

การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต  
ของทางหลวงในประเทศไทยด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ



นายสิรินทร์ สืบจากรอด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2551  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENT DETERIORATION MODELS FOR  
THAILAND NATIONAL HIGHWAYS USING MARKOV CHAINS

Mr. Sirint Surbjakrod

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511070

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต  
ของทางหลวงในประเทศไทยด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ

โดย

นายสิรินทร์ สืบจากรอด

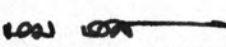
สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


รองศาสตราจารย์ ดร.วิศณุ ทรัพย์สมพล

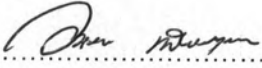
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

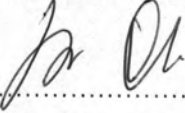
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต ธงทอง)

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

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชระ เพียรสุภาพ)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. นพดล จอกแก้ว)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิง คุณะวัฒน์สถิตย์)

สิรินธร สืบจากรอด : การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของ  
ทางหลวงในประเทศไทยด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ (DEVELOPMENT OF ASPHALT  
CONCRETE PAVEMENT DETERIORATION MODELS FOR THAILAND NATIONAL HIGHWAYS  
USING MARKOV CHAINS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.วิศณุ ทรัพย์สมพล,  
164 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของ  
สายทางหลวงที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีมากกว่า 300 คันต่อวัน ด้วยกระบวนการ  
ลูกโซ่มาร์คอฟ เพื่อใช้ในการวางแผนและบริหารงานซ่อมบำรุงทาง โดยใช้ข้อมูลค่าดัชนีความ  
ขรุขระสากลที่เป็นตัวแทนสภาพความเสียหายของผิวทางจากสายทางในภาคเหนือและภาค  
ตะวันออกเฉียงเหนือที่อยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวง การพัฒนาแบบจำลองแยกตาม  
พฤติกรรมการเสื่อมสภาพของผิวทางโดยใช้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพผิวทางที่สำคัญ  
5 ปัจจัย คือ ความแข็งแรงโครงสร้างทาง ปริมาณการจราจร ความเสียหายผิวทาง สภาพแวดล้อม  
และการก่อสร้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาแบบจำลองแยกตามพฤติกรรมของทางซึ่งได้รับ  
ผลกระทบจากปัจจัยทั้ง 5 ได้ทั้งหมด 19 แบบจำลอง โดยแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางที่  
พัฒนาขึ้นมาสรุปได้ว่า ในสายทางที่มีความแข็งแรงโครงสร้างสูงกว่าจะมีอัตราการเสื่อมสภาพผิว  
ทางต่ำกว่าสายทางที่มีความแข็งแรงโครงสร้างต่ำ ในขณะเดียวกันในสายทางที่มีความแข็งแรง  
โครงสร้างเหมือนกัน สายทางที่มีปริมาณการจราจรสูงกว่าจะมีการเสื่อมสภาพผิวทางเร็วกว่าสาย  
ทางที่มีปริมาณการจราจรต่ำ ในส่วนของปัจจัยทางด้านความเสียหายของทาง สายทางที่มีความ  
เสียหายผิวทาง จะมีความเร็วในการเสื่อมสภาพผิวทางสูงกว่าสายทางที่ไม่มีความเสียหายผิวทาง  
เกิดขึ้น เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างทางลดลง แบบจำลอง  
ทำนายสภาพผิวทางที่พัฒนาจากการวิจัยนี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบบริหารงานซ่อม  
บำรุงรักษาทาง เพื่อช่วยในการวางแผนงานการซ่อมบำรุงรักษาทางและวางแผนงบประมาณใน  
ระดับโครงข่ายได้ดียิ่งขึ้น

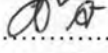

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2551.....

