

การศึกษาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระกับค่าความฝืดของผิวทาง และการศึกษาสมการการเสื่อมสภาพค่าความฝืดของผิวทาง ในสภาวะการใช้งานจริง

The study of the equation of the relationship between the roughness value and skid resistance of the pavement and the study of the equation for the deterioration of the skid resistance in actual use conditions

นายภัทรพล สีดอกบวบ

สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กรุงเทพมหานคร

MR.PATTARAPON SEDOKBUAB; E-mail address: s_pattarapon@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระกับค่าความฝืดของผิวทาง และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพค่าความฝืดของผิวทาง เพื่อสร้างสมการการเสื่อมสภาพค่าความฝืดของผิวทางในสภาวะการใช้งานจริง โดยทำการศึกษากับผิวทางชนิด AC 60-70 และ ผิวทางชนิด Para Slurry Seal ที่อายุ 2-3 ปี โดยตัวที่ทำการศึกษา แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 กลุ่มคุณลักษณะสภาพผิวทาง ส่วนกลุ่มที่ 2 กลุ่มแรงที่กระทำต่อสภาพผิวทาง ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ค่าความขรุขระของผิวทางมีแนวโน้มไปในทิศทางที่ค่อนข้างสัมพันธ์กันมากกับค่าความฝืดของผิวทางทั้งผิวทางชนิด AC 60-70 และ ผิวทางชนิด Para Slurry Seal ซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระกับค่าความฝืดของผิวทางชนิด AC 60-70 คือ $y = 1.0413x - 0.0098$ และของผิวทางชนิด Para Slurry Seal คือ $y = 0.9475x - 0.0775$ และผลการวิเคราะห์โดยใช้สัมประสิทธิ์สหพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพค่าความฝืดของผิวทาง พบว่า ตัวแปรอุณหภูมิผิวทาง, อายุผิวทาง(ปี), ปริมาณรถสะสม และรถบรรทุกสะสม เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพค่าความฝืดของผิวทางชนิด AC60-70 และของผิวทางชนิด Para Slurry Seal อย่างมีนัยสำคัญ และด้วยวิธีทางสถิติการวิเคราะห์ Multiple Regression Analysis พบว่ารูปแบบของสมการที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาสมการการเสื่อมสภาพค่าความฝืดของผิวทาง ในสภาวะการใช้งานจริง ของผิวทางชนิด AC 60-70 คือ ค่าความฝืดของผิวทางชนิด AC 60-70 = $0.89 - 0.028$ อายุผิวทาง(ปี) + 2.473×10^{-8} ปริมาณรถสะสม - 1.1×10^{-7} รถบรรทุกสะสม และของผิวทางชนิด Para Slurry Seal คือ ค่าความฝืดของผิวทางชนิด Para Slurry Seal = $1.036 - 0.085$ อายุผิวทาง(ปี) - 6.863×10^{-9} ปริมาณรถสะสม - 8.432×10^{-8} รถบรรทุกสะสม

คำสำคัญ: ความฝืดของผิวทาง, ค่าความขรุขระของผิวทาง

Abstract

The objective of this study In order to study the relationship and create the relation equation between roughness and surface roughness And study the factors that affect the deterioration, stiffness of the pavement To create equations for deterioration of the surface stiffness in actual usage conditions The study was conducted on AC 60-70 and Para Slurry Seal pavements aged 2-3 years. The study was divided into 2 groups. By group 1, the group of surface characteristics, while group 2, the forces acting on the surface Which the study found that The roughness of the road surface tends to be in a direction which is quite relevant to the surface roughness of both the road surface AC 60-70 and Para Slurry Seal road surface. Which is the relation equation between roughness and the skid resistance of the pavement of the AC 60-70 type is $y = 1.0413x - 0.0098$ and of the Para Slurry Seal type is $y = 0.9475x - 0.0775$. And the analysis using the federation coefficient of factors affecting the deterioration of the surface pavement found that the surface temperature, pavement age (years), cumulative vehicle volume and truck volume. It is a factor that significantly affects the deterioration of the surface friction of AC60-70 and Para Slurry Seal surfaces and with statistical methods, Multiple Regression Analysis found that the form of the equation is suitable for the study of the equation for the deterioration of the surface friction In actual use conditions The pavement type AC 60-70 is the viscosity of the pavement type AC 60-70 = $0.89 - 0.028$ pavement age (years) + 2.473×10^{-8} cumulative vehicle volume - 1.1×10^{-7} cumulative truck And the Para Slurry Seal type is the friction of the Para Slurry Seal type =

1.036 - 0.085 the age of the pavement (years) - 6.863×10^{-9} cumulative vehicle volume - 8.432×10^{-8} collector truck

Keywords: skid resistance of the pavement, Roughness value of the pavement

1. คำนำ

กรมทางหลวง มีภารกิจหลักในการก่อสร้างและบำรุงรักษาถนนโครงข่ายหลักของประเทศเป็นระยะทางกว่า 65,000 กิโลเมตร (2 ช่องจราจรไป - กลับ) ทั้งนี้ ยังครอบคลุมถึงการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยของโครงข่ายถนนภายใต้การรับผิดชอบของกรมทางหลวง เพื่อให้ผู้ใช้ทางสามารถใช้ถนนและสัญจรได้อย่างปลอดภัย โดยแนวทางหนึ่งที่จะรักษาและยกระดับความปลอดภัยในท้องถนนได้อย่างเป็นรูปธรรม คือ การรักษาความปลอดภัยของผิวทาง (Skid Resistance) ซึ่งเป็นตัวแปรหลักตัวหนึ่งในการประเมินสภาพความปลอดภัยของถนนให้อยู่เกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งถ้าผิวทางที่มีค่าความปลอดภัยของผิวทาง ไม่พอเพียงและไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ย่อมส่งผลให้ถนนเกิดความไม่ปลอดภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาอุบัติเหตุอันเนื่องมาจากถนนลื่นหรือสภาพถนนที่มีค่าความปลอดภัยของผิวทางต่ำ

การศึกษานี้เป็นวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลการทดสอบค่าความขรุขระ (Roughness value) ของผิวทางจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Sand Patch เพื่อประเมินค่าความลึกผิวเฉลี่ย (Mean Texture Depth ; MTD) จากการศึกษาค่าความลึกผิวเฉลี่ย (f หรือ μ) ของผิวทางที่ได้จากเครื่องมือ Skid (ASFT T - 10) นั้น เพื่อศึกษาและสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระกับค่าความปลอดภัยของผิวทาง เพื่อเป็นการเปรียบเทียบเครื่องมือทดสอบที่มีลักษณะแตกต่างกันหลายด้าน เช่น ลักษณะการทดสอบ การทดสอบแบบเคลื่อนที่ และการทดสอบแบบจุด เพื่อเป็นการสอบเทียบเครื่องมือ และเป็นการนำเทคนิคการหาค่าความลึกผิวโดยการใช้อุปกรณ์เครื่องมือทดสอบราคาต่ำอย่างการทดสอบด้วยเครื่องมือ Sand Patch มาใช้หาค่าความลึกผิวได้โดยไม่ต้องใช้อาศัยเครื่องมือ Skid (ASFT T-10) ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงได้ และจากงานศึกษาอื่นๆที่ผ่านมาได้มีการกล่าวถึงค่าความขรุขระหรือค่าความหยาบของผิวทางย่อมส่งผลต่อค่าความปลอดภัยของผิวทางด้วย และเพื่อให้อุบัติการณ์ความปลอดภัยเพิ่มขึ้น งานศึกษานี้ยังได้ทำการศึกษาค้นคว้าที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพค่าความปลอดภัยของผิวทางเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความปลอดภัยของผิวทางกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพในหลาย ๆ ด้านที่เกี่ยวข้องและสร้างสมการการเสื่อมสภาพค่าความปลอดภัยของผิวทาง เพื่อเป็นการคาดการณ์การใช้งานของผิวทางจากค่าความปลอดภัย ทำให้สามารถวางแผนเพื่อกำหนดการบำรุงรักษาผิวทางในโครงข่ายถนนได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

2. ทฤษฎี หลักการและเหตุผลที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพความปลอดภัยที่สำคัญ 4 ปัจจัย ดังนี้

