หลังการซ่อมบำรุงได้ค่า IRI ที่เท่ากัน ดังนั้นผลประโยชน์ต่อผู้ใช้ทางที่เกิดขึ้นจากการประเมินด้วยค่า IRI จึงเท่ากันด้วยแต่ต้นทุนค่าซ่อมบำรุงที่สูงกว่าของการบูรณะโครงสร้างทาง ทำให้การประเมินด้วยผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C) จะให้ผลลัพธ์เป็นแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางเสมอ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนากรอบวิธีคิดสำหรับพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างสองแนวทางการซ่อมบำรุงด้วยวิธีวิเคราะห์เพื่อเลือกแนวทางการซ่อมบำรุงที่ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีน้อยที่สุด โดยที่องค์ประกอบในการวิเคราะห์หรือแบบจำลองต่างๆได้อ้างอิงตามที่ได้กล่าวในบทที่ 3

4.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน

การวิเคราะห์หาต้นทุนค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกิดขึ้นในอนาคต จะคำนวณจากแบบจำลองสภาพความเสียหาย แบบจำลองผลกระทบหลังการซ่อมบำรุง และแบบจำลองโครงสร้างทาง เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางการซ่อมบำรุงที่ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีน้อยที่สุด

ซึ่งในระบบบริหารบำรุงทางจะใช้ค่า IRI เป้าหมายในการกำหนดรูปแบบวิธีการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทาง รวมถึงฉาบผิวทาง โดยค่า IRI ที่ใช้เป็นเป้าหมายในการวิเคราะห์ได้อ้างอิงมาจากยุทธศาสตร์สายทางที่เหมาะสมของกรมทางหลวง โดยในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงสร้างทางที่ได้พัฒนาขึ้นจากตัวอย่างสายทางเข้ามาช่วยพิจารณาถึงสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างทาง โดยมีการกำหนดค่า E2 เป้าหมายเพื่อใช้เป็นตัวกำหนดสภาพความแข็งแรงของชั้นพื้นทางต่ำที่สุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ตลอดช่วงอายุการใช้งานของสายทางที่วิเคราะห์ และเมื่อค่า E2 ต่ำกว่าหรือเท่ากับค่า E2 เป้าหมายที่กำหนดไว้ การวิเคราะห์วิธีการซ่อมบำรุงจะถูกกำหนดให้เป็นการบูรณะโครงสร้างทาง เพื่อปรับปรุงโครงสร้างชั้นทาง และปรับสภาพผิวทางหลังการซ่อมและตั้งต้นค่า E2 และค่า IRI ใหม่สำหรับวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายในปีถัดไป โดยสามารถแสดงการวิเคราะห์ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมข้อมูลและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้การวิเคราะห์ประกอบไปด้วย

- ข้อมูลสภาพสายทางที่ได้จากการสำรวจ (IRI)
- ข้อมูลปีที่มีการซ่อมบำรุงย้อนหลังแบบเสริมผิวทางหรือบูรณะโครงสร้างทาง (AGE, HSOLD)
- ข้อมูลปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (AADT) และเปอร์เซ็นต์ยานยนต์หนัก (%HV)
- ข้อมูลต้นทุนค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงอ้างอิงตามพื้นที่สายทาง

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดเงื่อนไขในการซ่อมบำรุง ค่า IRI เป้าหมายเสริมผิว ฉาบผิว และ E2 เป้าหมายสำหรับเป็นเกณฑ์ในการกำหนดนโยบายซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางและบูรณะโครงสร้างทาง

ขั้นตอนที่ 3 คัดกรองข้อมูลสายทาง โดยใช้แบบจำลองสภาพทางและแบบจำลองโครงสร้างทาง เพื่อพิจารณาอายุคงเหลือของผิวทางและโครงสร้างชั้นพื้นทางเพื่อคัดเลือกเฉพาะสายทางที่ถึงกำหนดการซ่อมบำรุงตามกำหนดระยะเวลาและมีความสุ่มเสี่ยงต่อความเสียหายหนักอันเกิดจากโครงสร้างชั้นทางในการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์กรณีเสริมผิวทาง

วิเคราะห์ค่า E2 และพิจารณาว่าค่า E2 ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ณ ปีนั้นมีค่ามากกว่าค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับให้ถือว่าสิ้นสุดระยะเวลาการวิเคราะห์ที่กำหนด

- กรณีที่ค่า IRI น้อยกว่าหรือเท่ากับค่า $IRI_{เป้าหมายฉาบผิว}$ ที่กำหนด ให้เลือกวิธีการซ่อมเป็นบำรุงปกติ แต่ถ้า IRI มากกว่าหรือเท่ากับ $IRI_{เป้าหมายฉาบผิว}$ ให้เลือกวิธีการซ่อมเป็นการฉาบผิวทางลาดยาง จากนั้นวิเคราะห์สภาพผิวทางหลังการซ่อมและคำนวณค่าใช้จ่ายในการฉาบผิวทางลาดยาง
- พิจารณาการคำนวณต้นทุนค่าซ่อมบำรุงให้ครบตามระยะเวลาการวิเคราะห์ที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์กรณีบูรณะโครงสร้างทาง

- กำหนดช่วงเวลาในการวิเคราะห์โดยพิจารณาอายุการใช้งานของสายทางจากค่า E2 จนถึงค่า $E2_{เป้าหมาย}$ ในการบูรณะโครงสร้าง
- วิเคราะห์ และพิจารณาว่าค่า IRI ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ณ ปีนั้น มีค่ามากกว่าค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ ที่กำหนดหรือไม่

  กรณีที่ IRI มากกว่าค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ ที่กำหนด ให้เลือกวิธีการซ่อมเป็นการเสริมผิวทางลาดยาง จากนั้นวิเคราะห์สภาพผิวทางหลังการซ่อมและคำนวณค่าใช้จ่ายในการเสริมผิวทางลาดยาง

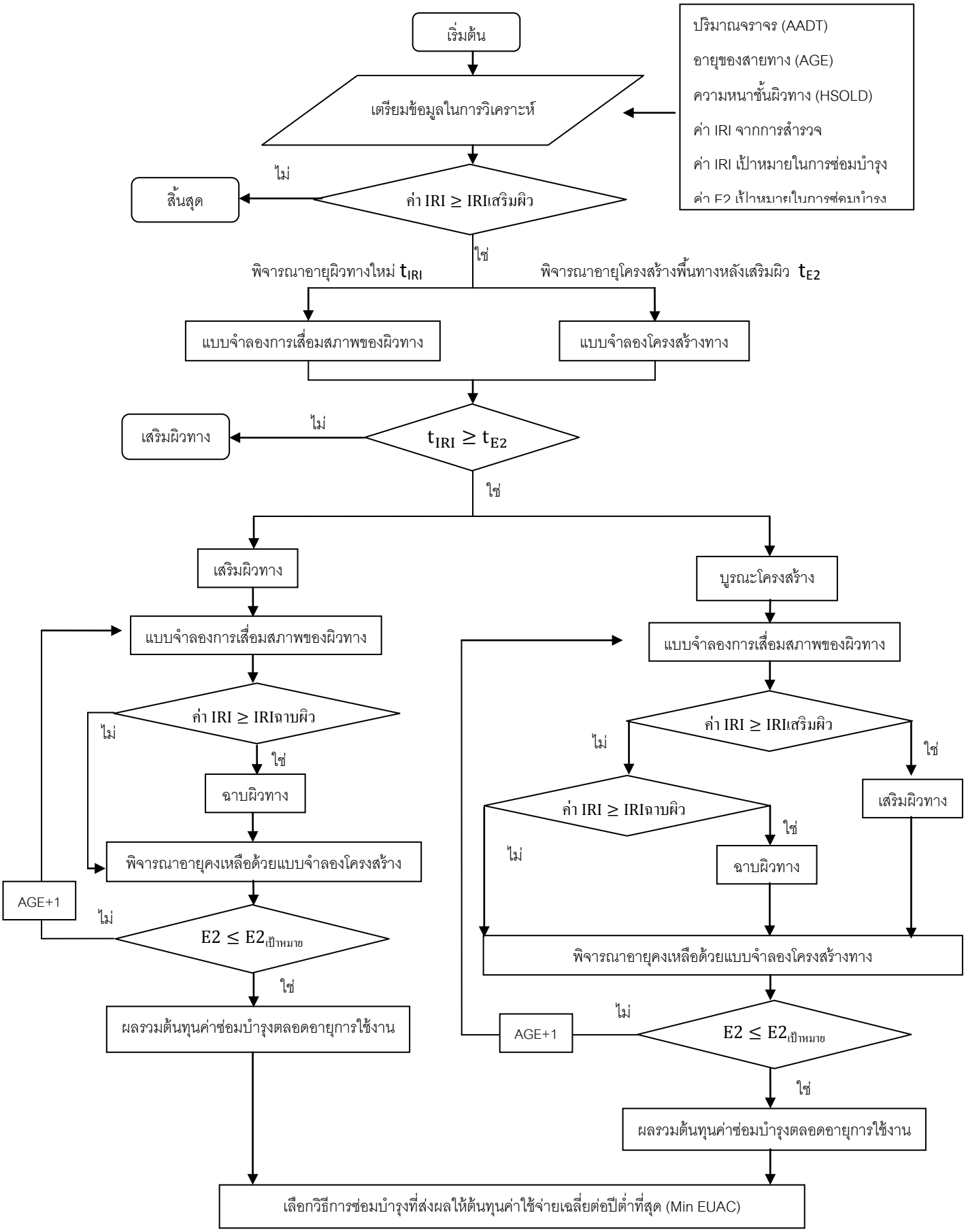
- กรณีที่ค่า IRI น้อยกว่าค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ ที่กำหนด ให้พิจารณาค่า IRI ถ้าน้อยกว่า $IRI_{เป้าหมายฉาบผิว}$ ให้เลือกวิธีการซ่อมเป็นบำรุงปกติ แต่ถ้ามากกว่าหรือเท่ากับ $IRI_{เป้าหมายฉาบผิว}$ ให้เลือกวิธีการซ่อมเป็นการเสริมฉาบผิวทางลาดยาง จากนั้นวิเคราะห์สภาพผิวทางหลังการซ่อมและคำนวณค่าใช้จ่ายในการฉาบผิวทางลาดยาง
- พิจารณาการคำนวณต้นทุนค่าซ่อมบำรุงให้ครบตามระยะเวลาการวิเคราะห์ที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 6 พิจารณาเลือกแนวทางการซ่อมบำรุงที่ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีน้อยที่สุด สำหรับต้นทุนการซ่อมบำรุงพิจารณาจากเกณฑ์การเลือกวิธีข้างต้น โดยกรณีที่เป็นการซ่อมด้วยวิธีบำรุงปกติจะไม่นำมาคำนวณค่าใช้จ่าย เนื่องจากโดยทั่วไปการซ่อมบำรุงปกติทำเป็นประจำทุกปี ทั้งในกรณีซ่อมบำรุงพื้นฐานและกรณีที่ซ่อมบำรุงตามการกำหนดมาตรฐาน ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ผลต่างต้นทุนค่าใช้จ่ายของทั้ง 2 กรณี ค่าบำรุงปกติจึงคิดเหมือนกัน ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.1