## 4870520321: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD : PAVEMENT DETERIORATION MODEL/ MARKOV CHAINS/ SURFACE  
DISTRESSES

SIRINT SURBJAKROD : DEVELOPMENT OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENT  
DETERIORATION MODELS FOR THAILAND NATIONAL HIGHWAYS USING  
MARKOV CHAINS. ADVISOR: ASSOC.PROF. WISANU SUBSOMPON, Ph.D., 164  
pp.

The objective of this thesis is to develop deterioration models for asphalt concrete pavements which have average annual daily traffic more than 300 cars per day, using Markov Chains method. The International Roughness Index (IRI) is used to represent pavement condition. Based on data from national highways in Northern and Southeastern regions, nineteen deterioration models are developed. These models are grouped by five most influencing factors on pavement damage which resulted from the preliminary analysis. Such factors are pavement strength, surface distresses, traffic volume, construction, and environment. Several conclusions can be drawn from developed models as follows. The higher strength road would result in lower deterioration. For roads which have similar strength, traffic volume would affect deterioration rate. Furthermore, the deterioration rate of roads which have surface distresses are higher than the roads without the surface distresses. This is because surface distress would lower the strength of structural road that accelerate the deterioration of pavement. The deterioration model can be applied for the pavement maintenance management system in order to planning for maintenance method of the roads network and also planning for budget allocation.

Department:.....Civil Engineering..... Student's Signature:..........  
Field of Study:.....Civil Engineering..... Advisor's Signature:..........  
Academic Year:.....2008.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์ คำแนะนำ ความร่วมมือ การสนับสนุน และกำลังใจจากผู้ที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายด้วยกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งรองศาสตราจารย์ ดร.วิศณุ ทรัพย์สมพล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้เสียสละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่มาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต ธงทอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิง คุณะวัฒน์สถิตย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชระ เพียรสุภาพ และอาจารย์ ดร. นพดล จอกแก้ว ที่ได้สละเวลาอันมีค่าช่วยให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบโดยสมบูรณ์

ผู้เขียนขอขอบพระคุณกรมทางหลวงและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนข้อมูลและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนกำลังจากเพื่อนๆ ทุกท่านที่มีได้กล่าวมาไว้ ณ ที่นี้

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนขอสำนึกและกราบขอบพระคุณบิดานายสมโภชน์ สืบจากรอด และ มารดา นางสิริจิต สืบจากรอด ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น กำลังใจ และคอยสนับสนุนและช่วยเหลือในด้านต่างๆ เสมอมาแก่ผู้เขียนจนสำเร็จการศึกษา...



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ค
สารบัญภาพ.....	ป
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 พฤติกรรมของทาง.....	7
2.2 ดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index: IRI).....	8
2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพทาง.....	8
2.3.1 ปัจจัยทางด้านโครงสร้างที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพ ผิวทาง.....	10
2.3.2 ปัจจัยทางด้านปริมาณการจราจรที่ส่งผลกระทบต่อการ เสื่อมสภาพผิวทาง.....	14
2.3.3 ปัจจัยทางด้านความเสียหายที่ส่งผลกระทบต่อการ เสื่อมสภาพผิวทาง.....	15
2.3.4 ปัจจัยทางด้านการก่อสร้างที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพ ผิวทาง.....	17