2.1.1 คุณลักษณะของพื้นผิวทาง (Pavement Characteristics)

เช่น ความหยาบละเอียด (Texture), ความขรุขระ (Roughness), ร่องล้อ (Rutting) ความหยาบละเอียดของพื้นผิวถนนส่งผลให้ความปลอดภัยเพิ่มขึ้น

ขรุขระของถนนอาจทำให้ล้อยานพาหนะเกิดอาการกระด้างเมื่อขับผ่านซึ่งส่งผลให้ความเสียดทานระหว่างล้อและผิวถนนลดลงร่องล้อที่เกิดขึ้นบนผิวถนนโดยเฉพาะเมื่อมีน้ำขังมีส่วนทำให้ค่าความเสียดทานระหว่างล้อและผิวถนนลดลง

2.2.2 คุณลักษณะของล้อยาง (Tire Characteristics)

ตัวอย่างเช่น ชนิดของยาง (Tire Type), ดอกยาง (Tire Tread), ลมยาง (Inflation Pressure) การออกแบบดอกยางโดยทั่วไปจะเลือกออกแบบให้ล้อยางมีคุณลักษณะที่ได้อย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างในด้านความทนทานต่อการสึกหรอหรือด้านความฝืดล้อยางที่ถูกออกแบบให้มีเนื้อยางแข็งจะมีความทนทานต่อการสึกหรอมากกว่าล้อยางที่ถูกออกแบบให้มีเนื้อยางอ่อน แต่หากในสภาพผิวถนนที่เปียกและใช้ความเร็วสูง เนื้อยางแข็งจะมีความฝืดที่ต่ำกว่าล้อยางที่มีดอกยางที่ถูกออกแบบมาอย่างดีและสภาพดีสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของค่าความฝืดได้และช่วยรีดน้ำในขณะแล่นบนถนนเปียกได้ดีลมยางที่มากหรือน้อยเกินไปมีผลให้ค่าความฝืด

2.2.3 คุณลักษณะของการใช้รถ (Vehicle Operational Characteristics)

ตัวอย่างเช่น ความเร็ว (Speed), อาการลื่น (Tire Slip), น้ำหนักรถ (Axle Load), ชนิดของรถ (Type of Vehicle) ความเร็วของยานพาหนะเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การรีดน้ำบนถนนที่เปียกลดลงส่งผลให้สภาพเปียกของถนนมีผลต่อการเบรกยานพาหนะเมื่อทำการเบรกความเร็วของล้อจะลดลง ถ้าความเร็วของล้อลดลงด้วยอัตราที่สูงกว่าความเร็วของรถล้อยางจะมีอาการลื่น ระบบ Anti-lock brake system (ABS) ถูกออกแบบเพื่อช่วยสร้างสมดุลความเร็วช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการลื่นไถลความปลอดภัยระหว่างล้อและพื้นถนน

2.2.4 สภาพแวดล้อมอื่นๆ (Environmental Factors)

เช่น สภาพเปียก (Wetness), สิ่งเปื้อน (Contamination), อุณหภูมิ (Temperature), ฤดูกาล (Seasonal variation) ถนนที่มีสภาพเปียกหรือมีสิ่งเปื้อนเช่นโคลนน้ำมันบนผิวถนนจะลดประสิทธิภาพความฝืดอุณหภูมิของถนนที่สูงขึ้นจะทำให้ล้อยางสูญเสียสภาพง่าย ทำให้ค่าความฝืดลดลงได้ รวมถึงฤดูแห่งแล้งที่ยาวนานส่งผลให้เกิดฝุ่นผงขนาดเล็กปกคลุมผิวถนนทำให้เกิดความฝืดลดลง ในขณะที่เกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักน้ำจะทำการชะล้างฝุ่นตะกอนขนาดเล็กออกไปจากผิวถนนส่งผลทำให้ความฝืดเพิ่มมากขึ้น

2.2 ปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระเฉลี่ยของผิวทาง และความปลอดภัยของผิวทาง (สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, 2559)

ค่าความปลอดภัยของผิวทางคือ แรงต้านทานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างล้อและผิวทาง หรือแรงต้านไม่ให้ล้อลื่นไถลไปบนผิวทางแรงต้านทานนี้จะเกิดขึ้นเมื่อยางรถยนต์หมุนหรือไถลไปตามพื้นผิวของถนนแรงต้านทานนี้สามารถหาได้จาก

$$\mu = F / F_w \quad (1)$$

โดยที่

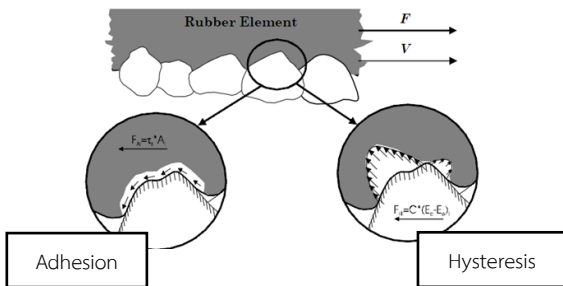
- μ = ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดของผิวทาง
- F = แรงฝืดในแนวสัมผัส
- F_w = น้ำหนักรถยนต์ที่กระทำกับล้อในแนวตั้ง

แรงฝืดผิวทางได้รับผลจากสององค์ประกอบหลักนั้น คือ แรง Adhesion และ Hysteresis แม้ว่ามีส่วนประกอบอื่นๆ ที่มีผลต่อแรงฝืดผิวทาง เช่น ผิวยางล้อรถ แต่ส่วนประกอบอื่นนั้นไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแรง Adhesion และ Hysteresis ดังนั้นแรงฝืดผิวทางสามารถคิดได้จากผลรวมของแรง Adhesion และ Hysteresis

แรง Adhesion เป็นแรงฝืดที่เกิดจากการเชื่อมหรือห้วงจากวัสดุขนาดเล็กกับยางยานพาหนะโดยค่าของแรง Adhesion จะแปรผันตรงกับแรงเฉือนและขนาดพื้นที่ที่สัมผัส ซึ่งส่วนใหญ่จะขึ้นกับลักษณะพื้นผิวละเอียด (Micro-Texture)

แรง Hysteresis เป็นองค์ประกอบหลักของแรงฝืดซึ่งเกิดจากการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของยางยานพาหนะ เมื่อยางบีบอัดกับพื้นผิวทาง การกระจายความเครียดทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งพลังงานนี้จะถูกเก็บไว้ภายในยาง พลังงานส่วนหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแรงฝืดเพื่อช่วยหยุดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ในขณะที่ส่วนอื่นๆ จะสูญเสียไปในรูปแบบของความร้อน ซึ่งแรง Hysteresis จะขึ้นกับลักษณะพื้นผิวหยาบ (Macro-Texture)

$$F = F_A + F_H \quad (2)$$



รูปที่ 1 แรงฝืดประกอบด้วยแรง Adhesion และแรง Hysteresis (NCHRP, 2006)

2.3 การทดสอบค่าความฝืดของผิวจราจร

โดยทั่วไปค่าความฝืดที่ได้จากการสำรวจด้วยเครื่องมือที่แตกต่างกันจะทำให้ได้ค่าความฝืดที่ต่างกันไป ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการเก็บข้อมูลค่าความฝืดมาจากข้อจำกัดด้านเครื่องมือ (ลีลาประภากรณ์, ศิริยงค์ et al. 2012) ซึ่งเครื่องมือที่กรมทางหลวงใช้มีลักษณะการวัดแบบต่อเนื่อง ซึ่งค่าที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง รวมทั้งไม่สอดคล้องกับมาตรฐานการวัดของ ASTM จึงทำการศึกษาค้นคว้าหาความสัมพันธ์ของค่าความฝืดที่วัดได้จากเครื่องมือแบบที่แปรผันตามความเร็วและแบบที่ไม่แปรผันตามความเร็ว เครื่องมือทดสอบของกรมทางหลวงมีการสำรวจความฝืดได้จากวิธีการ 2 ประเภท คือ ค่าความขรุขระของผิวหน้าของผิวทางจากการทดสอบ Sand patch และค่าความฝืดจากเครื่องมือ Skid (ASFT T - 10) เป็นต้น

