

การศึกษาความต้านทานการลื่นไถลมวลรวมของหิน
The Study of Skid Resistance Value of Aggregate



นางสาวธัญชนก	หนุมนำสิริสวัสดิ์	รหัส 53360309
นายวิญญู	ทองทัน	รหัส 53360637
นายสุทธิชัย	ประสาทเกษการ	รหัส 53360729

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรัตนนคร

ปีการศึกษา 2556
ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 2 ต.ย. 2558
เลขทะเบียน..... 16758009
เลขเรียกหนังสือ..... 16
มหาวิทยาลัยรัตนนคร 8 449 17


2556




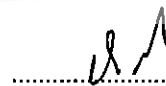
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การศึกษาความต้านทานการสั่นไถลของหิน		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นางสาวธัญชนก	हनุนนำสิริสวัสดิ์	รหัส 53360309
	นายวิญญู	ทองทัน	รหัส 53360637
	นายสุทธิชัย	ประสาทเกษการ	รหัส 53360729
ที่ปรึกษาโครงการงาน	อาจารย์บุญพล	มีไชโย	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	คณะวิศวกรรมศาสตร์	
ปีการศึกษา	2556		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา


.....ที่ปรึกษาโครงการงาน
(อาจารย์บุญพล มีไชโย)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิชเชจริญ)


.....กรรมการ
(อาจารย์อำพล เตโชวานิชย์)

.....หัวหน้าภาควิชา
(ดร.กำพล ทรัพย์สมบูรณ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาความต้านทานการลื่นไถลมวลรวมของหิน		
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวธัญชนก	หนูนนำสิริสวัสดิ์	รหัส 53360309
	นายวิญญู	ทองทัน	รหัส 53360637
	นายสุทธิชัย	ประสาทเกษการ	รหัส 53360729
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์บุญพล	มีไชโย	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	คณะวิศวกรรมศาสตร์	
ปีการศึกษา	2556		

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษา ความต้านทานการลื่นไถลมวลรวมของหินปูนขนาด $3/8":1/2"$ ในอัตราส่วนที่คละกัน จากแหล่งหิน อำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลของหินในอัตราส่วนต่างๆกับจำนวนรอบในการขัดหิน โดยใช้เครื่องมือในการทดลอง 2 ชนิด คือ เครื่องขัด (Polishing Machine) และ เครื่องวัดความต้านทานการลื่นไถล (Portable Skid-Resistance Tester) ทั้งหมด 12 ตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานการลื่นไถล

จากการศึกษาพบว่าจำนวนรอบที่ขัดด้วยเครื่องขัด (Polishing Machine) มีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล จำนวนรอบที่ขั้นน้อยส่งผลทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลมีค่ามาก และเมื่อมีจำนวนรอบในการขัดที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลน้อยลงตามลำดับ ในกรณีหินอัตราส่วน 80:20 มีความสัมพันธ์ $y = -3.455x + 62.565$ ค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9639$, หินอัตราส่วน 60:40 มีความสัมพันธ์ $y = -2.901x + 60.259$ ค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9661$, หินอัตราส่วน 40:60 มีความสัมพันธ์ $y = -3.423x + 60.981$ ค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9638$, หินอัตราส่วน 20:80 มีความสัมพันธ์ $y = -3.955x + 64.041$ ค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9726$, จากค่าความเชื่อมั่นหินอัตราส่วน 20:80 มีค่าความเชื่อมั่นมากที่สุด

Project title The study of Skid Resistance Value of Aggregate
Name Ms.Thunchanok Noonnumsirisawus ID.53360309
 Mr.Winyu Thongthan ID.53360637
 Mr. Sutthichai Prasatketkam ID.53360729
Project advisor Mr.Boonphol Meechaiyo
Major Civil Engineering
Department Civil Engineering
Academic year 2013

Abstract

This project studies the study of polished stone value of aggregate at Prankratai Distric, Kamphaeng Phet Province. Our main objective is to compare the skid resistance of stone in the unequal ratio and number of polishing stone .The skid resistance tested by portable skid resistance tester and polishing stone machine, all Trail 12 examples. And finally the project will analyze the skid resistance .This project tell us that number of polishing stone have a direct effect on the resistance .However , with increasing number of cycles more polished .The skid resistance is significantly reduced. At 80:20 ratio in rocks correlated $y = -3.455x + 62.565$ certainty $R^2 = 0.9639$, rocky ratio of 60:40, the relationship $y = -2.901x + 60.259$ certainty $R^2 = 0.9661$, 40:60 ratio rocky relationship $y = -3.423x + 60.981$ certainty $R^2 = 0.9638$, 20:80 ratio rocky relationship $y = -3.955x + 64.041$ certainty $R^2 = 0.9726$, From certainty we can see that the stone has a ratio of 20:80, the most confidence.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้ความอุปการะและสนับสนุนด้านการเงินและเป็นกำลังใจในการศึกษาและการจัดทำโครงการนี้

คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณอาจารย์บุญพล มีไชโย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการตลอดการให้คำปรึกษาแนะนำวิธีการแก้ไขปัญหาในด้านต่างๆ รวมไปถึงการอบรมสั่งสอนในเรื่องที่เกี่ยวกับการทำงานและการดำเนินชีวิต

คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ คุณรัชสมล บัวชื่น ผู้ร่วมวิจัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำในด้านการทดสอบวัสดุ แก่คณะผู้จัดทำโครงการ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับความอนุเคราะห์ทุนการศึกษาเพื่อเป็นค่าใช้จ่ายในการจัดทำโครงการวิศวกรรมโยธา



คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม
นางสาวธัญชนก หนูนนำสิริสวัสดิ์
นายวิญญู ทองทัน
นายสุทธิชัย ประสาทเกษการ

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญรูป(ต่อ).....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.....	1
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	2
1.7 งบประมาณ.....	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	3
2.1 ความต้านทานการลื่นไถลของผิวทาง.....	3
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานการลื่นไถล.....	6
2.3 การศึกษาความต้านทานการลื่นไถลในอดีต.....	19
2.4 การวัดค่าความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทาง.....	24
2.5 มาตรฐานกำหนดความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทาง.....	29
2.6 ประเภทการทดสอบวัสดุชั้นทาง.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	39
3.1 วัสดุ.....	39
3.2 วิธีการทดลอง.....	39
3.3 แผนผังการดำเนินโครงการ.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	47
4.1 ผลการทดลอง.....	47
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	56
เอกสารอ้างอิง.....	57



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของยาง.....	27
2.2 ระดับของค่า SFC ที่ความเร็ว 50 กิโลเมตร / ชั่วโมง (SFC50) สำหรับประเภทและ..... ลักษณะของถนนต่าง ๆ รวม 4 ประเภท (Giles, 1957)	30
2.3 ผลของความลึกของผิวมหภาคที่มีต่อค่าความต้านทานการสั่นไถล (SRV) เมื่อ..... ความเร็วเพิ่มขึ้น (Salt & Szatkowski, 1973)	31
2.4 ค่าความต้านทานการสั่นไถลขั้นต่ำของ BPT-Number และ Mu-Meter Number ที่ ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในลักษณะถนนประเภทต่างๆ ในกรณีผิวทางเปียก (Wet Condition) (Bunnag & Sukhawan, 1975)	31
2.5 ค่าขอบเขตมาตรฐาน Los Angeles abrasion value สำหรับวัสดุหินผิวทาง เมื่อ..... จำแนกตามประเภทชนิดหินและปริมาณการจราจร (NAASRA,1982)	33
2.6 ค่าคุณสมบัติ ACV. และ AIV. ของหินชนิดต่างๆ (ข้อมูลจาก C.J.Talbot, 1982).....	35
2.7 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของกลุ่มหินชนิดต่างๆตามการจำแนกของ British Standard.....	37
2.8 ค่าคุณสมบัติของวัสดุหินในประเทศไทย.....	38
4.1 ตารางอัตราส่วนและน้ำหนักของตัวอย่าง.....	47
4.2 ผลการทดลองการหาค่า PSV.....	48
4.2(ต่อ) ผลการทดลองการหาค่า PSV.....	49
4.3 ผลการทดลองหาค่า PSV เฉลี่ย.....	50
ก1 ค่าความถ่วงจำเพาะของหิน จากแหล่งหินอำเภอรานกระต่าย จังหวัด กำแพงเพชร.....	58
ข1 ดรรชนีความแบน (Flakiness Index).....	59
ข2 ดรรชนีความยาว (Elongation Index).....	59

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	3
2.1 แผนภาพแสดงแรงที่กระทำต่อล้อรถยนต์ขณะมีการเคลื่อนที่.....	3
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดอุบัติเหตุเมื่อถนนเปียก.....	4
และความเสียหายของผิวทาง	
2.3 ค่าเฉลี่ยความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุรถชนสำหรับโครงข่ายถนน.....	5
ในประเทศไทย	
2.4 องค์ประกอบของแรงเสียดทานระหว่างหน้ายางล้อรถและผิวทาง.....	6
2.5 ภาพแสดงความแตกต่างของลักษณะผิวทาง.....	8
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การลดลงของค่า สปส. ความเสียหาย (BFC)	9
กับความสึกผิวทาง (STD) ของถนนในช่องทางรถวิ่งช้า และ ช่องทางรถวิ่งเร็ว	
2.7 แสดงผลของความสึกผิวทางที่มีต่อการลดลงของค่า สปส. ความเสียหาย (BFC).....	10
ที่ ความเร็ว 50 และ 130 กม./ชม.	
2.8 แสดงผลของค่าความยืดหยุ่นของดอกยาง (Tread Resilience)	12
บนผิวทางเรียบและหยาบในสภาพผิวทางเปียก	
2.9 ผลของลักษณะดอกยางบนผิวทางเรียบและหยาบในสภาพที่มีต่อค่า.....	13
สปส.ความเสียหาย	
2.10 แสดงผลของความสึกดอกยางกับค่า สปส. ความเสียหาย (BFC) บนผิวทางเปียก....	15
2.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่า SFC ที่อุณหภูมิใดๆกับค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (t)....	16
2.12 แสดงผลของความเร็วยวดยานที่มีต่อ สปส. ความเสียหาย (SFC)	18
ในสภาพผิวทางต่างๆ	
2.13 แสดงผลของความเร็วยวดยานที่มีต่อ สปส. ความเสียหาย (SFC)	18
ในสภาพผิวทางต่างกันขณะเปียก	
2.14 แสดงระดับค่า สปส.ความเสียหาย (SFC) บนผิวทางชนิดต่างๆ.....	20
โดยใช้ Chippings ขนาด 13 mm. มีปริมาณการจราจร 2100 คัน/ช่องทาง/วัน)	
2.15 แสดงระดับค่า สปส.ความเสียหาย (SFC ในฤดูร้อน)	20
บนผิวทางมาตรฐาน Motorway	
2.16 แสดงการเพิ่มค่าของ สปส.ความเสียหาย (SFC) บนผิวทาง Trunk Road A 4.....	21
COLNBROOK BY -PASS เมื่อการจราจรลดลง	
2.17 แสดงความสัมพันธ์ของค่า M – MV กับ BPTV.....	23
2.18 เครื่อง Portable Skid-Resistant Tester.....	26
2.19 แสดงแผ่นดัชนี.....	28
2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PSV, AAV และ AIV.....	36
2.21 เครื่อง PSV Polishing Machine.....	37

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	39
3.1 การเรียงหินลงในตัวอย่าง.....	40
3.2 การวางลวดเหล็ก.....	40
3.3 การปิดหน้าตัวอย่าง.....	41
3.4 การแฉะร่องตัวอย่าง.....	41
3.5 ตัวอย่างเรียงในวงล้อเหล็ก.....	42
3.6 นำวงล้อตัวอย่างเข้าเครื่อง.....	43
3.7 เครื่องกำลังดำเนินการขัดตัวอย่าง.....	43
3.8 นำตัวอย่างเข้าที่จับ.....	45
3.9 การแกว่งแขนให้สัมผัสตัวอย่าง.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	47
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าPSVและจำนวนรอบในการขัดของหิน.....	51
ขนาด3/8” 80% 1/2” 20%	
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าPSVและจำนวนรอบในการขัดของหิน.....	52
ขนาด3/8” 60% 1/2” 40%	
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าPSVและจำนวนรอบในการขัดของหิน.....	53
ขนาด3/8” 40% 1/2” 60%	
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าPSVและจำนวนรอบในการขัดของหิน.....	54
ขนาด3/8” 20% 1/2” 80%	
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าPSVและจำนวนรอบในการขัด.....	55
ของหินทั้ง 4 อัตราส่วน	

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

PSV	=	Polished Stone Value
BFC	=	Brake Force Coefficient
SFC	=	Sideway Force Coefficient



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ความเสียดทานของผิวทาง (Pavement Friction) คือ แรงต้านทานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างล้อและผิวทาง หรือแรงต้านไม่ให้ล้อลื่นไถลไปบนผิวทาง ค่าความเสียดทานของผิวทางนับเป็นปัจจัยสำคัญอันหนึ่งในการประเมินสภาพความปลอดภัยของถนน โดยผิวทางที่มีความเสียดทานของผิวทางต่ำ เมื่อถนนลื่นย่อมส่งผลให้สายทางเกิดความไม่ปลอดภัย จากผลการศึกษาของศูนย์วิจัยอุบัติเหตุแห่งประเทศไทย (TARC, 2007) พบว่าสาเหตุส่วนใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดอุบัติเหตุประเภทรถชนคันเดียว (Single vehicle crash) ในลักษณะการชนแบบออกนอกเส้นทาง (Run-off road crash) มีปัจจัยมาจากการขับรถเร็วร่วมกับสภาพของถนนที่มีค่าความเสียดทานของผิวทางต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณทางโค้งซึ่งพบอุบัติเหตุบ่อย นอกจากนี้สายทางที่มีค่าความเสียดทานของผิวทางสูงจะช่วยให้ระยะการเบรกของรถสั้นลง รถสามารถชะลอความเร็วได้ดีขึ้น ช่วยลดอุบัติเหตุหรือทำให้อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงน้อยลงได้ เราจึงได้ทำการทดลองหาค่าความต้านทานการลื่นไถลของหินแต่ละขนาด เพื่อที่จะนำค่าความต้านทานการลื่นไถลของหินไว้เป็นกรณีศึกษาในการคัดเลือกหินที่ใช้ในการทำถนน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาความต้านทานการลื่นไถลมวลรวมของหิน

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการลื่นไถลและจำนวนรอบขีดของเครื่อง PSV

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ทราบว่าหินแต่ละขนาดมีแรงเสียดทานต่างกัน

1.3.2 ทราบว่าจำนวนรอบที่ขีดมีผลกระทบต่อแรงเสียดทานของหิน

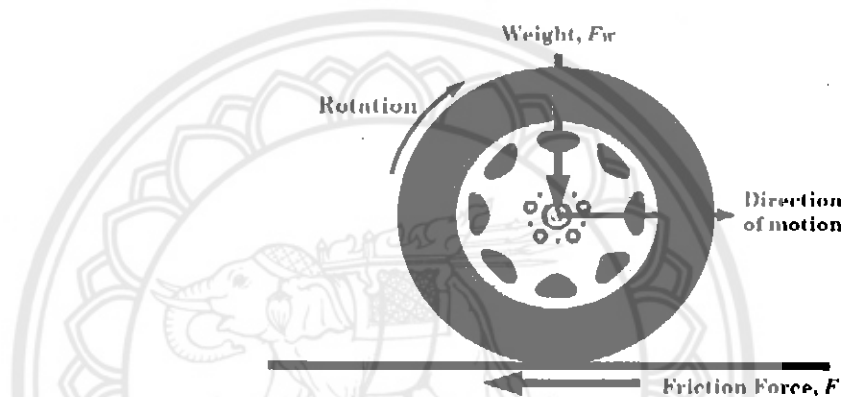
1.3.3 สามารถประเมินค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางได้ในอนาคต

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการและทฤษฎี

ความเสียดทานของผิวทาง (Pavement Friction) คือ แรงที่ต้านการเคลื่อนไหวยาระหว่างยางของรถยนต์กับผิวทาง แรงต้านนี้จะเกิดขึ้นเมื่อยางรถยนต์หมุนหรือไถลไปตามพื้นผิวของถนน ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งแรงต้านนี้จะหาได้จากสมการที่ 1 โดยแรงเสียดทานของผิวทางสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ ความเสียดทานตามยาว (Longitudinal Friction) และความเสียดทานด้านข้าง (Side Force Friction)



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงแรงที่กระทำต่อล้อรถยนต์ขณะมีการเคลื่อนที่ (NHCRP, 2009)

$$\mu = F/F_w$$

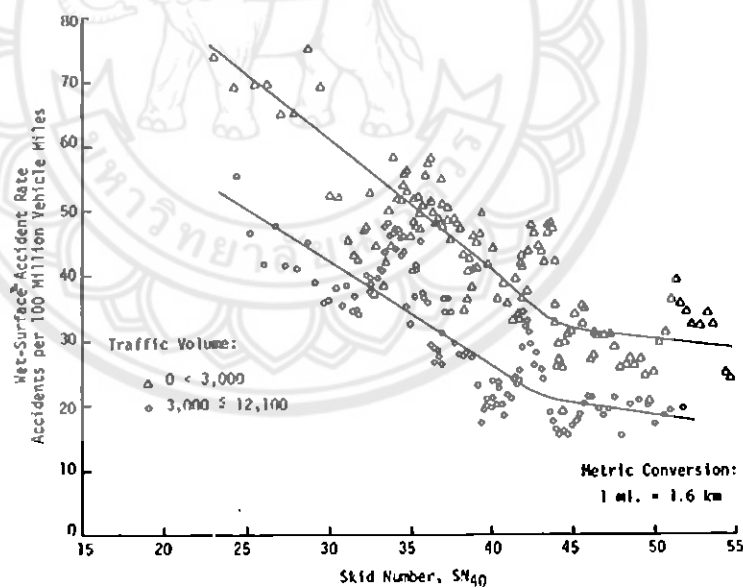
(สมการที่ 1)

โดยที่ μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

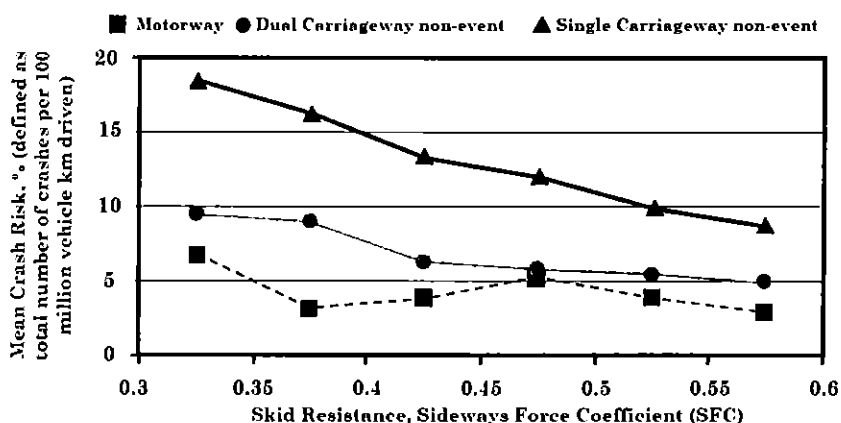
F = แรงเสียดทานในแนวตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่

F_w = แรงกดที่เกิดจากน้ำหนักรถยนต์ที่กระทำต่อล้อในแนวตั้ง

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตความเสียหายของผิวทางที่เกิดขึ้นระหว่างยางรถยนต์กับผิวทางเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่เป็นตัวควบคุมและลดจำนวนการเกิดอุบัติเหตุรถชน (Henry, 2000 และ Ivey et al, 1992) โดยพบว่าเมื่อสภาพถนนเปียก จะทำให้เกิดอุบัติเหตุรถชนกันเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันก็ทำให้ความเสียหายของผิวทางลดลงเช่นกัน (Rizenbergs et al, 1973) ดังภาพที่ 3 การศึกษาของกระทรวงคมนาคมของรัฐเท็กซัส (Texas Department of Transportation, TXDOT) ก็พบว่าการเสียชีวิตและได้รับบาดเจ็บสูงขึ้น เมื่อความเสียหายของผิวทางลดลง โดยวัดที่ความเร็ว 50 ไมล์ต่อชั่วโมง หรือ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (McCullough et al, 1966) นอกจากนี้ยังพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน (Agent et al, 1996 และ Wallman and Astrom, 2001) การศึกษาความสัมพันธ์จากผลการศึกษา Tangent Alignments ในสภาพถนนเปียกโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า SCRIM ที่ 13 เปอร์เซนต์ Slip (Viner et al., 2004) แสดงดังภาพที่ 3 ผลการวิจัยเบื้องต้นบ่งชี้ว่าค่าความเสียหายของผิวทางมีความสัมพันธ์ต่ออัตราการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน ดังนั้นกระทรวงทดสอบประเมินค่าความเสียหายของผิวทางให้มีสภาพปลอดภัยในการขับขี่จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยปัจจุบันเครื่องมือใช้วัดค่าความเสียหายแบบพกพาทั้ง 3 ประเภท มีคุณลักษณะการใช้งานดังนี้



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดอุบัติเหตุเมื่อถนนเปียกและความเสียหายของผิวทาง (Rizenbergs et al., 1973)



รูปที่ 2.3 ค่าเฉลี่ยความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุรถชนสำหรับโครงข่ายถนน ในประเทศอังกฤษ (Viner et al., 2004)

2.1.1 ความต้านทานการลื่นไถลของผิวทาง

องค์ประกอบที่ก่อให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของพื้นผิวทาง ทั้งพื้นผิวทางแบบคอนกรีตและพื้นผิวทางแบบบราดยางมีอยู่ 2 องค์ประกอบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2