4.2 การกำหนดเงื่อนไขและเกณฑ์ที่ใช้เป็นเป้าหมายในการวิเคราะห์

สำหรับการกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์รวมถึงขอบเขตในการวิเคราะห์ได้อ้างอิงจากระบบบริหารบำรุงทางของกรมทางหลวงมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ระดับการให้บริการของทางซึ่งเป็นขอบเขตของการวิเคราะห์แบ่งตามลักษณะของปริมาณจราจร ซึ่งถูกแบ่งกลุ่มตามมาตรฐานชั้นทางของกรมทางหลวงดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์แนวทางการซ่อมบำรุงโดยพิจารณาจากต้นทุนค่าซ่อมบำรุงตลอดอายุการใช้งาน

ตารางที่ 4.1 การแบ่งประเภทชั้นทางตามปริมาณการจราจร

มาตรฐานชั้นทาง	AADT (คันต่อวันต่อปี)
พิเศษ	> 8,000
1	4,001 – 8,000
2	2,001 – 4,000
3	1,001 – 2,000
4	300 – 1,000
5	< 300

2. การวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ยานยนต์หนัก (%HV) เพื่อเป็นค่าตัวแทนในแต่ละประเภทชั้นทางในการวิเคราะห์ ได้จากหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลปริมาณการจราจรทั่วประเทศ ซึ่งเก็บสำรวจโดยกรมทางหลวงเป็นประจำทุกปี ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวย้อนหลังเป็นเวลา 5 ปี ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ยานยนต์หนักในแต่ช่วงของประเภทชั้นทาง

มาตรฐานชั้นทาง	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย (%HV)
พิเศษ	2,485	21.29
1	3,596	17.84
2	2,444	17.20
3	1,908	15.69
4	1,315	14.39
5	238	10.66

3. การกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจในการซ่อมบำรุงและราคาซ่อมบำรุงในแต่ละวิธีจากระบบบริหารบำรุงทางของกรมทางหลวงในปัจจุบัน ตามความเหมาะสมในแต่ละยุทธศาสตร์สายทางและราคาซ่อมบำรุงโดยเฉลี่ยทั่วประเทศไทย
4. ค่าอีลาสติกโมดูลัสซึ่งใช้เป็นตัวแทนสภาพความแข็งแรงของชั้นทางต่างๆสำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์เป้าหมายในการวิเคราะห์จากการสัมภาษณ์วิศวกรฝ่ายออกแบบซ่อมบำรุงของกรมทางหลวงซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นทางที่ได้จากการเก็บสำรวจด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectrometer (FWD) ประกอบกับข้อมูลการสำรวจในอดีตมาใช้เป็นเกณฑ์กำหนดรูปแบบการซ่อมบำรุงดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ระดับความแข็งแรงที่ยอมให้ในแต่ละระดับชั้น

ระดับ	ตัวย่อ	ค่าอีลาสติกโมดูลัส (MPa.)
ผิวทาง	E1	> 3,000
พื้นทาง	E2	> 150
รองพื้นทาง	E3	0 - 100

4.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมข้อมูลและพารามิเตอร์ต่างๆ ในตัวอย่างการวิเคราะห์นี้ได้อ้างอิงข้อมูลของกรมทางหลวงรหัสสายทาง 0219-0501-0 จังหวัดมหาสารคาม กม. 79+000 – 80+000 ที่มีอายุบริการ (AGE3) 8 ปี และมีค่า IRI ที่ได้จากการสำรวจเท่ากับ 3.6 เมตรต่อกิโลเมตร โดยแสดงตัวอย่างข้อมูลบัญชีสายทาง ข้อมูลปริมาณตัวแทนยานพาหนะ และข้อมูลมาตรฐานการซ่อมบำรุง ดังตารางที่ 4.3, 4.4, และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างข้อมูลสายทาง

ข้อมูลสายทาง	รหัส 0219-0501-0 กม. 79+000 – 80+000
ความกว้างผิวทางจราจร	7 เมตร
ช่วงความยาวพิจารณา	1000 เมตร
อายุสายทาง	8 ปี
จำนวนช่องจราจร	2 ช่อง
ความลาดชัน	1%
ค่า IRI จากการสำรวจ	3.6 เมตรต่อกิโลเมตร

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างข้อมูลปริมาณตัวแทนยานพาหนะ

ประเภทยานพาหนะ	ปริมาณจราจร (คัน/วัน/ปี)
จักรยานยนต์และสามล้อเครื่อง	50
รถยนต์นั่งไม่เกิน 7 คน	769
รถยนต์นั่งเกิน 7 คน	469
รถโดยสารขนาดเล็ก	53
รถโดยสารขนาดกลาง	109
รถโดยสารขนาดใหญ่	252
รถบรรทุกขนาดเล็ก (4 ล้อ)	2224
รถบรรทุกขนาด 2 เพลา (6 ล้อ)	308
รถบรรทุกขนาด 3 เพลา (10 ล้อ)	348
รถบรรทุกกึ่งพ่วง (มากกว่า 3 เพลา)	375
รถบรรทุกพ่วง (มากกว่า 3 เพลา)	145

จากการศึกษาในอดีต (ชานนท์ อมรชัยศักดา และ วิศณุ ทรัพย์สมพล, 2552) แสดงวิธีวิเคราะห์ระดับการให้บริการของสายทางที่เหมาะสมสำหรับสายทางที่มีปริมาณการจราจรต่ำ และสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การบริหารจัดการทางของกรมทางหลวง โดยจากตัวอย่างการวิเคราะห์ทำให้ได้ค่า $IRI_{เป้าหมายฉาบผิว}$ ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.5 เมตร/กิโลเมตร และ $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ ที่เหมาะสมเท่ากับ 3.5 เมตร/กิโลเมตร และในส่วนของการกำหนดค่า $E2_{เป้าหมาย}$ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดอายุการใช้งานของสายทางและรูปแบบการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างชั้นทางโดยการสัมภาษณ์จากประสบการณ์ของวิศวกรชำนาญการฝ่ายออกแบบและบำรุงรักษาของกรมทางหลวงซึ่งพิจารณาจากข้อมูล FWD ของสายทางที่มีความเสียหายถึงระดับโครงสร้างชั้นพื้นทางในอดีต ซึ่งพบค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางส่วนใหญ่ที่ได้จากการทดสอบสายทางที่พบความเสียหายจะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 - 150 MPa. งานวิจัยนี้จึงตั้งสมมุติฐานสำหรับค่า $E2_{เป้าหมาย}$ ไว้ที่ขอบเขตบนคือ 150 MPa. จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 ข้างต้น การนำไปใช้วิเคราะห์ทำนายค่า IRI และ E2 ในอนาคตและค่า IRI หลังการซ่อม จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทาง (SNC) และจำนวนเพลามาตรฐาน (YE4) มีหน่วยเป็น ล้านเพลา/ช่องทางจราจร/ปี ซึ่งมีตัวอย่างการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างข้อมูลมาตรฐานการซ่อมบำรุง

วิธีการซ่อมบำรุง	ต้นทุนค่าซ่อมบำรุง บาท/ตารางเมตร	เกณฑ์เป้าหมายในการซ่อมบำรุง
งานฉาบผิวทางลาดยาง (10 มิลลิเมตร)	105	$IRI_{สำรวจ} \geq$ 2.5 m/km.
งานเสริมผิวทางลาดยาง (10 เซนติเมตร)	430	$IRI_{สำรวจ} \geq$ 3.5 m/km.
งานบูรณะโครงชั้นสร้างทาง (ชั้นพื้นทาง + เสริมผิว 5 เซนติเมตร)	1070	$E2_{สำรวจ} \geq$ 150 MPa.