2.3.1 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

ค่าความขรุขระของผิวหน้าของผิวทางจากการทดสอบ Sand patch เป็นวิธีที่ใช้หาความลึกของผิวทางโดยใช้ทรายที่ทราบขนาดในการทำการทดสอบ ถนนพื้นผิวแบบแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวัดค่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของทรายที่ทดสอบทั้ง 4 ค่าเพื่อนำไปเฉลี่ยหาค่าความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ไม่มีความคาดเคลื่อนค่อนข้างน้อย แต่ข้อจำกัดตรงที่ต้องทดสอบในที่แห้งเท่านั้น การทดสอบประกอบด้วย 6 จุดซึ่งจะกำหนดจุดเป็นตัวอักษร A, B, C, D, E, และ F โดย 3 จุดทางด้านซ้ายเป็นบริเวณร่องล้อซึ่งมีการกดทับจากล้อรถยนต์มาก ส่วน 3 จุดด้านขวามือ เป็นช่วงร่องล้อขาที่มีการกดทับน้อยข้อมูลที่ได้นี้จะนำไปคำนวณค่าความขรุขระของผิวทาง จากสมการดังนี้

$$D = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4}{4} \quad (3)$$

$$MTD = \frac{4 \times V}{\pi \times D^2} \quad (4)$$

สำหรับ Rigid Pavement

$$MTD = \frac{63660}{2 \times D^2} \quad (5)$$

สำหรับ Flexible Pavement

$$MTD = \frac{63660}{D^2} \quad (6)$$

โดย

d_1, d_2, d_3, d_4 คือ ความยาวเส้นผ่าศูนย์กลาง mm

D คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลาง

V คือ ปริมาตรกระบอกตวง

MTD คือ ค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิวหรือค่าความลึกผิวเฉลี่ย

ตารางที่ 1 ตารางพิจารณาค่าเฉลี่ยความหยาบของผิวจราจรจาก Sand Patch

ค่าเฉลี่ยความขรุขระของผิวจราจร MTD ; mm.	จำแนกความขรุขระของผิวจราจร
< 0.25	ละเอียด
0.25- 0.50	ปานกลาง
> 0.50	หยาบ

ที่มา : สำนักวิศวกรรมและตรวจสอบ กรมทางหลวง



รูปที่ 2 ชุดเครื่องมือทดสอบ Sand Patch

2.4 การทดสอบค่าความฝืดของผิวจราจร (สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, 2554)

ค่าความฝืดแบบต่อเนื่อง Skid (ASFT-T-10) ประเภท Fixed Slip เป็นการทดสอบความฝืดผิวทาง โดยวิธีวัดความฝืดระหว่างผิวทางถนนกับล้อยางของรถทดสอบ ที่มีลักษณะเป็นรถทดสอบพ่วง 2 ล้อ และล้อทดสอบ 1 ล้อ ติดตั้งอยู่กับเพลลา แสดงดังรูปที่ 3 และมีกลไกที่ใช้ด้านทานการเคลื่อนที่โดยเกียร์ และระบบโซ่เชื่อมกับเพลาล้อขับเคลื่อนทำให้เกิดการหมุนที่ล้อทดสอบ กำหนดน้ำหนักที่กระทำบนล้อทดสอบในแนวตั้ง เพื่อสามารถคำนวณแรงที่ตกลงบนพื้นผิวทาง อันเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อความเสียดทานที่จะทดสอบได้ ในการทดสอบจะทดสอบด้วยล้อในสภาพพื้นผิวเปียกที่ความเร็วคงที่ ด้วยการวัดแรงเสียดทาน สำหรับการทดสอบผิวทางในสภาพเปียกน้ำจะถูกเก็บสะสมไว้ที่ถังน้ำ ซึ่งอยู่บนรถลากต่อท่อกับวาล์วควบคุมหัวฉีดน้ำที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าของล้อทดสอบ เพื่อปล่อยน้ำที่บริเวณล้อทดสอบ ควบคุมโดยชุดปั๊มที่ติดตั้งอยู่ในชุดรถทดสอบ เพื่อให้ได้ความหนาของฟิล์มน้ำตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ เมื่อเริ่มการวิ่ง ตัวรถทดสอบจะทดสอบของล้อยางรถทดสอบให้ต่ำกว่ารอบที่รถลากขณะวิ่ง จึงเป็นการจำลองการห้ามล้อแบบไม่ ล้อกล้อ (Anti-Brake System) ทำให้สามารถทดสอบความเสียดทานตามยาวในลักษณะต่อเนื่องได้ (Continuous Longitudinal Friction)



รูปที่ 3 เครื่องมือ Skid (ASFT T - 10)

- หลักการทำงานของเครื่องมือทดสอบวัดค่าความฝืด ASFT รุ่น T - 10 เป็นเครื่องทดสอบหาค่าความฝืดของผิวจราจร เช่น ผิวแอสฟัลต์คอนกรีต เป็นต้น โดยมีลักษณะของเครื่องมือทดสอบจะเป็นแบบลากพ่วง จะมีการควบคุมหรือสั่งการจากภายในตัวรถได้

- หลักการทดสอบคือการทดสอบบนผิวที่เปียก โดยใช้การหมุนของล้อทดสอบที่มีค่า % Slip ที่ 13 % และวัดค่า Torque ที่เกิดขึ้นของชุดล้อทดสอบ เพื่อนำไปประมวลค่า Friction สามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน ISO 8349

- ยางที่ใช้ในการทดสอบนั้นมียู 2 ลักษณะ คือ แบบผิวเรียบตามข้อกำหนด ASTM 1551 และแบบที่ยางมีดอกตามข้อกำหนด Patterned T49 (สว.ใช้ตาม ASTM 1551) ในการทดสอบโดยจะใช้อัตราความเร็วที่ 30 - 90 km/h (65)

ตารางที่ 2 เกณฑ์ระดับพึงระวัง (Investigatory Level) และระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level)

เกณฑ์ระดับ	μ (T10)
ค่าระดับพึงระวัง (Investigatory Level)	0.43
ค่าระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level)	0.29

ที่มา : สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง

2.5 แบบจำลองสำหรับความฝืดของผิวจราจร

ความฝืดของผิวจราจร (Skid resistance) คือความเสียดทานระหว่างยางล้อผิวจราจรในสภาวะเปียก Mayer (Mayer, 1934) พบว่าความฝืดของผิวจราจรจะมีค่าลดลงตามความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างยางกับผิวจราจร (Slip speed) ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 7 (Penn State Model, (Leu and Henry, 1983))

$$\mu = \mu_o e^{-\frac{S}{S_p}} \quad (7)$$

เมื่อ μ_o คือค่าตัดแกนความเสียดทานที่ความเร็วเท่ากับศูนย์ S คือความเร็ว S_p คือค่าคงที่เกี่ยวกับความเร็ว โดยมีค่าเท่ากับ $PNG/100$ เมื่อ PNG คือการเปลี่ยนแปลงความเสียดทานต่อความเร็วหารด้วยความเสียดทาน (ร้อยละ) ซึ่งค่า S_p เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับสภาพพื้นผิวจราจรระดับ macro IPARC Model (PIARC, 1995) ได้นำเอา Penn State Model มาใช้ แต่ใช้ค่าความเสียดทานตัดแกนที่ความเร็วที่ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (F60) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 8

$$FS = F60 e^{-\frac{60-S}{S_p}} \quad (8)$$

เมื่อ FS คือค่าความเสียดทานที่ความเร็ว S ใดๆ จากสมการดังกล่าวจะพบว่าผิวจราจรสองแห่งที่มีค่าความเสียดทานที่ความเร็วค่าหนึ่งเท่ากัน สามารถมีค่าความเสียดทานที่ความเร็วอื่นๆ แตกต่างกันได้ ดังนั้นการระบุความฝืดของผิวจราจรที่ความเร็วใดความเร็วหนึ่งเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถให้ข้อมูลที่เพียงพอต่อการประเมินความฝืดของผิวจราจรได้