แรงยึดเกาะ (Adhesion Force) ในขณะที่หน้าสัมผัสของล้อยางยานพาหนะ และ พื้นผิวทางเกิดการสัมผัสกัน ตลอดแนวสัมผัสนั้นจะเกิดแรงเสียดทานขึ้นในลักษณะของแรงเฉือนค่าของแรงเฉือนนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำพื้นผิวทาง ชนิดและลักษณะของดอกยาง พื้นสัมผัส แรงยึดเกาะนี้มีค่าสูงเมื่อผิวทางแห้ง และจะลดค่าลงเมื่อมีสิ่งสกปรกหรือของเหลวมาปิดกั้นระหว่างผิวสัมผัส

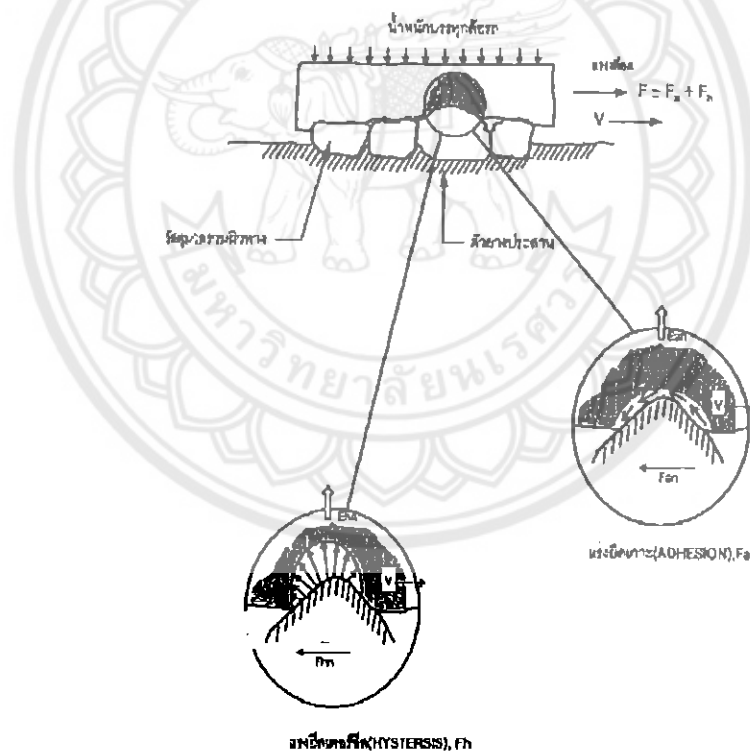
แรงฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis Force) เป็นแรงที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงาน เมื่อหน้ายางยุบตัวลงขณะที่รถแล่นไปบนผิวทาง มีค่าแปรผันตรงกับค่าความยุบตัวของยาง ไม่ขึ้นอยู่กับของเหลวที่ปิดกั้นระหว่างผิวสัมผัสของยางกับพื้นผิวทาง

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance Parameters)

การควบคุมยานพาหนะให้สามารถแล่นอยู่ในทิศทางตามที่ต้องการบนเส้นทางการจราจรได้ ต้องอาศัยปัจจัยหลายอย่าง สิ่งสำคัญอย่างยิ่ง คือ แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวทางและผิวหน้าสัมผัสยางของยานพาหนะ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยรองอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อความต้านทานการลื่นไถล ซึ่งความนำมาพิจารณาในการออกแบบควบคู่กันไปด้วย ดังนี้ คือ

2.2.1 คุณลักษณะและรูปร่างของวัสดุมวลรวม (Aggregate Characteristics and Surface Texture)

วัสดุที่มีความแข็ง มีเหลี่ยมมุม (Angular) ทนทานต่อการขัดสีของดอกยาง สามารถเจาะผ่านฟิล์มของของเหลวที่กั้นอยู่ระหว่างผิวสัมผัสหน้ายางและพื้นผิวทางได้ดีกว่า ทำให้ค่าแรงยึดเกาะของยางและพื้นผิวทางมีค่าสูงกว่าวัสดุที่มีผิวเรียบหรือผิวมน (Rounded Aggregates) เป็นผลให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลสูงตามไปด้วย



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของแรงเสียดทานระหว่างหน้ายางล้อรถและผิวทาง

(Maclean & Shergold, 1968)

Hosking (1974) ได้ทำการศึกษาวัสดุที่มีเนื้อพรุน (Porous Aggregates) พบว่าความต้านทานการลื่นไถลจะเป็นสัดส่วนกับความพรุน และมีค่าสูงกว่าวัสดุที่มีเนื้อแน่น และได้ศึกษาการนำดินมอสไซท์ที่มีลูมิน่าสูงมาทำการเผา พบว่าความพรุนของเนื้อดินภายหลังการเผาเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานการลื่นไถลดีขึ้น แต่ความสึกหรอจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย





2.2.2 ผิวมหภาค (Macro Texture) หมายถึง ผิวขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาในลักษณะ Large Scale Texture ของขนาด รูปร่าง และลักษณะผิววัสดุรวมซึ่งเป็นเครื่องบ่งบอกลักษณะ ความหยาบ หรือละเอียดของพื้นผิวทางโดยทั่วไป ผิวมหภาคที่ดีจะต้องสามารถระบายน้ำออกจาก หน้าสัมผัสยางรถได้ดี และช่วยให้ยางรถยึดตัวในขณะที่รถวิ่งบนพื้นผิวทางด้วยความเร็วสูงเพื่อทำให้เกิดแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น

2.2.3 ผิวจุลภาค (Micro Texture) หมายถึง ผิวของมวลรวมแต่ละก้อนบนพื้นผิวทางเป็นการพิจารณาลักษณะเฉพาะก้อนแบบ Small - Scale Texture ของพื้นผิวทาง ผิวจุลภาคที่ดีจะต้อง มีความแข็ง ความขรุขระ ความหยาบเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการลื่นไถลเมื่อรถแล่นด้วยความเร็วระดับหนึ่งที่ได้ออกแบบไว้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3

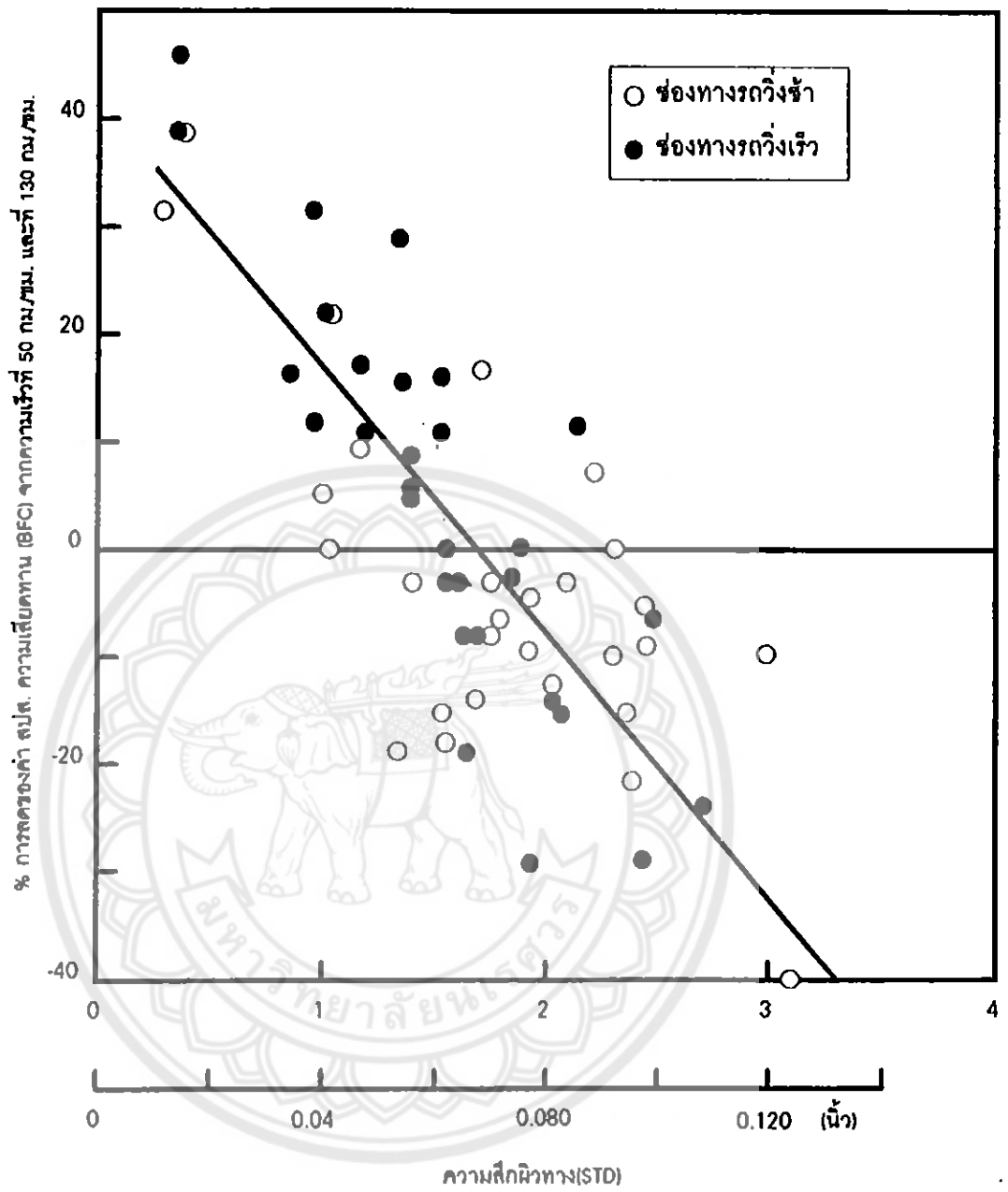
Lupton, G.N. (1968) ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ของค่าความลึกของผิวทาง และการลดลงของค่าความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทางในรูปของค่า BFC ระหว่างความเร็ว 50 กม./ชม. และ 130 กม./ชม. ตามรูปที่ 2.4 พบว่าความลึกผิวทางที่น้อยกว่า 250 μm (0.010 นิ้ว) ในถนนที่ใช้ความเร็วสูงนั้นค่า BFC จะลดลงเฉลี่ย 25 % ของค่า BFC ที่ความเร็ว 50 กม./ชม. ดังนั้นจึงอาจ กำหนดค่าความลึกผิวทางไว้ อย่างน้อยที่สุดสำหรับถนนที่ใช้ความเร็วสูงเท่ากับ 250 μm . เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ขับขี่รถยนต์

Sabey, B.E. (1966) ได้ศึกษาหาค่าความสัมพันธ์ความลึกผิวทาง และการลดลงของค่าความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทางในรูปของค่า BFC ระหว่างความเร็ว 50 กม./ชม. และ 130 กม./ชม. ของพื้นผิวทางคอนกรีต และ พื้นผิวทางลาดยาง ตามรูปที่ 2.5 ซึ่งให้ผลสรุปสนับสนุนผลการศึกษาของ Lupton

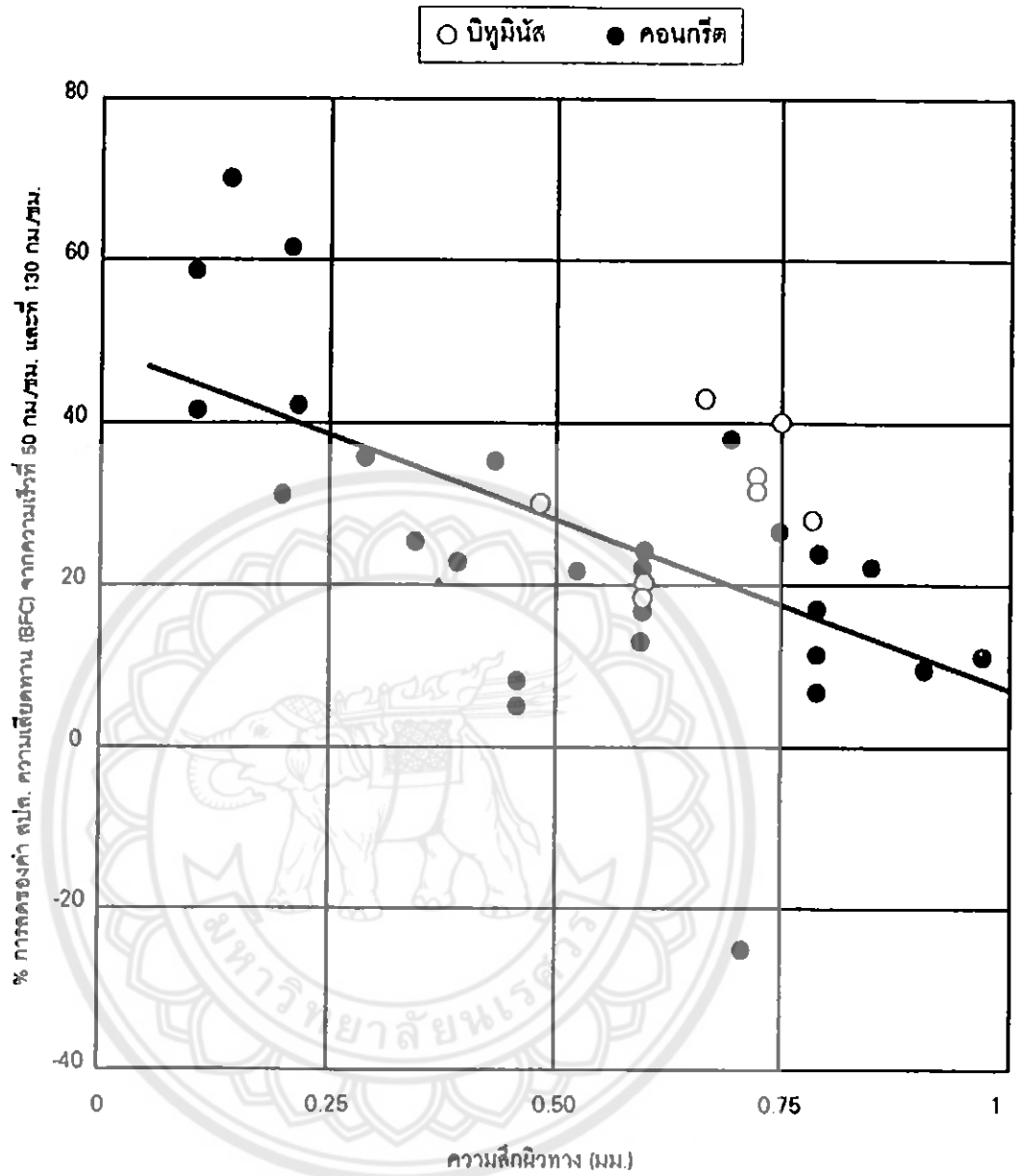
ตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทางลาดยาง คือ อัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ทำพื้นผิวทาง (Mix Proportions) คุณสมบัติของวัสดุประสาน บิทูมินัส (Bituminous Binder) สำหรับพื้นผิวทางคอนกรีตคุณสมบัติของซีเมนต์ที่ใช้งานวัสดุมวลรวมหยาบ วัสดุมวลรวมละเอียด และ อัตราส่วนผสมล้วนมีผลต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลทั้งสิ้น ตลอดจนวัสดุอื่นที่อยู่บนพื้นผิวทาง เช่น ฝุ่นละออง เม็ดดิน เม็ดกรวด หิน หวาย คราบน้ำมัน และ ของเหลวที่สะสม อยู่บนพื้นผิวทางจนเกิดเป็นแผ่นฟิล์ม (Traffic Film) โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาพเปียกจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลลดลงอย่างมาก

	ผิว	ขนาดของลักษณะผิว	
		มหภาค (ขนาดใหญ่)	จุลภาค (ขนาดเล็ก)
1		ขรุขระ	หยาบ
2		ขรุขระ	เนียน
3		เรียบ	หยาบ
4		เรียบ	เนียน

รูปที่ 2.5 ภาพแสดงความแตกต่างของลักษณะผิวทาง



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การลดลงของค่า สปส. ความเสียหาย (BFC) กับความสึกผิวทาง (STD) ของถนนในช่องทางรถวิ่งช้า และ ช่องทางรถวิ่งเร็ว (Lupton 1968)



รูปที่ 2.7 แสดงผลของความลึกผิวทางที่มีต่อการลดลงของค่า สปส. ความเสียหาย (BFC) ที่ความเร็ว 50 และ 130 กม./ชม. (Sabey 1966)

2.2.4 ความสามารถในการระบายน้ำของผิวทาง (Surface Drainage)

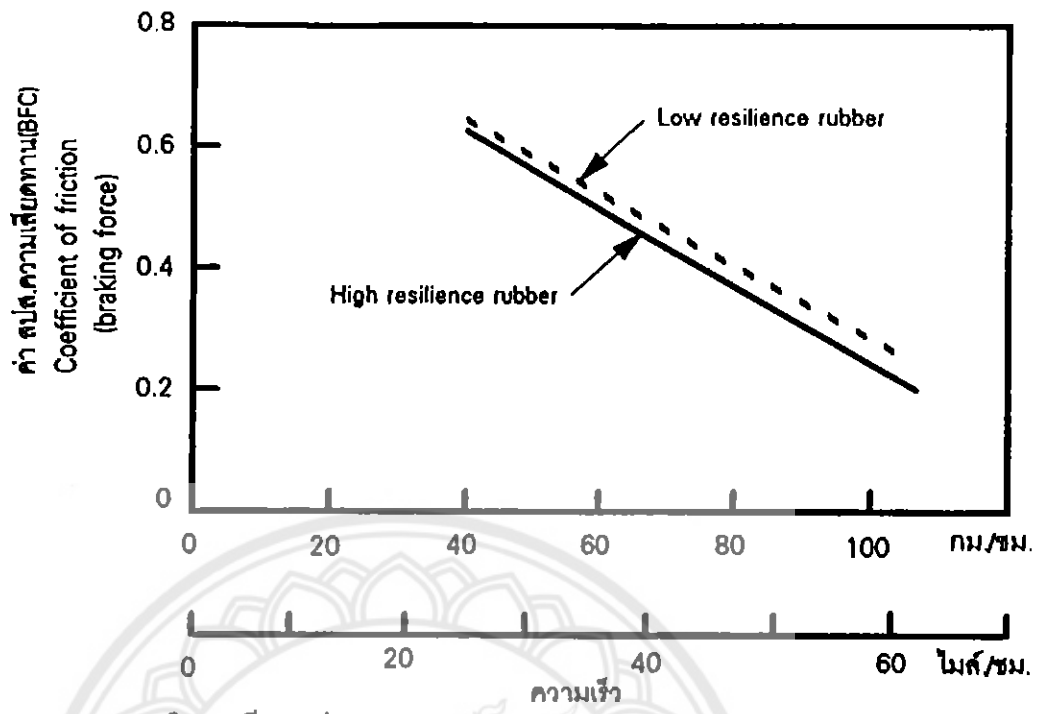
Csathy, T.I. (1968) พบว่าค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางที่เปียกจะลดลง และแปรค่าผกผันกับความหนาฟิล์มน้ำบนพื้นผิวทาง ดังนั้นมวลรวมที่ผิวมหภาคและจุลภาคที่ดี มีความพรุนสูง จะสามารถดูดซับน้ำ หรือระบายน้ำออกจากผิวสัมผัสของหน้ายางและพื้นผิวทางได้ดีและรวดเร็วกว่า ทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลมีค่าสูงขึ้น

2.2.5 คุณสมบัติของยางรถ (Rubber properties) ยางรถมีคุณสมบัติสัมพันธ์กับพื้นผิวทางแบบฮิสเตอร์ซิส ดังนั้นยางที่มีคุณสมบัติฮิสเตอร์ซิสสูงจะมีผลทำให้ค่าความฝืดของผิวทางมีค่ามากขึ้น โดยเฉพาะบนพื้นผิวทางที่หยาบซึ่งมีการยุบตัวของหน้ายางมาก จะทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลสูงขึ้นถึง 20 % ความแข็งของดอกยาง จะมีผลในกรณีผิวทางเรียบ หรือผิวทางที่มีน้ำแข็งปกคลุม โดยยางที่มีดอกยางแข็งจะทำให้มีพื้นผิวสัมผัสกับผิวทางที่มีค่าน้อย ความกตตันที่ผิวสัมผัสสูง การระบายน้ำเร็วขึ้นเป็นผลให้ความฝืดของผิวทางเพิ่มขึ้น

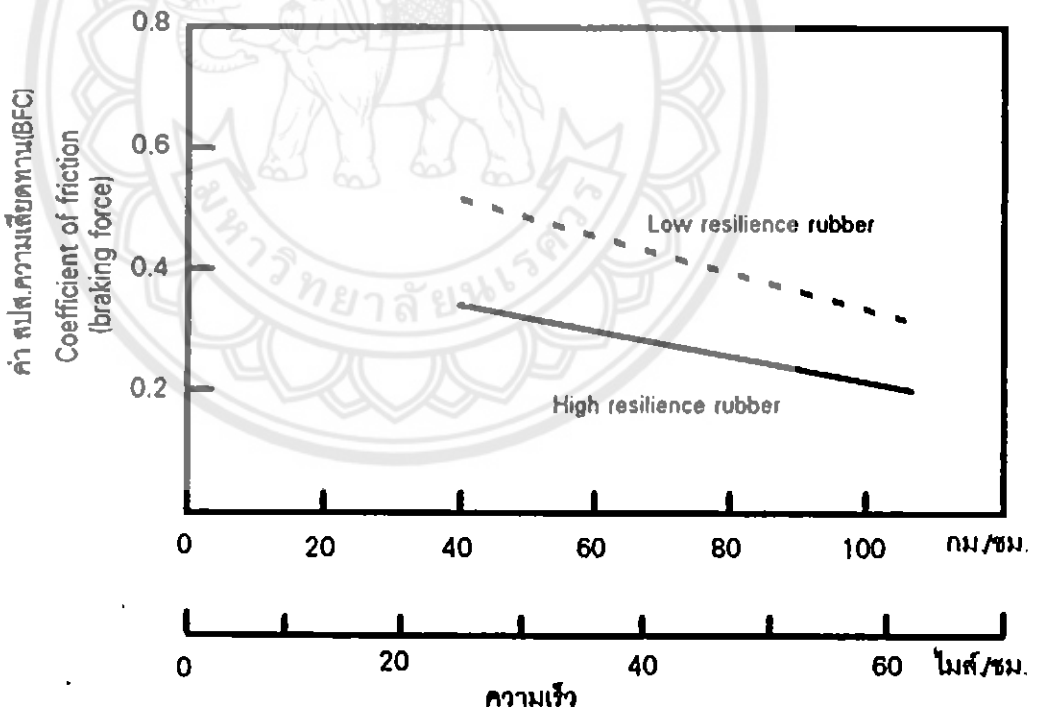
Lupton, G.N. (1968) ได้ศึกษาคุณสมบัติฮิสเตอร์ซิสของยางรถต่อค่า สปส. ความเสียดทานของผิวทาง (BFC) บนผิวทางเรียบและหยาบที่ความเร็วต่าง ๆ กัน ในแต่ละสภาพความเปียกของผิวทาง ตามรูปที่ 2.6 พบว่าบนพื้นผิวทางหยาบยางรถที่มีค่าฮิสเตอร์ซิสสูง (ค่าความยืดหยุ่นต่ำ) ค่า BFC จะมีค่าสูงกว่ายางรถที่มีค่าฮิสเตอร์ซิสต่ำ ส่วนบนผิวทางเรียบคุณสมบัติทางด้านฮิสเตอร์ซิสจะมีผลต่อค่า BFC น้อย