1) การกำหนดค่า SNC ได้อ้างอิงจากมาตรฐานการออกแบบถนนของกรมทางหลวง โดยแบ่งตามปริมาณการจราจรดังแสดงในตารางที่ 3.3 การคำนวณค่า AADT จะพิจารณาจากผลรวมของปริมาณการจราจรทั้งหมดทุกประเภทยกเว้นจักรยานยนต์และสามล้อเครื่อง ซึ่งเท่ากับ 5,050 คันต่อวัน/ปี และสำหรับ %HV พิจารณาจากสัดส่วนของผลรวมปริมาณการจราจรของยานพาหนะประเภท รถโดยสารขนาดกลาง รถโดยสารขนาดใหญ่ รถบรรทุกขนาด 2 เพลา (6 ล้อ) รถบรรทุกขนาด 3 เพลา (10 ล้อ) รถบรรทุกพ่วง (มากกว่า 3 เพลา) และรถบรรทุกกึ่งพ่วง (มากกว่า 3 เพลา) เปรียบเทียบกับค่า AADT ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20% ซึ่งเมื่อดูจากตารางที่ 3.3 จะพบว่าค่า SNC มีค่าอยู่ในช่วง 5,000 – 10,000 ที่ SNC = 5.49

2) การคำนวณค่า YE4

$$YE4 = (AADT \times Lane\ Factor \times \%HV \times Truck\ Factor \times 365) / 10^6$$

$$= (5{,}050 \times 0.5 \times 20\% \times 1.5 \times 365) / 10^6$$

$$= 0.276 \text{ ล้านเพลา/ช่องทางจราจร/ปี}$$

3) การคำนวณค่า NE4 สำหรับพยากรณ์ค่า E2 ในอนาคต

$$NE4 = YE4 \times AGE$$

$$= 0.274 \times 8$$

$$= 2.208 \text{ ล้านเพลาสะสม/ช่องทางจราจร}$$

ขั้นตอนที่ 2 จะคัดกรองสายทางตัวอย่างว่าเข้าข่ายเสี่ยงต่อความเสียหายหนักอันเกิดจากความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นพื้นทางหรือไม่ เนื่องจากสายทางตัวอย่างมีค่า IRI ที่ได้จากการสำรวจ $IRI_{สำรวจ}$ เท่ากับ 3.6 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งพบว่ามีค่ามากกว่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ ที่ใช้เป็นค่าเป้าหมายในการซ่อมบำรุงตามกำหนดระยะเวลา (Periodic Maintenance) ซึ่งหมายความว่าสายทางตัวอย่างถึงกำหนดต้องซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางลาดยาง โดยการคัดกรองสายทางตัวอย่างจะเปรียบเทียบอายุบริการของผิวทางหลังการเสริมผิว (t_{IRI}) กับอายุบริการของโครงสร้าง

ทางหลังเสริมผิวทาง (t_{E2}) โดยมีสมมุติฐานสำหรับงานวิจัยนี้ว่า ถ้า $t_{IRI} < t_{E2}$ ให้สิ้นสุดการวิเคราะห์โดยเลือกวิธีการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางตามกำหนดระยะเวลาเนื่องจากแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางในครั้งนี้สามารถใช้งานผิวทางใหม่ได้จนครบกำหนดระยะเวลาจนถึงค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ ในรอบถัดไป และมีต้นทุนค่าซ่อมบำรุงที่ถูกกว่าแบบบูรณะโครงสร้างทาง สำหรับกรณีที่ $t_{IRI} \geq t_{E2}$ หมายความว่าในรอบการเสริมผิวทางในครั้งนี้ไม่สามารถใช้งานผิวทางใหม่ได้จนครบกำหนดระยะจนถึงค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ ในรอบถัดไป เนื่องจากค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางจะถึงเกณฑ์เป้าหมายในการบูรณะโครงสร้างทางก่อน ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์ต่อเพื่อพิจารณาหาแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบทั้งสองกรณีระหว่างการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางและแบบบูรณะโครงสร้างทางเพื่อหาแนวทางที่ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีถูกที่สุด

สำหรับสมการที่ใช้คำนวณค่า IRI ในอนาคตอ้างอิงจากสมการที่ 3.1 ค่า IRI หลังการฉาบผิวทางลาดยางอ้างอิงจากสมการที่ 2.1 และสำหรับค่า IRI หลังการเสริมผิวทางลาดยางอ้างอิงจากสมการที่ 2.2 ซึ่งมีตัวอย่างการคำนวณดังนี้

4) การคำนวณค่า IRI สิ้นปีที่ 1

กำหนดค่า IRI ตั้งต้นในปีที่เริ่มวิเคราะห์เท่ากับ 2.0 เมตร/กิโลเมตร

$$dIRI = K_{gp} \times (a_0 \times Exp(K_{gm} \times m \times AGE) \times [(1 + SNC \times a_1)]^{-5} \times YE4 + a_2 \times AGE) + (K_{gm} \times m \times IRI_b)$$

$$= 1 \times (134 \times Exp(0.87 \times 0.03 \times 1) \times [(1+5.49 \times 0.755)]^{-5} \times 2.74+ 0.012 \times 1) + (0.87 \times 0.03 \times 2)$$

$$= 0.170$$

จะได้ค่า IRI สิ้นปีที่ 1 = 2.0 + 0.170 = 2.170 เมตร/กิโลเมตร

5) การคำนวณค่า E2 ณ ปีปัจจุบัน

$$E2 = [377 \times e^{((-23 \times NE4)/HSOLD)}]+118$$

= [377 x e^((-23 x2.192)/50)]+118

= 254.29 MPa.

6) การคำนวณค่า E2 สิ้นปีที่ 1 กรณีเสริมผิวทาง 50 มิลลเมตร

rE2(NE4) = (-8671/HSNEW) x e^[(-23 xNE4)/HSNEW]

= (-8671/100) x e^[(-23 x2.192)/100]

= -48.92

จะได้ค่า E2 สิ้นปีที่ 1 = 254.29 + (-48.92) = 205.37 MPa.

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่า IRI และค่า E2 ในกรณีซ่อมตามกำหนดระยะเวลาด้วยวิธีการเสริมผิวทาง 50 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการทำนายค่าทั้งสองในอนาคตสำหรับการตรวจสอบค่า t_{IRI} และ t_{E2} ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่า IRI และ E2 กรณีซ่อมบำรุงตามกำหนดระยะเวลาด้วยวิธีการเสริมผิว

ปีที่	ค่า IRI (เมตร/กิโลเมตร) กรณีเสริมผิวทาง 50 มิลลิเมตร	ค่า E2 (MPa.) กรณีเสริมผิวทาง 50 มิลลิเมตร
1	2.170	205.37
2	2.359	152.46
3	2.568	116.38
4	2.797	75.95
5	3.048	38.02
6	3.320	2.42
7	3.525	0
8	3.644	0

จากตารางที่ 4.7 จะพบว่าหลังการซ่อมบำรุงตามกำหนดระยะเวลาด้วยวิธีการเสริมผิวทาง 50 มิลลิเมตร เมื่อทำนายค่า IRI ในอนาคตโดยไม่คำนึงถึงปัจจัยด้านความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางพบว่าค่า IRI ในอนาคตจะถึงเกณฑ์ค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ มากกว่าหรือเท่ากับ 3.5 ซึ่งพบว่าสิ้นปีที่ 7 ค่า IRI มีค่าเท่ากับ 3.525 ดังนั้นค่า t_{IRI} มีค่าเท่ากับ 7 ปี และในส่วนของการพิจารณาค่า E2 ในอนาคตพบว่าจะถึงเกณฑ์ค่า $E2_{เป้าหมาย}$ ที่กำหนดไว้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 150 MPa. พบว่าสิ้นปีที่ 2 ค่า E2 มีค่าเท่ากับ 152.46 MPa. ดังนั้นค่า t_{E2} มีค่าเท่ากับ 2 ปี เมื่อเปรียบเทียบค่าทั้งสองแล้วจะพบว่าค่า $t_{IRI} \geq t_{E2}$ ซึ่งหมายความว่าในการเสริมผิวทางด้วยแนวทางการซ่อมบำรุงตามกำหนดระยะเวลา ณ ปีนี้ จะไม่สามารถใช้งานผิวทางใหม่ได้จนครบอายุการใช้งานเนื่องจากความเสียหายในระดับโครงสร้างชั้นพื้นทางจะเกิดขึ้นก่อนและส่งผลต่อเนื่องมายังชั้นผิวทาง จึงผ่านการคัดกรองเพื่อเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์แนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมดังขั้นตอนต่อไป

7) ตัวอย่างการคำนวณค่า IRI หลังการฉาบผิวทางในต้นปีที่ 4

จากการคำนวณค่า IRI สิ้นปีที่ 3 เท่ากับ 2.57

$IRI_a = IRI_b - MAX[0, MIN\{ a_0 \times (IRI_b - a_1), (a_2 \times Hsl)\}]$

$= 2.568 - MAX[0, MIN\{0.1 \times (2.568-2.5),(0.03 \times 10)\}]$

$= 2.548$ เมตรต่อกิโลเมตร

8) การคำนวณราคาค่าฉาบผิวทางลาดยาง

ราคาค่าฉาบผิวทางลาดยาง = 1000 x 7 x 105 = 735,000 บาท/กิโลเมตร

9) ตัวอย่างการคำนวณค่า IRI หลังการเสริมผิวในต้นปีที่ 8

จากการคำนวณตามแบบจำลองค่า IRI ในปีที่ 7 เท่ากับ 3.525 เมตร/กิโลเมตร

$a_1 = max[4, 2.1 \times e^{(0.019 \times HSNEW)}]$

$= max[4, 2.1 \times e^{(0.019 \times 50)}] = 5.43$

$a_2 = 1 + 0.018\ max[0, (100-HSNEW)]$

$= 1 + 0.018\ max[0, (100-50)] = 1.9$

$a_3 = min\{a_0, max[0.9, (0.01 \times HSNEW- 0.15)]\}$

$= min\{a_0, max[0.9, (0.01 \times 50- 0.15)]\} = 0.35$

แทนค่า a_1 a_2 และ a_3 ลงในสมการที่ 3.1 จะได้

$$dIRI = \max[0, 0.9\{\min(a_1, IRI_b)-a_2\} + a_3 \times \max\{0,(IRI_b-a_1)\}]$$