ในปี 1992 มีการทดสอบในเบลเยียม และสเปน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างผิวจราจร (texture) กับความฝืดของผิวจราจร และเสนอเป็นแบบจำลองที่เรียกว่า International Friction Index (IFI) การทดสอบการทำโดยการวัดความฝืดของผิวจราจรที่ความเร็ว 30 60 และ 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยในทุกๆ การทดสอบจะมีการทดสอบซ้ำสองครั้ง และมีการวัดสภาพผิวจราจรทุกอย่างที่สภาวะผิวแห้งก่อนที่จะมีการให้น้ำบนผิวจราจรเพื่อทำการวัดความฝืด รวมทั้งทำการวัดพื้นผิวจราจรระดับ ทั้งก่อนและหลังการวัดความฝืดของผิวจราจร และพบว่าหลังการวัดความฝืดของผิวจราจรพื้นผิวจราจรระดับ micro ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะทางสถิติ

2.6 การเปลี่ยนแปลงความฝืดของผิวจราจร

การศึกษาความฝืดของผิวจราจรมีการศึกษาครั้งแรกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1934 โดย Moyer (Moyer, 1937) Zube et al. (Zube et al, 1968) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวจราจร จะมีค่าลดลงเล็กน้อยหลังจากมีฝนตกในช่วงฤดูหนาว นอกจากนี้ยังไม่พบการลดลงของความฝืดผิวจราจรอย่างมีนัยยะภายใต้สภาวะจราจรหนาแน่น และพบว่าอัตราการสึกกร่อนจากการขัดสีของผิวจราจรมีค่าน้อย อย่างไรก็ตามจะพบการลดลงของความฝืดผิวจราจรอย่างมากในช่วง 100 วันแรก หลังจากการเปิดใช้เส้นทางจราจร ในปี ค.ศ. 1972 Szatkowski et al. (Szatkowski et al., 1972) พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของปริมาณจราจร กับคุณลักษณะการ

เส้นใตลของผิวจราจรแบบเปียก และสรุปปัจจัย 3 ประการที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านความผิดของผิวจราจร ได้แก่ 1) microtexture ได้แก่ ส่วนประกอบของมวลรวม และค่าต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวม 2) macrotexture ได้แก่ การระบายน้ำ และการสลายตัวของพลังงาน 3) สภาพจราจร และปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ความหนาแน่นของปริมาณจราจร อุณหภูมิ สภาพของเส้นทางจราจร เป็นต้น ในงานวิจัยเดียวกันนี้ยังพบว่าการลดลงของความผิดผิวจราจร จะมีการลดลงอย่างต่อเนื่องภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งปี และหลังจากนั้นความผิดของผิวจราจรจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้อธิบายสาเหตุที่ความผิดของผิวจราจรมีค่าคงที่ไว้ว่า เกิดจาก อิทธิพลของปัจจัยสองประการกล่าวคือ การขัดสีระหว่างผิวจราจร และล่อทำให้ผิวจราจรเสียคุณสมบัติระดับ microtexture ไป แต่ขณะเดียว การสึกกร่อนของ macrotexture เนื่องจากสภาพภูมิอากาศและปัจจัยอื่นๆ จะก่อเกิดการผุพังในมวลรวมที่พื้นผิวจราจร ซึ่งเป็นการฟื้นฟูคุณสมบัติระดับ microtexture จึงทำให้ความผิดของผิวจราจรมีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาถึงระดับการขัดสี พบว่ารถที่มีน้ำหนักบรรทุกมากจะก่อให้เกิดการขัดสีมากตามไปด้วย ในการศึกษาของ Szatkowski et al. (Szatkowski et al., 1972) อัตราส่วนของรถบรรทุกกับรถยนต์ส่วนบุคคลในถนนเส้นหนึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามช่วงถนน และเลนของถนน และการศึกษาของงานวิจัยหลายๆงานพบว่าค่าความผิดของผิวจราจรมีความสัมพันธ์กับจำนวนของรถบรรทุก มากกว่าจำนวนรถยนต์ทั้งหมด

จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการลดลงของความผิดผิวจราจรมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายประการ อย่างไรก็ตามยังไม่มียานวิจัยไหนที่ประสบความสำเร็จในการสร้างสมการทำนายการลดลงของความผิดได้แม่นยำตามสภาพการจราจรจริง ทั้งนี้เนื่องจากต้องอาศัยการเก็บข้อมูลจำนวนมาก และใช้เวลานาน นอกจากนี้สภาพภูมิอากาศแต่ละแห่งมีความแตกต่างกัน ส่งผลให้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นแห่งหนึ่งไม่สามารถนำไปใช้ในพื้นที่อีกแห่งได้ อย่างไรก็ตามหากสามารถสร้างแบบจำลองที่ประเทศเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศแบบประเทศไทยก็จะทำให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเป็นรูปธรรม นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนนได้อีกด้วย

2.7 พื้นผิวจราจร

ขนาดของผิวจราจร (Pavement texture) ที่มีผลต่อความผิดของผิวจราจร ได้แก่ พื้นผิวจราจรระดับ micro (microtexture) ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 μ m ถึง 0.5 mm และพื้นผิวจราจรระดับ macro (macrotexture) ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0.5 mm ถึง 50 mm. การศึกษาของประเทศในแถบยุโรป (Roe et al., 1998) พบว่าการเพิ่มพื้นผิวจราจรระดับ macro จะช่วยลดการเกิดอุบัติเหตุทั้งในสภาวะพื้นผิวเปียก หรือพื้นผิวแห้ง

พื้นผิวจราจรคือลักษณะของผิวทางที่กำหนดปฏิสัมพันธ์ต่างๆระหว่างยางรถยนต์กับพื้นถนน ได้แก่ ความผิด เสียงรบกวน (noise) การต้านการพลิกคว่ำ (rolling resistance) การกระเซ็นของน้ำบนผิวจราจร (splash and spray) ฯลฯ พื้นผิวจราจรสามารถแยกได้เป็นสามขนาด ได้แก่ พื้นผิวจราจรระดับ micro (microtexture) พื้นผิวจราจรระดับ macro (macrotexture) และพื้นผิวจราจรระดับ mega (megatexture) หากวัดใน

สเกลที่ใหญ่กว่าระดับ megatexture จะเป็นการขรุขระ หรือความราบเรียบของผิวจราจร

ในงานประชุม World Road Congress ครั้งที่ 18 IPARC ได้เสนอนิยามช่วงขนาดสำหรับพื้นผิวจราจรต่างๆ รวมทั้งช่วงขนาดพื้นผิวจราจรที่มีอิทธิพลต่อปฏิสัมพันธ์แบบต่างๆระหว่างยางรถยนต์กับพื้นถนน ซึ่งจะพบว่าผิวจราจรที่ออกแบบให้มีความผิดสูง จะมาพร้อมกับเสียงรบกวน การสึกหรอของยาง และการกระเซ็นของน้ำบนผิวจราจรอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

2.4.1 พื้นผิวจราจรระดับ micro

พื้นผิวจราจรระดับ micro เป็นฟังก์ชันกับพื้นผิวของมวลรวมหยาบ ดังนั้นคุณสมบัติของมวลรวมหยาบ ได้แก่ รูปร่าง พื้นผิว (texture) แร่ธาตุ ประกอบ ความแข็ง (hardness) ความทนทานต่อการขัดสี (polish resistance) และความทนทานต่อการสึกกร่อน (abrasion resistance) เป็นคุณสมบัติที่ต้องพิจารณา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาหลายชิ้น เช่น Henry and Dahir (1979) พบว่าคุณลักษณะของพื้นผิวของชั้นผิวทางขึ้นกับคุณสมบัติของมวลรวมเช่น ความทนทานต่อการสึกกร่อน (wearing resistance) Abdul – Marak et al (1996) พบว่าคุณลักษณะของมวลรวมหยาบเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อพื้นผิวของชั้นผิวทาง

เนื่องจากการวัดพื้นผิวจราจรระดับ micro โดยตรงไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การหาตัวแทนของค่าพื้นผิวจราจรระดับ micro และเนื่องจากการวัดความผิดของผิวจราจรในสภาพเปียกที่ความเร็วต่ำ จะเป็นการวัดค่าที่แสดงคุณสมบัติของพื้นผิวจราจรระดับ micro การศึกษาของ Pennsylvania State University (Henry and Leu, 1978) พบว่าค่า ในสมการที่ 7 กับค่าพื้นผิวจราจรระดับ micro มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง และพบว่าค่าที่อ่านได้จาก BPT กับ ก็มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง ดังนั้นค่าที่อ่านได้จาก BPT สามารถใช้เป็นตัวแทนค่าพื้นผิวจราจรระดับ micro ได้ และยังพบว่าค่าที่วัดได้จาก DF (ค่า DFT) ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กับค่าที่อ่านได้จาก BPT มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง

2.4.2 พื้นผิวจราจรระดับ macro

พื้นผิวจราจรระดับ macro เป็นฟังก์ชันของการเรียงตัว การกระจายขนาดของมวลรวมที่พื้นผิวของชั้นผิวทาง การวัดพื้นผิวจราจรระดับ macro โดยวิธีแผ่ทราย (sand patch) เป็นวิธีการวัดพื้นผิวจราจรระดับ macro ที่เป็นพื้นฐานและเป็นที่ยอมรับทำได้โดยนำทราย Ottawa ซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และค้างตะแกรงเบอร์ 100 มาใช้ในการทดสอบ การทดสอบสามารถทำได้โดยนำทรายที่ปริมาตรกำหนดตามแฉอกเป็นวงกลมจนว่าจะไม่สามารถแผ่ออกไปได้แล้ว จากนั้นให้หาพื้นที่ของทรายที่แผ่ออก แล้วนำไปคำนวณค่า Mean Texture Depth (MTD) โดยมีค่าเท่ากับปริมาตรหารด้วยพื้นที่ที่ทรายแผ่ออกไป รูปที่ 2.4 แสดงอุปกรณ์พร้อมทั้งวิธีทดสอบ Sand patch สำหรับมาตรฐานการทดสอบของ ASTM ปัจจุบันแนะนำให้ใช้ลูกแก้วขนาดเล็กแทนการใช้ทราย Ottawa เนื่องจากลูกแก้วมีขนาด และรูปร่างสม่ำเสมอ กว่า นอกจากวิธี Sand patch แล้วยังมีการใช้จารบี (Grease Patch) (Trafford et al., 1968....) รวมทั้งการวัดพื้นผิวจราจรระดับ macro ด้วยการใส่เลขอร์ (Circular Track Meter, CT Meter)

3. วัตถุประสงค์

- 3.1 เพื่อศึกษาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระกับค่าความผิดของผิวทาง สภาวะการใช้งานจริง
- 3.2 เพื่อศึกษาสมการการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทาง ในสภาวะการใช้งานจริง

4. วิธีดำเนินการศึกษา

- 4.1 ศึกษาเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการกำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย
- 4.2 ทำการทดสอบภาคสนามจากแปลงทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบทั้ง 2 ประเภท ดังนี้

ค่าความขรุขระของผิวทางจากการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบ Sand Patch เพื่อประเมินค่าความลึกผิวเฉลี่ย (MTD) และค่าความผิด (f หรือ μ) จากเครื่องมือ Skid (ASFT T-10) โดยทำการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือทดสอบ Sand Patch จำนวนอย่างน้อย 1 ตำแหน่ง (ตำแหน่งละ 3 จุด) และทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบ Skid (ASFT T-10) ทดสอบทุกระยะประมาณ 200 เมตร (อ้างอิงการศึกษาที่ [2],[3],[4]) บริเวณร่องล้อซ้ายของแต่ละสายทางที่ได้รับคัดเลือก ในตำแหน่งเดียวกัน ทั้ง 2 เครื่องมือ โดยการกำหนดชุดข้อมูลดังนี้

- ชนิดของผิวทาง
 - ผิวทางชนิดเกรต Asphalt Concrete (AC 60-70)
 - ผิวทางชนิด Para Slurry Seal
- อายุผิวทาง (หลังหมดประกันผลงาน)
 - อายุผิว 2 ปี

ประกอบด้วยแปลงทดสอบ ดังนี้

ผิวทางชนิดเกรต Asphalt Concrete (AC 60-70) 2 แปลงทดสอบ

- ทางหลวงหมายเลข 366 ตอน ทางเลี่ยงเมืองลพบุรี ระหว่างกม. 0+065 – กม.2+500 LT. AADT 10,356 คัน/วัน รถบรรทุก 3,999 คัน/วัน
- ทางหลวงหมายเลข 3017 ตอน แยกนิคมสร้างตนเอง – แยกพัฒนานิคม ระหว่างกม.7+000 – กม.11+000LT. AADT 15,865 คัน/วัน รถบรรทุก 5,668 คัน/วัน

ผิวทางชนิด Para Slurry Seal 2 แปลงทดสอบ

- ทางหลวงหมายเลข 3017 ตอน แยกพัฒนานิคม – วังม่วง ระหว่างกม.36+050 – 40+000 LT. AADT 8,540 คัน/วัน รถบรรทุก 3,756 คัน/วัน
- ทางหลวงหมายเลข 3454 ตอน แยกท่าช้าง – วิเศษชัยชาญ ระหว่างกม. 60+980 – 63+500 LT. AADT 11,215 คัน/วัน รถบรรทุก 2,283 คัน/วัน



รูปที่ 4 ตัวอย่างตำแหน่งการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือทดสอบ Sand Patch



รูปที่ 5 ตัวอย่างตำแหน่งทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบ Skid (ASFT T-10)

- 4.3 ทำการศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์และสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระกับค่าความผิดของผิวทาง ในสภาวะการใช้งานจริง

ของค่าจากการทดสอบที่ได้จากการทดสอบเครื่องมือทั้ง 2 ประเภท ซึ่งได้ทำการสำรวจข้อมูลภาคสนามจากแปลงทดสอบ ทดสอบทุกระยะประมาณ 100 เมตร (อ้างอิงการศึกษาที่ [2],[3],[4]) โดยครอบคลุมกลุ่มของแต่ละชนิดผิวทางดังนี้

- ผิวทางชนิด Asphalt Concrete (AC 60-70)
- ผิวทางชนิด Para Slurry Seal
- อายุผิวทาง (หลังหมดประกันผลงาน)
 - อายุผิวทางตั้งแต่ 2-3 ปี

ประกอบด้วยแปลงทดสอบ ดังนี้

ผิวทางชนิดเกรต Asphalt Concrete (AC 60-70) 4 แปลงทดสอบ

อายุผิว เริ่มต้นติดตามผลการทดสอบ 2 ปี

- ทางหลวงหมายเลข 366 ตอน ทางเลี่ยงเมืองลพบุรี ระหว่างกม. 0+065 – กม.2+500 RT./LT. AADT 10,356 คัน/วัน รถบรรทุก 3,999 คัน/วัน
- ทางหลวงหมายเลข 3017 ตอน แยกนิคมสร้างตนเอง – แยกพัฒนานิคม ระหว่างกม.7+000 – กม.11+000 RT./LT. AADT 15,865 คัน/วัน รถบรรทุก 5,668 คัน/วัน

อายุผิว เริ่มต้นติดตามผลการทดสอบ 3 ปี

- ทางหลวงหมายเลข 366 ตอน ทางเลี่ยงเมืองลพบุรี ระหว่างกม. 0+065 – กม.2+500 RT./LT. AADT 10,356 คัน/วัน รถบรรทุก 3,999 คัน/วัน
- ทางหลวงหมายเลข 3017 ตอน แยกนิคมสร้างตนเอง – แยกพัฒนานิคม ระหว่างกม.7+000 – กม.11+000 RT./LT. AADT 15,865 คัน/วัน รถบรรทุก 5,668 คัน/วัน

ผิวทางชนิด Para Slurry Seal 4 แปลงทดสอบ

อายุผิวเริ่มต้นติดตามผลการทดสอบ 2 ปี

- ทางหลวงหมายเลข 3017 ตอน แยกพัฒนานิคม – วังม่วง ระหว่างกม.36+050 – 40+000 RT./LT AADT 8,540 คัน/วัน รถบรรทุก 3,756 คัน/วัน
- ทางหลวงหมายเลข 3454 ตอน แยกท่าช้าง – วิเศษชัยชาญ ระหว่างกม. 60+980 – 63+500 RT./LT AADT 11,215 คัน/วัน รถบรรทุก 2,283 คัน/วัน