2.2.6 ลักษณะของดอกยาง (Tread Pattern) ลักษณะของดอกยางที่ดีจะต้องมีแนวสันตามเส้นรอบวง (Circumferential Ribs) และมีร่องตามแนวขวาง (Transverse Slots) ทำให้เกิดความต้านทานลื่นไถลเพิ่มขึ้นมากกว่ายางที่ไม่มีดอกยาง โดยเฉพาะเมื่อผิวทางเปียก เนื่องจากดอกยางจะช่วยระบายน้ำออกจากผิวสัมผัสได้เร็วกว่านั่นเอง ยางที่มีดอกยางดีทำให้เกิดการลื่นไถลน้อยลง เมื่อขับขี่ด้วยความเร็วสูงและผู้ขับขี่จะได้รับความปลอดภัยสูง

Lupton, G.N. (1968) ได้ศึกษาผลของลักษณะดอกยาง (Tread Pattern) ที่มีต่อค่า สปส. ความเสียดทานของผิวทาง (BFC) เรียบและหยาบ เมื่อความเร็วต่าง ๆ กัน ในสภาพผิวทางเปียกตามรูปที่ 2.7 พบว่าในสภาพความเร็วต่ำ ลักษณะของดอกยางจะมีผลไม่มากนักต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางขณะที่เปียกทั้งพื้นผิวทางเรียบและหยาบ แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวมหภาคและพื้นผิวจุลภาคของพื้นผิวทางมากกว่าอย่างอื่น ในกรณีความเร็วสูงบนพื้นผิวทางเรียบดอกยางรถจะมีส่วนสำคัญต่อค่า BFC มากกว่าผิวทางหยาบ ยางรถที่ไม่มีดอกยางค่า BFC จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วสูงขึ้น ส่วนยางที่มีดอกยางค่า BFC จะค่อยๆ ลดลงด้วยอัตราคงที่

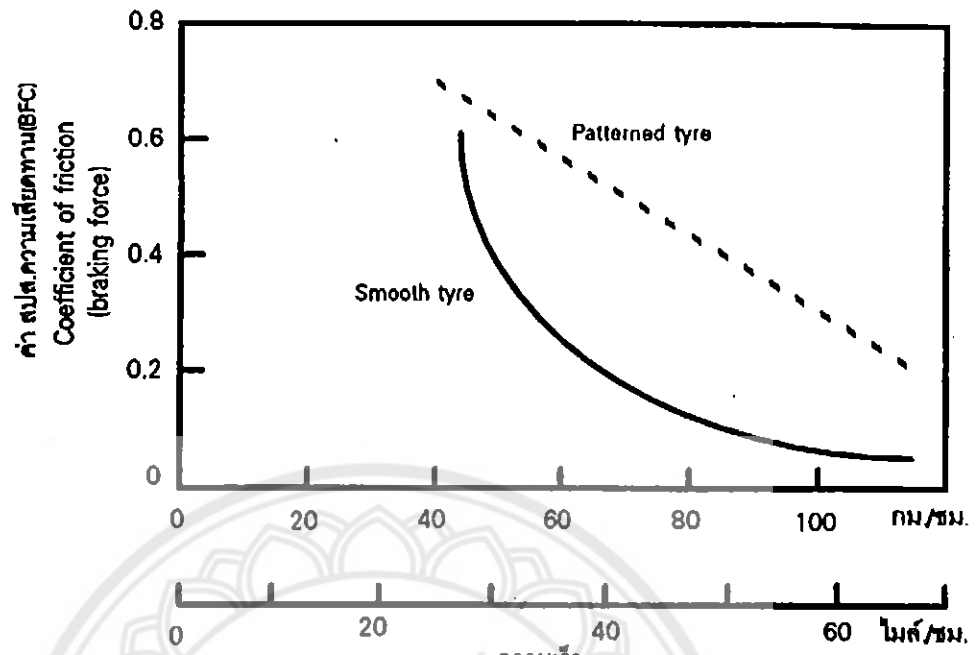


า) บนผิวทางเรียบ รูป C

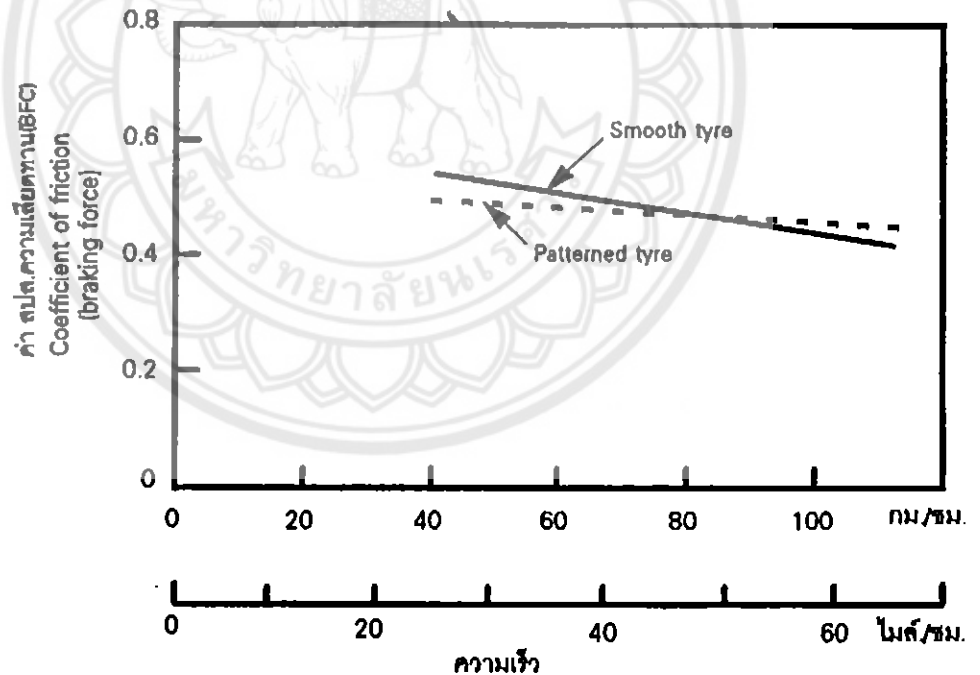


บ) บนผิวทางเรียบ รูป A

รูปที่ 2.8 แสดงผลของค่าความยืดหยุ่นของดอกยาง (Tread Resilience) บนผิวทางเรียบและหยาบ ในสภาพผิวทางเปียก (Lupton, 1968)



บ) บนผิวทางเรียบ รูป C



บ) บนผิวทางเรียบ รูป A

รูปที่ 2.9 ผลของลักษณะดอกยางบนผิวทางเรียบและหยาบในสภาพที่มีต่อค่า สปส.ความเสียดทาน (Lupton,1968)

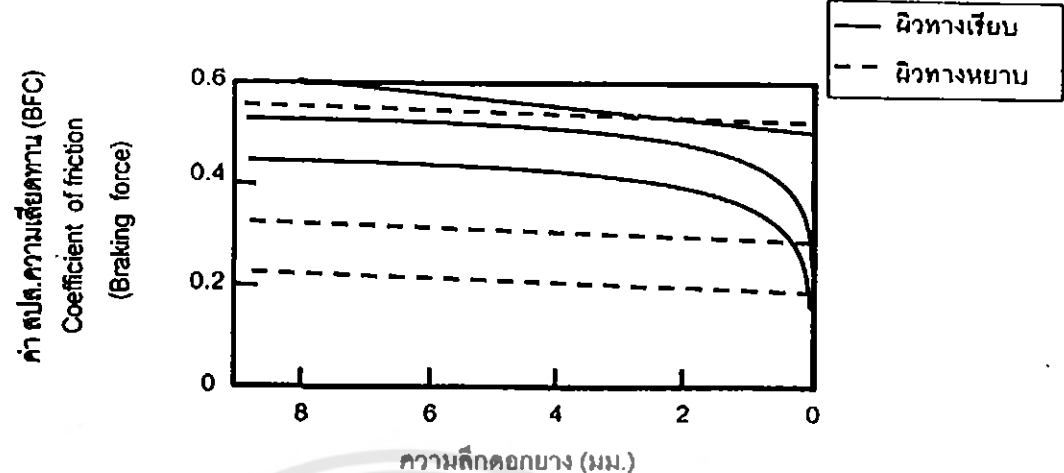
Maycock,G. (1967) ได้ทดลองเกี่ยวกับลักษณะของดอกยางรถที่มีผลต่อความต้านทานการลื่นไถล พบว่าความกว้างของร่องดอกยาง (Grooves) จะมีผลต่อการระบายออกจากผิวสัมผัสได้มากกว่าจำนวนของสัน (Ribs) ขณะผิวทางเปียก ทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลเพิ่มสูงขึ้น

Sabey,B.E. (1969) พบว่าในขณะที่ผิวทางเปียกแรงดึงดูดระหว่างผิวทางและยางรถยนต์จะลดลงเมื่อค่าความลึกของดอกยางลดลง ความลึกของดอกยางที่ลดลงนี้เนื่องจากการสึกหรอตามการใช้งานปกติแสดงในรูปที่ 2.8 แสดงค่าความสัมพันธ์ของค่า BFC และความลึกของดอกยาง (Tread Depth) ที่ความเร็วต่างๆกันคือ 50, 80 และ 130 กม./ชม. บนผิวทางหยาบ พบว่าที่ความเร็วต่างๆกัน ค่าของ BFC จะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แม้ว่าความลึกของดอกยางจะน้อยก็ตาม เนื่องจากความหยาบของผิวทางมีมากเพียงพอ ที่จะระบายน้ำออกไปจากผิวสัมผัสได้ ส่วนบนผิวทางที่เรียบมาก หรือค่าของความลึกผิวทาง มีค่าประมาณ 125 mm. ที่ค่าความเร็วต่ำ (50-80กม./ชม.) ค่า BFC จะลดลงอย่างมากเมื่อดอกยางมีความลึกน้อยกว่า 1-2 มม. บนผิวทางเรียบที่ความเร็วสูง (< 130กม./ชม.) แม้ว่าจะใช้ยางใหม่ที่มีความลึกของดอกยางมากก็ไม่ได้ทำให้ค่า BFC เพิ่มมากกว่าเมื่อใช้ยางที่มีความลึกของดอกยางน้อย แสดงว่าดอกยางไม่สามารถชดเชยความหยาบของพื้นผิวทางได้เลยที่ค่าความเร็วสูงๆ บนผิวทางเรียบ

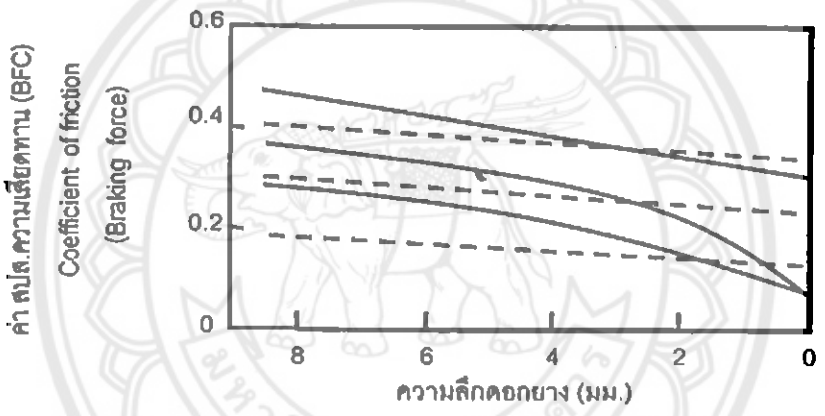
2.2.7 อุณหภูมิ (Temperature) ผลจากการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานการลื่นไถลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของพื้นผิวทางยางรถเพิ่มสูงขึ้น โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจะลดลงประมาณ 0.02 เมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นถึง 10 °F เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1000 °F จะทำให้พื้นผิวทางลาดยางเกิดการเยิ้มเหลว (Melting) ของยางและทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลลดลง

Giles et al, C.G.(1976) พบว่าในฤดูหนาวค่าความต้านทานการลื่นไถลจะสูงกว่าในฤดูร้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงผิวจุลภาคของผิวทางซึ่งเกิดจากอุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และฝุ่นที่ปกคลุมบนพื้นผิวทาง ฝุ่นละอองซึ่งมีมากในฤดูร้อนทำให้เกิดการขัดสีวัสดุใช้ทำพื้นผิวทางทำให้ผิวจุลภาคลื่นขึ้น เมื่อฝนตกฝุ่นนี้จะหายไปพื้นผิวทางจะหยาบทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลเพิ่มสูงขึ้น

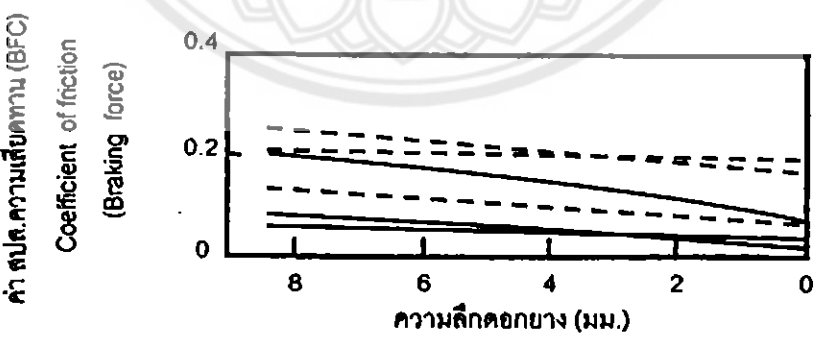
Hoskin และ Woodford (1976) สรุปผลการทดสอบเกี่ยวกับอุณหภูมิและค่าความต้านทานการลื่นไถลว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C ค่า SFC จะลดลงประมาณ 0.003 หน่วย ต่อมา Sabey,B.E. ได้ทำการศึกษาผลของค่าอุณหภูมิต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางที่วัดด้วย BPT บนพื้นผิวทางคอนกรีตและพื้นผิวทางลาดยาง ในช่วงอุณหภูมิ 7-35 °C พบว่าค่าความต้านทานการลื่นไถลจาก BPT (SRV) จะลดลง 0.26 หน่วย ต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 1°C (มีค่าประมาณ 0.003 หน่วย ของ SFC) และยังได้แสดงความสัมพันธ์ของค่า SFC ที่อุณหภูมิใดๆ (SFC) กับค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (t) ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8



a) 50 กม./ชม.(30 ไมล์/ชม.)

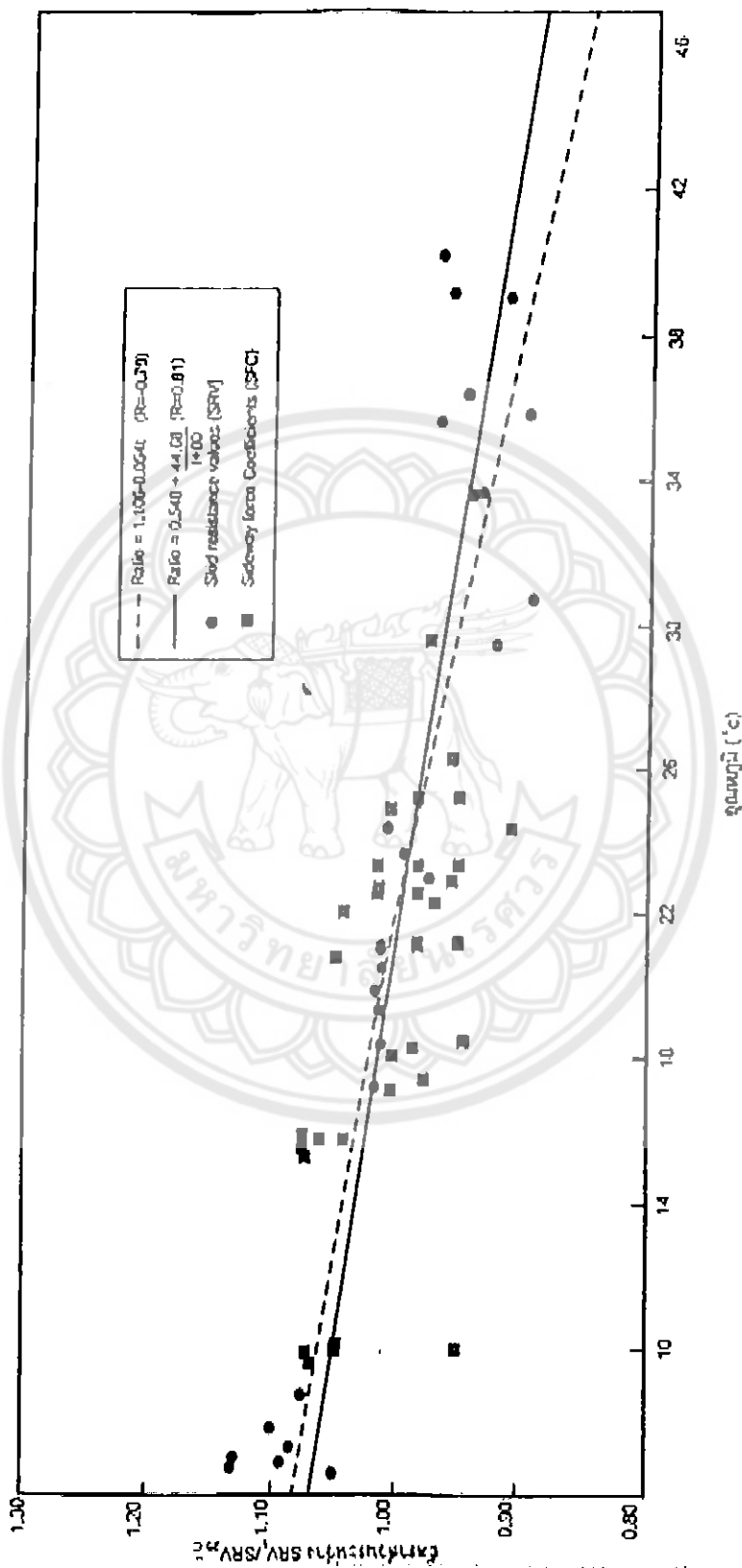


b) 80 กม./ชม. (50 ไมล์/ชม.)



c) 130 กม./ชม. (80 ไมล์/ชม.)