$$= \max[0, 0.9\{\min(5.43,3.780)-1.9\} + 0.35 \times \max\{0,(3.780-5.43)\}]$$

$$= 1.28$$

จะได้ค่า IRI ในต้นปีที่ 5 = 3.525 – 1.280 = 2.245 เมตร/กิโลเมตร

10) ตัวอย่างการคำนวณราคาค่าเสริมผิวทางลาดยางหนา 50 มิลลิเมตร

ราคาค่าเสริมผิวทางลาดยาง = 1000 x 7 x 430 = 3,010,000 บาท/กิโลเมตร

11) ตัวอย่างการคำนวณราคาค่าบูรณะโครงสร้างชั้นทาง

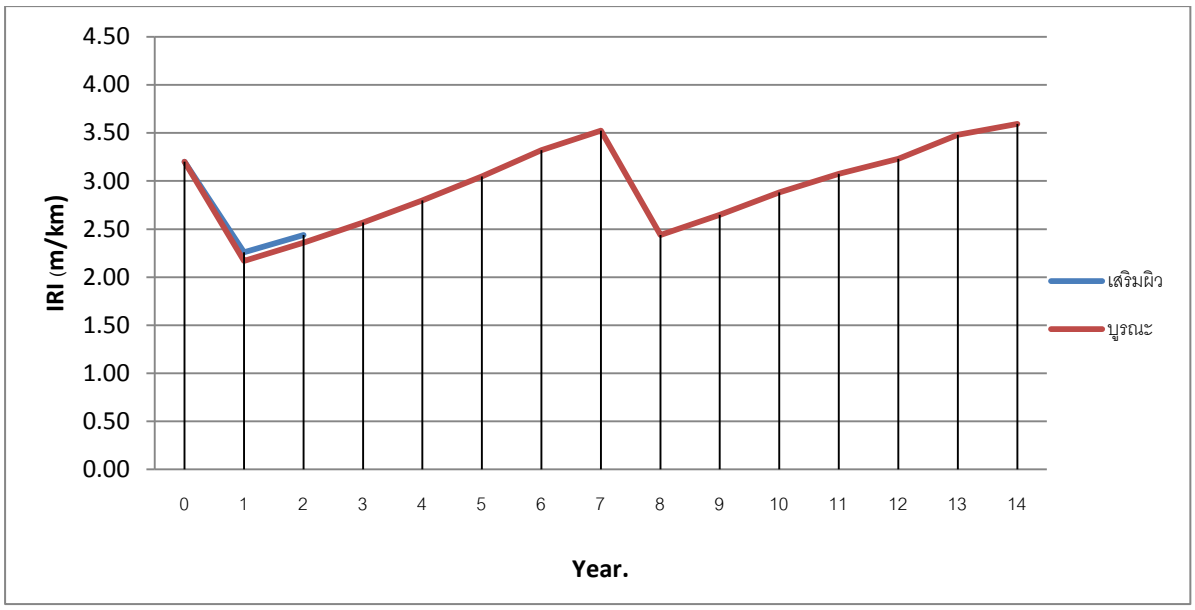
ราคาค่าเสริมผิวทางลาดยาง = 1000 x 7 x 1070 = 4,790,000 บาท/กิโลเมตร

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่า IRI และค่า E2 ทั้งสองแนวทางการซ่อมบำรุงคือแบบเสริมผิวทาง และแบบบูรณะโครงสร้างชั้นทาง จนสิ้นสุดอายุการใช้งานตามค่า $E2_{เป้าหมาย}$ ที่กำหนดเป็นระยะเวลา 14 ปี และสำหรับกรณีบูรณะใช้เป็นตัวกำหนดอายุการใช้งาน โดยกำหนดค่า E2 เริ่มต้นกรณีบูรณะโครงสร้างทางเท่ากับ 500 MPa. ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐานวัสดุงานทางของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับการคำนวณค่าซ่อมบำรุงตลอดระยะเวลาที่วิเคราะห์ไม่นำดัชนีราคาค่าก่อสร้างต่างๆ มาร่วมพิจารณา เนื่องจากเป็นปัจจัยที่คาดการณ์ได้ยาก ซึ่งวิธีการซ่อมตามการกำหนดเงื่อนไขและต้นทุนค่าใช้จ่ายในการซ่อมแสดงดังตารางที่ 4.8

จากตารางที่ 4.8 สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI และ E2 ทั้งสองแนวทางการซ่อมบำรุงในอนาคตได้ ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 โดยจะเห็นว่าหากเป็นกรณีที่ซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างชั้นทางค่า IRI ในปีที่ 14 มีค่าเท่ากับ 3.594 เมตร/กิโลเมตร ซึ่งตลอดอายุ 14 ปี มีการเสริมผิวทางลาดยางเพื่อปรับสภาพผิวทางทั้งหมด 1 ครั้ง ในต้นปีที่ 8 และสำหรับค่า E2 หากเป็นการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวค่า E2 จะมีค่าเริ่มต้นที่ 230.86 ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ต่อเนื่องจากอายุการใช้งานของโครงสร้างชั้นทางหลังการบูรณะครั้งล่าสุด

ตารางที่ 4.8 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่า IRI และ E2 ตลอดอายุการใช้งาน

ปีที่	กรณีเสริมผิวทาง		กรณีบูรณะโครงสร้างทาง	
	IRI สิ้นปี (m/km.)	E2 สิ้นปี (MPa.)	IRI สิ้นปี (m/km.)	E2 สิ้นปี (MPa.)
1	2.26	186.62	2.170	455.49
2	2.44	145.89	2.359	417.22
3	สิ้นสุดการวิเคราะห์		2.568	384.32
4			2.797	356.03
5			3.048	331.71
6			3.320	310.80
7			3.525	292.83
8			2.437	266.94
9			2.648	242.94
10			2.880	220.69
11			3.073	200.05
12			3.231	180.92
13			3.480	160.84
14			3.594	141.76
15			สิ้นสุดการวิเคราะห์	



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของค่า IRI ระหว่างแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางและบูรณะ

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของค่า E2 ระหว่างแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางและบูรณะ

ตารางที่ 4.9 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ต้นทุนค่าซ่อมบำรุง เมื่อกำหนดให้ค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.5 $IRI_{เป้าหมายฉาบผิว}$ เท่ากับ 3.00 และ $E2_{เป้าหมาย}$ เท่ากับ 150 MPa.

ปีที่	กรณีเสริมผิวทาง		ปีที่	กรณีบูรณะโครงสร้างทาง	
	วิธีการซ่อม	ค่าซ่อมบำรุง (บาท)		วิธีการซ่อม	ค่าซ่อมบำรุง (บาท)
9	เสริมผิวทาง 5 cm.	3,010,000	9	บูรณะโครงสร้าง	7,490,000
10	บำรุงปกติ	0	1	บำรุงปกติ	0
11	สิ้นสุดการวิเคราะห์		2	บำรุงปกติ	0
			3	บำรุงปกติ	0
			4	ฉาบผิวทาง 10 mm.	735,000
			5	ฉาบผิวทาง 10 mm.	735,000
			6	ฉาบผิวทาง 10 mm.	735,000
			7	เสริมผิวทาง 5 cm.	3,010,000
			8	บำรุงปกติ	0
			9	ฉาบผิวทาง 10 mm.	735,000
			10	ฉาบผิวทาง 10 mm.	735,000
			11	ฉาบผิวทาง 10 mm.	735,000
			12	ฉาบผิวทาง 10 mm.	735,000
			13	ฉาบผิวทาง 10 mm.	735,0000
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)		3,010,000	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)		11,178,202
EUAC (บาท/ปี)		1,781,011	EUAC (บาท/ปี)		1,686,469

12) ขั้นตอนสุดท้าย พิจารณาเลือกแนวทางการซ่อมบำรุงซึ่งส่งผลให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปี (EUAC) น้อยที่สุด โดยในกรณีนี้แนวทางการซ่อมบำรุงที่มีต้นทุนเฉลี่ยต่อปีน้อยที่สุดคือแนวทางการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง ซึ่งมีอายุการใช้งาน 14 ปี และมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยเท่ากับ 1,686,496 บาทต่อปี ซึ่งต่ำกว่าแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวซึ่งมีอายุการใช้งานเพียง 2 ปี และมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยเท่ากับ 1,781,011 บาทต่อปี

4.4 ผลการวิเคราะห์แนวทางการซ่อมบำรุงจากการประเมินต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน

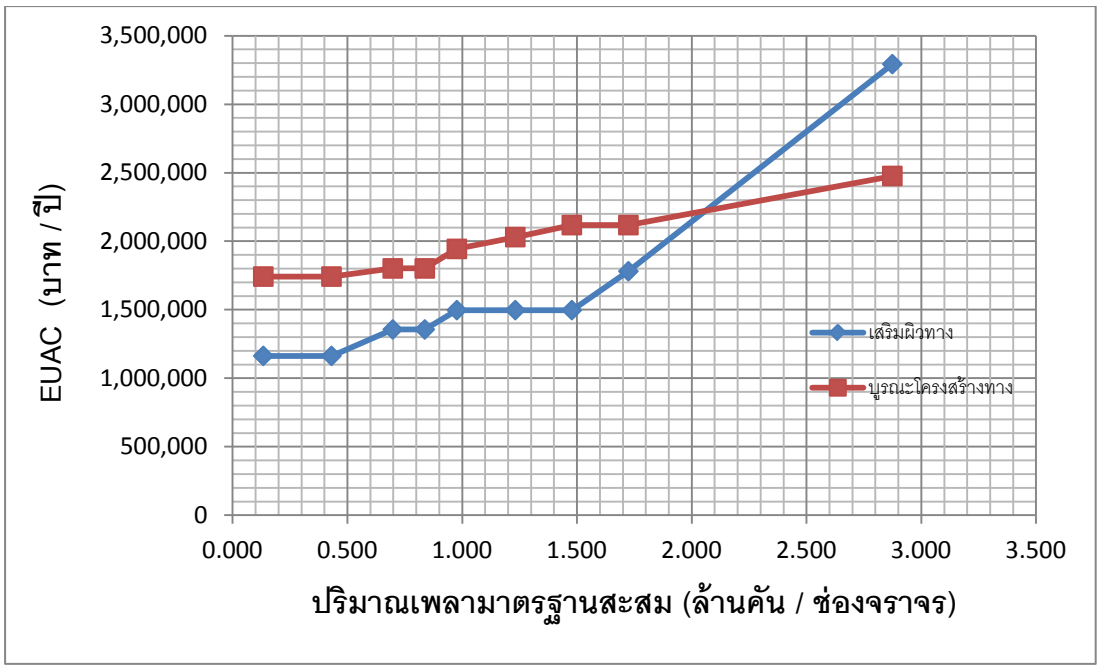
การวิเคราะห์แนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมจากการประเมินต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน เป็นการเลือกวิธีการซ่อมบำรุง ที่ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีต่ำที่สุด (Equivalent Uniform Annual Cost : EUAC) และเนื่องจากต้นทุนค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานแปรผันตามปริมาณการจราจร รวมถึงเงื่อนไขที่กำหนดเป็นเกณฑ์เป้าหมายสำหรับการซ่อมบำรุง ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้วิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่า EUAC เพื่อหาแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมและคุ้มค่ากับการลงทุนเมื่อมีการซ่อมบำรุงตามเงื่อนไขเป้าหมายที่ได้วางเอาไว้ตามแต่ละยุทธศาสตร์ของการบริหารจัดการโครงข่ายสายทาง โดยวิเคราะห์แนวโน้มของค่า EUAC ในปริมาณการจราจรที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 500 – 30,000 คันต่อวัน ที่ IRIเป้าหมาย$_{เสริมผิว}$ เท่ากับ 3.00 เมตร/กิโลเมตร และ IRIเป้าหมาย$_{เสริมผิว}$ เท่ากับ 3.50 เมตร/กิโลเมตร ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 และรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ โดยกำหนดค่า IRI เป้าหมาย$_{ฉาบผิว}$ เท่ากับ 2.50 เมตร/กิโลเมตร และ ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางที่ยอมให้เท่ากับ 150 MPa.

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ค่า EUAC เมื่อกำหนดปริมาณการจราจร 500 – 30,000 คันต่อวัน และ $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.00 เมตร/กิโลเมตร

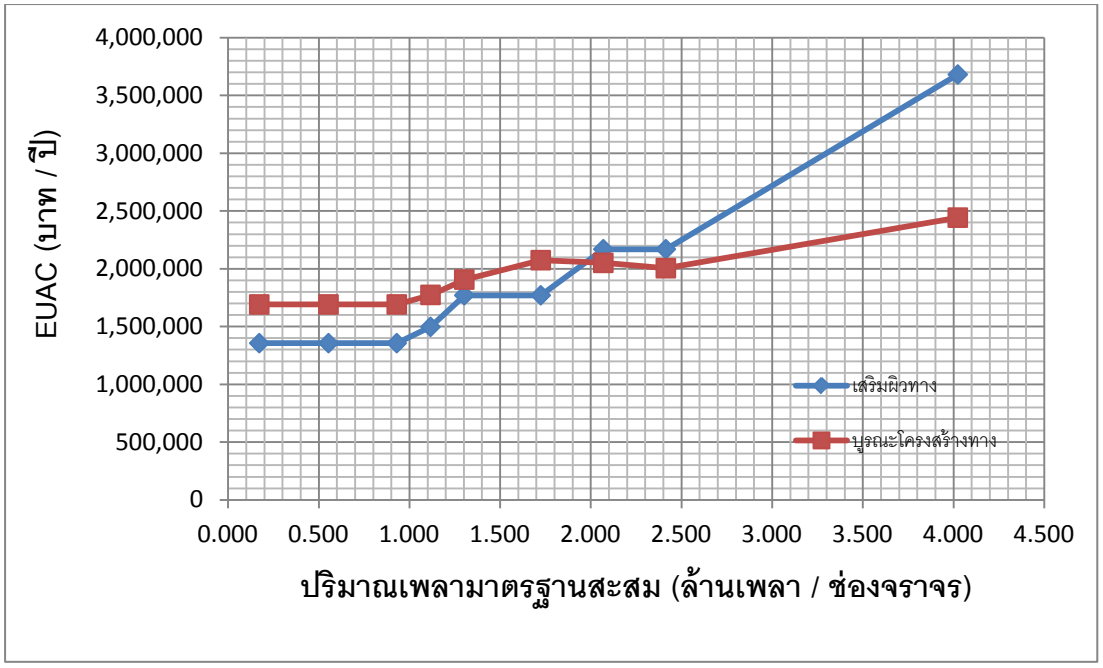
ปริมาณการจราจร (คัน / วัน)	ปีที่เข้าเกณฑ์พิจารณา	t_{IRI} (ปี)	t_{E2} (ปี)	NE4 (ล้านเพลา/ช่องจราจร)	Overlay	Rehabilitation
					EUAC (บาท / ปี)	EUAC (บาท / ปี)
500	7	6	4	0.134	**1,163,237**	1,742,217
1,500	7	6	4	0.431	**1,163,237**	1,742,217
2,500	6	5	4	0.698	**1,356,148**	1,801,654
3,000	6	5	4	0.838	**1,356,148**	1,801,654
3,500	6	4	3	0.977	**1,497,165**	1,944,027
5,000	5	4	3	1.232	**1,497,165**	2,030,226
6,000	5	4	3	1.478	**1,497,165**	2,117,846
7,000	5	4	2	1.725	**1,781,011**	2,117,846
10,000	5	4	2	2.874	3,292,800	**2,476,346**
30,000	5	2	1	8.623	5,565,000	**3,362,408**

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่า EUAC เมื่อกำหนดปริมาณการจราจร 500 – 30,000 คันต่อวัน และ $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.50 เมตร/กิโลเมตร

ปริมาณการจราจร (คัน / วัน)	ปีที่เข้าเกณฑ์พิจารณา	t_{IRI} (ปี)	t_{E2} (ปี)	NE4 (ล้านเพลา/ช่องจราจร)	Overlay	Rehabilitation
					EUAC (บาท / ปี)	EUAC (บาท / ปี)
500	9	8	6	0.172	**1,356,148**	1,690,850
1,500	9	7	6	0.554	**1,356,148**	1,690,850
2,500	8	7	6	0.931	**1,356,148**	1,690,850
3,000	8	7	6	1.117	**1,497,165**	1,773,642
3,500	8	6	5	1.303	**1,770,394**	1,906,388
5,000	7	6	5	1.725	**1,770,394**	2,074,155
6,000	7	6	5	2.070	2,169,313	**2,050,978**
7,000	7	5	4	2.414	2,169,313	**2,004,822**
10,000	7	5	4	4.024	3,681,102	**2,442,403**
30,000	4	3	2	6.899	5,565,000	**3,045,712**



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า EUAC และ NE4 โดยกำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.00 เมตร/กิโลเมตร



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า EUAC และ NE4 โดยกำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.50 เมตร/กิโลเมตร

สำหรับการกำหนดขอบเขตของค่า IRIเป้าหมาย ได้กำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ ในการวิเคราะห์ที่ 3.00 และ 3.50 เมตร/กิโลเมตร โดยพิจารณาจากค่า IRI ที่เหมาะสมในแนวทางการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ตามยุทธศาสตร์ของระบบบริหารบำรุงทางของกรมทางหลวง โดยผลการวิเคราะห์ที่กำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.00 เมตร/กิโลเมตร พบว่าในช่วงปริมาณเพลามาตรฐานสะสมตั้งแต่ 0 – 2.10 ล้านเพลาต่อช่องจราจร จะให้ผลลัพธ์เป็นการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทาง ซึ่งพิจารณาได้จากค่า EUAC ของแนวทางการซ่อมบำรุงเสริมผิวทางที่ต่ำกว่าแนวทางการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และในช่วงปริมาณเพลามาตรฐานสะสมมากกว่า 2.10 ล้านเพลาต่อช่องจราจรขึ้นไป จะให้ผลลัพธ์เป็นแนวทางการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทางดังแสดงในรูปที่ 4.4 ส่วนการวิเคราะห์ที่กำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.50 เมตร/กิโลเมตร พบว่าในช่วงปริมาณเพลามาตรฐานสะสมตั้งแต่ 0 – 1.90 ล้านเพลาต่อช่องจราจร จะให้ผลลัพธ์เป็นการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทาง ซึ่งพิจารณาได้จากค่า EUAC ของแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางที่ต่ำกว่าแนวทางการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และในช่วงปริมาณเพลามาตรฐานสะสมมากกว่า 1.90 ล้านเพลาต่อช่องจราจร ขึ้นไปจะให้ผลลัพธ์เป็นแนวทางการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทางดังแสดงในรูปที่ 4.5

ข้อสังเกตของผลการวิเคราะห์ คือ การกำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ นั้นมีผลต่อแนวทางการซ่อมบำรุงโดยค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ จะแสดงถึงความถี่ในการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางซึ่งการวิเคราะห์ที่ค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.00 เมตร/กิโลเมตร จะซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทางที่จำนวนเพลามาตรฐานสะสมที่มากกว่าค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ ที่ 3.50 เมตร/กิโลเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากการซ่อมบำรุงตามกำหนดระยะเวลาด้วยวิธีเสริมผิวทางที่ถี่กว่าทำให้ชะลออัตราการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นทางได้มากกว่าซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยของความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทาง

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าถนนที่มีการกำหนดนโยบายค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.00 เมตร/กิโลเมตร โดยในช่วงปริมาณการจราจรต่ำกว่า 10,000 คัน/วัน และปริมาณเพลามาตรฐานสะสมต่ำกว่า 2.10 ล้านเพลาต่อช่องจราจร จะส่งผลให้การซ่อมบำรุงแบบเสริมผิว