2.3.5	ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อการ เชื่อมสภาพผิวทาง.....	18
2.4	แบบจำลองทำนายการเชื่อมสภาพผิวทาง.....	19
2.4.1	กระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Chain).....	20
2.4.2	ลักษณะสำคัญของกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ.....	21
2.5	การพัฒนาแบบจำลองการเชื่อมสภาพผิวทางในอดีต.....	24
2.6	บทสรุป.....	31
บทที่ 3	การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	33
3.1	ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
3.2	การคัดเลือกและตรวจสอบข้อมูล.....	39
3.3	บทสรุป.....	40
บทที่ 4	การพัฒนาแบบจำลองทำนายการเชื่อมสภาพผิวทาง.....	41
4.1	ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทำนายการเชื่อมสภาพผิวทางด้วย กระบวนการมาร์คอฟ.....	41
4.1.1	การจัดกลุ่มข้อมูล.....	41
4.1.2	การสร้างเมทริกซ์ความน่าจะเป็นการเปลี่ยนสถานะ.....	46
4.1.3	การหาสถานะของทาง ณ เวลาใดๆ.....	48
4.2	แบบจำลองการเชื่อมสภาพผิวทาง.....	51
4.3	การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง.....	57
4.3.1	การทดสอบความสัมพันธ์.....	57
4.3.2	การเปรียบเทียบแบบจำลอง.....	61
4.4	การทดสอบปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความเสียหายผิวทาง.....	64
4.4.1	ปัจจัยทางด้านความเสียหายของผิวทาง.....	64
4.4.2	ปัจจัยทางด้านความแข็งแรงโครงสร้างและปริมาณ การจราจร.....	68
4.4.3	ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม.....	70



4.5 บทสรุป.....	70
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อการบริหารบำรุงทาง.....	73
5.1 การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง.....	73
5.2 การวางแผนงานซ่อมบำรุงทาง.....	74
5.3 บทสรุป.....	82
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	83
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	83
6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
รายการอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	93
ภาคผนวก ข.....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	164

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 สรุปเปรียบเทียบแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพทางในอดีต.....	3
ตารางที่ 2.1 ความหมายของระดับความอ่อนไหวใน HDM.....	25
ตารางที่ 2.2 การจัดลำดับของผลกระทบที่มีต่อปัจจัยการเสื่อมสภาพ .....	26
ตารางที่ 2.3 สรุปปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสภาพผิวทางในอดีต .....	32
ตารางที่ 3.1 ช่วงเวลาและระยะทางสำรวจค่าดัชนีความขรุขระสากลของกรมทาง หลวงในแต่ละปี.....	34
ตารางที่ 3.2 ช่วงเวลาและระยะทางสำรวจสภาพความเสียหายของกรมทางหลวงใน แต่ละปี.....	36
ตารางที่ 3.3 ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีตามมาตรฐานชั้นทางสำหรับทาง หลวง.....	38
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลที่คัดเลือกใช้การพัฒนาแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพทาง .....	38
ตารางที่ 4.1 แบ่งกลุ่มสายทางด้วยความแข็งแรงโครงสร้างทาง .....	43
ตารางที่ 4.2 ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีตามมาตรฐานชั้นทางสำหรับทาง หลวง.....	43
ตารางที่ 4.3 สถิติอุณหภูมิจนของประเทศไทยในฤดูการต่างๆ .....	44
ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำฝน (มม.) ของประเทศไทยในฤดูต่างๆ .....	45
ตารางที่ 4.5 สรุปกลุ่มสายทางตามพฤติกรรมการเสื่อมสภาพผิวทาง .....	45
ตารางที่ 4.6 ลักษณะสภาพผิวทางของค่าดัชนีความขรุขระสากลที่กำหนดโดยกรม ทางหลวง.....	46
ตารางที่ 4.7 สถานะสภาพของผิวทางที่ค่าดัชนีความขรุขระสากลต่างๆ.....	47
ตารางที่ 4.8 แมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะและแมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยน สถานะ .....	48
ตารางที่ 4.9 ตัวอย่างความน่าจะเป็นสถานะของสายทาง ณ อายุการใช้งาน 3 ปี.....	49
ตารางที่ 4.10 เวคเตอร์สถานะสภาพของผิวทาง และค่าดัชนีความขรุขระสากล ณ เวลาต่างๆ.....	50
ตารางที่ 4.11 สรุปจำนวนข้อมูลและกลุ่มแบบจำลองที่สามารถพัฒนาได้จากข้อมูล .....	52

ตารางที่ 4.12	เมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะและเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการ เปลี่ยนสถานะของสายทางที่มีความเสียหายหลุมบ่อในเขตพื้นที่ภาค ตะวันออกเฉียงเหนือ .....	53
ตารางที่ 4.13	ตัวอย่างการเปรียบเทียบแบบจำลองโดยวิธีกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ กับค่าดัชนีความขรุขระสากลจริงในปี พ.ศ.2551.....	59
ตารางที่ 4.14	สรุปความน่าเชื่อถือแบบจำลองที่พัฒนาจากค่าดัชนีความขรุขระสากล จริง.....	60
ตารางที่ 4.15	ตัวอย่างการเปรียบเทียบแบบจำลอง .....	62
ตารางที่ 4.16	สรุปการเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าดัชนีความเรียบสากลจริง .....	63
ตารางที่ 5.1	ค่าเวคเตอร์สถานะสภาพของผิวทาง และค่าดัชนีความขรุขระสากลของ แยกทางหลวงหมายเลข 1045 (ร่วมจิต) - ท่าปลา.....	74
ตารางที่ 5.2	เกณฑ์การซ่อมที่แนะนำในการซ่อมบำรุงทางแอสฟัลท์คอนกรีต .....	76
ตารางที่ 5.3	ตัวอย่างมาตรฐานการซ่อมบำรุงและราคาค่าซ่อมบำรุง .....	77
ตารางที่ 5.4	ระดับของค่าดัชนีความขรุขระสากล ณ จุดที่ต้องซ่อมแซมแบ่งตาม ประเภทของทางต่างๆ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง.....	78
ตารางที่ 5.5	ค่าเวคเตอร์สถานะสภาพของผิวทาง และค่าดัชนีความขรุขระสากลของ สายห้วยตาดหมื่น-กม.49+500(ต่อเขตแขวงฯตาก2) (เสียหายหลุมบ่อ) .....	79
ตารางที่ 5.6	ค่าเวคเตอร์สถานะสภาพของผิวทาง และค่าดัชนีความขรุขระสากลของ สายห้วยตาดหมื่น-กม.49+500 (ต่อเขตแขวงฯตาก2) (ไม่มีความ เสียหาย).....	80
ตารางที่ 5.7	ตัวอย่างกิจกรรมบำรุงรักษาทาง และราคาต่อหน่วยของกรมทางหลวง ชนบท.....	80
ตารางที่ ก.1	มาตรฐานชั้นทางต่างๆของกรมทางหลวง .....	95
ตารางที่ ก.2	ค่าเฉลี่ย Modulus วัสดุงานทางทั่วไปของประเทศไทย .....	96
ตารางที่ ก.3	โครงสร้างทางลาดยางชั้นต่ำ .....	97

ตารางที่ ข.1	สรุปแมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะและแมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะของสายทางทั่วประเทศ .....	99
ตารางที่ ข.2	สรุปแมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะและแมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะของสายทาง .....	100
ตารางที่ ข.3	สรุปแมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะของค่าดัชนีความ ขรุขระสากล พิจารณาตัวแปรระหว่างความเสียหายกับปริมาณ การจราจรพื้นที่ภาคเหนือ.....	102
ตารางที่ ข.4	สรุปแมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะของค่าดัชนีความ ขรุขระสากล พิจารณาตัวแปรระหว่างความเสียหายกับปริมาณ การจราจรพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ .....	105
ตารางที่ ข.5	การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคเหนือ, AADT 300-1,000 คัน/วัน, ไม่มีความเสียหาย) .....	107
ตารางที่ ข.6	การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2545 (ภาคเหนือ, AADT 1,000-2,000 คัน/วัน, ไม่มีความเสียหาย) .....	109
ตารางที่ ข.7	การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2547 (ภาคเหนือ, AADT 1,000-2,000 คัน/วัน, ไม่มีความเสียหาย) .....	110
ตารางที่ ข.8	การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคเหนือ, AADT 2,000-4,000 คัน/วัน, ไม่มีความเสียหาย) .....	113
ตารางที่ ข.9	การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคเหนือ, AADT 4,000-8,000 คัน/วัน, ไม่มีความเสียหาย) .....	119
ตารางที่ ข.10	การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคเหนือ, AADT ≥ 8,000 คัน/วัน, ไม่มีความเสียหาย) .....	123
ตารางที่ ข.11	การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2545 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 1,000-2,000 คัน/วัน, ไม่ มีความเสียหาย) .....	126

ตารางที่ ข.12 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2547 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 1,000-2,000 คัน/วัน, ไม่ มีความเสียหาย).....	127
ตารางที่ ข.13 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 1,000-2,000 คัน/วัน, ไม่ มีความเสียหาย).....	129
ตารางที่ ข.14 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2545 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 2,000-4,000 คัน/วัน, ไม่ มีความเสียหาย).....	131
ตารางที่ ข.15 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2547 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 2,000-4,000 คัน/วัน, ไม่ มีความเสียหาย).....	132
ตารางที่ ข.16 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2548 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 2,000-4,000 คัน/วัน, ไม่ มีความเสียหาย).....	133
ตารางที่ ข.17 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2549 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 2,000-4,000 คัน/วัน, ไม่ มีความเสียหาย).....	134
ตารางที่ ข.18 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2547 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 4,000-8,000 คัน/วัน, ไม่ มีความเสียหาย).....	135
ตารางที่ ข.19 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2548 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 4,000-8,000 คัน/วัน, ไม่ มีความเสียหาย).....	136
ตารางที่ ข.20 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2548 (ภาคเหนือ, AADT 300-1,000 คัน/วัน, มีรอยแตก).....	138



ตารางที่ ข.21 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคเหนือ, AADT 1,000-2,000 คัน/วัน, มีรอยแตก).....	139
ตารางที่ ข.22 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคเหนือ, AADT 2,000-4,000 คัน/วัน, มีรอยแตก).....	141
ตารางที่ ข.23 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคเหนือ, AADT 4,000-8,000 คัน/วัน, มีรอยแตก).....	145
ตารางที่ ข.24 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2544 (ภาคเหนือ, AADT มากกว่า 8,000 คัน/วัน, มีรอยแตก) .....	148
ตารางที่ ข.25 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2546 (ภาคเหนือ, AADT มากกว่า 8,000 คัน/วัน, มีรอยแตก) .....	148
ตารางที่ ข.26 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคเหนือ, AADT มากกว่า 8,000 คัน/วัน, มีรอยแตก) .....	149
ตารางที่ ข.27 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 1,000-2,000 คัน/วัน, มี รอยแตก) .....	152
ตารางที่ ข.28 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 2,000-4,000 คัน/วัน, มี รอยแตก) .....	154
ตารางที่ ข.29 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคเหนือ, AADT 1,000-2,000 คัน/วัน, มีหลุมบ่อ).....	157
ตารางที่ ข.30 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคเหนือ, AADT 2,000-4,000 คัน/วัน, มีหลุมบ่อ).....	158
ตารางที่ ข.31 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคเหนือ, AADT 4,000-8,000 คัน/วัน, มีหลุมบ่อ).....	161



ตารางที่ ข.32 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 1,000-2,000 คัน/วัน, มี หลุมบ่อ) .....	162
ตารางที่ ข.33 การพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในปี พ.ศ.2551 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, AADT 2,000-4,000 คัน/วัน, มี หลุมบ่อ) .....	163

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความขรุขระสากลกับสภาพทาง	9
รูปที่ 2.2 อุปกรณ์วัดค่าดัชนีความขรุขระสากล	9
รูปที่ 2.3 พฤติกรรมของการเสื่อมสภาพทาง	10
รูปที่ 2.4 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อความขรุขระของทาง	11
รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของสายทางประเภทผิวทางยึดหยุ่น	11
รูปที่ 2.6 การกระจายน้ำหนักชั้นทางของทางประเภทผิวทางยึดหยุ่น	12
รูปที่ 2.7 อิทธิพลของความแข็งแรง และปริมาณการจราจรที่มีต่อการเสื่อมสภาพทาง	13
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความขรุขระสากลกับปริมาณการจราจร	14
รูปที่ 2.9 ช่วงเริ่มและช่วงเกิดความเสียหาย	17
รูปที่ 2.10 พฤติกรรมของทางที่ซ่อมรอยแตก และไม่ซ่อมรอยแตก	18
รูปที่ 2.11 แมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะ	21
รูปที่ 2.12 แมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ	22
รูปที่ 3.1 ลักษณะข้อมูลดิบก่อนการคัดเลือก (1)	39
รูปที่ 3.2 ลักษณะข้อมูลดิบก่อนการคัดเลือก (2)	40
รูปที่ 3.3 ลักษณะข้อมูลดิบก่อนการคัดเลือก (3)	40
รูปที่ 4.1 ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ระยะเวลาต่างๆ ของสายทางที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีเฉลี่ยต่อวันตลอดปีอยู่ระหว่าง 300-1,000 คัน/วัน ในเขตพื้นที่ภาคเหนือ	51
รูปที่ 4.2 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 300 - 1,000 คัน/วัน	53
รูปที่ 4.3 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 1,000 - 2,000 คัน/วัน	54
รูปที่ 4.4 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 2,000 - 4,000 คัน/วัน	54

รูปที่ 4.5	ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่ปริมาณ การจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 4,000 - 8,000 คัน/วัน .....	55
รูปที่ 4.6	ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่ปริมาณ การจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี $\geq 8,000$ คัน/วัน .....	55
รูปที่ 4.7	ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 1,000 - 2,000 คัน/วัน .....	56
รูปที่ 4.8	ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 2,000 - 4,000 คัน/วัน .....	56
รูปที่ 4.9	ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 4,000 - 8,000 คัน/วัน .....	57
รูปที่ 4.10	การกระจายของข้อมูล 4 ชุดที่มีค่ากลางและการกระจายเหมือนกันแต่ ระดับความสัมพันธ์ต่างกัน .....	58
รูปที่ 4.11	ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สภาพความเสียหายผิวทางต่างๆ ในเขตพื้นที่ ภาคเหนือ .....	65
รูปที่ 4.12	ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 1,000- 2,000 คัน/วัน ในพื้นที่ภาคเหนือ .....	66
รูปที่ 4.13	ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 2,000- 4,000 คัน/วัน ในพื้นที่ภาคเหนือ .....	66
รูปที่ 4.14	ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 4,000- 8,000 คัน/วัน ในพื้นที่ภาคเหนือ .....	67
รูปที่ 4.15	ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีมากกว่า 8,000 คัน/วัน ในพื้นที่ภาคเหนือ .....	67
รูปที่ 4.16	ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางที่มีความแข็งแรงโครงสร้างปาน กลาง มีความเสียหายรอยแตก ในพื้นที่ภาคเหนือ .....	68
รูปที่ 4.17	ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่มีความเสียหายรอยแตก ในพื้นที่ภาคเหนือ .....	69
รูปที่ 4.18	ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่มีความเสียหายหลุมบ่อ ในพื้นที่ภาคเหนือ .....	69

รูปที่ 4.19 ค่าความขรุขระสากลที่สภาพแวดล้อมต่างๆ ในสายทางที่ไม่มีความ เสียหาย .....	71
รูปที่ 4.20 ค่าความขรุขระสากลที่สภาพแวดล้อมต่างๆ ในสายทางที่มีรอยแตก.....	71
รูปที่ 4.21 ค่าความขรุขระสากลที่สภาพแวดล้อมต่างๆ ในสายทางที่มีหลุมบ่อ.....	72
รูปที่ 5.1 ตัวอย่างเปรียบเทียบวิธีการซ่อมบำรุง.....	81