อายุผิวเริ่มต้นติดตามผลการทดสอบ 3 ปี

- ทางหลวงหมายเลข 3017 ตอน แยกพัฒนานิคม – วังม่วง ระหว่างกม.36+050 – 40+000 RT./LT AADT 8,540 คัน/วัน รถบรรทุก 3,756 คัน/วัน
- ทางหลวงหมายเลข 3454 ตอน แยกท่าช้าง – วิเศษชัยชาญ ระหว่างกม. 60+980 – 63+500 RT./LT AADT 11,215 คัน/วัน รถบรรทุก 2,283 คัน/วัน

การทดสอบจะเลือกช่องจราจรซ้ายเนื่องจากด้วยช่องจราจรซ้ายมีปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนักมากกว่าช่องจราจรอื่น และตามปกติรถส่วนใหญ่จะขับชิดเลนซ้ายมากกว่าดังนั้นการทดสอบจะเลือกช่องจราจรซ้ายเป็นแปลงทดสอบ แล้วจึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลของผิวทางทั้ง 2 ชนิด โดยทำการวิเคราะห์สัมพัทธ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระของผิวทางจากการชูดเครื่องมือทดสอบ Sand Patch เพื่อประเมินค่าความสึกผิวเฉลี่ย (MTD) และค่าความผิด (f หรือ μ) จากเครื่องมือ Skid (ASFT T-10)

4.4 ทำการศึกษวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเสื่อมสภาพกับค่าความผิดของผิวทาง

โดยมุ่งเน้นการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเสื่อมสภาพต่อค่าความผิด โดยการใช้เครื่องมือทดสอบ Skid (ASFT – 10) เป็นตัวที่ใช้เก็บข้อมูลความผิดของแต่ละชนิดผิวทาง เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อเสื่อมสภาพค่าความผิดโดยการศึกษาที่ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็นการศึกษาเกี่ยวกับข้อมูล กลุ่มคุณลักษณะสภาพผิวทาง ส่วนกลุ่มที่ 2 กลุ่มแรงกระทำต่อสภาพผิวจราจรประกอบด้วยตัวแปร ดังนี้

กลุ่มที่ 1 กลุ่มลักษณะสภาพผิวจราจรประกอบด้วยตัวแปร ดังนี้

- ผิวทางชนิด Asphalt Concrete (AC 60-70)
- ผิวทางชนิด Para Slurry Seal

กลุ่มที่ 2 กลุ่มแรงกระทำต่อสภาพผิวจราจรประกอบด้วยตัวแปร ดังนี้

- ปัจจัยด้านเวลา คือ อายุผิวทาง
- ปัจจัยด้านปริมาณจราจรตลอดอายุผิวทางคือ AADT x 365 วัน x จำนวนปี
- ปัจจัยด้านจำนวนรถบรรทุก คือ ปริมาณรถบรรทุกตลอดอายุผิวทาง

4.5 สร้างสมการพยากรณ์การเสื่อมสภาพความผิดผิวทาง เพื่อคาดการณ์ การใช้งานของผิวทางนั้นๆ

การศึกษานี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็น การศึกษาเกี่ยวกับข้อมูล กลุ่มคุณลักษณะสภาพผิวทาง ส่วนกลุ่มที่ 2 กลุ่ม แรงที่กระทำต่อสภาพผิวทางและตัวแปรอีกประเภทคือตัวแปรเชิงปริมาณ เป็นตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้ในที่นี้คือ ปัจจัยด้านเวลา, ปัจจัยด้านจราจร ตลอดอายุผิวทาง, ปัจจัยด้านจำนวนรถบรรทุกโดยรายละเอียดของตัวแปร ต่างๆจะกล่าวถึงตัวแปรที่สำคัญได้ดังนี้

อายุผิวทาง (ปี) = อายุผิวจราจรที่เปิดการใช้งาน

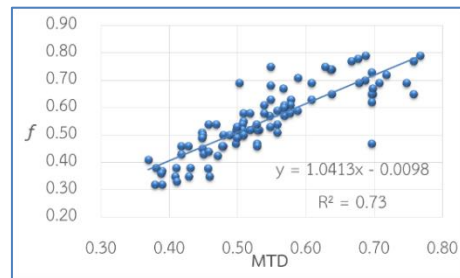
AADT x 365 x ปี = ปริมาณการจราจรตลอดอายุผิวทาง

ปริมาณรถบรรทุกตลอดอายุผิวทาง=จำนวนรถบรรทุกที่วิ่งตลอดอายุที่ เปิดใช้

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง การทดสอบค่า MTD จาก Sand Patch และค่า f จาก Skid (ASFT T-10) บนผิวทางชนิด AC 60-70 อายุผิวประมาณ 2 ปี

จากการทดสอบด้วยวิธี Simple Linear Regression Analysis ทดสอบ ทุกระยะประมาณ 200 เมตร มีจำนวนข้อมูล 90 ข้อมูล เพื่อหาความสัมพันธ์ พบว่า ค่า MTD มีแนวโน้มไปในทิศทางที่สัมพันธ์กับค่า f จากการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ของผิวทางชนิด AC 60-70 ได้ค่า MTD เฉลี่ยเท่ากับ 0.54 mm. และค่า f เฉลี่ยเท่ากับ 0.56 และมีค่า R² เท่ากับ 0.73 มีค่าที่ค่อนข้าง สัมพันธ์กันมาก ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MTD จาก Sand Patch และค่า f จาก Skid (ASFT T-10) ของผิวทางชนิด AC 60-70

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ จึงได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความขรุขระ (MTD) กับค่าความผิด f ของผิวทางชนิด AC 60-70 คือ

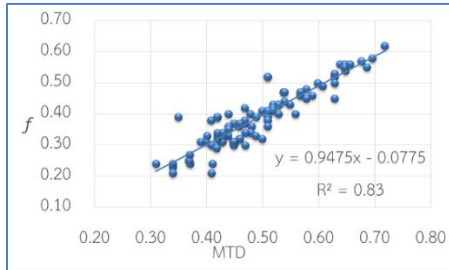
$$y = 1.0413x - 0.0098 \quad (9)$$

เมื่อ y คือ ค่าความผิด f จากเครื่องมือ Skid (ASFT T-10)

X คือ ค่าความขรุขระ (MTD) ของผิวทางจากการเครื่องมือ Sand Patch

5.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง การทดสอบค่า MTD จาก Sand Patch และค่า f จาก Skid (ASFT T-10) บนผิวทางชนิด Para Slurry Seal อายุผิวประมาณ 2 ปี

จากการทดสอบด้วยวิธี Simple Linear Regression Analysis ทดสอบ ทุกกระยะประมาณ 200 เมตร มีจำนวนข้อมูล 90 ข้อมูล หาคความสัมพันธ์ พบว่า ค่า MTD มีแนวโน้มไปในทิศทางที่สัมพันธ์กับค่า f จากการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ของผิวทางชนิด Para Slurry Seal ได้ค่า MTD เฉลี่ยเท่ากับ 0.39 mm. และค่า f เฉลี่ยเท่ากับ 0.49 และมีค่า R2 เท่ากับ 0.83 มีค่าที่ ค่อนข้างสัมพันธ์กันมาก ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MTD จาก Sand Patch และค่า f จาก Skid (ASFT T-10) ของผิวทางชนิด Para Slurry Seal

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ จึงได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความขรุขระ (MTD) กับค่าความผิด f ของผิวทาง ชนิด Para Slurry Seal

$$y = 0.947x - 0.0775 \quad (10)$$

เมื่อ y คือ ค่าความผิด f จากเครื่องมือ Skid (ASFT T-10)

X คือ ค่าความขรุขระ (MTD) ของผิวทางจากการเครื่องมือ Sand Patch

5.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพ ค่าความผิดของผิวทาง ในสภาวะการใช้งานจริง

5.3.1 จากการสำรวจและประเมินสภาพความผิดของผิวทางชนิด AC 60-70 กับปัจจัยส่งผลต่อการเสื่อมสภาพทดสอบทุกกระยะ ประมาณ 100 เมตร จำนวนข้อมูล 168 ข้อมูล ผลของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เบื้องต้น

พบว่า ค่า f ของผิวทางชนิด AC 60 - 70 ช่วงอายุผิวทาง 2 - 3 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.63 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปผลการเก็บข้อมูล ผิวทางชนิด AC 60-70

	ค่า f ผิว AC60-70	อุณหภูมิ ผิวทาง	อายุผิวทาง (ปี)	ปริมาณรถสะสม (คัน)	รถบรรทุกสะสม (คัน)
Mean	0.63	31.93	2.5	11,963,559.37	4,410,291.19
N	168	168	168	168	168

ผลการวิเคราะห์โดยใช้สัมประสิทธิ์สหพันธ์ (Correlations) พบว่า ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพผิวทางชนิด AC 60-70 จะเห็นได้ว่าตัวแปรพหุคูณทุกตัวมีค่า Sig. เท่ากับ 0.000 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าผลการวิเคราะห์ทางสถิติตัวแปรดังกล่าวเป็นปัจจัยส่งผลต่อการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทางชนิด AC60-70 อย่างมีนัยสำคัญ ดังผลในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 Correlations ของผิวทางชนิด AC60-70

	ค่า f	อุณหภูมิ ผิวทาง	อายุผิวทาง (ปี)	ปริมาณรถสะสม	รถบรรทุกสะสม	
Pearson Correlation	ค่า f	1.000	-.769	-.732	-.910	-.930
	อุณหภูมิผิวทาง	-.769	1.000	.880	.636	.664
	อายุผิวทาง(ปี)	-.732	.880	1.000	.552	.590
	ปริมาณรถสะสม	-.910	.636	.552	1.000	.997
	รถบรรทุกสะสม	-.930	.664	.590	.997	1.000
Sig. (1-tailed)	ค่า f	.000	.000	.000	.000	.000
	อุณหภูมิผิวทาง	.000	.000	.000	.000	.000
	อายุผิวทาง(ปี)	.000	.000	.000	.000	.000
	ปริมาณรถสะสม	.000	.000	.000	.000	.000
	รถบรรทุกสะสม	.000	.000	.000	.000	.000
N	ค่า f	168	168	168	168	168
	อุณหภูมิผิวทาง	168	168	168	168	168
	อายุผิวทาง(ปี)	168	168	168	168	168
	ปริมาณรถสะสม	168	168	168	168	168
	รถบรรทุกสะสม	168	168	168	168	168

5.3.2 จากการสำรวจและประเมินสภาพความผิดของผิวทาง Para Slurry Seal กับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพ ผลของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เบื้องต้น

พบว่า ค่า f ของผิวทาง Para Slurry Seal ช่วงอายุผิวทาง 2 - 3 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.52 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สรุปผลการเก็บข้อมูล ผิวทางชนิด Para Slurry Seal

	ค่า f ผิว Para Slurry Seal	อุณหภูมิ ผิวทาง	อายุผิวทาง (ปี)	ปริมาณรถสะสม (คัน)	รถบรรทุกสะสม (คัน)
Mean	0.52	31.1	2.5	9,061,581	2,820,766
N	168	168	168	168	168

ผลการวิเคราะห์โดยใช้สัมประสิทธิ์สหพันธ์ (Correlations) พบว่า ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพผิวทางชนิด Para Slurry Seal จะเห็นได้ว่าตัวแปรพหุคูณทุกตัวมีค่า Sig. เท่ากับ 0.000 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าผลการวิเคราะห์ทางสถิติตัวแปรดังกล่าวเป็นปัจจัยส่งผลต่อการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทางชนิด Para Slurry Seal อย่างมีนัยสำคัญ ดังผลในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 Correlations ของผิวทางชนิด Para Slurry Seal

	ค่า f	อุณหภูมิ ผิวทาง	อายุผิวทาง (ปี)	ปริมาณรถสะสม	รถบรรทุกสะสม	
Pearson Correlation	ค่า f	1.000	-.825	-.832	-.737	-.892
	อุณหภูมิผิวทาง	-.825	1.000	.998	.807	.632
	อายุผิวทาง(ปี)	-.832	.998	1.000	.809	.643
	ปริมาณรถสะสม	-.737	.807	.809	1.000	.553
	รถบรรทุกสะสม	-.892	.632	.643	.553	1.000
ค่า f	.	.000	.000	.000	.000	

	อุณหภูมิผิวทาง	.000	.	.000	.000	.000
Sig. (1-tailed)	(1-อายุผิวทาง(ปี)	.000	.000	.	.000	.000
	ปริมาณรถสะสม	.000	.000	.000	.	.000
	รถบรรทุกสะสม	.000	.000	.000	.000	.
N	ค่า f	168	168	168	168	168
	อุณหภูมิผิวทาง	168	168	168	168	168
	อายุผิวทาง(ปี)	168	168	168	168	168
	ปริมาณรถสะสม	168	168	168	168	168
	รถบรรทุกสะสม	168	168	168	168	168

5.4 ผลการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทางในสภาวะการใช้งานจริง

ด้วยการคัดเลือกตัวแปรที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพและมีความสำคัญต่อค่าความผิดของผิวทาง พบว่า

5.4.1 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทางชนิด AC60-70 ด้วยวิธีทางสถิติการวิเคราะห์ Multiple Regression Analysis ในที่นี้ได้ใช้วิธีเลือกตัวแปรโดยวิธี Backward Elimination พบว่าได้ Model ที่เหมาะสมมา 2 รูปแบบ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.964 ^a	.930	.928	.01913	.930	538.393	4	163	.000
2	.964 ^b	.928	.927	.01923	-.001	2.716	1	163	.101

a. Predictors: (Constant), รถบรรทุกสะสม, ปริมาณรถสะสม, อุณหภูมิผิวทาง, อายุผิวทาง(ปี)

b. Predictors: (Constant), รถบรรทุกสะสม, ปริมาณรถสะสม, อายุผิวทาง(ปี)

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ตัวแปรเพื่อสร้างสมการการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทางชนิด AC 60-70 ในสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งพบว่า Model รูปแบบที่ 2 ตัวแปรในการสร้างสมการทุกตัวมีค่า Sig. น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างสมการการเสื่อมสภาพ ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ดังนี้ คือ

$$\text{ค่าความผิดของผิวทางชนิด AC 60-70} = 0.89 - 0.028\text{อายุผิวทาง(ปี)} + 2.473 \times 10^{-8} \text{ ปริมาณรถสะสม} - 1.1 \times 10^{-7} \text{ รถบรรทุกสะสม} \quad (10)$$

ตารางที่ 8 Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error			
				Beta		
1	(Constant)	.931	.026		36.079	.000
	อุณหภูมิผิวทาง	-.002	.001	-.078	-1.648	.101
	อายุผิวทาง(ปี)	-.020	.007	-.140	-2.967	.003

	ปริมาณรถสะสม	2.500E-008	.000	1.525	5.140	.000
	รถบรรทุกสะสม	-1.100E-007	.000	-2.316	-7.565	.000
2	(Constant)	.890	.008		117.696	.000
	อายุผิวทาง(ปี)	-.028	.004	-.199	-6.502	.000
	ปริมาณรถสะสม	2.473E-008	.000	1.509	5.060	.000
	รถบรรทุกสะสม	-1.100E-007	.000	-2.317	-7.526	.000

a. Dependent Variable: ค่าความผิดผิวทางชนิด AC 60-70

4.4.2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทางชนิด Para Slurry Seal ด้วยวิธีทางสถิติการวิเคราะห์ Multiple Regression Analysis ในที่นี้ได้ใช้วิธีเลือกตัวแปรโดยวิธี Backward Elimination พบว่าได้ Model ที่เหมาะสมมา 2 รูปแบบ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.957 ^a	.915	.913	.03635	.915	441.244	4	163	.000
2	.957 ^b	.915	.914	.03624	.000	.027	1	163	.869

a. Predictors: (Constant), รถบรรทุกสะสม, ปริมาณรถสะสม, อุณหภูมิผิวทาง, อายุผิวทาง(ปี)

b. Predictors: (Constant), รถบรรทุกสะสม, ปริมาณรถสะสม, อายุผิวทาง(ปี)

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ตัวแปรเพื่อสร้างสมการการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทางชนิด Para Slurry Seal ในสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งพบว่า Model รูปแบบที่ 2 ตัวแปรในการสร้างสมการทุกตัวมีค่า Sig. น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างสมการการเสื่อมสภาพ ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ดังนี้ คือ

$$\text{ค่าความผิดของผิวทางชนิด Para Slurry Seal} = 1.036 - 0.085\text{อายุผิวทาง(ปี)} - 6.863 \times 10^{-9} \text{ ปริมาณรถสะสม} - 8.432 \times 10^{-8} \text{ รถบรรทุกสะสม}$$

ตารางที่ 10 Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error			
				Beta		
1	(Constant)	1.056	.126		8.405	.000
	อุณหภูมิผิวทาง	-.002	.011	-.055	-.166	.869
	อายุผิวทาง(ปี)	-.071	.082	-.290	-.866	.388
	ปริมาณรถสะสม	-6.855E-009	.000	-.125	-3.213	.002
	รถบรรทุกสะสม	-8.444E-008	.000	-.602	-19.884	.000
2	(Constant)	1.036	.014		72.649	.000
	อายุผิวทาง(ปี)	-.085	.010	-.345	-8.199	.000
	ปริมาณรถสะสม	-6.863E-009	.000	-.125	-3.227	.002
	รถบรรทุกสะสม	-8.432E-008	.000	-.601	-20.222	.000

a. Dependent Variable: ค่าความผิดผิวทางชนิด Para Slurry Seal

6. สรุปผลการศึกษา

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธี Simple Linear Regression Analysis หาความสัมพันธ์ ระหว่างการทดสอบค่าความขรุขระ และค่าความผิดของผิวทางชนิด AC 60-70 และผิวทางชนิด Para Slurry Seal พบว่า ค่าความขรุขระของผิวทางมีแนวโน้มไปในทิศทางที่สัมพันธ์กับค่าความผิดของผิวทาง ของผิวทางทั้งสองชนิด ซึ่งมีค่า R^2 ที่ระดับค่อนข้างสัมพันธ์กันมาก และมีการกระจายตัวอยู่ในรูปเชิงเส้น และจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ จึงได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระกับค่าความผิดของผิวทางชนิด AC 60-70 คือ $y = 1.0413x - 0.0098$ และ ผิวทางชนิด Para Slurry Seal คือ $y = 0.9475x - 0.0775$ เมื่อ y คือ ค่าความผิดของผิวทาง และ X คือ ค่าความขรุขระผิวทาง

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทาง ในสภาวะการใช้งานจริง โดยใช้สัมประสิทธิ์สหพันธ์ (Correlations) ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพผิวทางชนิด AC 60-70 และผิวทางชนิด Para Slurry Seal จะพบว่า ตัวแปรอุณหภูมิผิวทาง, อายุผิวทาง(ปี), ปริมาณรถสะสม, รถบรรทุกสะสม, ตัวแปรพยากรณ์ทุกตัวมีค่า Sig. เท่ากับ 0.000 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ผลการวิเคราะห์ทางสถิติตัวแปรดังกล่าวเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทางทั้ง 2 ชนิดอย่างแน่นอน

ผลการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทางชนิด AC 60-70 และผิวทางชนิด Para Slurry Seal ในสภาวะการใช้งานจริง ด้วยวิธีทางสถิติการวิเคราะห์ Multiple Regression Analysis ในที่นี้ ได้ใช้วิธีเลือกตัวแปรโดยวิธี Backward Elimination พบว่า ตัวแปรพยากรณ์ของทั้ง 2 ชนิดผิวทาง ที่มีค่า Sig. น้อยกว่า 0.05 คือตัวแปรอายุผิวทาง(ปี), ตัวแปรปริมาณรถสะสม และตัวแปรรถบรรทุกสะสม เป็นตัวแปรที่เหมาะสมในการสร้างสมการการเสื่อมสภาพค่าความผิดของผิวทางมากที่สุดของผิวทางทั้ง 2 ชนิด ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบสมการของผิวทางได้ดังนี้ คือ ค่าความผิดของผิวทางชนิด AC 60-70 = $0.89 - 0.028$ อายุผิวทาง(ปี)+ 2.473×10^{-8} ปริมาณรถสะสม - 1.1×10^{-7} รถบรรทุกสะสม และค่าความผิดของผิวทางชนิด Para Slurry Seal = $1.036 - 0.085$ อายุผิวทาง(ปี) - 6.863×10^{-9} ปริมาณรถสะสม - 8.432×10^{-8} รถบรรทุกสะสม

7. ข้อเสนอแนะ

1) ในการศึกษาเป็นการศึกษานำร่อง เพื่อศึกษาระยะหลังหมดประกันสัญญา เพื่อศึกษาคุณภาพผิวทางอันเนื่องมาจากค่าความขรุขระและค่าความผิดของผิวทาง สำหรับในอนาคตเมื่อมีผลการเก็บข้อมูลค่าความขรุขระเฉลี่ยของผิวทางจากเครื่องมือ High-speed Laser Texture Measurement กับข้อมูลค่าความผิดของผิวทาง ที่มากเพียงพอและครอบคลุมทุกประเภทผิวทาง ก็จะนำมาใช้พัฒนาและปรับปรุงผลการวิเคราะห์ค่าความขรุขระกับค่าความผิดของผิวทางต่อไป เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2) วิธีการตรวจสอบสภาพความผิดของผิวถนนที่นำเสนอจะแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและชนิดผิวทางของถนนประเภทต่างๆ จากข้อจำกัดด้านเครื่องมือ อาจส่งผลให้ค่าความผิดมีความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้น ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการจริง ผู้ดำเนินการควรศึกษาถึงข้อจำกัดของเครื่องมือเพื่อให้สามารถเลือกเครื่องมือได้เหมาะสมกับชนิดของผิวทางมากที่สุด และให้ผลค่าความผิดที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

3) ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ของปริมาณจราจรสะสมผิวทางชนิด AC 60- 70 พบว่ามีค่าเป็นลบเท่ากับ $2.473E-008$ ส่วนผิวทางชนิด Para Slurry Seal พบว่ามีค่าเป็นลบเท่ากับ $-6.863E-009$ เนื่องจากผิวทางชนิด AC 60-70 เมื่อมีการใช้งานอันเนื่องการปริมาณการจราจรไปสักระยะหนึ่งด้วยยางแอสฟัลต์ที่เคลือบวัสดุผิวรวมจะลดบางลง การเคลือบตัววัสดุผิวรวมทำให้เกิดค่าความผิดของผิวทางจากการขัดสีกับตัววัสดุเองโดยตรงจากการศึกษา [4] ซึ่งก็เป็นไปตามการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นอัตราการส่งผลเสียที่จะส่งผลทำให้วัสดุผิวรวมเสียคุณสมบัติไปในระยะยาว ส่วนผิวทางชนิด Para Slurry Seal ตัววัสดุผิวรวมที่ใช้จะประกอบด้วยหินฝุ่นและขนาดหินโตสุดเพียงแค่ 3/8 นิ้ว ซึ่งไม่มีขนาดคละแบบผิวทางชนิด AC 60-70 ซึ่งจากการใช้ไปสักระยะหนึ่งก็จะเกิดการหลุดล่อนของหินได้ทำให้ค่าความผิดผิวทางลดอันเนื่องมาจากปริมาณจราจร

กิตติกรรมประกาศ

งานศึกษานี้แล้วเสร็จลุล่วงเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์งบประมาณและความร่วมมือจากผู้บริหารและเจ้าหน้าที่สำนักวิจัยและพัฒนางานทางกรรมทางหลวง กรมชบพพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] คู่มือแนะนำการตรวจสอบและการวางแผนบำรุงรักษาผิวทางให้มีความผิดที่เหมาะสม. สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรรมทางหลวง, 2555
- [2] โครงการศึกษาสภาพความผิดผิวทางของถนนประเภทต่าง ๆ ในประเทศไทย. สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรรมทางหลวง, 2555
- [3] โครงการประยุกต์ใช้ค่าความสึกผิวเฉลี่ยของผิวทาง ในการทำนายสภาพลื่นของผิวถนน เพื่อการวางแผนที่เหมาะสม. สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรรมทางหลวง, เมษายน 2559
- [4] โครงการยกระดับมาตรฐานความผิดของผิวทางแอสฟัลต์ เพื่อมุ่งสู่ทศวรรษแห่งความปลอดภัยทางถนน. สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรรมทางหลวง, ตุลาคม 2561
- [5] ข้อเสนอแนะขั้นตอนการทำงานฉาบผิวทางแบบ Para Slurry Seal. สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรรมทางหลวง, 2546