ทางมีต้นทุนค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ถูกกว่าการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง ถึงแม้จะไม่สามารถใช้งานผิวทางใหม่ที่ได้จากการเสริมผิวจนครบกำหนดซ่อมบำรุงในรอบถัดไปก็ตาม และสำหรับปริมาณการจราจรสูงกว่า 10,000 คัน/วัน และปริมาณเพลามาตรฐานสะสมมากกว่า 2.10 ล้านเพลาต่อช่องจราจร จะส่งผลให้การซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างชั้นทางมีความคุ้มค่ามากกว่าแบบเสริมผิวทาง เช่นเดียวกับกรณีสายทางที่กำหนดให้ค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ มีค่าเท่ากับ 3.5 เมตร/กิโลเมตร โดยในช่วงปริมาณการจราจรต่ำกว่า 6,000 คัน/วัน และปริมาณเพลามาตรฐานสะสมต่ำกว่า 1.90 ล้านเพลาต่อช่องจราจร จะส่งผลให้การซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางจะมีต้นทุนค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ถูกกว่าการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทางถึงแม้จะไม่สามารถใช้งานผิวทางใหม่ที่ได้จากการเสริมผิวทางจนครบกำหนดซ่อมบำรุงในรอบถัดไปก็ตาม และสำหรับปริมาณการจราจรสูงกว่า 6,000 คัน/วัน และปริมาณเพลามาตรฐานสะสมมากกว่า 1.90 ล้านเพลาต่อช่องจราจร จะส่งผลให้การซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างชั้นทางมีความคุ้มค่ามากกว่าแบบเสริมผิวทาง

4.5 แนวทางการปรับปรุงการวิเคราะห์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบบริหารบำรุงทาง

จากกรอบวิธีการวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม จึงมีความจำเป็นในการปรึกษาและขอรับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญด้านงานบริหารงานทางเพื่อใช้เป็นแนวทางการปรับปรุงกรอบวิธีการวิเคราะห์แนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมในแต่ละยุทธศาสตร์สายทาง โดยแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ประเด็น คือ

1. การกำหนดเกณฑ์ IRIเป้าหมายที่ใช้ในการซ่อมบำรุง ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับลักษณะของสายทางตามแนวทางหรือนโยบายการซ่อมบำรุง ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้เป็นเป้าหมายนั้น จะต้องมีความเหมาะสมจากการประเมินด้วยแนวทางต่างๆ เช่น การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากกรอบวิธีคิดนี้จะพิจารณาในเรื่องของต้นทุนค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเท่านั้น ด้วยเหตุผลของลักษณะการซ่อมบำรุงทั้งแบบเสริมผิวทางและแบบบูรณะโครงสร้างทาง จะได้ผิวทางใหม่ทั้ง

สองวิธี ดังนั้นค่า IRI เริ่มต้นจะมีค่าเท่ากัน ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์แนวทางการซ่อมบำรุงด้วยการประเมินจากความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ที่ใช้อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนที่มากที่สุด (B/C) เป็นตัวชี้วัดได้ เนื่องจากผลประโยชน์ที่เกิดขึ้น (Benefit) จะเท่ากันเนื่องด้วยค่า IRI แต่ต้นทุนค่าซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทางที่สูงกว่าแบบเสริมผิวทางค่อนข้างมากนั้น ทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแนวทางนี้จะส่งผลให้แนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางมีค่าอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนที่สูงกว่าแนวทางการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทางเสมอ

2. การกำหนดเกณฑ์ E2เป้าหมายในการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง เนื่องด้วยงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองจากคุณสมบัติของชั้นทางตามขอบเขตของงานวิจัยที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของชั้นทางส่วนใหญ่ของประเทศไทยในความดูแลของกรมทางหลวง รวมถึงเกณฑ์ E2 เป้าหมาย ซึ่งเป็นเกณฑ์ค่าความแข็งแรงที่ยอมให้ของโครงสร้างชั้นพื้นทางตามขอบเขตของงานวิจัยเช่นกัน ดังนั้นสำหรับการวิเคราะห์สายทางที่มีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างออกไปจึงต้องพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาใหม่ตามลักษณะของโครงสร้างทางรวมถึงเกณฑ์ที่ใช้เป็นเป้าหมายที่ต้องกำหนดให้ตรงกับค่าความแข็งแรงที่ยอมให้ของคุณสมบัติโครงสร้างทางที่พิจารณา โดยสามารถใช้แนวความคิดในกรอบการวิเคราะห์สำหรับขั้นตอนการพิจารณาแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมได้เช่นเดิม

สำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่จำเป็นต้องปรับเพิ่มขึ้นในอนาคต เนื่องจากปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น การปรับขึ้นค่าแรง ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าการเสื่อมสภาพของเครื่องจักร ราคาค่าวัสดุ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นผลให้ต้นทุนค่าซ่อมบำรุงในแต่ละปีมีการปรับขึ้นอยู่เสมอ ดังนั้นจึงวิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น 10% – 50% พบว่าทั้งการกำหนดค่า IRIเป้าหมาย$_{เสริมผิว}$ ที่ 3.00 และ 3.50 เมตรต่อกิโลเมตร ให้ผลลัพธ์ของแนวทางการซ่อมบำรุงไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 การพิจารณาแนวทางการซ่อมบำรุงเมื่อต้นทุนค่าใช้จ่ายปรับเพิ่มขึ้นในอนาคต โดยกำหนด $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ 3.00 เมตรต่อกิโลเมตร

ปริมาณการจราจร (คัน / วัน)	แนวทางการซ่อมบำรุงเมื่อพิจารณาจากต้นทุนค่าซ่อมบำรุงตลอดอายุการใช้งาน โดยกำหนดค่า IRI เป้าหมาย เท่ากับ 3.00 เมตรต่อกิโลเมตร					
	เพิ่มขึ้น 0%	เพิ่มขึ้น 10%	เพิ่มขึ้น 20%	เพิ่มขึ้น 30%	เพิ่มขึ้น 40%	เพิ่มขึ้น 50%
500	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
1,500	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
2,500	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
3,000	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
3,500	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
5,000	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
6,000	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
7,000	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
10,000	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**
30,000	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**

ตารางที่ 4.13 การพิจารณาแนวทางการซ่อมบำรุงเมื่อต้นทุนค่าใช้จ่ายปรับเพิ่มขึ้นในอนาคต โดยกำหนด $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ 3.50 เมตรต่อกิโลเมตร

ปริมาณการจราจร (คัน / วัน)	แนวทางการซ่อมบำรุงเมื่อพิจารณาจากต้นทุนค่าซ่อมบำรุงตลอดอายุการใช้งาน โดยกำหนดค่า IRI เป้าหมาย เท่ากับ 3.50 เมตรต่อกิโลเมตร					
	เพิ่มขึ้น 0%	เพิ่มขึ้น 10%	เพิ่มขึ้น 20%	เพิ่มขึ้น 30%	เพิ่มขึ้น 40%	เพิ่มขึ้น 50%
500	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
1,500	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
2,500	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
3,000	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
3,500	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
5,000	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว	เสริมผิว
6,000	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**
7,000	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**
10,000	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**
30,000	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**	**บูรณะ**

4.6 ปัญหาและข้อจำกัดของข้อมูล

ในการเก็บข้อมูลจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทางในการหาค่า E2 ในอนาคตเพื่อใช้ประกอบการพิจารณาหาแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมมีปัญหาและอุปสรรคดังนี้

1. เนื่องจากข้อจำกัดของระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการเก็บสำรวจเก็บข้อมูลค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางด้วยเครื่องมือ FWD จึงทำให้จำนวนตัวอย่างสายทางและสำหรับการศึกษานี้ น้อยกว่าจำนวนตัวแทนที่วิเคราะห์โดยทฤษฎีทางสถิติ ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้อาจจะยังไม่เพียงพอสำหรับการใช้เป็นค่าตัวแทนในโครงข่ายระดับประเทศ

2. การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมานั้นไม่สามารถนำมาใช้ทำนายสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางกับสายทางที่เคยมีประวัติการซ่อมบำรุงแบบหมุนเวียนวัสดุ (Pavement Recycling) มาก่อน และลักษณะโครงสร้างทางต้องมีรูปแบบของความหนาและวัสดุ เป็นผิวทางแอสฟัลต์ความหนาไม่เกิน 10 เซนติเมตร ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุหินคลุกความหนาอยู่ระหว่าง 20-25 เซนติเมตร

3. การกำหนดราคาต่อหน่วย เช่น ต้นทุนค่าซ่อมบำรุง สำหรับวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายต่างๆ เป็นการกำหนดราคาในปีปัจจุบัน ซึ่งหากในอนาคตต้องการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ดังกล่าว ควรปรับราคาต้นทุนต่อหน่วยใหม่ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับสภาพเศรษฐกิจในอนาคต