รูปที่ 2.10 แสดงผลของความลึกดอกยางกับค่า สปส. ความเสียดทาน (BFC) บนผิวทางเปียก (Sabey,1969)



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่า SFC ที่อุณหภูมิใดๆ (SFC) กับค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (t)

2.2.8 ความเร็วของยาน (Vehicle Speed) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าค่าความต้านทานการเคลื่อนไถจะแปรผกผันกับค่าความเร็วของยานซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อพื้นผิวทางอยู่ในสภาพเปียก

Horne (1968) ได้ศึกษาพบว่าเมื่อความเร็วของยานเพิ่มสูงขึ้นในสภาพพื้นผิวทางเปียกน้ำที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสของหน้ายางและพื้นผิวทางไม่สามารถระบายออกไปได้ทันจะเกิดแรงดันระหว่างพื้นผิวทางและหน้ายางขึ้น (Hydrodynamic Lift) และเพิ่มสูงขึ้นตามค่าความเร็วและความสามารถที่จะระบายน้ำออกจากผิวหน้ายางได้ เมื่อแรงดันนี้ถึงระดับเดียวกันกับแรงดันที่ผิวหน้ายางกระทำกับผิวทาง ทำให้อัตราการเคลื่อนไถไปบนผิวทางผู้ขับขี่ไม่สามารถควบคุมทิศทางได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Hydroplaning และเรียกค่าความเร็วที่พอดีเกิดปรากฏการณ์นี้ว่า Hydroplaning Speed พบว่าค่าความสัมพันธ์ตามปรากฏการณ์นี้เป็นดังนี้

$$V_h = K\sqrt{p}$$

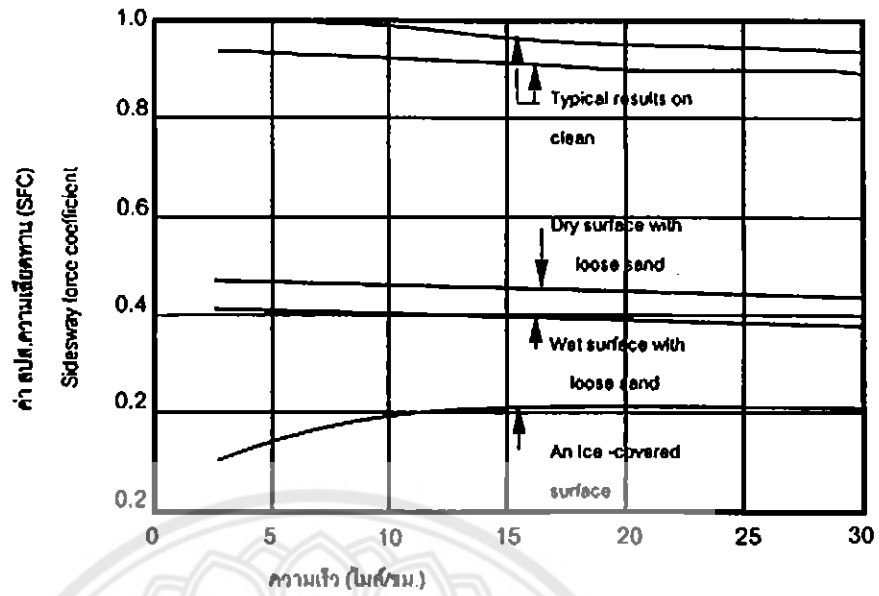
V_h = ความเร็วของยานขณะเกิด Hydroplaning หน่วยเป็น ไมล์ / ชั่วโมง

K = ค่าคงตัวที่ได้จากการสังเกตทดลองมีค่าประมาณ 10

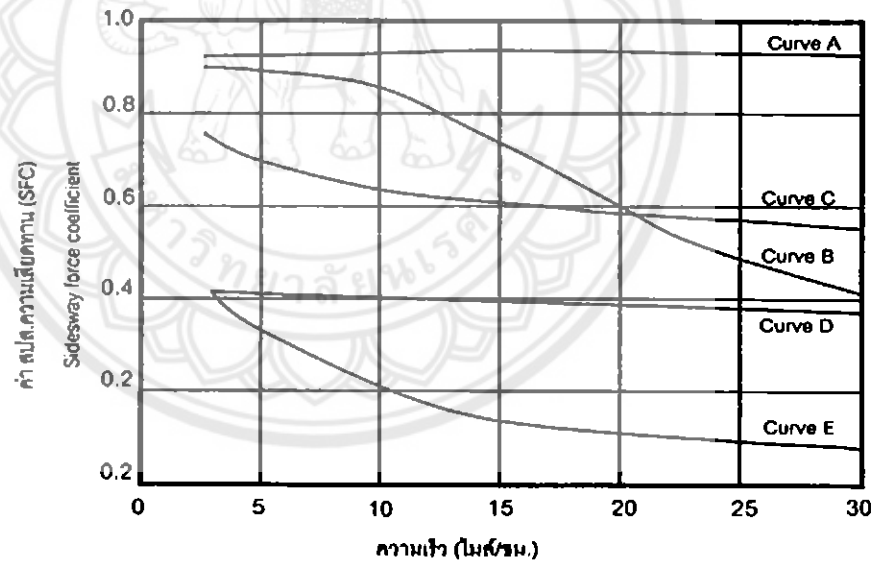
P = ความดันของยางรถ (Inflation Pressure) หน่วยเป็น ปอนด์ / ตารางนิ้ว

จากค่าความสัมพันธ์นี้ สามารถนำมาคำนวณความเร็วรถเพื่อจำกัดค่าความเร็วรถขณะผิวทางเปียกร่วมกันกับการออกแบบผิวจราจรให้หยาบระบายน้ำได้ดีเลือกใช้ยางที่มีดอกยางลึกก็จะสามารถลดอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้จากปรากฏการณ์ Hydroplaning

Lupton, G.N. (1968) ได้ศึกษาผลของความเร็วที่มีต่อค่า BFC ในสภาพพื้นผิวทางเปียกบนผิวทางต่างๆกัน 4 ประเภท พบว่าผิวทางเรียบที่มีผิวมทาคน้อยค่า BFC จะลดลงอย่างมากเมื่อความเร็วของยานมากขึ้น ส่วนผิวทางหยาบค่า BFC จะลดลงไม่มากนัก แสดงว่าผลของความเร็วต่อการต้านทานการเคลื่อนไถในเทอมของ BFC จะขึ้นอยู่กับสภาพและลักษณะของผิวทางเป็นสำคัญซึ่งได้ผลสอดคล้องกับการทดลอง Research on Road safety ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.12 แสดงผลของความเร็วยวดยานที่มีต่อ สปส. ความเสียดทาน (SFC) ในสภาพผิวทางต่างๆ (Road Research Laboratory, 1963)



รูปที่ 2.13 แสดงผลของความเร็วยวดยานที่มีต่อ สปส. ความเสียดทาน (SFC) ในสภาพผิวทางต่างกัน ขณะเปียก

กราฟ A สภาพผิวทางดีมาก

กราฟ B และ E สภาพผิวทางค่อนข้างเรียบและเรียบมาก ตามลำดับ

กราฟ C และ D สภาพผิวทางหยาบมากและค่อนข้างหยาบ ตามลำดับ

(Road Research Laboratory, 1963)

2.2.9 ปัจจัยอื่นๆ ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อความต้านทานการลื่นไถ คือ อายุการใช้งานผิวทาง ค่า PSV ของวัสดุผสมรวมที่ใช้ทำผิวทางและปริมาณการจราจรบนผิวทาง

Salt,G.F. (1977) ได้สรุปและรวบรวมผลการทดลองที่สำคัญพบว่า บนผิวทางที่มีปริมาณการจราจรเท่ากัน ค่าความต้านทานการลื่นไถของผิวทางลดลงเมื่ออายุการใช้งานของผิวทางเพิ่มขึ้น โดยอัตราการลดลงจะสูงในช่วงแรกของการใช้งานจากนั้นอัตราการลดลงจะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งค่าที่ลดลงนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า PSV ของวัสดุที่ใช้ตั้งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11

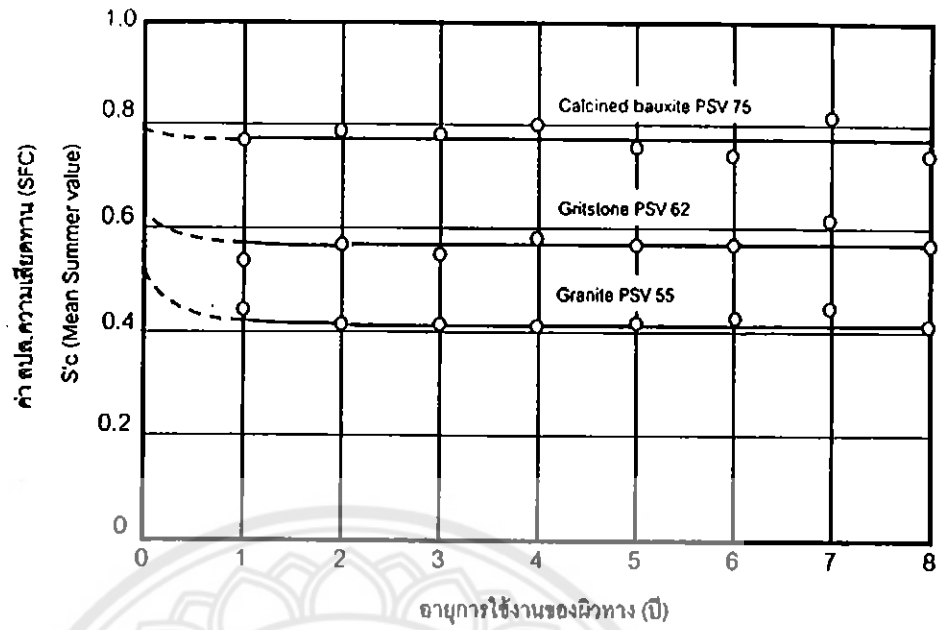
บนผิวทางที่ใช้วัสดุผสมรวมในระดับเดียวกัน คือ 58 ถึง 60 หน่วยดังรูปที่ 2.12 พบว่าผิวทางที่มีการจราจรมากจะทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลดลง แต่พบว่าค่าความต้านทานการลื่นไถจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการจราจรลดต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 2.13

2.3 การศึกษาความต้านทานการลื่นไถในอดีต

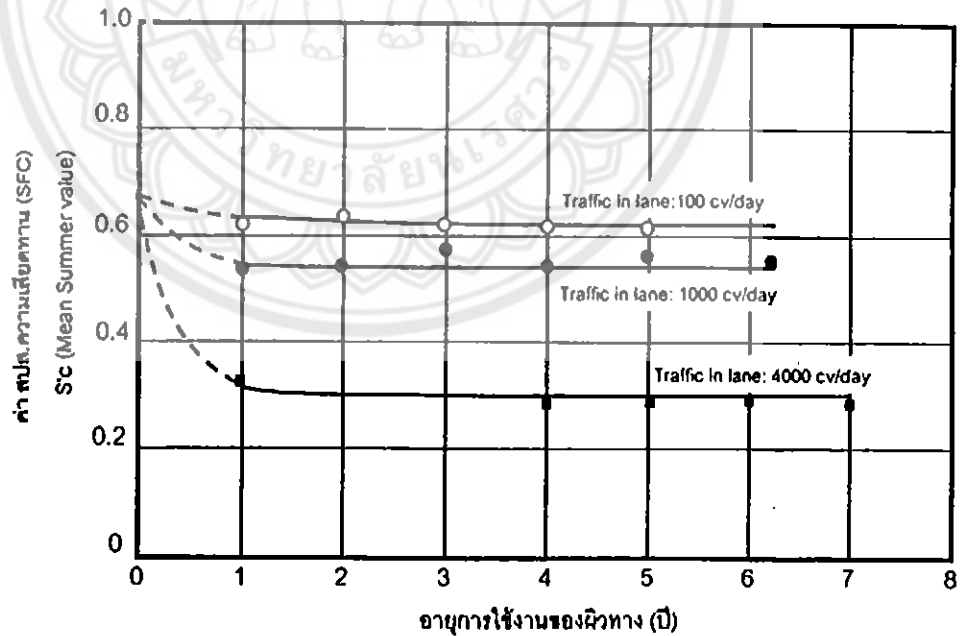
Macleam & Sheargold (1968) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า PSV ที่วัดในห้องทดลองด้วยเครื่อง British Portable Tester และค่าความต้านทานการลื่นไถ (Skid Resistance Value, SRV) ในสนาม โดยการฝั่งหินแบบต่างๆ ในปริมาณการจราจรต่างๆกัน พบว่าค่าทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันเมื่อปริมาณการจราจรหนัก 60,000 คันต่อวัน และ พบว่าสภาพหินตัวอย่างที่ถูกขัดสีมากที่สุด ในห้องทดลองจะมีสภาพเหมือนกับผิวทางจริงเมื่อเวลาผ่านไป คือ หินตัวอย่างบนเส้นทางตรงจะมีสภาพถูกขัดสีมากเมื่อเวลาผ่านไป 45 วัน แต่บนทางโค้ง ตัวอย่างที่ทำการทดสอบจะอยู่ในสภาพเดียวกันในระยะเวลาเพียง 14 วันเท่านั้น

Giles , et al (1964) ได้ทดลองหาค่าความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความต้านทานการลื่นไถที่วัดด้วยเครื่อง British Portable Tester กับเครื่องมืออื่นในสนามบนพื้นผิวทางจริง พบว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือมีความสัมพันธ์กันดีกับเครื่องมือที่ใช้ยาง มีดอกยางที่ความเร็ว 30 ไมล์ / ชั่วโมง ส่วนยางที่ไม่มีดอกยาง ค่าที่วัดได้จะสัมพันธ์กันดี ก็ต่อเมื่อวัดบนพื้นผิวทางที่หยาบ โดยค่าเฉลี่ยของ British Portable Tester จะมีค่าสูงกว่าเครื่องมืออื่นประมาณ 5 หน่วย

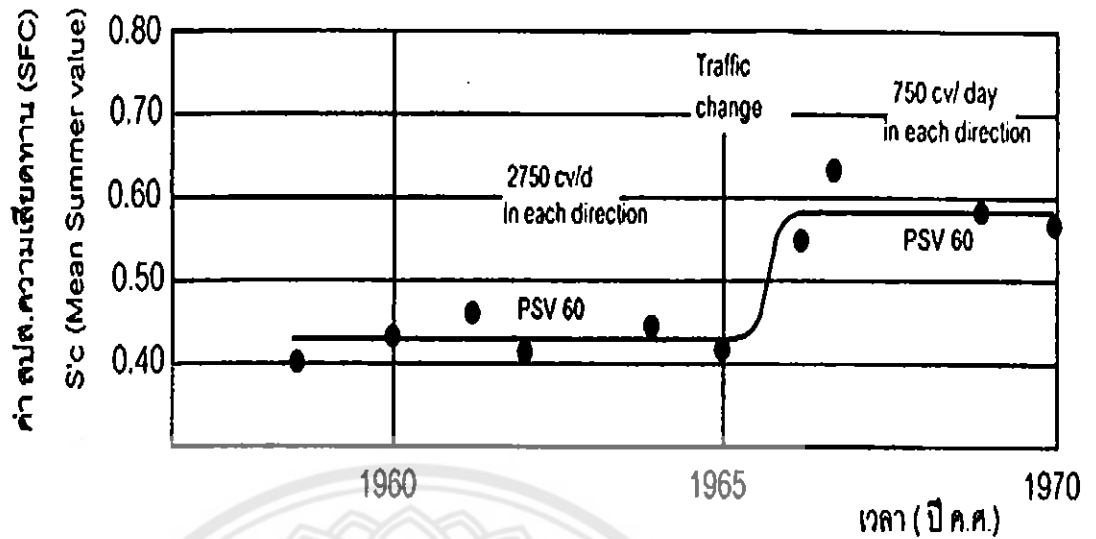
Bunnag , S.& Sukhawan (1975) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบผล และ แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการลื่นไถของพื้นผิวทางระหว่างเครื่อง British Portable Tester กับเครื่อง มูมิเตอร์ (Mu - Meter, Side - Force Friction Test Trailer) โดยได้ทำการทดสอบบนบริเวณร่องล้อของผิวทางต่างๆกัน 14 จุด ในสภาพผิวทางเปียก ความหนาของฟิล์มน้ำตลอดการทดสอบเท่ากับ 0.508 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.14 แสดงระดับค่า สปส.ความเสียดทาน (SFC) บนผิวทางชนิดต่างๆ (Surface dressing โดยใช้ Chippings ขนาด 13 mm. มีปริมาณการจราจร 2100 คัน/ช่องทาง/วัน) (Salt, 1977)



รูปที่ 2.15 แสดงระดับค่า สปส.ความเสียดทาน (SFC ในฤดูร้อน) บนผิวทางมาตรฐาน Motorway (Rolled Asphalt ด้วย Precoater Chippings มีค่า PSV ในช่อง 58- 60 Chippings ขนาด 13 mm. มีปริมาณการจราจร 2100 คัน ต่อ ช่องทาง ต่อ วัน) (Salt, 1977)



รูปที่ 2.16 แสดงการเพิ่มค่าของ สปส.ความเสียดทาน (SFC) บนผิวทาง Trunk Road A 4, COLNBROOK BY -PASS เมื่อการจราจรลดลง (Salt, 1977)

ผลการวัดค่าความต้านทานการลื่นไถลที่วัดด้วย Mu-Meter ในเทอมของ Mu-Meter Value (M-MV) ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง และค่าที่วัดด้วย British Portable Tester ในเทอมของ British Portable Tester Value (BPTV) มีความสัมพันธ์ตามสมการ $Y = 1.09X + 17.45$ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเป็น $r = 0.987$ ดังแสดงในรูปที่ 2.14

Szatkowski & Hoskig (1972) ได้ทดลองหาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการลื่นไถลที่วัดได้จากเครื่อง Side-Force Friction Tester (SFC) กับค่า PSV จากเครื่อง British Portable Tester ในห้องทดลองเมื่อทราบปริมาณการจราจรของยานพาหนะ (Q_{cv}) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$SFC_{50} = 0.204 - 0.663 \times 10^{-4} Q_{cv} + 1 \times 10^{-2} PSV$$

เมื่อกำหนดให้

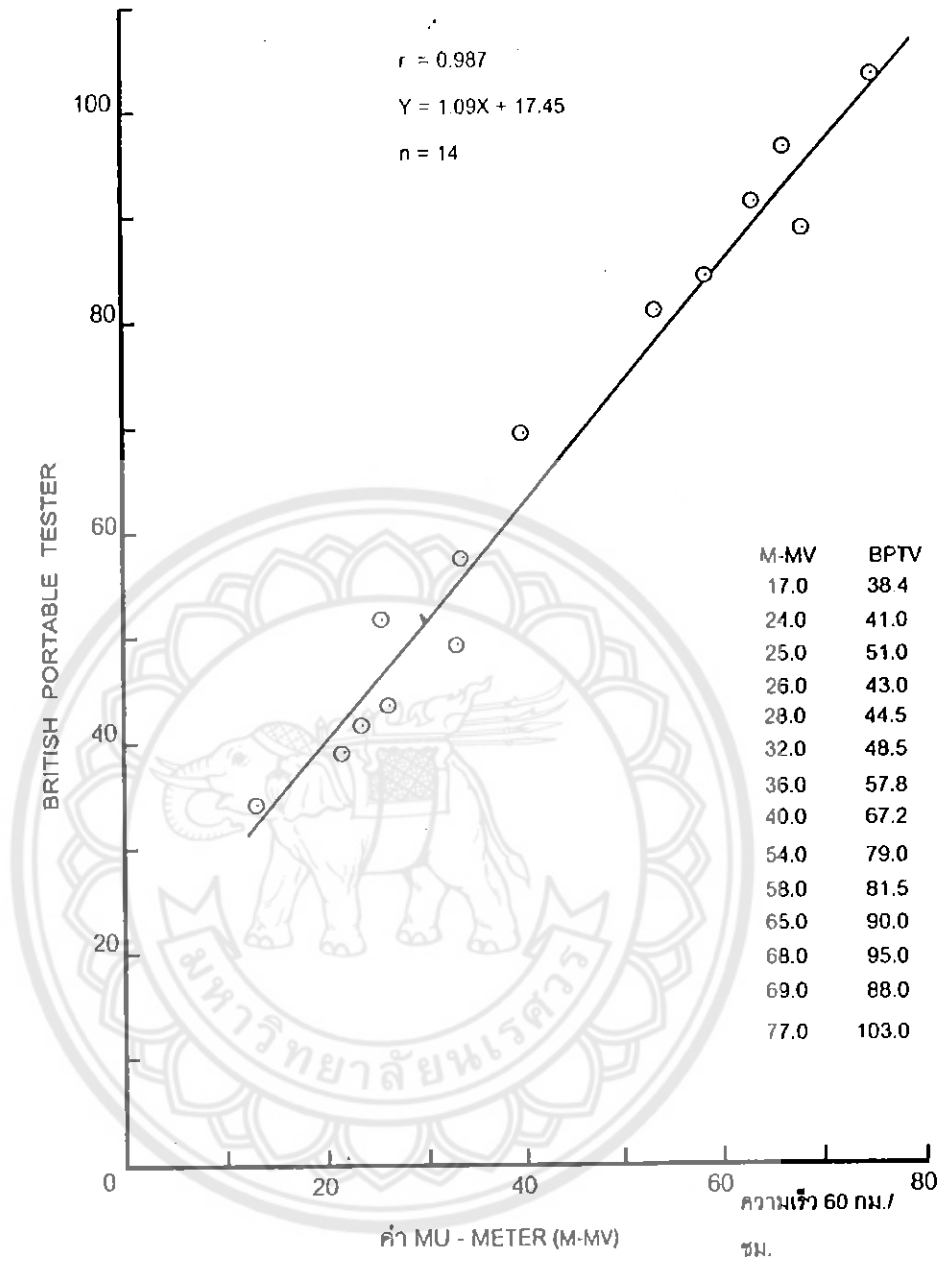
Q_{cv} = ปริมาณการจราจรของยานพาหนะ (คัน / ช่องทาง / วันในทิศทางเดียวกัน)

PSV = ค่าแรงเสียดทานของมวลรวมที่หล่อเป็นแผ่น หลังจากการขัดสีด้วยเครื่องขัดแล้ววัดค่านี้โดยใช้เครื่อง British Portable Tester โดยทำการทดสอบกับวัสดุมวลรวมชนิดเดียวกัน (ความเร็วที่ทำการหาค่าความสัมพันธ์ 50 กม./ชม.)

ความสัมพันธ์นี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกวัสดุมวลรวมที่จะนำไปใช้ในงานเป็นพื้นผิวทางประเภทต่างๆ เพื่อให้ได้ความต้านทานการลื่นไถลตามมาตรฐาน จากค่าความสัมพันธ์ข้างต้นพบว่าเมื่อค่า PSV เปลี่ยนไป 1 หน่วย จะมีผลทำให้ค่า SFC_{50} ที่ความเร็ว 50 กม./ชม. มีค่าเปลี่ยนไป 0.01 หน่วย

ผลการศึกษาค่าความต้านทานการลื่นไถลในประเทศไทย Bunnag, S. & Sukhawan (1975) ได้ผลการศึกษารูปดังนี้

1. จากการวิเคราะห์ค่าความฝืดของผิวทางชนิดต่างๆ คือ คอนกรีต แอสฟัลต์ติดคอนกรีต และแอสฟัลต์คาสต์ โดยใช้หลักการของผิวมหภาคและผิวจุลภาค พบว่าพื้นผิวทางในประเทศไทยทุกชนิดมีความต้านทานการลื่นไถลเพียงพอเมื่อผิวทางแห้ง แต่เมื่อผิวทางเปียกพื้นผิวทางประเภทแอสฟัลต์ติดคอนกรีต และแอสฟัลต์คาสต์ จะมีค่าความฝืดต่ำกว่ามาตรฐาน.
2. ค่าความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทางในสภาพแห้งและเปียก จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าความลึกของผิวทาง (Surface Texture Depth) เพิ่มขึ้น
3. ค่าความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทางจะลดลง เมื่อความเร็วของยานสูงขึ้น และอายุการใช้งานมากขึ้น ทั้งสภาพพื้นผิวทางเปียก และ สภาพพื้นผิวทางแห้ง
4. ความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทางในสภาพเปียกจะมีค่าน้อยกว่าในสภาพแห้งเปรียบเทียบเมื่ออายุการใช้งานเท่ากัน
5. พื้นผิวทางแบบแอสฟัลต์ติดคอนกรีต ค่าความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทางจะลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มน้ำ หรือความหนาของชั้นน้ำบนพื้นผิวทางมีค่ามากขึ้น
6. พื้นผิวทางแอสฟัลต์ติดคอนกรีตที่ใช้งานหนักมาประมาณ 2 ปี พบว่าค่าความลึกของพื้นผิวทาง และความต้านทานการลื่นไถลจะลดลงต่ำกว่ามาตรฐานมาก จนอาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ยานพาหนะที่วิ่งอยู่บนพื้นผิวทางได้ โดยเฉพาะในสภาพพื้นผิวทางเปียก



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ของค่า M - MV กับ BPTV (Bunnag & Sukhawan, 1975)

2.4 การวัดค่าความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทาง

พื้นผิวทางในสภาพเปียกเป็นสภาพที่วัดค่าความต้านทานการลื่นไถลได้น้อยกว่าสภาพพื้นผิวทางแห้ง ดังนั้นการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลโดยทั่วไปจึงทดสอบในสภาพพื้นผิวทางเปียก เครื่องมือที่นิยมใช้ตรวจวัดค่าความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทางโดยทั่วไปมี 3 ชนิดคือ

2.4.1 เครื่อง Braking Force Trailer โดยทั่วไปประกอบด้วยรถยนต์นั่ง หรือรถบรรทุกขนาดเล็ก ลากพ่วงเอาล้อทดสอบ (Test Wheel) จำนวนหนึ่งล้อ หรือมากกว่า เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติและถังน้ำ หลักการของวิธีนี้ คือ เมื่อทำการหยุดล้อทดสอบขณะที่รถลากกำลังวิ่งอยู่ จะเกิดแรงต้านทานที่พื้นผิวสัมผัสของหน้ายางล้อทดสอบกับพื้นผิวทาง ค่าแรงต้านทานนี้จะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติแล้วนำค่านี้ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานเรียกว่าค่า "Braking Force Coefficient (BFC) "

Casthy , T.I. (1968) พบว่าโดยปกติค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการลื่นไถลจะถูกบันทึกด้วยช่วงเวลาอันสั้น และมีความคลาดเคลื่อนเพียง 1-2 % เท่านั้น จึงคุ้มค่ากับราคาเมื่อต้องการทดสอบในสนาม เครื่องทดสอบประเภทนี้จึงเป็นที่นิยมใช้งานในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ และ ฝรั่งเศส ต่อมาได้มีการคิดค้นเครื่องมือแบบใหม่ โดยใช้หลักการเดียวกันคือ ทำรถทดสอบที่ติดตั้งเครื่องวัดค่าความหน่วง (Decelerometer) เมื่อรถทดสอบวิ่งผ่านจุดที่ต้องการวัดค่าด้วยความเร็ว 50 กม./ ชม. ให้หยุดรถทันที และปล่อยให้รถลื่นไถลไปแล้วจดบันทึกค่าอัตราหน่วงของรถทดสอบไว้ตั้งแต่ความเร็วเริ่มต้นจนถึงเวลาที่รถหยุดไถล ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการลื่นไถลของรถทดสอบจะมีค่าเท่ากับ อัตราหน่วงของรถทดสอบในเทอมของค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ผลที่ได้ให้ค่าใกล้เคียงกับวิธีการ Sideway - Force เมื่อรถทดสอบเป็นรถชนิดดอกยางเรียบ ข้อดีของวิธีนี้คือรวดเร็วและราคาต่ำแต่ค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าวิธี sideway - Force คือจะมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 2--3 %

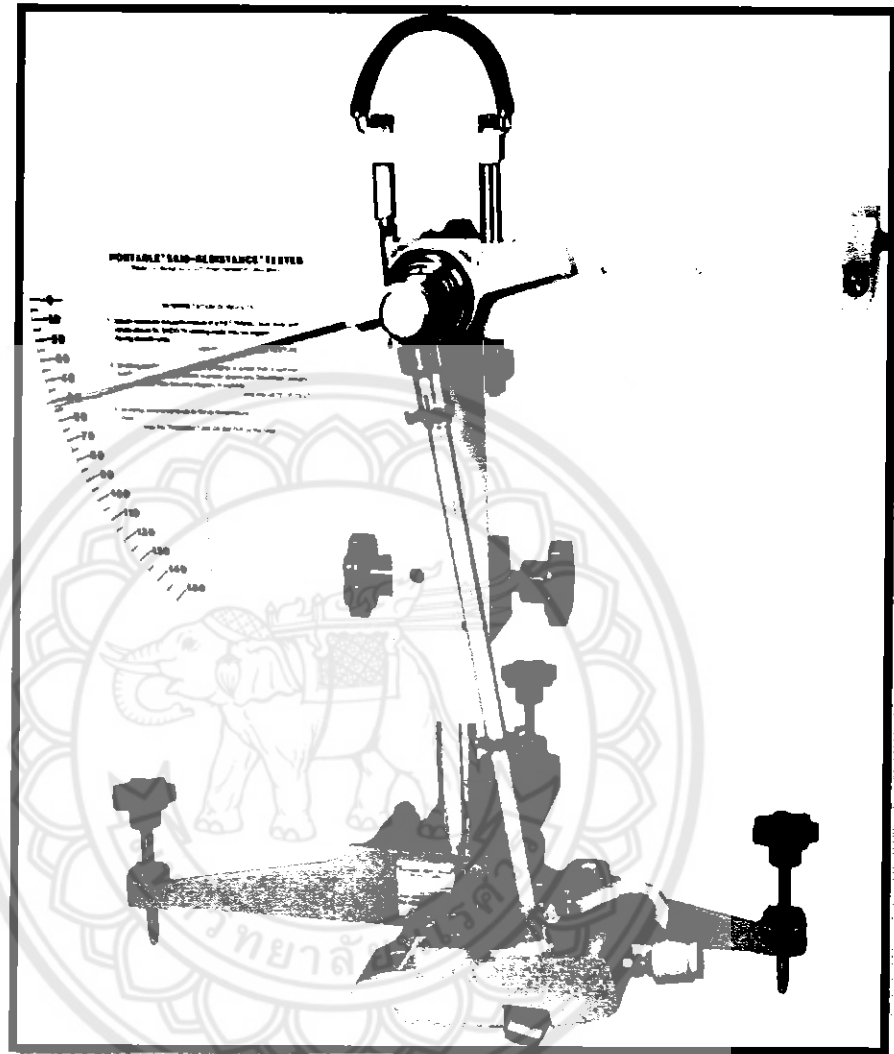
Giles (1957) ได้หาความสัมพันธ์ของค่า BFC และ SFC เมื่อวัดด้วยเครื่องมือทั้งสองแบบ พบว่าค่า BFC โดยเฉลี่ยจะน้อยกว่าค่า SFC เล็กน้อย หรือ $BFC = 0.8 SFC$

2.4.2 เครื่อง SCRIM (Sideway - Force Coefficient Routine Investigation Machine) เครื่องมือชนิดนี้ TRRL เริ่มใช้งานครั้งแรกในประเทศอังกฤษ เมื่อ ค.ศ. 1968 เรียกวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลแบบนี้ว่า Sideway-Force Coefficient (SFC) เป็นค่าอัตราส่วนของแรงทางด้านข้างของล้อทดสอบต่อน้ำหนักกระทำต่อล้อในแนวตั้ง โดยล้อทดสอบจะติดตั้งมุม 20 องศา กับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถทดสอบ ล้อทดสอบที่ใช้เป็นล้อยางที่มีดอกยางเรียบ รถทดสอบต้องสามารถบรรทุกน้ำหนักได้จำนวนมากเพื่อให้บริเวณที่จะทำการทดสอบเปียก ส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของเครื่อง SCRIM คือเครื่องบันทึกผลของแรงทางด้านข้างที่ล้อทดสอบขณะที่ล้อทดสอบแล่นผ่านไปบนผิวทางที่ต้องการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความเร็วที่ทำการทดสอบปกติ 50 กม./ชม. ตำแหน่งที่ทำการทดสอบจะถูกบันทึกออกมาเป็นช่วงด้วยกระดาษกราฟ ความคลาดเคลื่อนของวิธีการทดสอบด้วยวิธีนี้มี 1-2 % ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถวัดค่าได้ต่อเนื่องตลอดเส้นทางซึ่งไม่จำเป็นต้องมีการจัดระบบจราจรในขณะที่มีการทดสอบ

2.4.3 เครื่อง Portable Skid-resistant Tester(BPT)เครื่องมือชนิดนี้นิยมใช้งานกันแพร่หลายสำหรับการหาค่าความเสียดทานเฉพาะจุด (Spot Check) โดยวัดค่าความฝืดระหว่างยางที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายของแขนแกว่ง (Pendulum Arm) กับพื้นผิวทางในสภาพพื้นผิวทางเปียกในรูปของ Skidding Resistance Value (SRV)

ข้อดี ของเครื่องมือแบบนี้คือ สามารถทดสอบได้รวดเร็วทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ ค่าที่ได้สามารถอ่านได้โดยตรง สามารถทดลองได้แม้ในพื้นที่ลาดเอียง

ข้อเสีย คือเกิดความผิดพลาดได้ง่าย โดยเฉพาะกรณีพื้นผิวทางขรุขระ และมีขีดจำกัดในการใช้งานมากกว่าเครื่องมือแบบอื่น รูปร่างของเครื่องมือทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.15



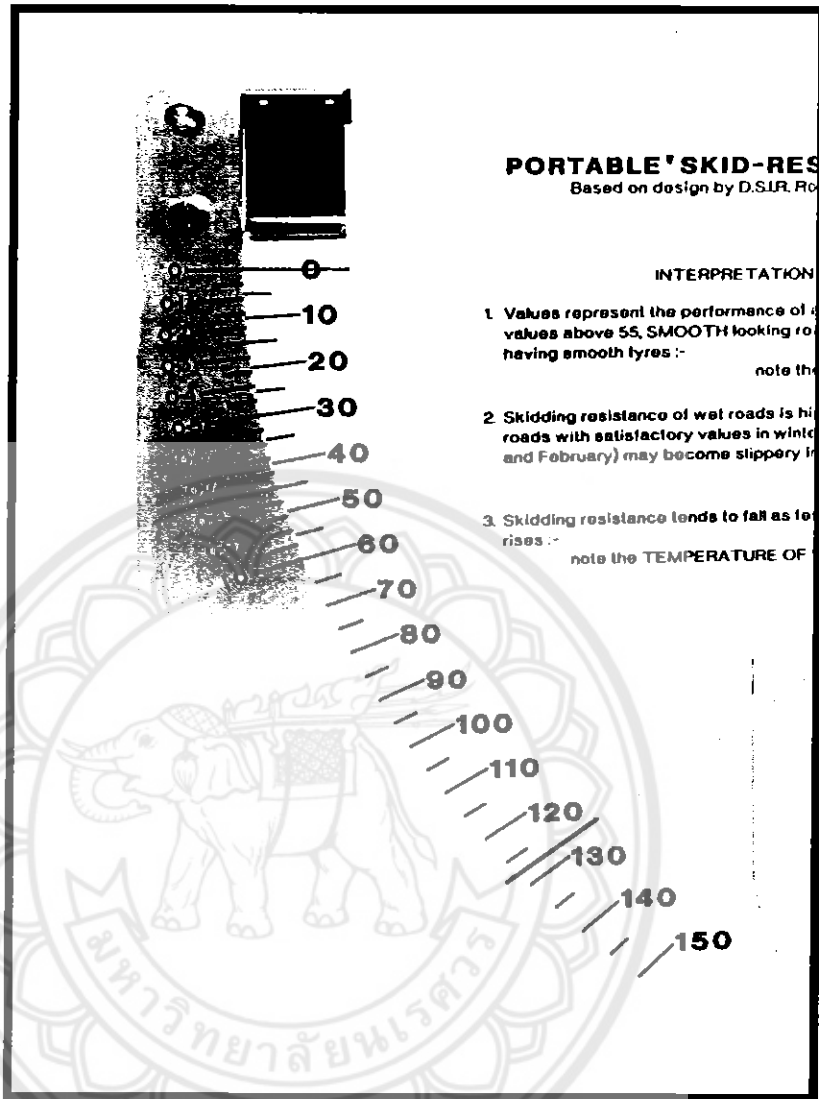
รูปที่ 2.18 เครื่อง Portable Skid-Resistant Tester

ส่วนประกอบของเครื่อง BPT ตัวเครื่องประกอบด้วยฐานรองรับรูปตัว T ปลายแต่ละด้านของฐานมีสกรูปรับให้สูงต่ำได้ โดยใช้ระดับน้ำซึ่งติดอยู่ที่โคนขาของเครื่องเป็นตัวตรวจสอบระดับของเครื่อง เพื่อให้เครื่องตั้งอยู่ในแนวตั้งขณะทำการทดลอง แกนในแนวตั้งเป็นแกนกลม มีรางเลื่อนให้แขนแกว่ง และแผ่นดัชนีเลื่อนขึ้นลงได้ในแนวตั้ง แขนแกว่งประกอบด้วยก้านอลูมิเนียมและลูกตุ้มที่ปลายแขน ภายในลูกตุ้มเป็นแผ่นยางติดกับก้านสปริงมีค้ำยกก้านสปริงเพื่อให้แผ่นยางยกขึ้น เหนือพื้นผิวทางได้เมื่อแกว่งกลับ แขนแกว่งถูกยึดติดด้วยไกปล่อยที่สามารถจับ - ปล่อยแขนแกว่งได้ เมื่อกดไกแขนแกว่ง จะตกลงจากตำแหน่งที่ถูกยึดไว้แบบอิสระและผิวหน้าแผ่นยางจะปาดสัมผัสไปบนพื้นผิวทางที่ต้องการทดสอบ ขณะเดียวกันแขนแกว่งจะพาเอาเข็มชี้ไปที่ขีดแบ่งบนดัชนีอลูมิเนียม การเลื่อนขึ้น - ลง ของแขนแกว่งผ่านแกนในแนวตั้งเพื่อให้แผ่นยางทดสอบสัมผัสผิวทางเป็นระยะทาง 7.60 ± 0.10 ซม. ความยาวของแขนแกว่งจากจุดหมุนของแขนแกว่งถึงแผ่นยางยาว 50.00 ซม. น้ำหนักแขนแกว่งรวมลูกตุ้มและแผ่นยางหลัก 1.50 ± 0.03 กก. จุดศูนย์ถ่วงอยู่ห่างจากจุดหมุน 40.50 ± 0.50 ซม. ยางมีลักษณะสี่ด้านรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 3.10 ซม. ยาว 7.60 ซม.หนา 0.06 ซม. ยึดติดกับอลูมิเนียมมีรูเสียบติดกับก้านสปริง น้ำหนักยางรวมแผ่นโลหะหนัก 22.0 ± 5.00 กรัม แผ่นยางวางท่ามุม 20 องศา กับผิวพื้นผิวทางที่ทำการทดสอบ เมื่อแขนแกว่งอยู่ที่ตำแหน่งต่ำที่สุดแผ่นยางที่อายุการใช้งานอย่างน้อย 6 เดือน และมีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของยาง

คุณสมบัติของยาง	อุณหภูมิ (°C)				
	0	10	20	30	40
ความยืดหยุ่น (Resilience)%	42-47	55-62	61-68	64-71	66-73
ความแข็ง (Hardness)	55 ± BS.DEGREE				

แผ่นดัชนีเป็นแผ่นดัชนีเคลือบรูปสี่เหลี่ยมกลม มีขีดแบ่งช่วงที่จุดบนสุดเป็น 0 และที่จุดล่างสุดเป็น 150 ดังรูปที่ 2.19 หลักการออกแบบเครื่องมือนี้ คือ ใช้เครื่องมือจำลองสภาพล้อรถที่วิ่งไปบนพื้นผิวทางโดยแผ่นยางที่มีพื้นที่สัมผัสเท่ากับ $3 \times 1/20$ ตารางนิ้ว มีความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งเปรียบเทียบเป็นค่าความเร็วที่ 48 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ค่าความต้านทานการลื่นไถลที่อ่านได้จากเครื่อง (Skid Resistance Value, SRV) ที่อ่านได้จากเครื่อง BPT จะให้ค่า 100 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน (Coefficient of Friction, C_f)



รูปที่ 2.19 แสดงแผ่นดัชนี

2.5 มาตรฐานกำหนดความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทาง (Standard of Skid Resistance)

โดยทั่วไปมาตรฐานที่กำหนดขึ้นจะเป็นค่าขั้นต่ำ เพื่อเป็นขีดจำกัดให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ขับขี่ยานเป็นประการสำคัญ นอกจากนี้ยังใช้เป็นประโยชน์ในการพิจารณาประเมินระยะเวลาเพื่อซ่อมบำรุงพื้นผิวจราจรได้ด้วย

Giles (1957) ได้เสนอแนะระดับของค่า SFC ที่ความเร็ว 50 กิโลเมตร / ชั่วโมงสำหรับประเภทและลักษณะถนนต่าง ๆ รวม 4 ประเภท ในสภาพพื้นผิวทางเปียกดังแสดงในตารางที่ 1 ค่าที่ได้รับการเสนอแนะนี้ใกล้เคียงกับที่ใช้งานของหน่วยซ่อมบำรุงทางหลวงของประเทศอังกฤษ

Salt, GF, & Szatkowski, W.S. (1973) ได้เสนอแนะว่าสำหรับถนนที่ใช้สำหรับยานที่มีความเร็วสูงเกินกว่า 95 กิโลเมตร/ชั่วโมง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า SRV มากที่สุดจากค่าความเร็วสูงไปต่ำไม่ควรเกิน 20% เพื่อที่จะรักษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานให้มากที่สุดที่จะไม่ทำให้เกิดอันตราย จากตารางที่ 2 จะเห็นว่า ค่าความลึกของพื้นผิวจราจรที่น้อยที่สุดสำหรับผิวทางลาดยาง คือ 1.00 มม. ผิวทางคอนกรีตเท่ากับ 0.50 มม. เมื่อค่าความลึกผิวทางน้อยกว่านี้ควรทำการซ่อมบำรุงพื้นผิวทางใหม่

Bunnag, et al (1975) ได้เสนอแนะค่าความต้านทานการลื่นไถลในสภาพพื้นผิวทางเปียกของถนนประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 ระดับของค่า SFC ที่ความเร็ว 50 กิโลเมตร / ชั่วโมง (SFC_{50}) สำหรับประเภทและลักษณะของถนนต่าง ๆ รวม 4 ประเภท (Giles, 1957)

ประเภท	ลักษณะของถนน	ในสภาพผิวทางเปียก	
		ค่า SFC_{50}	ค่า BPTV ⁽¹⁴⁾
A	ถนนตามจุดอันตราย(Most Difficult Sites) เช่น - วงเวียน - ถนนโค้งที่มีรัศมีความโค้งน้อยกว่า 500 ฟุต - ทางลาดชันมากกว่า 1 : 2 และระยะความลาดมากกว่า 300 ฟุต - บริเวณแยกใกล้ไฟสัญญาณ	มากกว่า 0.60	มากกว่า 65
B	ถนนสาธารณะโดยทั่วไปที่ไม่ได้จัดอยู่ในประเภท A และ C (General Requirements)	มากกว่า 0.50	มากกว่า 55
C	ถนนสาธารณะในทางตรงที่มีความลาดชันน้อย รัศมีความโค้งไม่มากนัก และมีบริเวณแยกน้อย (Easy Sites)	มากกว่า 0.40	มากกว่า 55
D	ถนนสาธารณะโดยทั่วไปที่มี สปส. ความเสียหายต่ำกว่า 0.40 (Proved Sites)		ถ้าต่ำกว่า 45 จะเกิดการลื่นไถล

ตารางที่ 2.3 ผลของความลึกของผิวมหภาคที่มีต่อค่าความต้านทานการสิ้นไกล (SRV) เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น (Salt & Szatkowski, 1973)

ค่า SRV ที่ลดลงเมื่อความเร็วเปลี่ยนจาก 50-130กม./ชม. (%)	ความลึกผิวทาง (มม.)	
	ผิวทางลาด ยาง	ผิวทาง คอนกรีต
0	2.00	0.80
10	1.50	0.70
20	1.00	0.50
30	0.50	0.40

ตารางที่ 2.4 ค่าความต้านทานการสิ้นไกลขั้นต่ำของ BPT-Number และ Mu-Meter Number ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในลักษณะถนนประเภทต่าง ๆ ในกรณีผิวทางเปียก (Wet Condition) (Bunnag & Sukhawan, 1975)

ลักษณะของถนน	ค่า BPN	Mu-Meter Number ที่ 60 กม. ต่อ ชม.
ตามจุดอันตราย เช่น วงเวียน โค้ง ทางชันจุดใกล้ สัญญาณไฟจราจร (ตามแยก) และ บริเวณที่เกิด อุบัติเหตุบ่อย ๆ	50	30
ทางหลวงชั้น 1, ชั้น 2 และถนนแยก (Feeder Roads) ที่มีปริมาณการจราจรเกิน 1,500 คัน	45	25

2.6 ประเภทการทดสอบวัสดุขั้นสูง

ประเภทการทดสอบวัสดุขั้นสูงเพื่อประเมินหาคุณสมบัติที่เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมและคุณภาพสามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

2.6.1 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านความคงทน (Durability tests) ข้อกำหนดการควบคุมคุณภาพวัสดุจะมีการกำหนดคุณสมบัติทางด้านความคงทนของวัสดุไว้เพื่อให้แน่ใจได้ว่าวัสดุมวลรวมนั้นจะไม่เกิดการแตกสลายเปลี่ยนแปลงสภาพไปในขณะก่อสร้างหรือตลอดช่วงอายุการใช้งาน ความคงทนของวัสดุหินเป็นคุณสมบัติเฉพาะของหินแต่ละชนิด การทดสอบคุณสมบัติทางด้านความคงทนเพื่อการควบคุมคุณภาพวัสดุมีความสำคัญจำเป็นอย่างยิ่ง จะเห็นได้ว่าการทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านอื่นๆจะไม่มีค่าจำเป็นหรือมีประโยชน์แต่อย่างใดเลยหากวัสดุที่เรานำมาใช้ไม่มีความคงทน การทดสอบคุณสมบัติทางด้านความคงทนนี้ประกอบไปด้วย

Los Angeles abrasion value (LAA) วิธีการทดลองประเภทการทดสอบทางกลสมบัติ (Mechanical Tests) เพื่อหาค่าความสึกหรอของวัสดุมวลรวม การทดลองนำตัวอย่างทดลองและลูกเหล็กทรงกลมมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 46.8 มม. มีมวล 390-445 กรัม ใส่ลงในเครื่อง Los Angeles ซึ่งมีลักษณะเป็นโลหะรูปทรงกระบอกหมุนในแกนราบด้วยความเร็ว 30-35 รอบต่อนาที โดยจะหมุนให้ได้ 500 หรือ 1000 รอบ ขึ้นอยู่กับขนาดวัสดุ นำตัวอย่างมาล้างบนตะแกรงเบอร์ 12 ปริมาณร้อยละของส่วนละเอียดที่เล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 12 เมื่อเทียบกับมวลเริ่มต้นเป็น ค่า Abrasion value โดยทั่วไปแล้ววัสดุมวลรวมที่ใช้ทำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ควรมีค่าความสึกหรอนั้นน้อยกว่า 30% ค่าขอบเขตที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาตามประเภทชนิดหินและปริมาณการจราจรได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าขอบเขตมาตรฐาน Los Angeles abrasion value สำหรับวัสดุหินผิวทาง เมื่อ
จำแนกตามประเภทชนิดหินและปริมาณการจราจร (NAASRA,1982)

ROCK TYPE	LOS ANGELES VALUE (MAXIMUM)		
	TRAFFIC VOLUME (vehicles per lane per day)		
	Less than 200	300-10 000	More than 10 000
Hornfls	25	20	15
Basalt, Dolerite	30	25	20
Microdiorite, Andesite, Microsyenite	30	25	20
Microgranite, Rhyolite	30	25	20
Breccia	30	25	20
Slate	35	30	25
Quartzite	35	30	25
Limestone	35	30	25
River gravel	35	30	25
Granite	45	40	35
Quartz	45	40	35
Slag	30	25	20

Aggregate crushing value (ACV) วิธีการทดสอบประเภทการทดสอบทางกลสมบัติ ตาม
มาตรฐาน BS 812 : Part 110 : 1990 เพื่อหาปริมาณการแตกหักของวัสดุมวลรวมเมื่อถูกแรงกด
ตัวอย่างทดสอบมีขนาดผ่านตะแกรง 12.25 มม. และค้างตะแกรงขนาด 9.52 มม. ประมาณ 2 กก. ที่
บรรจุในกระบอกโลหะมาทำการทดสอบด้วยแรงกดอย่างต่อเนื่องจนถึง 40.64 ตัน ในเวลา 10 นาที
ปริมาณร้อยละของวัสดุมวลรวมที่แตกหักและมีขนาดเล็กกว่า 2.40 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับมวลวัสดุ
เริ่มต้นเป็นค่า ACV. โดยปกติแล้วค่า ACV. ของหินจะมีค่ามากกว่าค่า AIV.

Aggregate impact value (AIV) วิธีการทดสอบประเภทการทดสอบทางกลสมบัติ ตามมาตรฐาน BS 812 : Part 112 : 1990 เพื่อหาปริมาณการแตกหักของวัสดุมวลรวมเมื่อถูกแรงตก กระแทก ตัวอย่างทดสอบมีขนาดผ่านตะแกรง 12.25 มม. และค้ำตะแกรงขนาด 9.52 มม. บรรจุใน ถ้วยโลหะที่ติดตั้งอยู่ใต้ตุ้มโลหะมาตรฐานมวล 13.5 – 14.1 กก. ซึ่งถูกปล่อยให้ตกกระแทกวัสดุมวล รวมในแนวตั้ง เป็นระยะทาง 380 + 6.5 มม. จำนวน 15 ครั้ง ปริมาณร้อยละของวัสดุมวลรวมที่ แตกหักและมีขนาดเล็กกว่า 2.40 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับมวลวัสดุเริ่มต้น เป็นค่า AIV.

ค่า AIV. เป็นการตรวจวัดประเมินหาค่าความต้านทานการแตกหักลงเป็นเม็ดขนาดเล็กของ วัสดุมวลรวมที่จะเกิดขึ้นทั้งในขณะก่อสร้างและเมื่อรับน้ำหนักจากยานพาหนะตลอดช่วงอายุการใช้ งาน

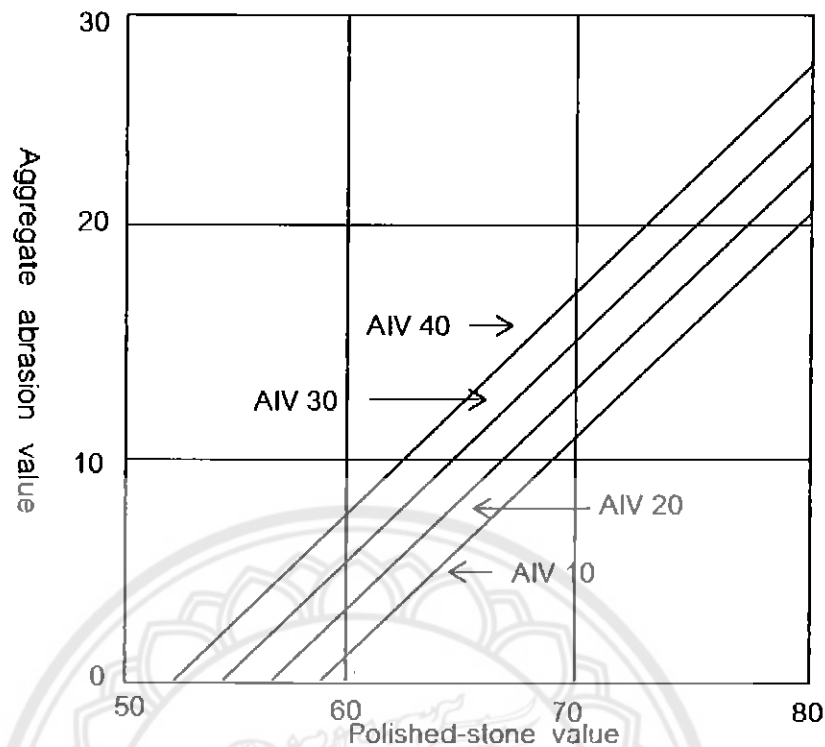
ธรณีวิทยาแร่ประกอบหิน ลักษณะเนื้อหิน (Texture) และขนาดของวัสดุมวลรวมจะเป็น ปัจจัยควบคุมค่า ACV. และ AIV. แต่ปัจจัยที่สำคัญกว่าคือค่าดัชนีความแบน (Flakness Index) โดย ค่า ACV. และ AIV.จะมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าดัชนีความแบนมากขึ้น ข้อบกพร่องหรือจุดอ่อนของวิธีการ ทดลอง ACV. และ AIV. คือการกำหนดตรวจวัดการแตกหักของวัสดุเฉพาะที่มีขนาดเล็กกว่า 2.40 มม.ซึ่งในความเป็นจริงแล้วยังมีวัสดุที่เกิดการแตกหักและมีขนาดใหญ่กว่านี้ได้ การรายงานค่า จึงเป็น การรายงานค่าของการแตกหักที่ต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในการแก้ข้อบกพร่องนี้ จึงต้องมีการ รายงานค่า Aggregate impact value residue ประกอบด้วย

Aggregate impact value residue (AIVR) คือร้อยละของขนาดตัวอย่างทดสอบที่ยังคงมี ขนาดเท่าขนาดเดิมหรือส่วนที่ค้ำตะแกรงขนาด 9.5 มม. ตัวอย่างเช่น มวลรวมหินบะซอลต์ที่มี คุณภาพไม่ดี มีค่า AIV. 16% ซึ่งบ่งบอกว่าหินนี้มีการแตกหักในปริมาณที่ไม่มาก แต่เมื่อพิจารณาค่า AIVR. พบว่ามีค่า 14% ซึ่งแสดงว่าหินบะซอลต์นี้มีการแตกหักเกิดขึ้นในปริมาณที่มาก ค่า ACV. และ AIV. ของหินชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

Ten percent fines value (TFV) วิธีการทดสอบประเภทการทดสอบทางกลสมบัติ ตาม มาตรฐาน BS 812 : Part 111 : 1990 เป็นการทดสอบที่ทำควบคู่กับ ACV. เพื่อทดแทนค่า ACV. กรณีที่วัสดุมวลรวมนั้นมีค่า ACV. มากกว่า 30% ซึ่งไม่ควรนำมาพิจารณา เพราะเม็ดส่วนละเอียด ปริมาณมากเหล่านี้จะเกิดขวางหรือเกิดการหุ้มเม็ดขนาดใหญ่ไว้ไม่ให้ถูกทำลายแตกหักต่อไป ค่า ACV. ที่ได้จึงไม่มีความสอดคล้องตรงตามความเป็นจริงต้องทำการทดสอบโดย TFV. ทดแทน ในการทดสอบ วัสดุมวลรวมจะถูกกระทำด้วยแรงที่สม่ำเสมอเป็นเวลา 10 นาที และเป็นผลให้วัสดุมวลรวมถูกกดจน ลง 15, 20 และ 24 มม. สำหรับประเภทวัสดุมวลรวมกรวด หินไม่ และ มวลรวมที่มีลักษณะเป็นรู พรุนเหมือนรวงผึ้ง (Honey combed aggregate) ตามลำดับ แรงดังกล่าวที่ทำให้วัสดุมวลรวม แตกหักมีขนาดเล็กกว่า 2.40 มม. เป็นปริมาณที่อยู่ระหว่าง 7.5 – 12.5% คือค่า TFV.ค่าคุณสมบัติ ของวัสดุมวลรวมที่เหมาะสมสำหรับวัสดุมวลรวมหินผิวทางต้องมีค่า TFV. ไม่น้อยกว่า 160 KN.(BS 63 : Part 2 : 1987)

ตารางที่ 2.6 ค่าคุณสมบัติ ACV. และ AIV. ของหินชนิดต่างๆ (ข้อมูลจาก C.J.Talbot, 1982)

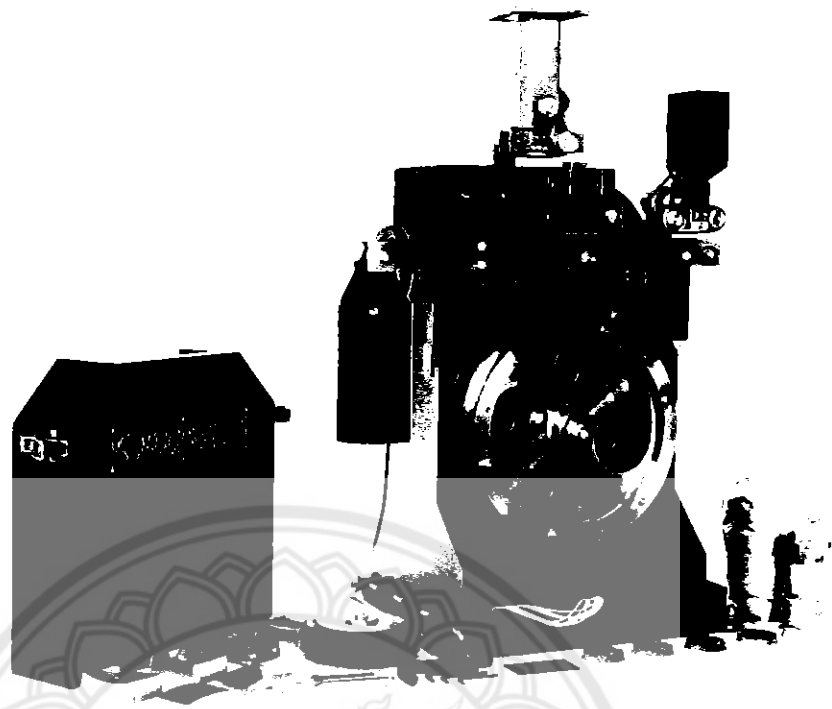
ชนิดหิน	AIV.		ACV.	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าขอบเขต	ค่าเฉลี่ย	ค่าขอบเขต
Basalt	11	10-13	16	16-17
Andesite	13	11-16	16	15-17
Dacite	12	-	13	-
Porphyry	13	12-14	12	-
Felsite	13	12-15	-	-
Dolerite	13	10-17	19	-
Teschenite	22	-	-	-
Granite	19	17-21	26	23-30
Limestone	17	15-20	-	-
Greywacke	9	-	-	-
Marble	19	16-21	26	25-28
Psamite	14	14-15	-	-



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PSV, AAV และ AIV (ข้อมูลจาก C.J.Talbot,1982)

Polished stone value (PSV) วิธีการทดสอบหาความต้านการลื่นไถลของหินเมื่อถูกขัด ซึ่งเป็นประเภทการทดสอบทางกลสมบัติวัสดุมวลรวมหินผิวทาง ตามมาตรฐาน BS 812 : Part 114 : 1989 ตัวอย่างทดสอบขนาด 7.94 – 9.52 มม. ที่มีผิวหน้าเรียบ รูปร่างเหลี่ยมหรือกลมไม่แบนยาว จะถูกหล่อติดกับปูนพาสเตอร์ในแบบหล่อขนาด 5x20 ซม. นำไปแช่น้ำเป็นเวลา 7-14 วัน และนำไปติดตั้งในวงล้อหมุน ซึ่งถูกกดทับด้วยวงล้อที่ถ่วงน้ำหนัก 40 กก.ไว้ วงล้อหมุนเพื่อขัดตัวอย่าง ขณะที่ผงขัดและน้ำจะถูกปล่อยไล่ตลอดเวลา ตัวอย่างที่ถูกขัดแล้วนำไปหาความต้านการลื่นไถล (Skid resistance) โดยเครื่องมือ Standard pendulum arc friction tester ซึ่งมีลักษณะเป็นแขนแกว่ง อ่านค่าสัมประสิทธิ์ความต้านการลื่นไถล เป็นค่า PSV. ค่า PSV. มีค่าสูงแสดงว่าเมื่อหินผ่านการขัดหินยังมีค่าความต้านการลื่นไถลมาก กรณีนำมาใช้เป็นวัสดุหินผิวทางจะมีความคงทนต่อการขัดถู โดยล้อยานพาหนะได้มาก ผิวจราจรมีความฝืดมาก ค่า PSV. ที่มากกว่า 50 ขึ้นไป ถือได้ว่าดีมีความเหมาะสมเป็นที่ยอมรับ หินโดยทั่วไปแล้วจะมีค่า PSV. ไม่เกิน 65

หินปูนบริสุทธิ์ (Pure limestone) เมื่อถูกขัดผิวหน้าหินจะมีความฝืดน้อยกว่าหินปูนเนื้อผสม (Impure limestone) ค่ากลสมบัติของมวลรวมหินมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่า วัสดุมวลรวมที่แข็งแกร่งจะมีความต้านทานต่อแรงตกกระแทก การขัดถู การสึกกร่อนได้ดี ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.20 และตารางที่ 2.7



รูปที่ 2.21 เครื่อง PSV Polishing Machine

ตารางที่ 2.7 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของกลุ่มหินชนิดต่างๆตามการจำแนกของ British Standard

Rock Group	Crushing strength		ACV (%)	Abrasion value (%)	AIV (%)	Attrition value		Specific gravity	
	KSC	lb/m ²				Dry	Wet	Range	Avg.
Basalt	2,000	29,000	12	17.6	16	3.3	5.5	2.6-3.0	2.80
Flint	2,050	30,000	17	19.2	17	3.1	2.5	2.4-2.6	2.54
Gabbro	1,950	28,500	-	18.7	19	2.5	3.2	-	2.95
Granite	1,850	27,000	20	18.7	13	2.9	3.2	2.6-3.0	2.69
Gritstone	2,200	32,000	12	18.1	15	3.0	5.3	2.6-2.9	2.69
Hornfels	3,400	49,500	11	16.5	9	4.3	7.8	2.5-2.8	2.66
Limestone	1,650	24,000	24	19.0	20	2.6	2.6	2.6-2.9	2.73
Porphyry	2,300	33,500	12	18.9	16	2.5	3.0	2.6-2.7	2.62
Quartzite	3,300	47,500	16	18.7	13	3.7	4.3		2.76
Schist	2,450	35,500	-						

ตารางที่ 2.8 ค่าคุณสมบัติของวัสดุหินในประเทศไทย

ชนิดหิน	Unconfined Compressive Strength* (KSC)		AIV (%)		ACV (%)		PSV		Abrasion value(%)	Specific gravity	Water absorption (%)
	Range	Avg.	Range	Avg.	Range	Avg.	Range	Avg.			
Basalt	2,400-	2,995	12.1-	13.9	11.4-	13.4	49.1-	50.1	15-	2.638-	0.5-
	3,700		14.8		14.6		51.8		20	2.924	1.9
Granite	1,800-	2,800	13.5-	16.1	19.2-	21.1	48.0-	51.3	21-	2.598-	0.3-
	3,650		18.2		23.8		52.0		29	2.750	1.06
Limestone	1,400-	1,760	9.7-	12.5	17.5-	21.5	36.0-	41.0	22-	2.684-	0.15-
	2,200		14.8		26.0		44.0		33	2.762	0.55
Sandstone	185-	880	15.3-	23.1	19.2-	26.4	53.0-	59.0	31-	2.237-	1.21-
	2,350		40.0		37.5		65.0		75	2.642	3.8
Andesite	-	2,880	11.0-	11.8	12.0-	13.6	49.4-	50.7	-	2.635-	0.7-
			13.0		15.0		51.3			2.662	1.05

หมายเหตุ * ค่า unconfined Compressive strength (จากการทดสอบ Point load test)

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการงาน

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวทางที่มีมวลรวมเป็นหินขนาด 3/8" และ 1/2" คละกันหลายๆสัดส่วน โดยการขัดด้วยเครื่อง PSV Polishing Machine แล้วนำมา หาค่าความต้านทานการลื่นไถลโดยใช้เครื่อง Portable Skid -Resistance Tester จะตีตัวอย่างแต่ละอันทั้งหมด 5 ครั้ง แล้วจดบันทึกค่า

3.1 วัสดุ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการลื่นไถลมวลรวมของหิน มีดังต่อไปนี้

- ผงขัด เป็นผงอลูมิเนียมคาร์ไบด์ โดยทั่วไปเรียกว่า Alundum มีสองชนิด คือ ผงหยาบ (Corn Emery) และผงละเอียด (Air – Floated Emery Flour)
- ทรายละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างเบอร์ 100
- ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ Type I
- ลวดเสริมขนาด 1.2 มม.
- หินขนาด 3/8" และ 1/2"

3.2 วิธีการทดลอง จะแบ่งเป็นทั้งหมด 3 ขั้นตอน คือการเตรียมตัวอย่าง การขัดตัวอย่าง และการหาค่าเฉลี่ย

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

- ตัวอย่างวัสดุหินที่ใช้ในการทดลอง 2 ขนาด คือ ขนาด 3/8" ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8"
- ขนาด 1/2" ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 1/2" ค้างตะแกรงเบอร์ 3/8"
- นำตัวอย่างหินที่ร่อนเสร็จมาล้างให้สะอาดและผึ่งให้แห้ง
- เลือกหินที่มีหน้าเรียบ ไม่แบน ไม่ยาวเกินไป
- ทาน้ำมันหรือจารบีเฉพาะที่ด้านข้างแบบหล่อ (Mold) เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างที่หล่อไว้ติดแน่นกับแบบหล่อ
- เรียงเม็ดหินตัวอย่างลงในแบบหล่อมาตรฐาน จำนวนตัวอย่างละ 3 แบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.1
- วางลวดเหล็กเสริมขนาด 1.2 มม. จำนวน 3 เส้นตามความยาวของแบบหล่อ เพื่อกันการแตกร้าวของตัวอย่างในขณะที่ทำการขัดตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.2
- หล่อด้วยปูนทราย ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ขาวและทรายในอัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก
- เมื่อปูนทรายเริ่มแข็งตัว ปาดผิวให้เรียบด้วยยางแข็ง ดังรูปที่ 3.3
- รอให้ตัวอย่างแห้งประมาณ 6-8 ชั่วโมง
- ถอดแผ่นตัวอย่างออกจากแบบหล่อด้วยความระมัดระวัง และใช้เกียงแซะปูนตามร่องของหินเพื่อไม่ให้เครื่องตีโดนปูน ดังรูปที่ 3.4
- นำแผ่นตัวอย่างไปแช่น้ำประมาณ 14 วัน โดยคว่ำด้านเม็ดหินลง



รูปที่ 3.1 การเรียงหินลงในตัวอย่าง



รูปที่ 3.2 การวางหลอดเหล็ก



รูปที่ 3.3 การปาดหน้าตัวอย่าง



รูปที่ 3.4 การแซะร่องตัวอย่าง

3.2.2 การขัดแผ่นตัวอย่างด้วยเครื่องขัด

- นำแผ่นตัวอย่างมาจัดเรียงในวงล้อเหล็ก ซึ่งบรรจุแผ่นตัวอย่างได้ทั้งหมดจำนวน 14 แผ่น คือ ตัวอย่างหิน 12 แผ่น Control Stone 2 แผ่น แล้วนำวงล้อเหล็กเข้าเครื่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6
- เดินเครื่องดำเนินการขัดแผ่นตัวอย่าง โดยในการขัด 5,000 และ 10,000 รอบ ขัดด้วยผงขัดหยาบ ส่วน 15,000 และ 20,000 รอบ ขัดด้วยผงละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 3.7
- หยุดเครื่องเมื่อครบทุก 5,000 รอบ แล้วฉีดน้ำทำความสะอาดแผ่นตัวอย่าง ทำความสะอาดเครื่องทุกครั้ง



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างเรียงในวงล้อเหล็ก



รูปที่ 3.6 นำวงล้อตัวอย่างเข้าเครื่อง

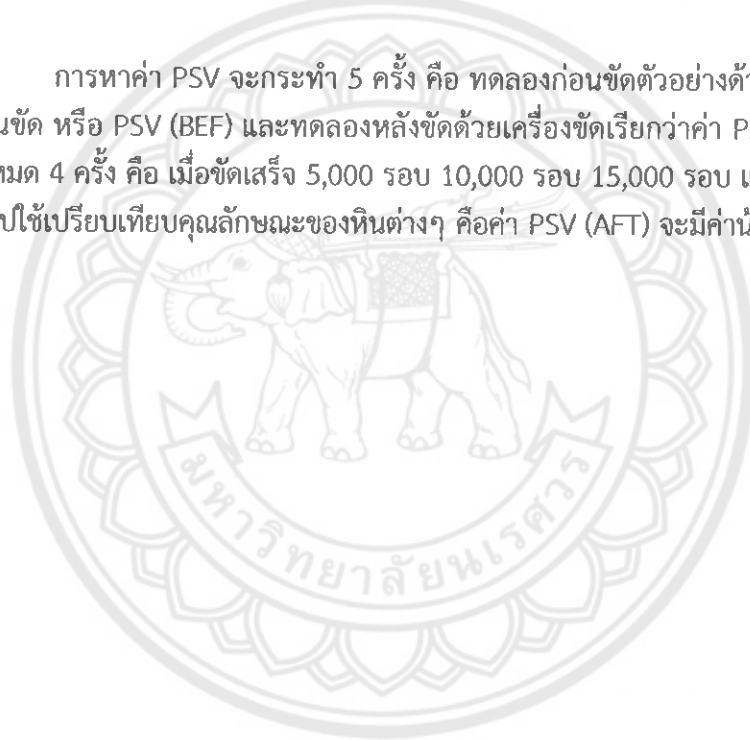


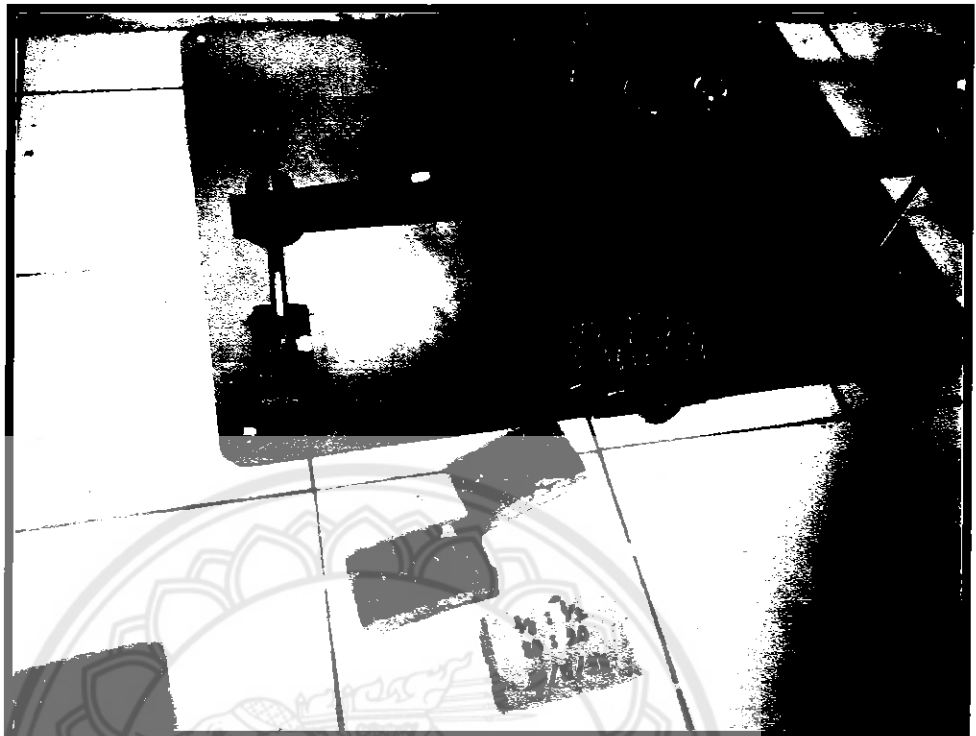
รูปที่ 3.7 เครื่องกำลังดำเนินการขัดตัวอย่าง

3.2.3 การทดสอบหาค่าเฉลี่ย PSV โดยใช้เครื่อง Portable Skid-Resistance Tester

- ปรับเครื่องมือโดยปรับระดับน้ำที่ฐานเครื่องให้เสายู่ในแนวตั้ง
- ทดลองแกว่งเปล่าๆ โดยไม่สัมผัสกับตัวอย่าง เข็มต้องชี้ที่เลข 0
- นำตัวอย่างเข้าที่จับ ดังแสดงในรูปที่ 3.8
- เลื่อนแขนแกว่งให้สัมผัสตัวอย่างเป็นระยะ 7.6 ± 0.1 ซม.
- รดน้ำแผ่นตัวอย่างแล้วกดปุ่มปล่อยแขนแกว่งให้แขนแกว่งสัมผัสตัวอย่าง อ่านค่า PSV จากแผ่นดัชนี ดังแสดงในรูปที่ 3.9
- อ่านค่าที่ได้จากการทดลอง 5 ครั้ง บันทึกค่าที่อ่านไว้ ค่า PSV เฉลี่ยของตัวอย่างหินแต่ละแผ่นจะสามารถคำนวณจากค่าที่อ่านได้ 3 ครั้งหลัง และค่า PSV เฉลี่ยทั้งหมดจะได้จากการเฉลี่ยจากตัวอย่างทั้ง 3 แผ่นอีกครั้งหนึ่ง

การหาค่า PSV จะกระทำ 5 ครั้ง คือ ทดลองก่อนขีดตัวอย่างด้วยเครื่องขีด เรียกว่าค่า PSV ก่อนขีด หรือ PSV (BEF) และทดลองหลังขีดด้วยเครื่องขีดเรียกว่าค่า PSV หลังขีด หรือ PSV (AFT) ทั้งหมด 4 ครั้ง คือ เมื่อขีดเสร็จ 5,000 รอบ 10,000 รอบ 15,000 รอบ และ 20,000 รอบ ค่า PSV ที่นำไปใช้เปรียบเทียบคุณลักษณะของหินต่างๆ คือค่า PSV (AFT) จะมีค่าน้อยกว่าค่า PSV (BEF) เสมอ



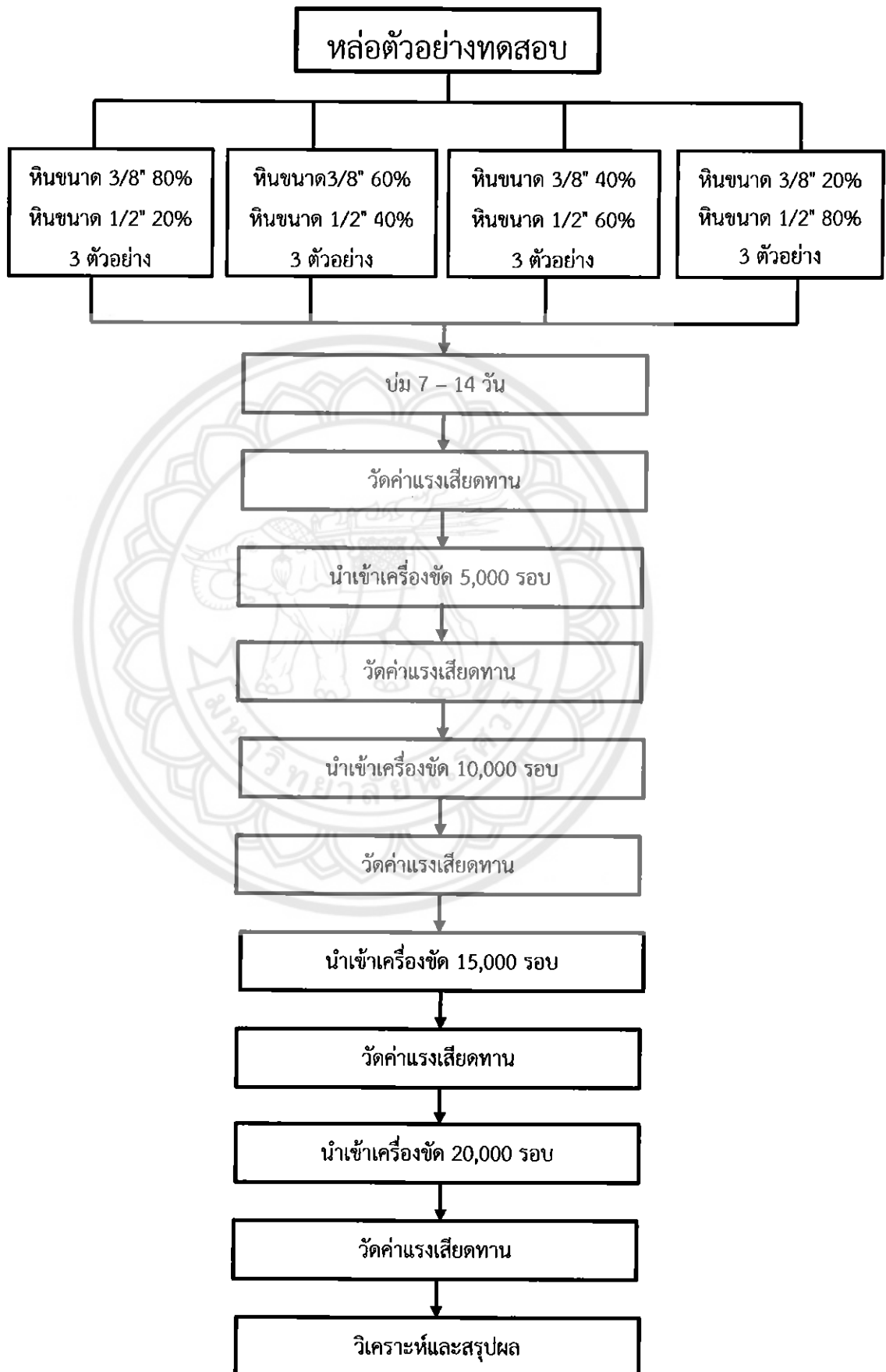


รูปที่ 3.8 นำตัวอย่างเข้าที่จับ



รูปที่ 3.9 การแกว่งแขนให้สัมผัสตัวอย่าง

3.3 แผนผังการดำเนินโครงการ



บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 ผลการทดลอง

จากการทดลองหาค่า Polished Stone Value ด้วยเครื่อง British portable Tester ทำให้สามารถสังเกตความแตกต่างของค่า PSV ได้ ซึ่งค่า PSV ของตัวอย่างทั้งหมด 12 ตัวอย่าง จะแบ่งค่าเป็น 4 ชุด ชุดแรกคือชุดตัวอย่างทั้งหมด 5,000 รอบ ชุดที่สอง 10,000 รอบ ชุดที่สาม 15,000 รอบ ชุดที่สี่ 20,000 รอบ

ตารางที่ 4.1 ตารางอัตราส่วนและน้ำหนักของตัวอย่าง

Test No.	Weight of Stone(g)		Stone Ratio(%)	
	3/8"	1/2"	3/8"	1/2"
Mol 1	20.8	8.4	80	20
Mol 2	27.2	6.8	80	20
Mol 3	23.7	6	80	20
Mol 4	18.84	12.56	60	40
Mol 5	18.54	12.36	60	40
Mol 6	19.14	12.76	60	40
Mol 7	17.52	26.28	40	60
Mol 8	17.04	25.56	40	60
Mol 9	16.8	25.14	40	60
Mol 10	8.4	33.6	20	80
Mol 11	8.94	35.76	20	80
Mol 12	8.56	34.24	20	80

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการหาค่า PSV

Test No.	PSV (BEF)	PSV (AFT) 5,000 Rounds	PSV (AFT) 10,000 Rounds	PSV (AFT) 15,000 Rounds	PSV (AFT) 20,000 Rounds
Mol 1	62	60	54	46	49
	62	60	52	45	48
	62	59	52	45	48
	Avg. = 62	Avg. = 59.67	Avg.=52.67	Avg.=45.33	Avg.=48.33
Mol 2	59	58	55	47	47
	58	55	54	47	45
	58	55	54	47	45
	Avg. = 58.33	Avg. = 56	Avg.=54.33	Avg.=47	Avg.=45.67
Mol 3	55	55	53	50	44
	55	53	52	50	43
	55	53	52	48	43
	Avg. = 55	Avg. = 53.67	Avg.=52.33	Avg.=49.33	Avg.=43.33
Avg. Mol 1,2,3	58.44	56.45	53.11	47.22	45.78
Mol 4	60	56	55	50	45
	60	55	55	50	45
	59	55	55	50	44
	Avg. = 59.67	Avg. = 55.33	Avg.=55	Avg.=50	Avg.=44.67
Mol 5	54	52	51	50	46
	54	51	50	49	46
	53	51	50	49	46
	Avg. = 53.67	Avg. = 51.33	Avg.=50.33	Avg.=49.33	Avg.=46
Mol 6	60	54	53	50	45
	58	54	53	49	44
	58	54	52	46	44
	Avg. = 58.67	Avg. = 54	Avg. = 52.67	Avg.=48.33	Avg.=44.33
Avg. Mol 4,5,6	57.34	53.55	52.67	49.22	45

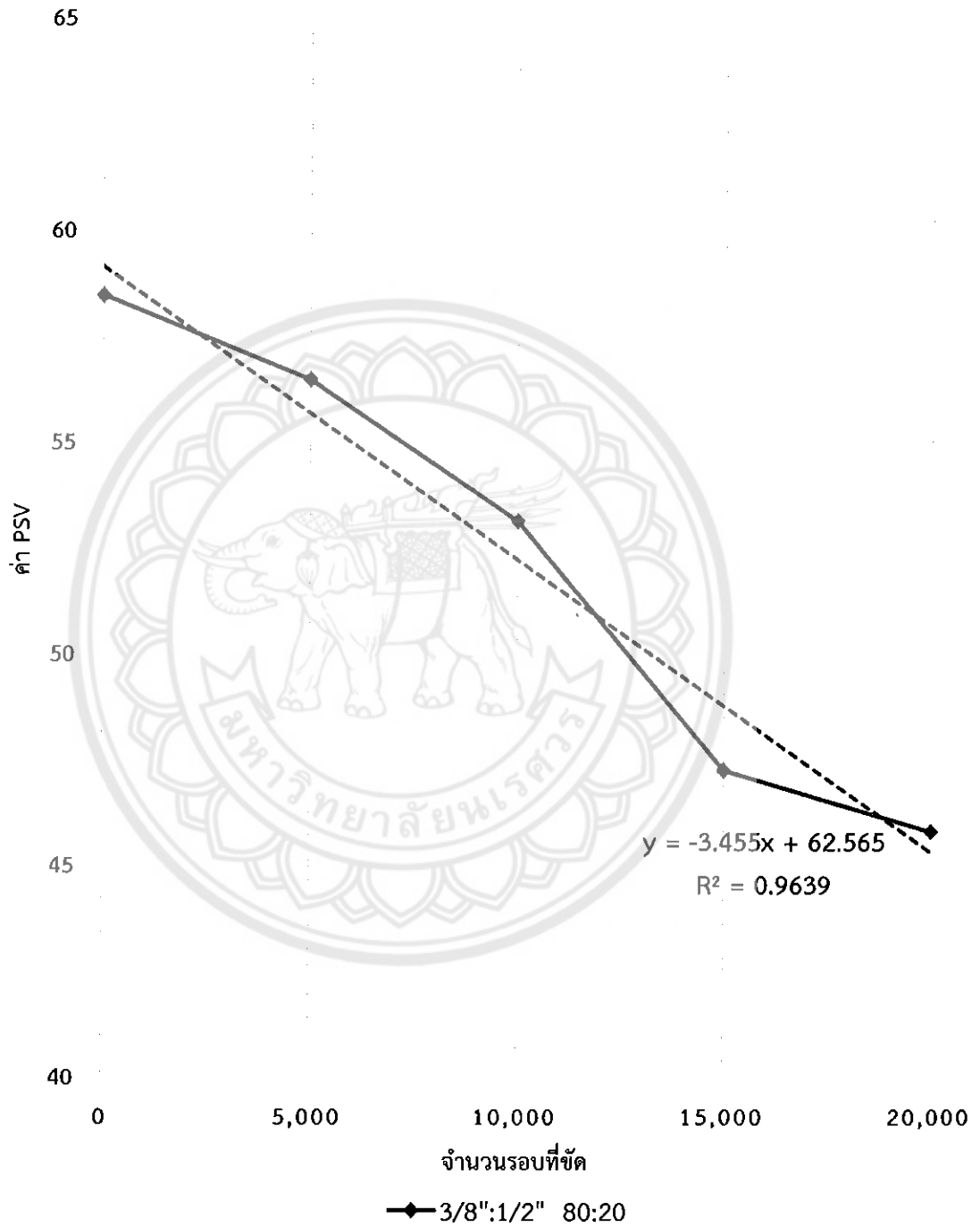
ตารางที่ 4.2(ต่อ) ผลการทดลองการหาค่า PSV

Test No.	PSV (BEF)	PSV (AFT) 5,000 Rounds	PSV (AFT) 10,000 Rounds	PSV (AFT) 15,000 Rounds	PSV (AFT) 20,000 Rounds
Mol 7	56	52	51	45	42
	56	51	50	43	41
	56	51	50	43	41
	Avg. = 56	Avg. = 51.33	Avg.=50.33	Avg.=43.67	Avg.=41.33
Mol 8	57	56	54	50	44
	57	56	52	49	43
	57	55	52	49	42
	Avg. = 57	Avg. = 52	Avg.=52.67	Avg.=49.33	Avg.=43
Mol 9	60	55	54	50	46
	60	55	53	50	45
	61	55	53	50	45
	Avg. = 60.33	Avg. = 55	Avg.=53.33	Avg.=50	Avg.=45.33
Avg. Mol 7,8,9	57.78	52.78	52.11	47.67	43.22
Mol 10	60	54	52	49	44
	61	53	52	48	44
	62	53	51	46	43
	Avg. = 61	Avg. = 53.33	Avg.=51.67	Avg.=47.67	Avg.=43.67
Mol 11	62	55	52	50	45
	62	54	51	49	44
	60	53	50	48	44
	Avg. = 61.33	Avg. = 54	Avg.=51	Avg.=49	Avg.=44.33
Mol 12	62	56	55	50	45
	61	56	54	50	45
	60	56	54	50	43
	Avg. = 61	Avg. = 56	Avg.=54.33	Avg.=50	Avg.=44.33
Avg. Mol 10,11,12	61.11	54.44	52.33	48.89	44.11

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาค่า PSV เฉลี่ย

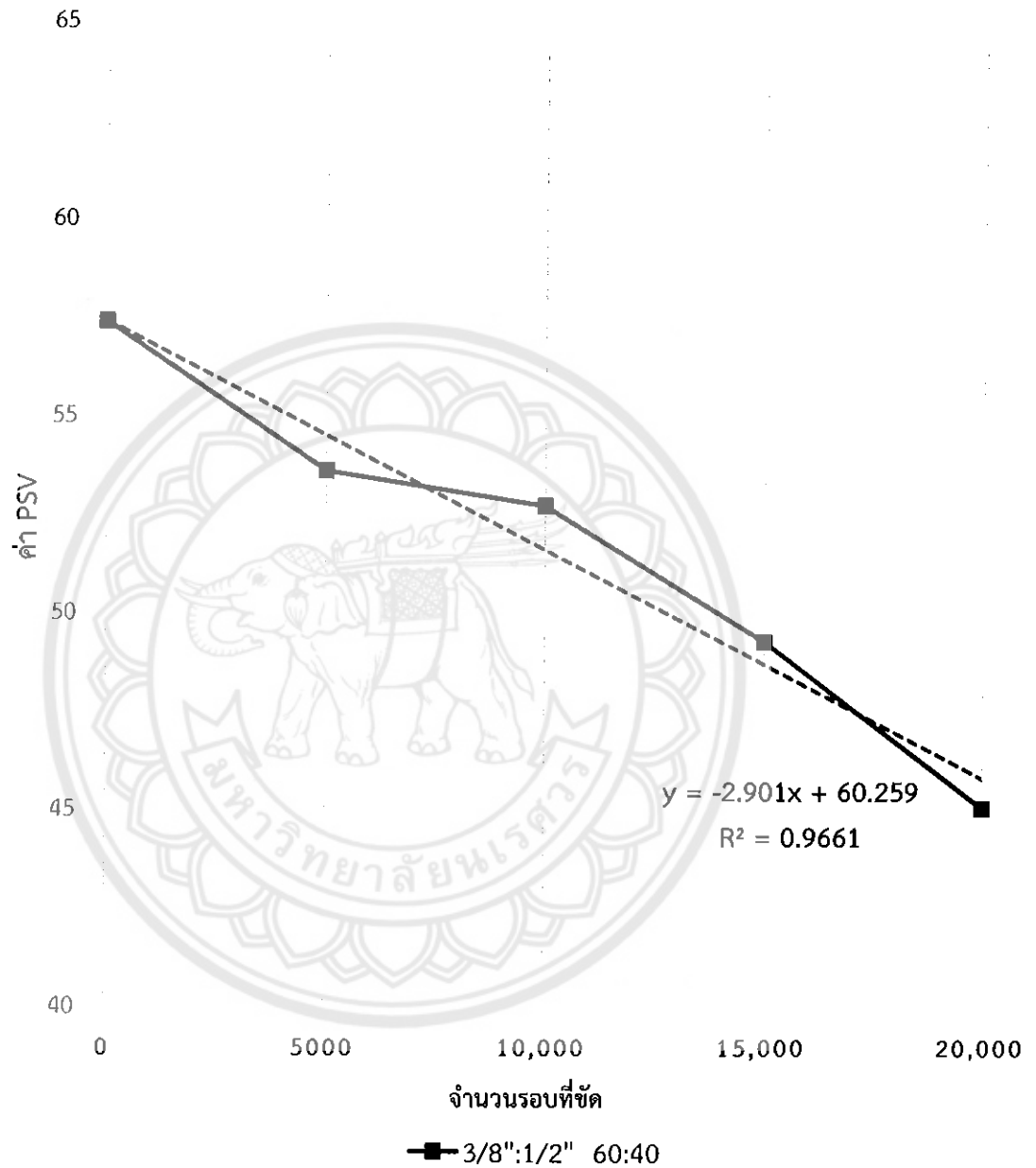
Test No.	PSV (BEF)	PSV (AFT) 5,000 Rounds	PSV (AFT) 10,000 Rounds	PSV (AFT) 15,000 Rounds	PSV (AFT) 20,000 Rounds
Avg. Mol 1,2,3	58.44	56.45	53.11	47.22	45.78
Avg. Mol 4,5,6	57.34	53.55	52.67	49.22	45
Avg. Mol 7,8,9	57.78	52.78	52.11	47.67	43.22
Avg. Mol 10,11,12	61.11	54.44	52.33	48.89	44.11

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าPSVและจำนวนรอบในการขัดของหิน
ขนาด3/8" 80% 1/2" 20%



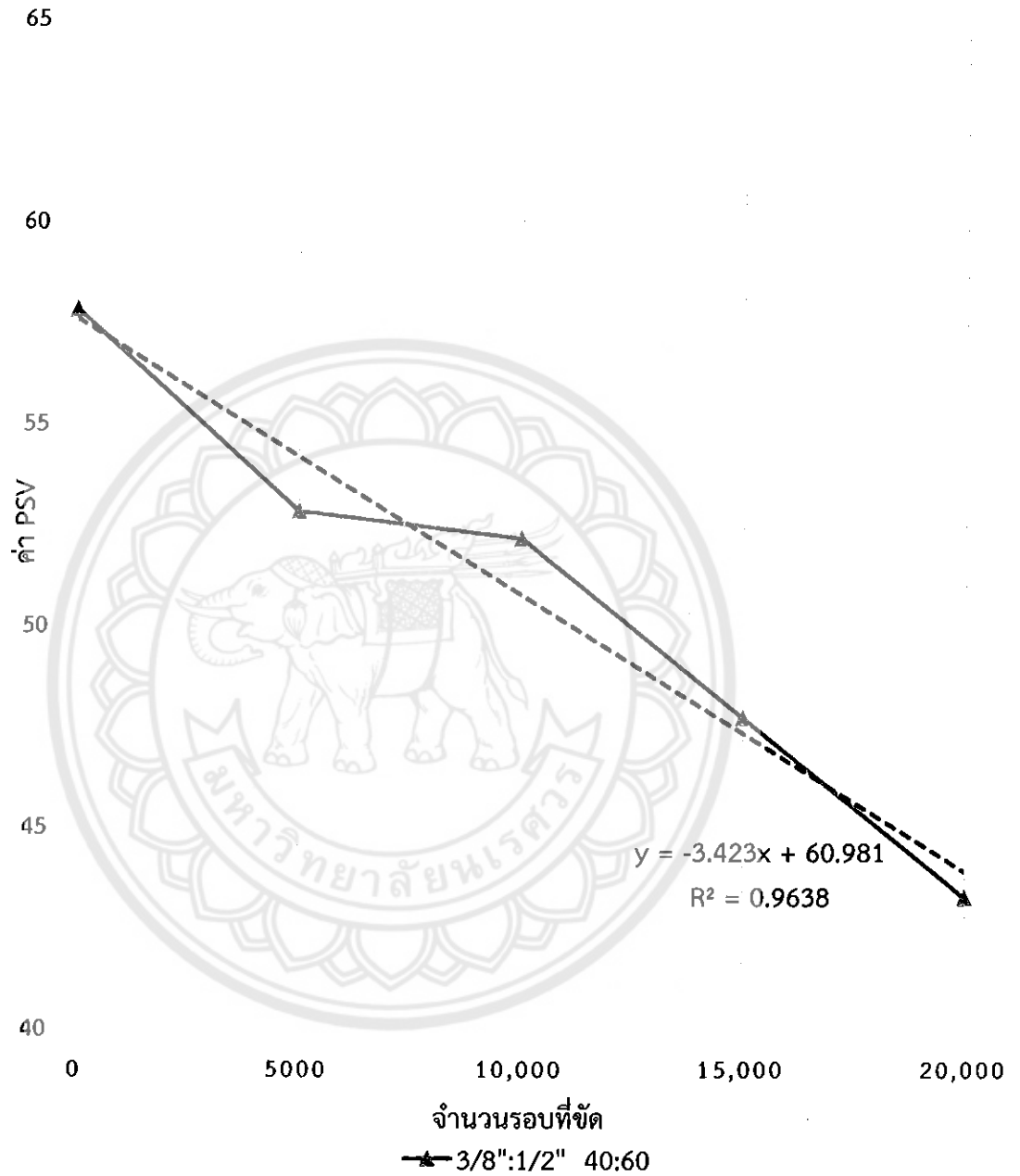
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ขัดต่อ ค่าPSV จะได้ว่า หินอัตราส่วน 80:20 มีความสัมพันธ์ $y = -3.455x + 62.565$ และมีค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9639$ ซึ่งเป็นค่าความเชื่อมั่นที่สูงมีความน่าเชื่อถือ

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าPSVและจำนวนรอบในการขีดของหิน
ขนาด3/8" 60% 1/2" 40%



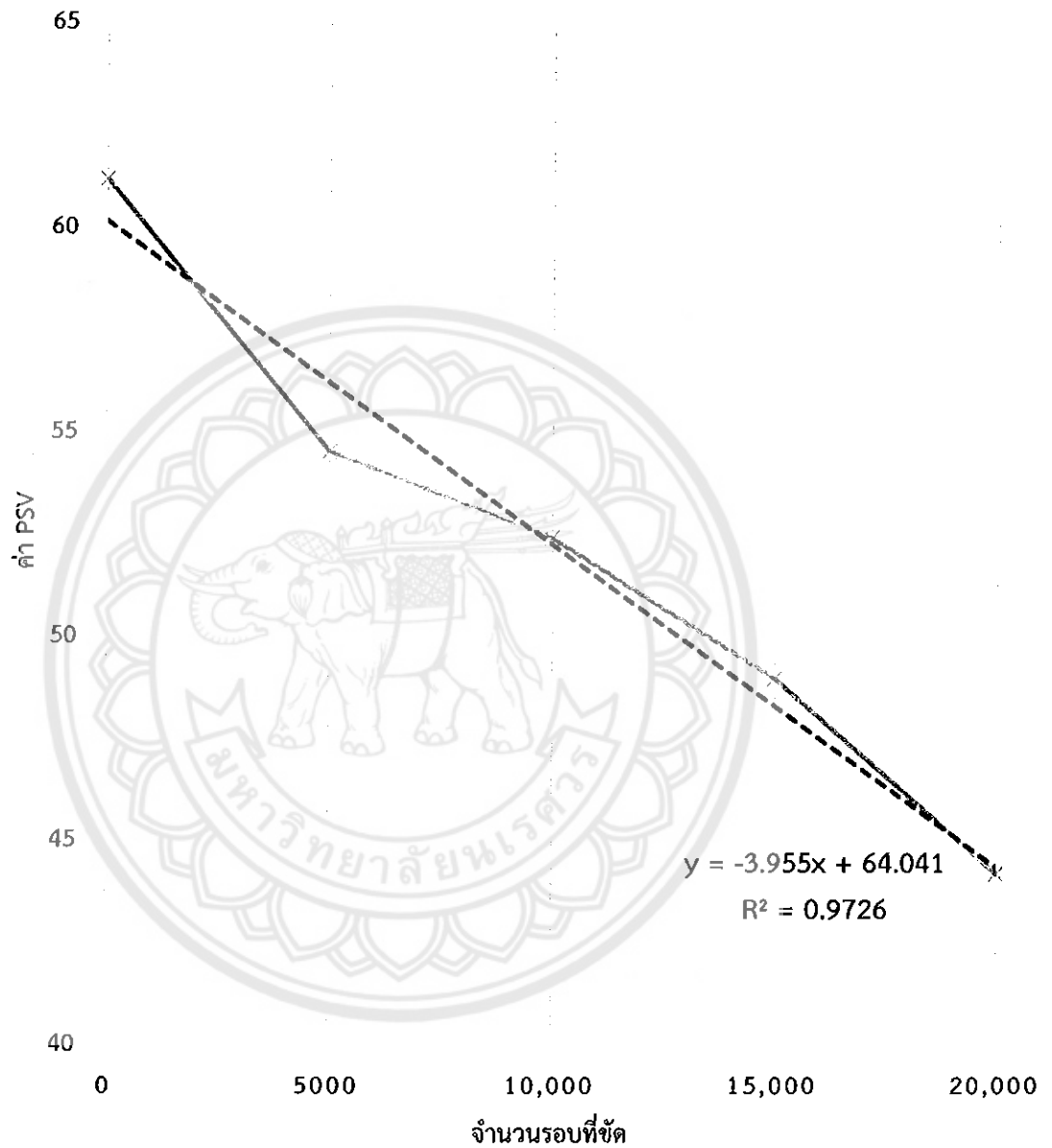
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ขีดต่อ ค่าPSV จะได้ว่า หินอัตราส่วน 60:40 มีความสัมพันธ์ $y = -2.901x + 60.259$ ค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9661$ ซึ่งเป็นค่าความเชื่อมั่นที่สูงมีความน่าเชื่อถือ

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าPSVและจำนวนรอบในการขัดของหิน
ขนาด3/8" 40% 1/2" 60%



จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ขัดต่อ ค่าPSV จะได้ว่า หินอัตราส่วน 40:60 มีความสัมพันธ์ $y = -3.423x + 60.981$ ค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9638$ ซึ่งเป็นค่าความเชื่อมั่นที่สูงมีความน่าเชื่อถือ

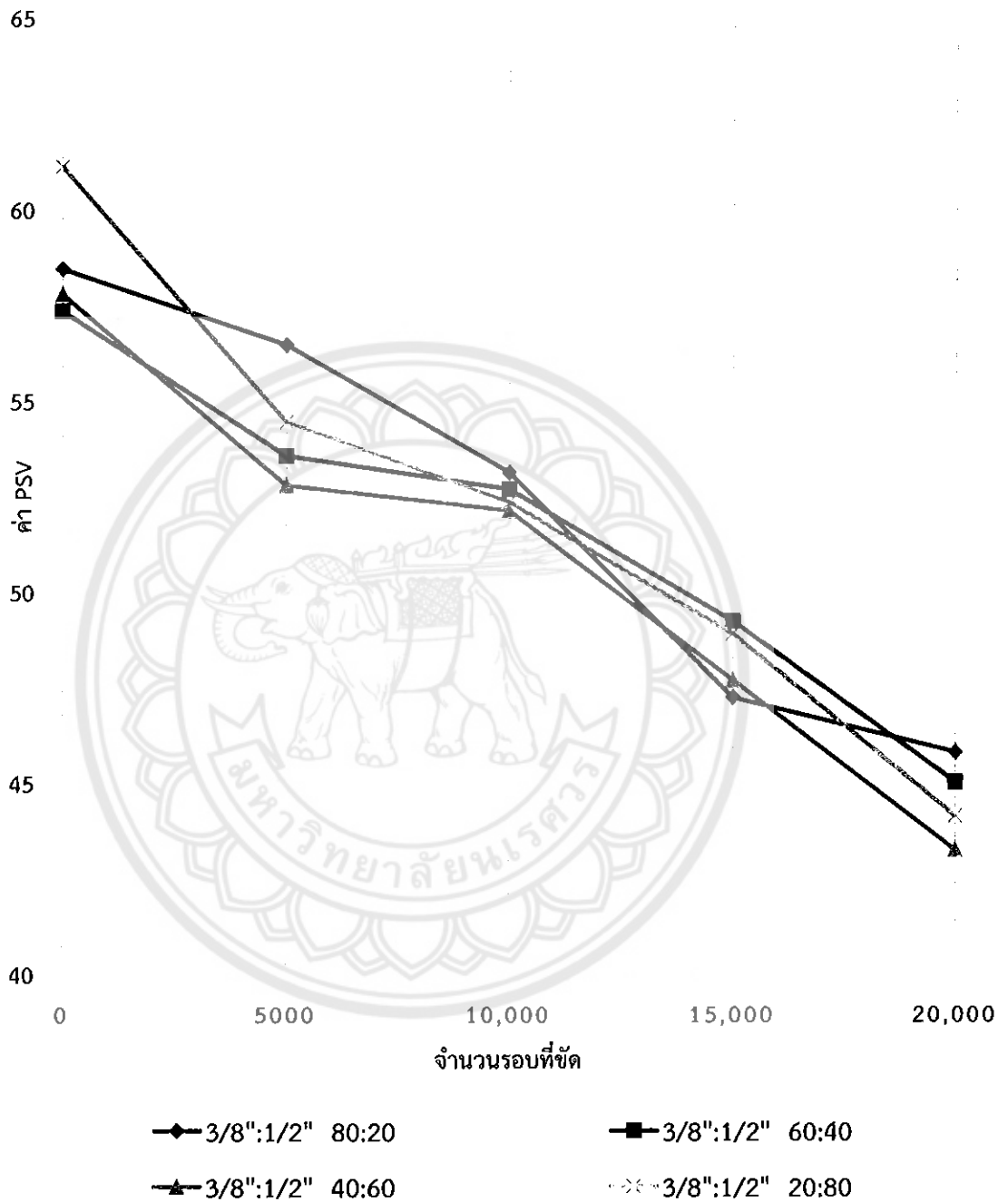
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าPSVและจำนวนรอบในการขัดของหิน
ขนาด3/8" 20% 1/2" 80%



หิน 3/8":1/2" 20:80

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ขัดต่อ ค่าPSV จะได้ว่า หินอัตราส่วน 20:80 มีความสัมพันธ์ $y = -3.955x + 64.041$ ค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9726$ ซึ่งเป็นค่าความเชื่อมั่นที่สูงมีความน่าเชื่อถือ

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าPSVและจำนวนรอบในการขัด ของหินทั้ง 4 อัตราส่วน



จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่า PSV ของหินในอัตราส่วน 80:20 จะมีค่าอยู่ในช่วง 45-58 อัตราส่วน 60:40 จะมีค่าอยู่ในช่วง 45-57 อัตราส่วน 40:60 จะมีค่าอยู่ในช่วง 43-57 และอัตราส่วน 20:80 จะมีค่าอยู่ในช่วง 44-61

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองหาค่า Polished Stone Value ด้วยเครื่อง Portable Skid-Resistance Tester ของแผ่นตัวอย่างหินขนาด 3/8" : 1/2" อัตราส่วน 80:20 3 ตัวอย่าง, 60:40 3 ตัวอย่าง, 40:60 3 ตัวอย่าง, 20:80 3 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 12 ตัวอย่าง จะแบ่งค่าเป็น 4 ชุด ครั้งแรกคือขัดตัวอย่างทั้งหมด 5,000 รอบ ครั้งที่สอง 10,000 รอบ ครั้งที่สาม 15,000 รอบ ครั้งที่สี่ 20,000 รอบ ได้สรุปค่า PSV ออกมาในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ขัดกับค่า PSV

ค่า PSV ของหินแต่ละอัตราส่วนจะมีค่าลดลงเรื่อยๆตามจำนวนรอบที่ขัดแต่จะเห็นได้ว่า ค่า PSV ของหินอัตราส่วน 20:80 จะมีค่ามากในช่วงแรก ในขณะที่อัตราส่วนอื่นๆ มีค่าใกล้เคียงกันแต่หลังจากที่ขัดแล้ว ค่า PSV ของหินแต่ละอัตราส่วนก็มีการลดลงเท่าๆกัน

ดังนั้นจึงพอสรุปได้จากข้อมูลข้างต้นว่า จำนวนรอบที่ขัดน้อยส่งผลทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลมีค่ามาก และเมื่อมีจำนวนรอบในการขัดที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลน้อยลงตามลำดับ ในกรณีหินอัตราส่วน 80:20 มีความสัมพันธ์ $y = -3.455x + 62.565$ ค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9639$, หินอัตราส่วน 60:40 มีความสัมพันธ์ $y = -2.901x + 60.259$ ค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9661$, หินอัตราส่วน 40:60 มีความสัมพันธ์ $y = -3.423x + 60.981$ ค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9638$, หินอัตราส่วน 20:80 มีความสัมพันธ์ $y = -3.955x + 64.041$ ค่าความเชื่อมั่น $R^2 = 0.9726$, จากกราฟ เราจะเห็นได้ว่า หินอัตราส่วน 20:80 มีค่าความเชื่อมั่นมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองนี้ควรระมัดระวังในการเรียงหินใส่โมลตัวอย่าง ซึ่งเวลาแกะแบบแล้วจะทำให้มีปัญหาในเรื่องของการนำเข้าเครื่องขัด แล้วหินจะหลุดจากแผ่นตัวอย่างได้ง่าย
2. ในการทดลองนี้จะไม่ทิ้งโมลที่หล่อแล้วรอให้แห้งถึง 24 ชั่วโมงเพราะอากาศที่แห้ง ทำให้แกะแผ่นตัวอย่างออกจากโมลได้ยาก
3. สามารถนำผลการวิจัยนี้เป็นแนวทางเพื่อใช้ในการศึกษาถึงผลกระทบของถนนที่มีการเปิดใช้แล้วต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. นายวรายุทธ ฉิมพาลี,นายสุรศักดิ์ หาญจริง,นายอดิศักดิ์ เสระสัย.(2547)การศึกษาค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางลาดยางและผิวทางคอนกรีต:กรณีศึกษาภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร.การศึกษาค้นคว้าด้วยตัวเอง วศ.บ.,มหาวิทยาลัยนเรศวร,พิษณุโลก.
2. BSi. STANDARDS (BS-DD 812 1967).Aggregate Impact Test. Thai Industrail Standards Institue.
3. <https://sites.google.com/site/patcharayutchanhom/khwam-seiyd-than-khxng-phiw-thang-pavement-friction>
4. <http://mai.doh.go.th/BT03/BT03C/2548/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%97%E0%B8%94%E0%B8%AA%E0%B8%AD%E0%B8%9A%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%84%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%9A%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%AB%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%A1%E0%B8%B2%E0%B8%B0%E0%B8%AA%E0%B8%A1.pdf>
5. http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:UiMGyHnOa58J:smartdoc.doh.go.th/PubDocinfo.asp?DocID%3D38522+&cd=1&hl=th&ct=clnk&gl=th&lr=lang_th

ภาคผนวก ก

ค่าความถ่วงจำเพาะของหินชนิดเม็ดหยาบ

ตารางที่ ก1 ค่าความถ่วงจำเพาะของหิน จากแหล่งหินอำเภอรานกระต่าย จังหวัด กำแพงเพชร

Sample		Weight of Sample			GB	GA	%Abs
		In oven-dry Condition (A)	In SSD. Condition (B)	Immersed In water (C)	$\frac{A}{B-C}$	$\frac{A}{A-C}$	$\frac{B-A}{A} \times 100$
HOT BIN	No.1	1011	1012.7	600	2.5	2.46	0.17
	No.2	1220.2	1227.3	700	2.314	2.346	0.582
	No.3	1136.2	1139.2	750	2.919	2.942	0.26
	No.4	962.3	964.6	500	2.071	2.081	0.24
	Total				2.451	2.457	0.313

ภาคผนวก ข

ดัชนีความแบนและความยาวของหิน

ตารางที่ ข1 ดรรชนีความแบน (Flakiness Index)

Sieve Size U.S. Standard Square Opening (mm.)	Guage Length (mm.)	Mass Retained X (gm.)	Mass Passing Y (gm.)	Total Mass X+Y (gm.)	Elongation Index %
25.4-19.05 (1"-3/4")	13.34 (0.525")	461.9	630	1091.9	
19.05-12.7 (3/4"-1/2")	9.53 (0.375")	1933	1350.6	3283.6	
12.7-9.52 (1/2"-3/8")	6.68 (0.263")	392.6	83	475.6	
9.52-4.76 (3/8" - #4)	4.29 (0.169")	45.4	4	49.4	
Total		2832.9	2067.6	4900.5	42.192

ตาราง ข2 ดรรชนีความยาว (Elongation Index)

Sieve Size U.S. Standard Square Opening (mm.)	Guage Length (mm.)	Mass Retained X (gm.)	Mass Passing Y (gm.)	Total Mass X+Y (gm.)	Elongation Index %
25.4-19.05 (1"-3/4")	40.01 (1.575")	1038.2	53.6	1091.8	-
19.05-12.7 (3/4"-1/2")	28.58(1.125")	2746.7	528	3274.7	-
12.7-9.52 (1/2"-3/8")	20.02(0.788")	310.1	165.8	475.9	-
9.52-4.76 (3/8" - #4)	12.85(0.506")	8.9	40.5	49.4	-
Total		4103.9	787.9	4891.8	83.893

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นางสาวอัชนก หนุณนำสิริสวัสดิ์
ภูมิลำเนา 8 หมู่ 15 ต.เวียง อ.เทิง จ.เชียงราย
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสามัคคีวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: lovelypan99@gmail.com



ชื่อ นายวิญญู ทองตัน
ภูมิลำเนา 155 หมู่ 13 ต.เมืองพาน อ.บ้านผือ จ.อุดรธานี
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุดรพิทยานุกูล
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: arm-zanoosai@hotmail.com



ชื่อ นายสุทธิชัย ประสาทเกษการ
ภูมิลำเนา 248/1 หมู่ 3 ต.ดงขุย อ.ชนแดน จ.เพชรบูรณ์
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนตะพานหิน
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: nik_nik_n@hotmail.com