4.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์แนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมและผลการวิเคราะห์โดยเริ่มตั้งแต่การคัดกรองข้อมูลสายทางที่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายในระดับโครงสร้าง ซึ่งในสายทางที่ผ่านการคัดกรองให้อยู่ในกรณีเฝ้าระวังจะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายทั้งสองแนวทางการซ่อมบำรุง คือ การซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง และการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทาง เพื่อหาแนวทางการซ่อมบำรุงที่ส่งผลให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีต่ำที่สุด ซึ่งอธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.1 4.2 รวมถึงการกำหนดเงื่อนไขและเกณฑ์ที่ใช้เป็นเป้าหมายในการวิเคราะห์ จากนั้นได้วิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมซึ่งผลของการวิเคราะห์สำหรับการกำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.00 เมตรต่อกิโลเมตร จะให้ผลลัพธ์เป็นการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางในกรณีที่ปริมาณการจราจรต่ำกว่า 10,000 คันต่อวัน และมีปริมาณเพลามาตรฐานสะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 0 – 2.1 ล้านเพลาต่อช่องจราจร และสำหรับกรณีที่ปริมาณการจราจรสูงกว่า 10,000 คันต่อวัน และมีปริมาณเพลามาตรฐานสะสมมากกว่า 2.10 ล้านเพลาต่อช่องจราจรขึ้นไป จะให้ผลลัพธ์เป็นการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง สำหรับการกำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.50 เมตรต่อกิโลเมตร จะให้ผลลัพธ์เป็นการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางในกรณีที่ปริมาณการจราจรต่ำกว่า 6,000 คันต่อวัน และมีปริมาณเพลามาตรฐานสะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 0 – 1.90 ล้านเพลาต่อช่องจราจร และสำหรับกรณีที่ปริมาณการจราจรสูงกว่า 6,000 คันต่อวัน และมีปริมาณเพลามาตรฐานสะสมมากกว่า 1.90 ล้านเพลาต่อช่องจราจรขึ้นไป จะให้ผลลัพธ์เป็นการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง และมีข้อสังเกตว่าสำหรับแนวทางที่มีการกำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ ที่ต่ำกว่าจะทำให้สามารถชะลออัตราการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทางได้เนื่องจากการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางที่ถี่กว่าทำให้แรงกระทำที่ส่งผ่านไปถึงโครงสร้างชั้นพื้นทางได้น้อยลงเนื่องจากความหนาที่เพิ่มขึ้นจากการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทาง และลำดับสุดท้ายได้กล่าวถึงปัญหาและข้อจำกัดของข้อมูล เพื่อให้สามารถนำไปใช้ปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง ตลอดจนองค์ประกอบของวิธีการวิเคราะห์ให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการใช้งาน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

กรมทางหลวงเป็นหน่วยงานที่มีถนนอยู่ในความรับผิดชอบมากกว่า 60,000 กิโลเมตร ได้แบ่งรูปแบบงานซ่อมบำรุงออกเป็น 4 ประเภทคือ งานซ่อมบำรุงปกติ งานซ่อมบำรุงตามกำหนดระยะเวลา งานซ่อมบำรุงพิเศษ และงานซ่อมบำรุงฉุกเฉิน แต่เนื่องจากปัจจุบันงบประมาณในการซ่อมบำรุงถนนของกรมทางหลวงมีน้อยกว่าความต้องการในการซ่อมบำรุงรักษาทาง ซึ่งไม่สามารถซ่อมบำรุงรักษาทางในความรับผิดชอบได้ครอบคลุมทุกความเสียหายที่เกิดขึ้นกับปริมาณสายทางทั้งหมดในความดูแล ด้วยเหตุนี้การวางแผนงบประมาณจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยปัจจุบันกรมทางหลวง ได้นำระบบบริหารบำรุงทางมาใช้เป็นเครื่องมือในการบริหารจัดการและจัดสรรงบประมาณที่ได้รับให้สอดคล้องกับความต้องการ คุ้มค่า และเกิดประโยชน์ต่อผู้ใช้ทางมากที่สุด

อย่างไรก็ตามระบบบริหารบำรุงทางในปัจจุบันได้ใช้ค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI) เป็นตัวชี้วัดระดับการให้บริการของทาง ซึ่งค่า IRI เป็นการประเมินสภาพบริการของผิวทางแต่ไม่สามารถสะท้อนถึงความเสียหายในระดับโครงสร้างชั้นทางได้ ทำให้ไม่สามารถประเมินถึงความเสียหายหนักที่เกิดจากโครงสร้างชั้นทางและอาจมีผลให้เกิดการซ่อมบำรุงไม่คุ้มค่ากับงบประมาณที่เสียไปในบางกรณี ปัจจุบันกรมทางหลวงใช้เครื่องมือสำรวจความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางที่เรียกว่า Falling Weight Deflectrometer (FWD) เข้ามาร่วมพิจารณาถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง แต่ด้วยราคาของเครื่องมือที่สูง ประกอบกับงบประมาณที่จำกัด ทำให้จำนวนเครื่องมือที่มีอยู่ไม่สามารถรองรับปริมาณสายทางที่รับผิดชอบอยู่เป็นจำนวนมากได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอกรอบวิธีวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม โดยพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทาง ซึ่งอาศัยข้อมูลจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD มาประยุกต์ใช้กับระบบบริหารงานบำรุงทาง เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการคัดกรองสายทางที่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายหนักในระดับโครงสร้างชั้นทาง จากจำนวนสายทางที่มีปริมาณมากให้เหลือเฉพาะที่ควรจะพิจารณาแบบเร่งด่วนได้

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะสายทางตัวอย่างตามลักษณะโครงสร้างทางที่มีคุณสมบัติชั้นผิวทางเป็นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตความหนาไม่เกิน 10 เซนติเมตร ชั้นพื้นทางเป็นวัสดุหินคลุกความหนาไม่เกิน 25 เซนติเมตร ชั้นรองพื้นทางวัสดุหินกรวดความหนาไม่เกิน 25 เซนติเมตรและชั้นดินคันทางวัสดุดินเดิมตามแต่ลักษณะภูมิประเทศของตำแหน่งที่ตั้งสายทาง โดยมีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 79 ตัวอย่าง ซึ่งได้จากการคัดกรองและตรวจสอบข้อมูลตามขอบเขตของงานวิจัย โดยแต่ละตัวอย่างแทนผลการทดสอบค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (Elastic Modulus of Base Layer, E2) ด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectrometer (FWD) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจบริเวณสนามทดสอบได้ค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งต่างๆ (Deflection) จากนั้นนำค่าการแอ่นตัวที่ได้เข้าสู่โปรแกรมวิเคราะห์ค่าอีลาสติกโมดูลัสด้วยวิธีคำนวณย้อนกลับ (Back – Calculation Analysis) ซึ่งกรมทางหลวงใช้โปรแกรม ELMOD ในการวิเคราะห์ โดยในแต่ละตัวอย่างหมายถึงค่าเฉลี่ยทุกๆ 1 กิโลเมตรจากผลการทดสอบ โดยนำข้อมูลเหล่านี้พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทางด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอย (Regression Analysis) ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่าปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางแบบมีนัยสำคัญ ได้แก่ อายุการใช้งาน ปริมาณการจราจร ปริมาณยานยนต์หนัก และความหนาชั้นผิวทางแอสฟัลต์ ผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณเพลามาตรฐานสะสมซึ่งเป็นผลการคำนวณระหว่างปัจจัยของอายุการใช้งาน ปริมาณการจราจร และปริมาณยานยนต์หนัก มีความสัมพันธ์กับค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทางมากที่สุด รองลงมาคือปัจจัยด้านความหนาของชั้นผิวทางแอสฟัลต์ ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์เท่ากับ -0.894 และ 0.408 ตามลำดับ และแบบจำลองที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น (R^2) เท่ากับ 0.790 ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุงานทางมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากแรงกระทำของปริมาณเพลาสะสมซึ่งถ่ายลงบนผิวทางแอสฟัลต์และกระจายต่อเนื่องลงสู่ระดับโครงสร้างชั้นทางด้านล่างลงไป ซึ่งความเข้มข้นของแรงกระทำที่ถูกถ่ายทอดจากชั้นผิวทางลงสู่โครงสร้างชั้นพื้นทางและรองพื้นทางด้านล่างนั้นจะมีความเข้มข้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นผิวทางแอสฟัลต์ที่มีปัจจัยเกี่ยวข้องในเรื่องของวัสดุที่ใช้ ความหนา และวิธีการก่อสร้าง จากนั้นได้นำแบบจำลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วย

อนุพันธ์ลำดับที่1 เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงการเสื่อมสภาพของชั้นทางเทียบกับปริมาณเพลามาตรฐานสะสมเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความแข็งแรงของชั้นพื้นทางในอนาคตได้ ต่อมาได้ประยุกต์ใช้เข้ากับระบบบริหารบำรุงทาง ซึ่งเป็นกรอบวิธีวิเคราะห์สำหรับแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (Life Cycle Cost Analysis, LCCA) ของแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทาง (Overlay) และแนวทางการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทาง (Rehabilitation) สำหรับตัวอย่างผลการวิเคราะห์ได้วิเคราะห์ด้วยการกำหนดค่า IRI เป้าหมายที่ 3.00 และ 3.50 เมตร/กิโลเมตร ซึ่งสอดคล้องกับหลักปฏิบัติของกรมทางหลวงในการกำหนดตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินตามประเด็นยุทธศาสตร์ของกรมทางหลวง พ.ศ. 2555 – 2559 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 1 การพัฒนาทางหลวงเพื่อรองรับระบบโลจิสติกส์ภาคขนส่ง
    - ในการประเมินตัวชี้วัดที่ 3.3 กำหนดร้อยละของระยะทางโครงข่ายทางหลวงที่ รองรับระบบโลจิสติกส์มีดัชนีความขรุขระสากลของทาง (IRI) เฉลี่ยไม่เกิน 3.00
- ประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 2 การพัฒนาโครงข่ายทางหลวงเพื่อรองรับการเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน
    - ในการประเมินตัวชี้วัดที่ 3.3 กำหนดร้อยละของระยะทางโครงข่ายทางหลวงสายหลักระหว่างประเทศมีดัชนีความขรุขระสากลของทาง (IRI) เฉลี่ยไม่เกิน 3.00
- ประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 3 การดูแลรักษา ปรับปรุง และพัฒนาประสิทธิภาพโครงข่ายทางหลวงให้กระจายทั่วทุกภูมิภาค
    - ในการประเมินตัวชี้วัดที่ 3.3 กำหนดร้อยละของระยะทางโครงข่ายทางหลวงในประเทศมีดัชนีความขรุขระสากลของทาง (IRI) เฉลี่ยไม่เกิน 3.50

โดยผลการวิเคราะห์พบว่าถนนที่มีการกำหนดนโยบายค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.00 เมตร/กิโลเมตร โดยในช่วงปริมาณการจราจรต่ำกว่า 10,000 คัน/วัน และปริมาณเพลามาตรฐานสะสมต่ำกว่า 2.10 ล้านเพลาต่อช่องจราจร จะส่งผลให้การซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางมีต้นทุนค่าใช้จ่าย

เฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ถูกกว่าบูรณะโครงสร้างทางถึงแม้จะไม่สามารถใช้งานผิวทางใหม่ที่ได้จากการเสริมผิวจนครบกำหนดซ่อมบำรุงในรอบถัดไปก็ตาม และสำหรับปริมาณการจราจรสูงกว่า 10,000 คัน/วัน และปริมาณเพลามาตรฐานสะสมมากกว่า 2.10 ล้านเพลาต่อช่องจราจร จะส่งผลให้การซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างชั้นทางมีความคุ้มค่ามากกว่าแบบเสริมผิวทาง เช่นเดียวกับกรณีสายทางที่กำหนดให้ค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ มีค่าเท่ากับ 3.5 เมตร/กิโลเมตร โดยในช่วงปริมาณการจราจรต่ำกว่า 6,000 คัน/วัน และปริมาณเพลามาตรฐานสะสมต่ำกว่า 1.90 ล้านเพลาต่อช่องจราจร จะส่งผลให้การซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางจะมีต้นทุนค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ถูกกว่าการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทางถึงแม้จะไม่สามารถใช้งานผิวทางใหม่ที่ได้จากการเสริมผิวจนครบกำหนดซ่อมบำรุงในรอบถัดไปก็ตาม และสำหรับปริมาณการจราจรสูงกว่า 6,000 คัน/วัน และปริมาณเพลามาตรฐานสะสมมากกว่า 1.90 ล้านเพลาต่อช่องจราจร จะส่งผลให้การซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างชั้นทางมีความคุ้มค่ามากกว่าแบบเสริมผิวทาง และมีข้อสังเกตของผลการวิเคราะห์ คือ การกำหนดค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ นั้นมีผลต่อแนวทางการซ่อมบำรุงโดยค่า IRI เป้าหมาย จะแสดงถึงความถี่ในการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางซึ่งการวิเคราะห์ที่ค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ เท่ากับ 3.00 เมตร/กิโลเมตร จะซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างทางที่จำนวนเพลามาตรฐานสะสมที่มากกว่าค่า $IRI_{เป้าหมายเสริมผิว}$ ที่ 3.50 เมตร/กิโลเมตร ซึ่งเป็นผลมากจากการซ่อมบำรุงตามกำหนดระยะเวลาด้วยวิธีเสริมผิวทางที่ถี่กว่าทำให้ชะลออัตราการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นทางได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทบทวนงานวิจัยในอดีตที่แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของความหนาที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมผิวทางมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

แบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางได้พัฒนาขึ้นบนข้อจำกัดด้านลักษณะโครงสร้างชั้นทางตามขอบเขตของงานวิจัยในเรื่องของวัสดุและความหนา ซึ่งกรอบวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการคัดกรองสายทางที่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายหนักอันจะเกิดขึ้นจากความเสียหายในระดับโครงสร้างชั้นพื้นทางและส่งผลกระทบมายังโครงสร้างชั้นผิวทาง ซึ่งการวิเคราะห์จะเป็นการเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่าย

ตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีระหว่างแนวทางการซ่อมบำรุงแบบเสริมผิวทางและแบบบูรณะโครงสร้างชั้นทางเท่านั้น แต่ปัจจุบันการซ่อมบำรุงแบบหมุนเวียนวัสดุมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) ได้รับความนิยมอย่างมากในการซ่อมบำรุงแบบบูรณะโครงสร้างชั้นทาง เนื่องจากต้นทุนค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่ถูกกว่าและอายุบริการที่มากกว่าการบูรณะโครงสร้างทางด้วยวัสดุแบบเดิม ดังนั้นสายทางส่วนใหญ่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงที่ได้เคยบูรณะโครงสร้างทางในช่วง 4-5 ปีย้อนหลังจะมีลักษณะโครงสร้างชั้นทางเป็นวัสดุหมุนเวียนซึ่งเป็นการผสมซีเมนต์ลงในขั้นตอนปรับปรุงวัสดุทำให้ คุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทางไม่สามารถใช้แบบจำลองโครงสร้างทางที่พัฒนาขึ้นในการวิเคราะห์ได้ เนื่องด้วยข้อจำกัดทางเครื่องมือและโปรแกรมการทดสอบที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าความเป็นจริงมากสำหรับวัสดุหมุนเวียน จึงไม่สามารถใช้ค่าอีลาสติกโมดูลัสของชั้นทางที่ได้จากโปรแกรมคำนวณย้อนกลับมาพัฒนาเป็นแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทางได้ และสำหรับอายุบริการของสายทางที่นำมาวิเคราะห์นั้นมีความยากลำบากในการสืบประวัติอายุบริการและประวัติงานซ่อมบำรุงทางที่จัดเก็บโดยแขวงการทางที่รับผิดชอบ เนื่องจากบางกรณีสายทางมีการปรับหมายเลขหลักกิโลเมตร ทำให้เกิดความสับสนต่อการตรวจสอบผลสำรวจด้วยเครื่องมือ FWD ที่จัดเก็บข้อมูลตามหมายเลขหลักกิโลเมตรใหม่ ดังนั้นการประยุกต์ใช้แนวทางการวิเคราะห์รูปแบบการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมจึงต้องมีการตรวจสอบข้อมูลประวัติสายทางที่ถูกต้อง

สำหรับในอนาคตเมื่อมีผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ที่มากเพียงพอและครอบคลุมทุกประเภทการจราจร ควรนำมาใช้พัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชั้นพื้นทางเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถพยากรณ์ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางที่มีการปรับปรุงด้วยแนวทางหมุนเวียนวัสดุได้จะสามารถเพิ่มมิติในการวิเคราะห์ให้มีความหลากหลายและรองรับข้อมูลสายทางในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงได้มากยิ่งขึ้นด้วย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กชกร โง้วศิริ และ วิศณุ ทรัพย์สมพล. การกำหนดคาบเวลางานเสริมผิวแอสฟัลต์โดยการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของถนน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 7 (2544)

ทางหลวง, กรม. คู่มือปฏิบัติงานบำรุงรักษาทางหลวง. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง, 2551.

กัลยา วานิชย์บัญชา. สถิติสำหรับงานวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

ชานนท์ อมรชัยศักดา และ วิศณุ ทรัพย์สมพล. กรอบการวิเคราะห์ระดับการให้บริการของสายทางที่เหมาะสมในแต่ละยุทธศาสตร์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 14 (2552)

ธันวิน สวัสดิศานต์, เศกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, นวพล พรหมจารีย์ และจตุพร ทิพย์ทอง. การสำรวจสภาพความเสียหายและหาสาเหตุของความเสียหายหลักของถนนลาดยางในประเทศไทย. สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง รายงานวิจัย ฉบับที่ วพ.261 (2551)

ภาษาอังกฤษ

American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C. : 1993.

Attoh-Okine, B., Predicting Roughness Progression in Flexible Pavements Using Artificial Neural Networks. Third International Conference on Managing Pavement 1 : 55-62, 1994

Haas, R., Pavement Management System. United States of America : McGraw-Hill, 1978.

Hoffman, M.S., Direct Method for Evaluating Structural Needs of Flexible Pavements with Falling-Weight Deflectometer Deflections. In Transportation Research Record 1860 (2003) : 41-47.

Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A., Resilient Response of Unbound Aggregates. Journal of Transportation Engineering January (2000) : 66-75.

Lytton, R.L., Blackcalculation of Pavement Layer Properties. In Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli. American Society for Testing and Materials STP1026 (1979) : 7-38.

NDIL. Modelling Road User Effects in HDM-4. Vancouver : The Asian Development Bank, 1995.

N.D. Lea International Ltd. Asia Development Bank Road Maintenance Project, Thailand T.A. No. 1006-THA. Final Report Volume 3, Main Report, Department of Highways, Thailand, 1992.

Odemark, N., Investigations as to the Elastic Properties of Soils Design of Pavements According to the Theory of Elasticity. Stockholm : Staten Vaeginstitut, 1949.

Odoki, J.B., and Henry, K., HDM-4 Highway Development and Management. 4 vols. Washington, D.C. : World Bank Publications, 2000.

Paterson, W.D.O., Road Deterioration and Maintenance Effects. Washington, D.C. : World Bank Publications, 1987.

Rodrigo, A.C., Road Network Evaluation Tools. Washington, D.C. : World Bank Publications, 2008.

Shahin, M.Y., Pavement Management for Airports, Roads, and Parking lot. New York, United States of America : Chapman and Hall, 1994.

Stevens, D., et al. A Comprehensive New Approach to Defining Structural Capacity (SNP). TRANSIT NZIHT 10th ANNUAL CONFERENCE (November 2009)

Ullidtz, P., Pavement Analysis. Amsterdam : Elsevier, 1987.

Yeo, I., Suh, Y., and Mun, S., Development of a Remaining Fatigue Life Model for Asphalt Black Base through Accelerated Pavement Testing. Construction and Building Materials Vol. 22 (2008) : 1881-1886

Zhang, Z., German, C., Lance, M., Ivan, D., Development of Structural Condition Index to Support Pavement Maintenance and Rehabilitation Decision at Network Level. In Transportation Research Record 1872 (2003) : 10-17.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทวี ก่อพงศ์เจริญชัย เกิดวันที่ 12 กันยายน พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาบริหารการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 ระหว่างการศึกษาได้รับทุนผู้ช่วยสอนและวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเป็นผู้ช่วยวิจัย สถาบันการขนส่งแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย