บทที่ 2

การศึกษาวิจัย ทฤษฎี และ สมมุติฐานสำคัญที่เกี่ยวข้องในอดีต

ผิวทางประเภทต่าง ๆ ที่มีอยู่อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ

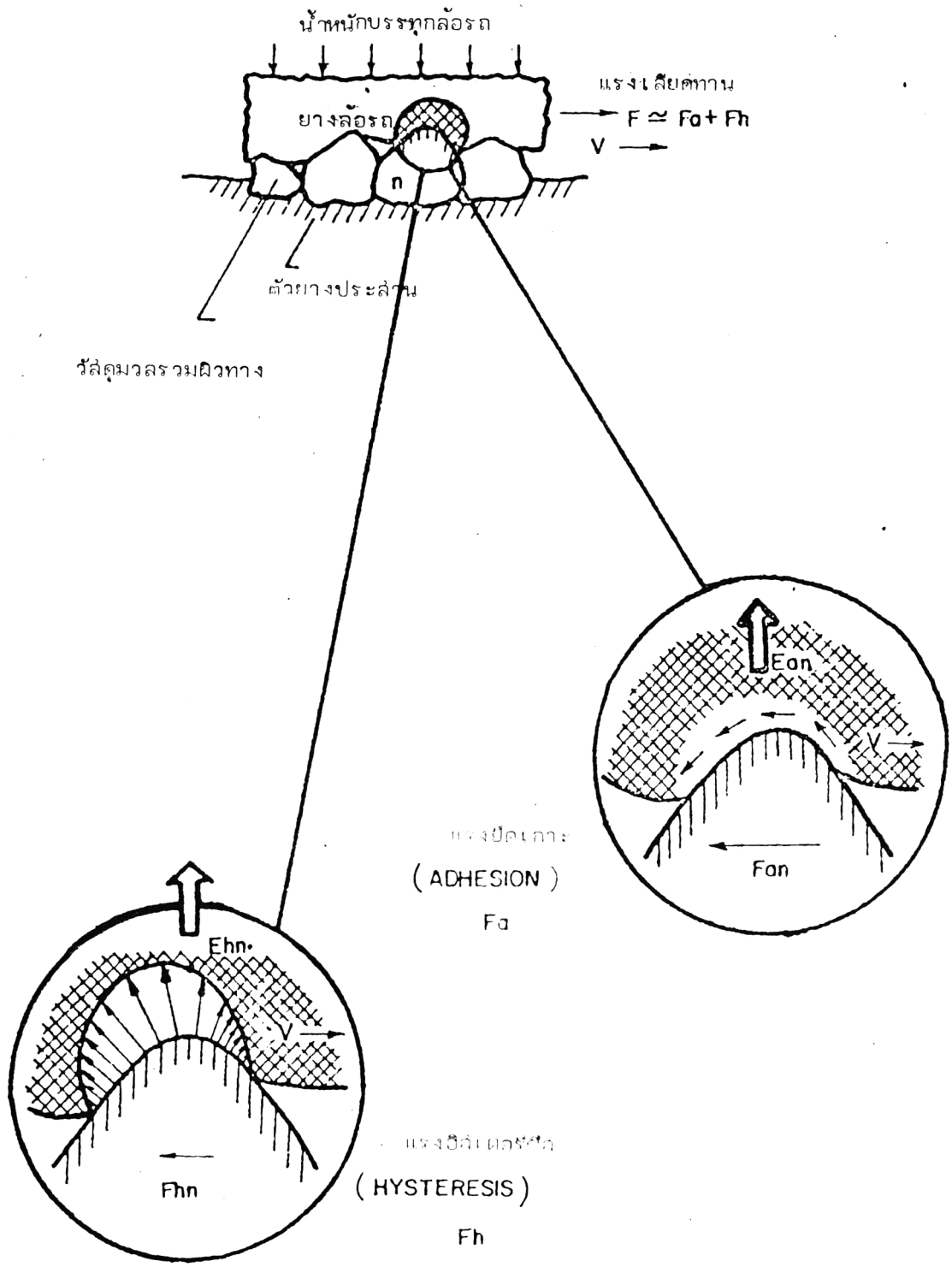
1) ผิวทางคอนกรีต (Rigid Pavement) ลักษณะทั่วไปจะประกอบด้วยชั้นดินเดิม หรือชั้นดินคันทาง (Natural Subgrade) ชั้นพื้นทาง (Base Course) ซึ่งอาจจะมีหรือไม่ก็ได้ แล้วแต่สภาพของดินเดิมว่าแข็งแรงเพียงใด ชั้นทรายรองผิวจราจรและชั้นผิวจราจรคอนกรีต (Portland-Cement Concrete) อยู่ส่วนบนสุดของผิวทาง ซึ่งมีความแข็งแรงและคุณสมบัติในการยืดหยุ่นสูงเพียงพอที่จะต้านทานต่อน้ำหนักกระทำบนผิวทางได้ ในที่นี้ก็คือยวดยานที่ขับเคลื่อนไปบนผิวทางนั่นเอง

2) ผิวทางลาดยาง (Flexible Pavement) แบ่งออกได้หลายประเภท เช่น ประเภทผิวทางแอสฟัลท์ติคคอนกรีต ประเภทผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ เป็นต้น ลักษณะทั่วไปประกอบด้วย ชั้นดินเดิม หรือชั้นดินคันทาง ชั้นดินถมบดอัดแน่น (Compacted Subgrade) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase Course) ชั้นพื้นทาง (Base Course) และชั้นผิวจราจร (Wearing Course) ซึ่งแยกออกได้เป็นชั้นผิวทาง (Surface Course) และชั้นวัสดุเชื่อมแน่น (Binder Course) ในการวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะผิวทาง เซอร์เฟสทรีตเมนท์เท่านั้น แต่ก่อนอื่นจะได้พิจารณาคุณสมบัติที่สำคัญของผิวทางโดยทั่วไปที่เกี่ยวข้องในเรื่องนี้เสียก่อน คือ คุณสมบัติความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance) ของผิวทาง ซึ่งเป็นความฝืดของผิวทางที่ต้านทานมิให้ยวดยานที่วิ่งผ่านไปมาบนผิวทางเกิดการลื่นไถล ออกไปจากแนวเส้นทางเดิมอันเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่จะต้องคำนึงถึง ในการนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมในผิวทางชนิดต่าง ๆ

2.1 องค์ประกอบของความต้านทานการลื่นไถลของผิวทาง

ความต้านทานการลื่นไถลของผิวทาง ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบด้วยกัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 อันเป็นองค์ประกอบของแรงเสียดทานระหว่างยางและผิวทาง ดังนี้ คือ

2.1.1 แรงยึดเกาะ(Adhesion Force) ระหว่างยางและผิวทางเป็นแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ผิวหน้ายางและผิวของมวลรวมเกิดสัมผัสกัน แรงส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับกำลังเฉือน พื้นที่



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของแรงเสียดทานระหว่างหน้ายางล้อรถและผิวทาง (1,14)

สัมผัสและความหยาบที่ผิว ระหว่างผิวทางและผิวของมวลรวม แรงยึดเกาะนี้มีผลอย่างมากเมื่อผิวทางแห้ง และจะลดลงเมื่อมีสิ่งสกปรก หรือของเหลวใด ๆ มากั้นอยู่ระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผิวทางเปียก[11]

2.1.2 แรงฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Force) เป็นแรงที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานเมื่อผิวหน้ายางยุบตัว ขณะที่รถแล่นผ่านไปบนผิวมวลรวม คือ ถ้ายุบตัวลงไปมากก็จะเกิดการดูดกลืนพลังงานได้มาก แรงส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับชนิดของยางรถที่ใช้ และอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงแรงฮิสเตอรีซิส จะลดลง[12] และแรงส่วนนี้จะไม่ขึ้นกับสิ่งหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัสเลย

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance Parameters)[2]

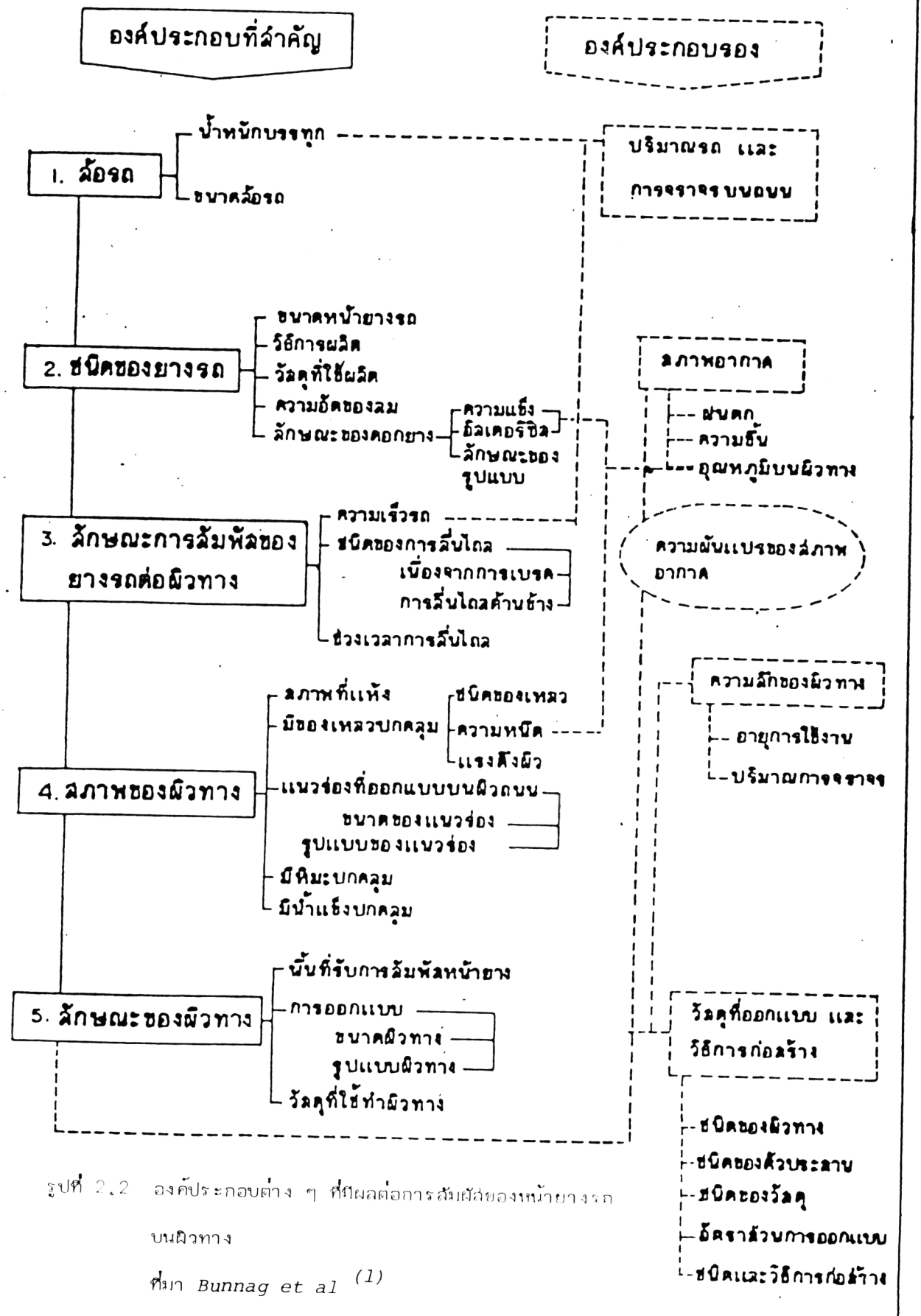
ในขณะที่ยวดยานวิ่งอยู่บนผิวทางสาเหตุส่วนใหญ่ของการลื่นไถล ของยวดยานไปจากทิศทางเดิมมักจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ อาทิเช่น สภาพยวดยานที่ใช้ , ปฏิกิริยาของผู้ขับขี่ , ความเร็วของยวดยานที่แล่นบนผิวทาง และสำคัญที่สุดคือ ความเสียดทานระหว่างผิวทางและผิวหน้ายองยางรถ ได้มีผู้ศึกษาถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสัมผัสของหน้ายางรถบนผิวทาง ออกเป็น องค์ประกอบหลักที่สำคัญซึ่งมีผลต่อความต้านทานการลื่นไถลโดยตรง และองค์ประกอบรอง ซึ่งควรจะนำไปพิจารณาในการออกแบบถนนควบคู่ไปกับองค์ประกอบหลักที่สำคัญด้วย ดังรายละเอียดในรูปที่ 2.2[1] ดังนั้นเราอาจจะแบ่งกลุ่มปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความต้านทานการลื่นไถลได้เป็น 3 กลุ่มคือ

กลุ่มที่ 1 เกี่ยวกับสภาพของผิวทาง (Pavement Surface Condition) มีตัวแปร (Parameters) ที่สำคัญ คือ คุณสมบัติและลักษณะของวัสดุมวลรวม (Aggregate Characteristics) และลักษณะผิวทาง (Surface Texture)

กลุ่มที่ 2 เกี่ยวกับสภาพของยวดยาน (Vehicle Condition) มีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ คุณสมบัติของยางรถ (Rubber Properties) และลักษณะของดอกยาง (Tread Pattern)

กลุ่มที่ 3 เกี่ยวกับสภาวะของการใช้งานผิวทาง (Operation Condition) มีตัวแปรที่สำคัญคือ อุณหภูมิ (Temperature) และ ความเร็วของยวดยาน (Vehicle Speed)

2.2.1 คุณสมบัติและลักษณะของวัสดุมวลรวม มีผลต่อความต้านทานการลื่นไถล โดยสามารถพิจารณาได้ 2 ประการ คือ



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสัมผัสของหน้ายางรถบนผิวทาง

ที่มา *Bunnag et al* (1)

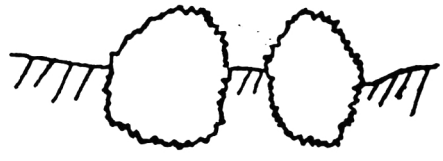
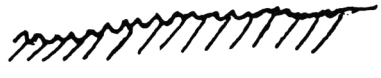
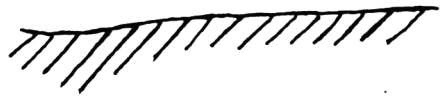
2.2.1.1 ชนิดและรูปร่างของวัสดุ พบว่า วัสดุที่แข็ง มีเหลี่ยมมุม (Angular) มีความแข็งแรงและทนทานต่อการขัดสีของดอกยางรถ จะสามารถเจาะทะลุฟิล์มน้ำที่อยู่ระหว่างหน้ายางและผิวทาง ทำให้เกิดผิวสัมผัสของหน้ายางกับผิวทาง เกิดแรงยึดเกาะได้ดีขึ้น เป็นผลให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลสูงกว่าวัสดุที่มีผิวเรียบหรือผิวมน (Rounded Aggregates)[2] และวัสดุที่เนื้อผิวมีรูพรุน (Porous Aggregates) จะให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลสูงกว่าวัสดุเนื้อแน่น Hosking[4] ได้ทำการศึกษาวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่มีเนื้อพรุน พบว่า ความต้านทานการลื่นไถลจะเป็นสัดส่วนกับความพรุน และเขายังได้ศึกษาถึงการนำดินมอล์ไซท์ที่มีอลูมินาสูงมาเผา พบว่า เมื่อความพรุนของดินหลังเผาเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานการลื่นไถลจะดีขึ้น แต่ค่าความลึกหรอจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยเขาได้สรุปผลว่า ปริมาณรูพรุนที่ดีที่สุดอยู่ในช่วง 25-35% คือ ให้ค่า PSV และ AAV พอเหมาะในการใช้งานผิวทาง

2.2.1.2 ความสามารถในการระบายน้ำของผิวทาง (Surface Drainage) พบว่า ค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางที่เปียกจะลดลง เมื่อความหนาของฟิล์มน้ำบนผิวทางมากขึ้น ดังนั้น มวลรวมที่มีผิวมหภาคและจุลภาคที่ดี มีความพรุน จะสามารถช่วยดูดซับน้ำหรือระบายน้ำออกจากผิวสัมผัสของหน้ายางและผิวทางได้ดีและรวดเร็ว ทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลสูงขึ้น

2.2.2 ลักษณะผิวทาง สามารถพิจารณาได้ในลักษณะของผิวมหภาคและผิวจุลภาค ได้ดังนี้

2.2.2.1 ผิวมหภาค (Macro Texture) หมายถึง ผิวขนาดใหญ่เป็นการพิจารณาในลักษณะ Large-Scale Texture ของขนาด รูปร่าง และลักษณะผิววัสดุมวลรวม ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงลักษณะหยาบหรือละเอียดของผิวทางโดยทั่วไป ผิวมหภาคที่ดีจะต้องระบายน้ำหรือระบายน้ำออกจากผิวสัมผัสของหน้ายางรถได้ดี และสามารถช่วยให้ยางยุบตัวในขณะที่รถวิ่งบนผิวทางด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดแรงฮิสเตอรีซีสขึ้น

2.2.2.2 ผิวจุลภาค (Micro Texture) หมายถึง ผิวของมวลรวมแต่ละก้อนบนผิวทาง ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละก้อน เป็นการพิจารณาเป็นลักษณะ Small-Scale Texture ของผิวทาง ผิวจุลภาคที่ดีจะต้องมีความแข็ง ความหยาบหรือขรุขระเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการลื่นไถลของรถที่แล่นด้วยความเร็วระดับหนึ่งระดับใดตามที่ออกแบบไว้[13] ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3

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

รูปที่ 2.3 ภาพแสดงความแตกต่างของลักษณะผิวทาง [20]

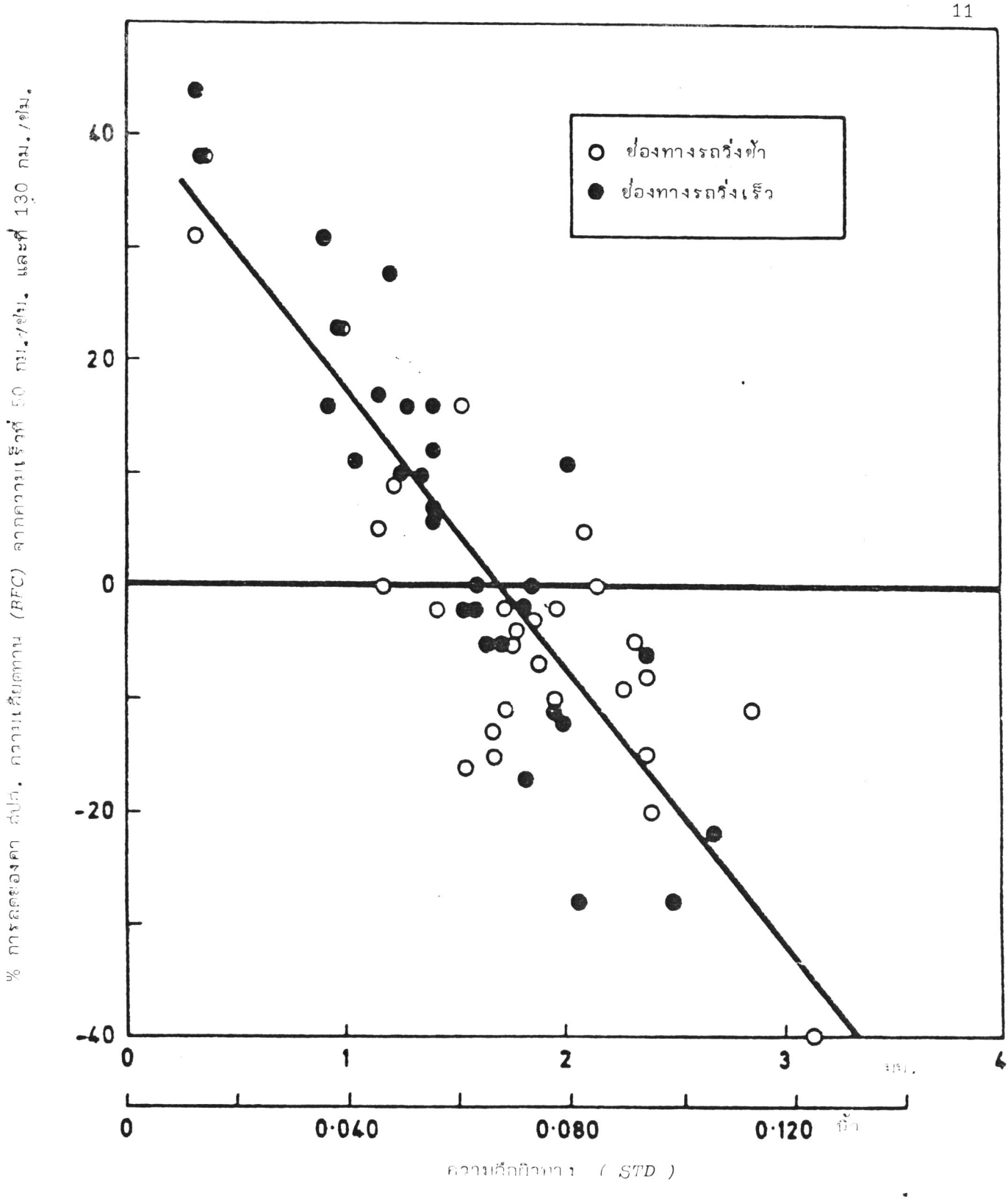
จากประสบการณ์ที่ผ่านมา พบว่าลักษณะของผิวทางที่มีลักษณะคล้ายกระดาษทรายหยาบ (Sandpaper Texture) มักจะให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลสูง[2] ส่วนวิธีที่ใช้ในการหาค่าความลึกผิวของผิวทาง (Texture Depth) อาจทำได้หลายวิธีคือ การใช้รูป-ถ่ายกับหมึกพิมพ์ และวิธี Sand-Patch[2] ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4

Lupton, G.N.[20] ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ของค่าความลึกผิวทางและการลดลงของค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางในรูปของค่า BFC ระหว่างความเร็วที่ 50 และ 130 กม./ชม. ตามรูปที่ 2.4 พบว่าความลึกผิวที่น้อยกว่า 250 μm (0.010 นิ้ว) ในถนนที่ใช้ความเร็วสูงนั้น ค่า BFC ที่ความเร็วจาก 50-130 กม./ชม. จะลดลงอย่างมากและถ้าความลึกผิวมากกว่า 650 μm. (0.025 นิ้ว) ค่า BFC จะลดลงโดยเฉลี่ยประมาณ $\frac{1}{4}$ ของค่า BFC ที่ความเร็ว 50 กม./ชม. ดังนั้นจึงอาจจะกำหนดความลึกผิวทางอย่างน้อยที่สุดสำหรับถนนที่ใช้ความเร็วสูงเท่ากับ 250 μm. เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ขับขี่ยวดยาน

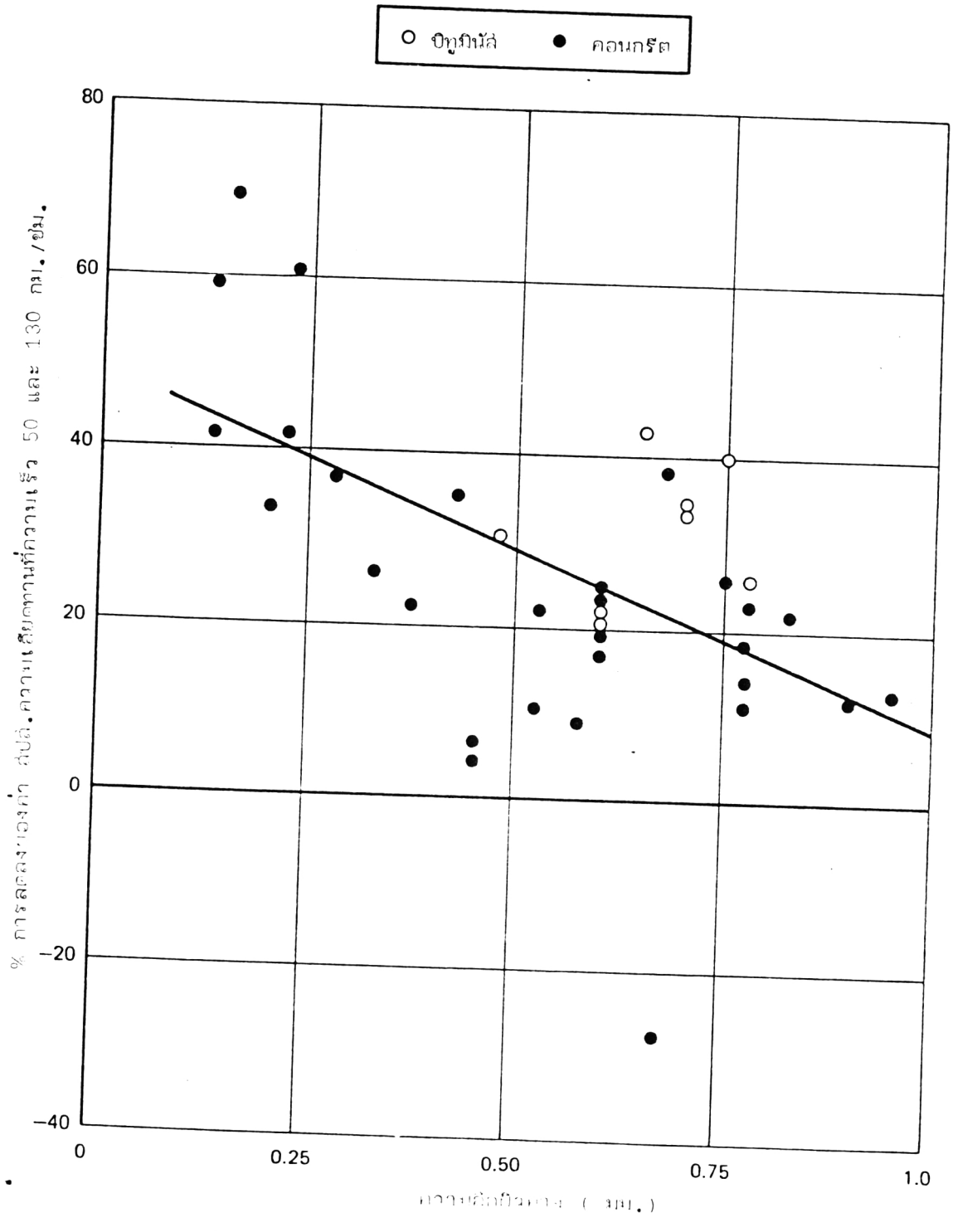
Sabey, B.E.[7] ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ของค่าความลึกผิวทางและการลดลงของค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางในรูปของค่า BFC ระหว่างความเร็วที่ 50 และ 130 กม./ชม. ของผิวทางคอนกรีตและผิวทางลาดยางตามรูปที่ 2.5 ซึ่งได้ข้อสรุปผลที่ใกล้เคียงกับ Lupton

ส่วนตัวแปรหรือตัวประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางก็คือ อัตราส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ (Mix Proportions) ในการออกแบบ, คุณสมบัติของวัสดุประสานบิทูมินัส (Bituminous Binder) ที่ใช้ ตลอดจนถึงวัสดุอื่นที่มีบนผิวทาง เช่น ฝุ่นละออง (Loose Dust), กรวด (Grit) เป็นต้น กล่าวคือ ถ้าอัตราส่วนของยางแอสฟัลท์ไม่เหมาะสมกับปริมาณวัสดุมวลรวมคือ มีปริมาณยางมากเกินไป อาจทำให้เกิดการเยิ้ม (Bleeding) ของยางบนผิวทางขึ้นจนเกิดการลื่นไถล (Slippery) ขึ้น ซึ่งมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานลดต่ำลง สำหรับผิวทางที่มีฝุ่นละออง คราบน้ำมันและอื่น ๆ สะสมอยู่จนเกิดคราบแผ่นฟิล์มขึ้น (Traffic Film) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในสภาพเปียกจะยิ่งทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลลดลงอย่างมากเช่นกัน

2.2.3 <u>คุณสมบัติของยางรถ</u> ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความต้านทานการลื่นไถลด้วยคุณสมบัติฮิสเตอรีซีสของมัน จากการศึกษาพบว่า ยางที่มีคุณสมบัติฮิสเตอรีซีสสูงจะมีผลทำให้ความผิดของผิวทางมีมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนผิวทางที่หยาบซึ่งมีการยุบตัวของหน้ายางมากจะ



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การลดลงของค่า สปส.ความเสียดทาน (BFC) กับความลึกบิดทาง (STD) ของถนนในช่องทางรถวิ่งช้าและช่องทางรถวิ่งเร็ว



รูปที่ 2.5 แสดงขนาดของความฝืดของทางที่ใช้ยางรถ การลดลงของค่า สปส.ความเสียดทาน (BFC) ที่ความเร็ว 50 และ 130 กม./ชม.

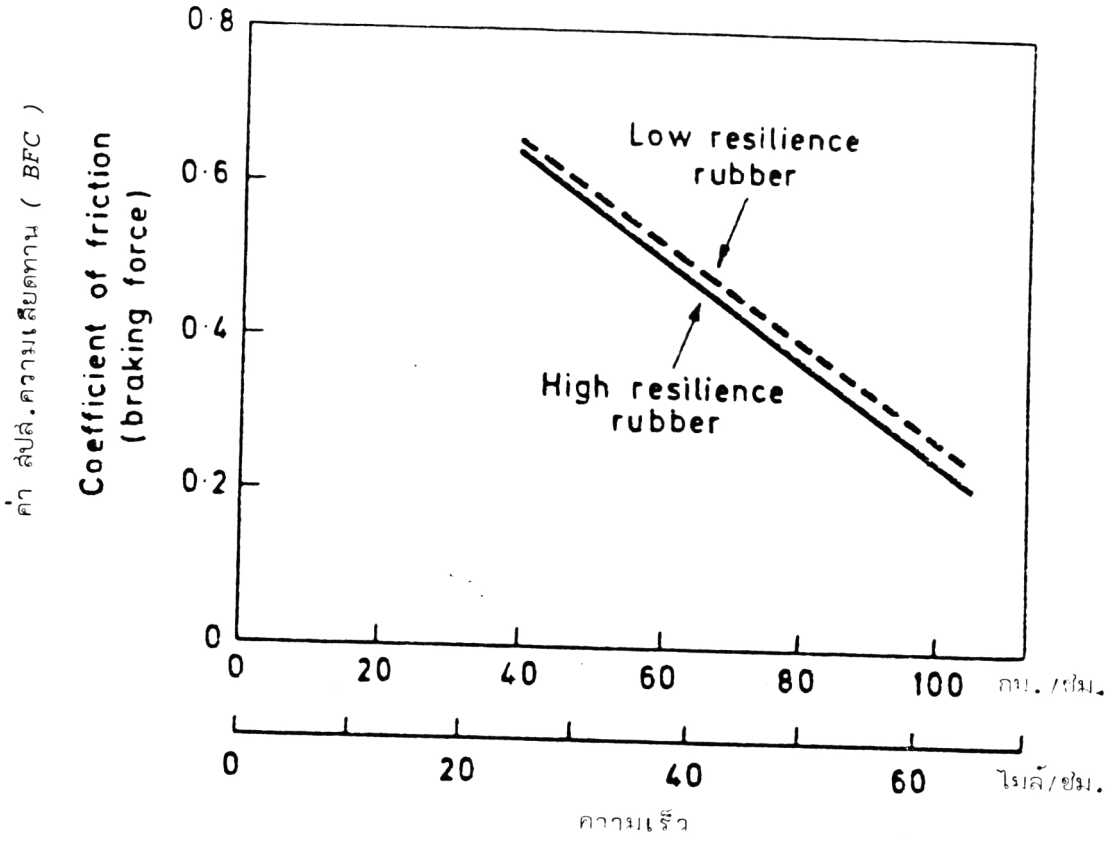
ทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลเพิ่มขึ้นถึง 20 เปอร์เซนต์[2] ความแข็งของดอกยางก็มีผลเช่นกันในกรณีผิวทางที่เรียบ หรือผิวทางที่มีน้ำแข็งปกคลุม โดยยางที่มีดอกยางแข็งจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสบนผิวทางมีน้อย ความกดดันที่ผิวสัมผัสสูง การระบายน้ำเร็วขึ้นมีผลให้ความฝืดของผิวทางมีเพิ่มขึ้น

Lupton, G.N.[20] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติฮิสเตอรีซีสของยางรถต่อค่า สปส.ความเสียดทานของผิวทาง (BFC) บนผิวทางเรียบและหยาบ เมื่อความเร็วต่าง ๆ กันในสภาพผิวทางเปียกตามรูปที่ 2.6 พบว่า บนผิวทางหยาบยางรถที่มีคุณสมบัติฮิสเตอรีซีสสูง (ค่าความยืดหยุ่นต่ำ) จะมีค่า BFC สูงกว่ายางรถที่มีคุณสมบัติฮิสเตอรีซีสต่ำ ส่วนบนผิวทางเรียบคุณสมบัติทางด้านฮิสเตอรีซีสจะมีผลต่อค่า BFC น้อย

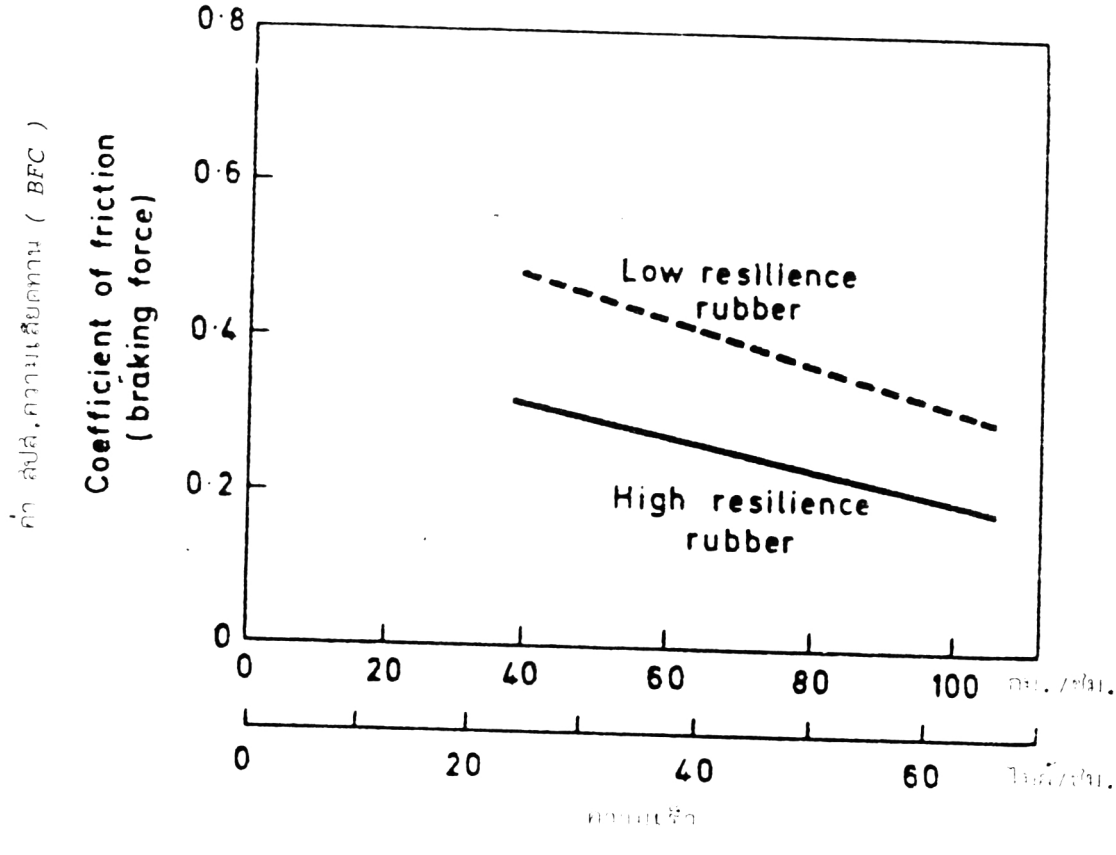
2.2.4 <u>ลักษณะของดอกยาง</u> ลักษณะของดอกยางที่ดีจะต้องมีแนวสันตามเส้นรอบวง (Circumferential Ribs)และมีร่องตามแนวขวาง (Transverse Slots) ทำให้เกิดความต้านทานการลื่นไถลเพิ่มขึ้นมากกว่ายางที่ไม่มีดอกยางโดยเฉพาะเมื่อผิวทางเปียก เนื่องจากดอกยางจะช่วยการระบายน้ำออกจากผิวสัมผัสได้เร็วกว่านั่นเอง และอีกประการหนึ่งยางที่มีดอกยางดีจะทำให้การลื่นไถลลดน้อยลงเมื่อยวดยานวิ่งด้วยความเร็วสูง ทำให้เพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่ด้วย

Lupton, G.N.[20] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของลักษณะดอกยาง (Tread Pattern) ที่มีต่อค่า สปส. ความเสียดทานของผิวทาง (BFC) บนผิวทางเรียบและหยาบ เมื่อความเร็วต่าง ๆ กันในสภาพผิวทางเปียก ตามรูปที่ 2.7 พบว่า <u>ในกรณีความเร็วต่ำ</u> (Low Speeds) ลักษณะของดอกยางจะมีผลไม่มากนักต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางขณะเปียกทั้งผิวทางเรียบและหยาบ แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะผิวมหภาคและผิวจุลภาคของผิวทางมากกว่าอย่างอื่น ถ้าผิวทั้งสองเรียบมาก ค่าความต้านทานการลื่นไถลจะต่ำ <u>ในกรณีความเร็วสูง</u> (High Speed) บนผิวทางเรียบ ดอกยางรถจะมีส่วนสำคัญต่อค่า BFC มากกว่าผิวทางหยาบคือยางรถที่ไม่มีดอกยาง (Smooth Tyre) ค่า BFC จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วสูงขึ้น ส่วนยางที่มีดอกยาง (Patterned Tyre) ค่า BFC จะค่อย ๆ ลดลงด้วยอัตราคงที่ (เป็นเส้นตรง)

Maycock, G.[21] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับลักษณะดอกยางรถที่มีผลมากที่สุดต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลพบว่า ความกว้างของร่องดอกยาง (Grooves) จะมี

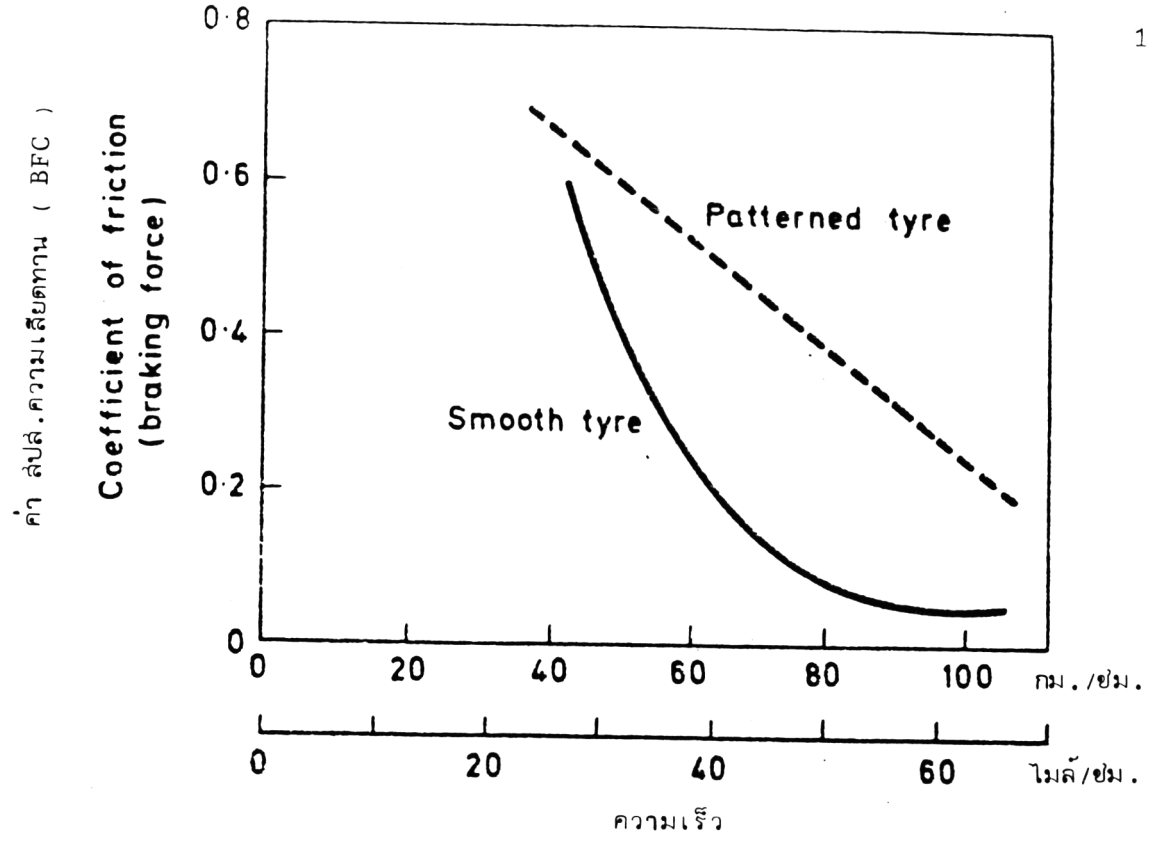


a) บนผิวทางเรียบ รูป C

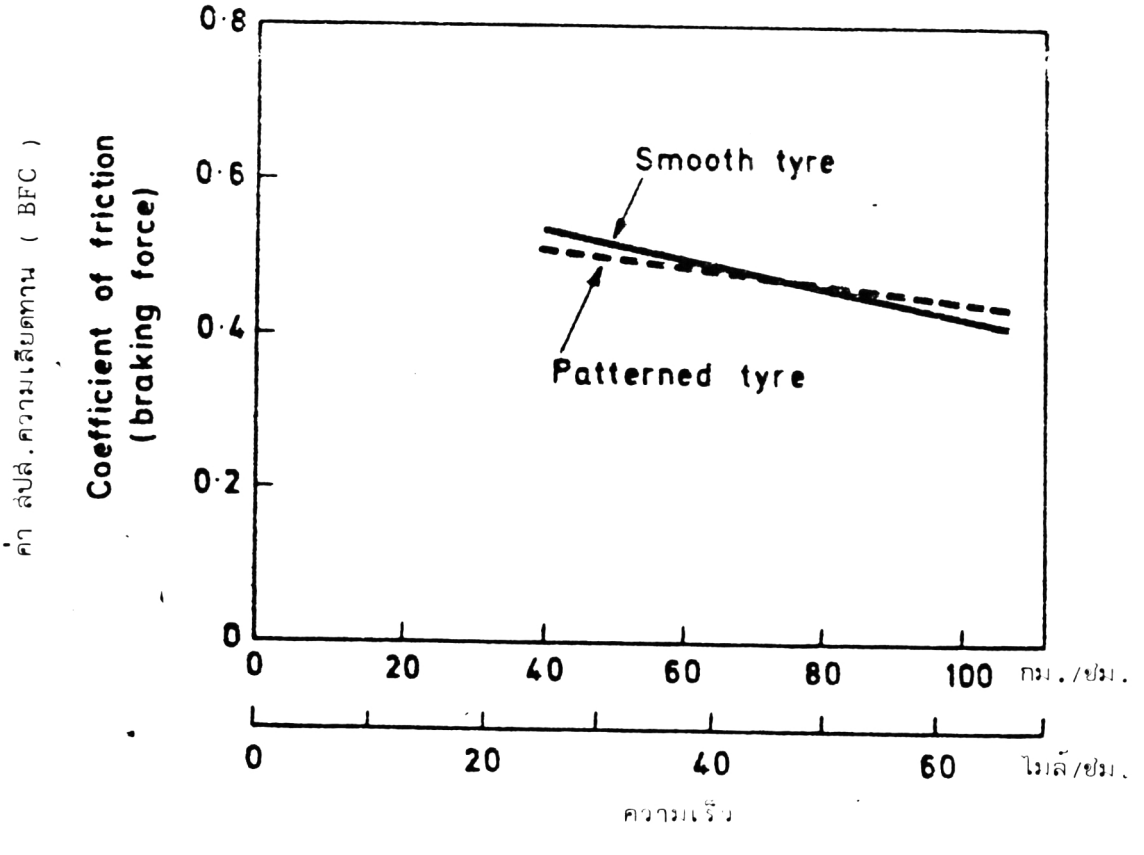


b) บนผิวทางขรุขระ รูป A

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดกับความเร็ว ของยางที่มีความยืดหยุ่นของดอกยางต่างกัน (Tread Resilience) บนผิวทางเรียบและขรุขระของผิวทางแบบต่างๆ



a) บนผิวทางเรียบ รูป C



b) บนผิวทางหยาบ รูป A

รูปที่ 2.7 ผลของลักษณะดอกยางบนผิวทางเรียบและหยาบ ในสภาพผิวทางเปียกที่มีต่อ ค่า สปส.ความเสียดทาน (BFC)

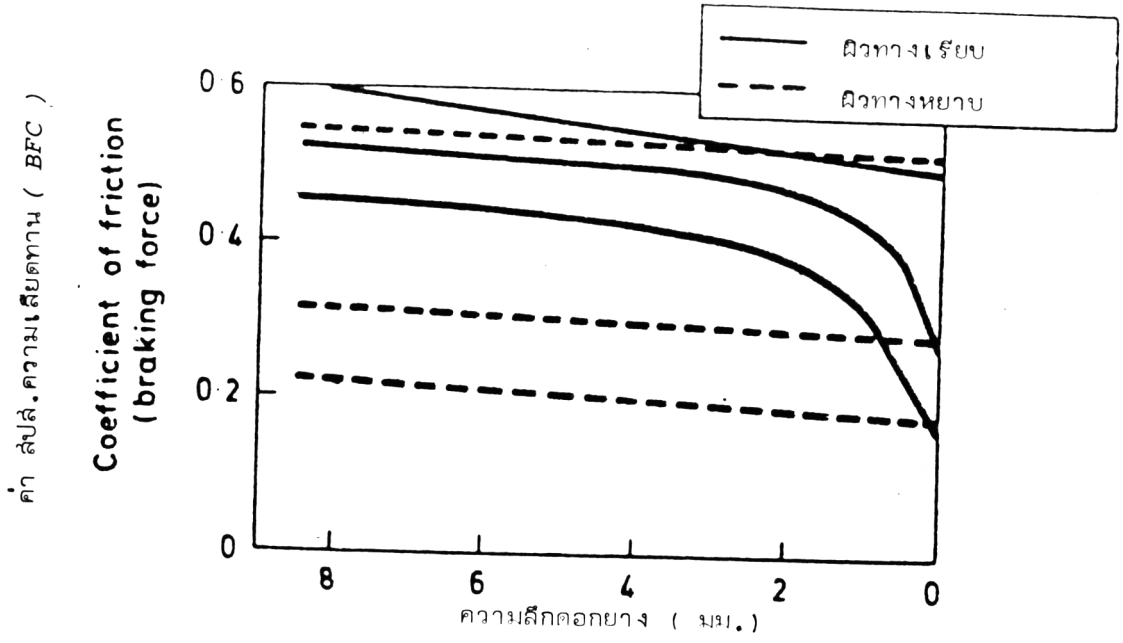
009516

ผลต่อการระบายน้ำออกจากผิวสัมผัสได้มากกว่าจำนวนของลัน (RIBS) ขณะผิวทางเปียกทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลสูงขึ้น (ค่า BFC มากขึ้น)

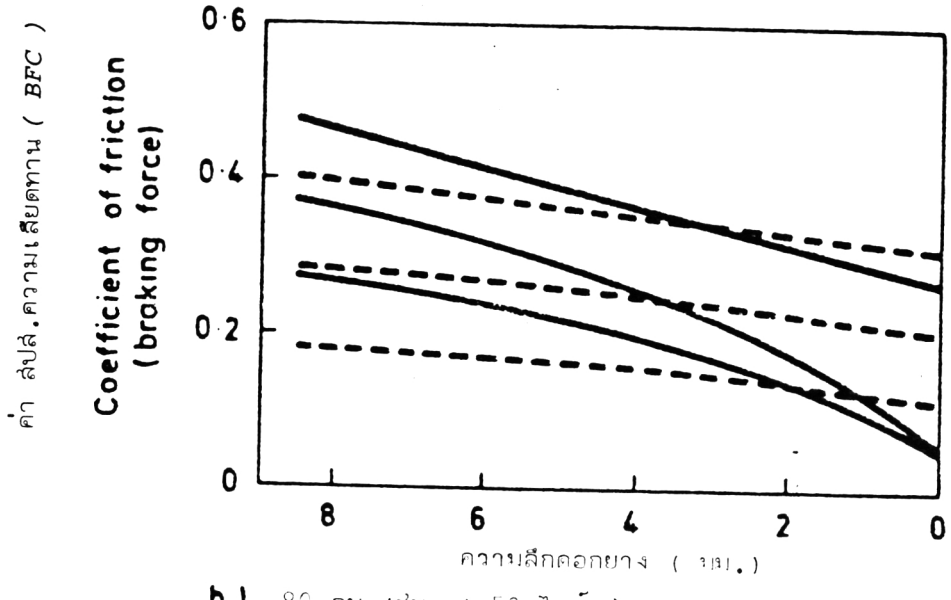
Sabey, B.E.[22] พบว่า ในขณะผิวทางเปียกแรงดึงดูด (Adhesion) ระหว่างผิวทางและยางรถจะลดลงเมื่อความลึกของดอกยางลดลง เนื่องจากความลึกหรอ ตามรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของค่า BFC และความลึกของดอกยาง (Tread Depth) ที่ความเร็วต่าง ๆ กันคือ 50, 80 และ 130 กม./ชม. บนผิวทางเรียบและหยาบ พบว่า บนผิวทางหยาบที่ความเร็วต่าง ๆ กันค่า BFC จะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แม้ว่าความลึกของดอกยางจะน้อยก็ตามเนื่องจากความหยาบของผิวทางเพียงพอที่จะระบายน้ำออกจากผิวสัมผัสได้ ส่วนบนผิวทางเรียบมาก ๆ (ความลึกผิวประมาณ 125 μm.) โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ (50-80 กม./ชม.) ค่า BFC จะลดลงอย่างมากเมื่อความลึกของดอกยางน้อยกว่า 1-2 มม. และมีข้อน่าสังเกตอีกประการหนึ่งคือ บนผิวทางเรียบที่ความเร็วสูง ๆ (130 กม./ชม.) แม้ว่าจะใช้ยางรถใหม่ที่มีความลึกของดอกยางมาก ก็ไม่ได้ทำให้ค่า BFC เพิ่มมากขึ้นกว่าเมื่อใช้ยางที่มีความลึกดอกยางน้อยแต่อย่างใด เช่นเดียวกับบนผิวทางหยาบแสดงว่า ลักษณะดอกยางไม่สามารถชดเชยความหยาบของผิวทางได้เลยโดยเฉพาะที่ความเร็วสูง ๆ

2.2.5 <u>อุณหภูมิ</u> จากผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่า ค่าความต้านทานการลื่นไถลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิ (ของลิ่งแวดล้อม, ผิวทางและยางรถ) สูงขึ้น โดยทั่วไปค่า สปส. ความเสียดทานจะลดลงประมาณ 0.02 เมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นทุก $10^{o}F$[2] อุณหภูมิมีส่วนทำให้ความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางลดลง และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อความหนืดของยางแอสฟัลท์ ดังนั้น ในสภาพผิวทางแห้งเมื่ออุณหภูมิสูงถึง $1,000^{o}F$ ยางแอสฟัลท์จะเกิดการเยิ้มเหลว (Melting) ทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลลดลง ฤดูกาลก็มีส่วนทำให้ความต้านทานการลื่นไถลเปลี่ยนไปได้เช่นกัน จากการศึกษาของ Giles et al[14] พบว่าในฤดูหนาวความต้านทานการลื่นไถลจะมีค่าสูงกว่าในฤดูร้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงผิวจุลภาคของผิวทาง ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิ, ปริมาณน้ำฝนและฝุ่นบนผิวทาง ฝุ่นละเอียดซึ่งมีมากในฤดูร้อนทำให้เกิดการขัดสีวัสดุ ผิวจุลภาคจะลื่นขึ้น เมื่อฝนตกฝุ่นนี้จะหายไปผิวทางจะหยาบ ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลเพิ่มขึ้น

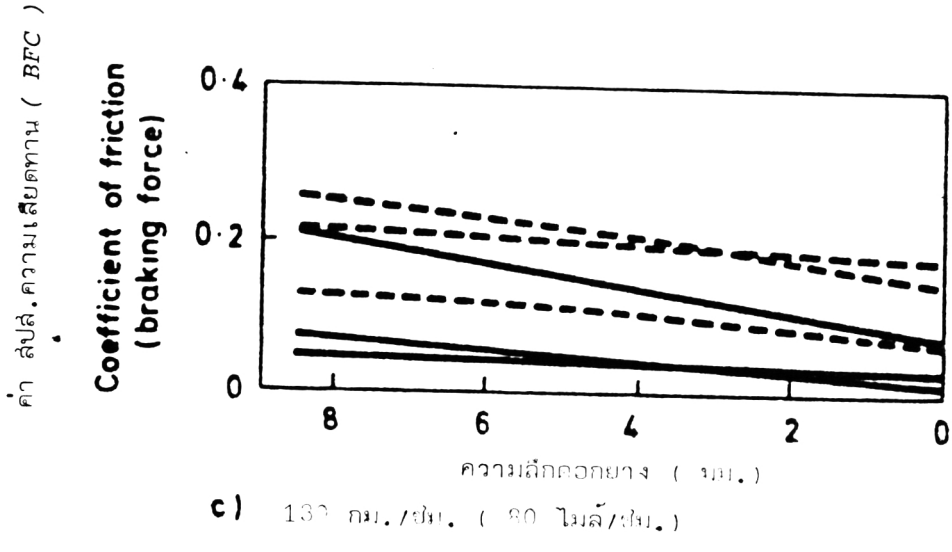
จากข้อสรุปของ Hosking และ Woodford[23] เกี่ยวกับผลของอุณหภูมิต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น $1^{o}C$ ค่า SFC จะลดลงประมาณ 0.003



a) 50 กม./ชม. (30 ไมล์/ชม.)



b) 80 กม./ชม. (50 ไมล์/ชม.)



c) 130 กม./ชม. (80 ไมล์/ชม.)

รูปที่ 2.8 แสดงผลของความลึกดอกยาง ต่อ ค่า สัปส่.ความเสียดทาน (BFC) บนผิวทางเปียก

หน่วย. ต่อมา Sabey, B.E.[22] ได้ทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางที่วัดด้วย BPT บนผิวทางคอนกรีตและผิวทางลาดยางในช่วงอุณหภูมิ 7-35°C พบว่า ค่าความต้านทานการลื่นไถลจาก BPT (SRV) จะลดลง 0.26 หน่วย ต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 1°C (ซึ่งมีค่าประมาณ 0.003 หน่วยของ SFC) และ Sabey ยังได้หาความสัมพันธ์ของค่า SFC ที่อุณหภูมิใด ๆ (SFC_t) กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (t) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นการ plot ค่า $\frac{SFC_t}{SFC_{20^oC}}$ กับอุณหภูมิ (t) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ 2 รูปแบบ คือ

รูปแบบที่ 1. $\frac{SFC_t}{SFC_{20^oC}} = 1.106 - 0.0054t$ (ค่า Correlation Coef.; r = -079)

รูปแบบที่ 2. $\frac{SFC_t}{SFC_{20^oC}} = 0.748 + \frac{44.69}{t + 80}$ (ค่า Correlation Coef.; r = 0.81)

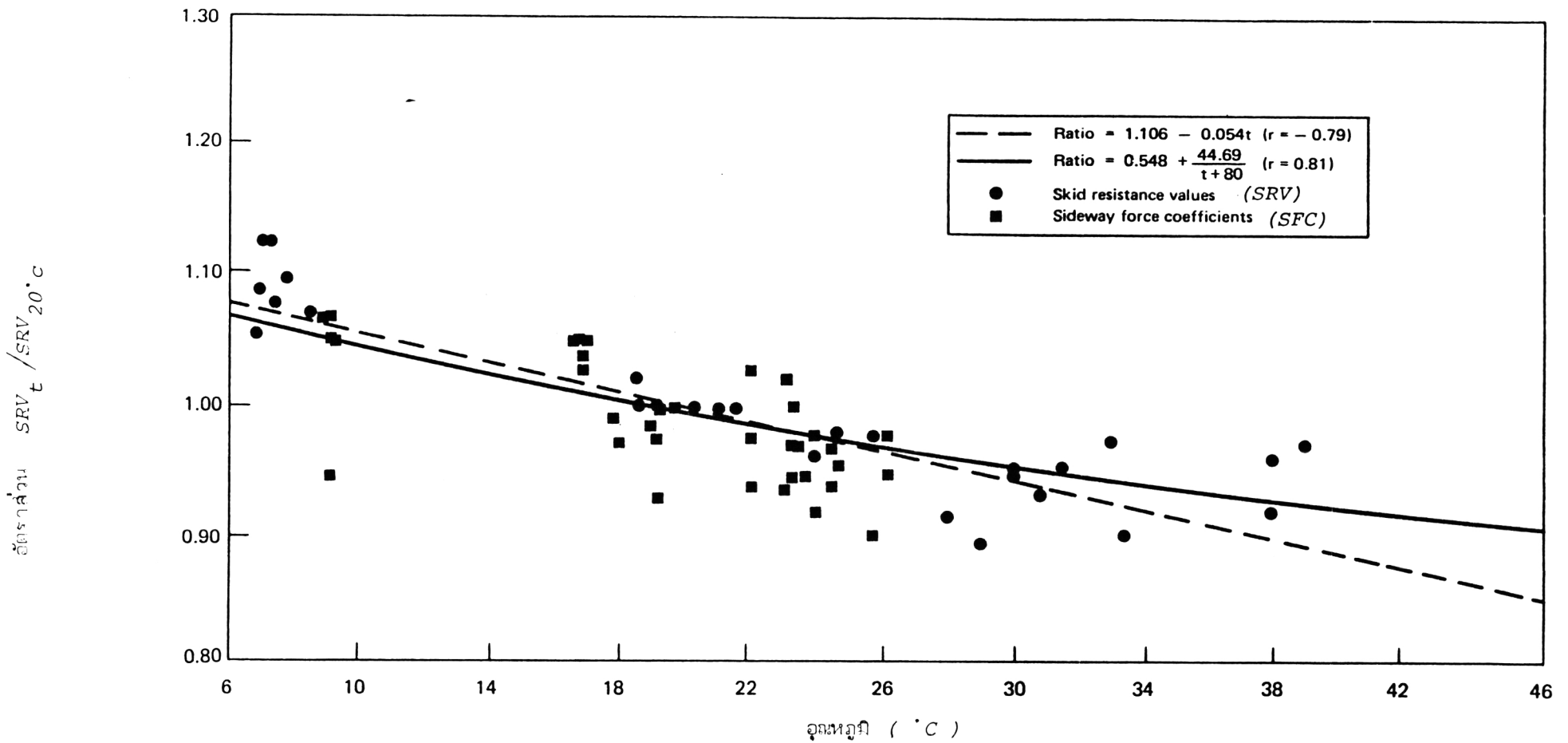
เมื่อ SFC_t, SFC_{20^oC} คือ ค่า SFC ที่อุณหภูมิใด ๆ และที่อุณหภูมิ 20°C ตามลำดับ

t คือ อุณหภูมิที่ทำการวัดค่า SFC เป็น °C

2.2.6 <u>ความเร็วของยวดยาน</u> จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ความต้านทานการลื่นไถลโดยเฉพาะในผิวทางเปียกจะลดลง เมื่อความเร็วของยวดยานบนผิวทางเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความเร็วสูงน้ำที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสของยางรถและผิวทางไม่สามารถระบายออกไปจากผิวสัมผัสได้ทัน ทำให้เกิดการลื่นไถลขึ้นจะเกิดปรากฏการณ์ไฮโดรเพลนนิ่ง (Hydroplaning) ขึ้น ซึ่งภายใต้สภาวะเช่นนี้ Horne[15] ได้ศึกษาพบว่า เมื่อความเร็วของยวดยานสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการรับน้ำหรือระบายน้ำออกจากผิวสัมผัสไม่ทันจะเกิดแรงดันระหว่างผิวทางและหน้ายาง (Hydrodynamic Lift) สูงขึ้นจนถึงระดับเดียวกันกับแรงดันที่ยางที่ต่อผิวทาง ทำให้ยางร่อนไปบนผิวน้ำ (ยวดยานจะแล่นแฉลบ) จะเกิดอันตรายต่อผู้ขับขี่ได้ ต่อมาได้มีการทดลองเกี่ยวกับความเร็วของยวดยานในขณะเกิดไฮโดรเพลนนิ่ง (Hydroplaning Speed) โดยพบความสัมพันธ์จากการทดลองดังนี้

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

เมื่อ V_h = ความเร็วของยวดยานขณะเกิดไฮโดรเพลนนิ่ง หน่วยเป็น ไมล์/ชั่วโมง



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิ

K = ค่าคงตัวที่ได้จากการสังเกตทดลอง (Empirical Constant) ซึ่งมีค่าประมาณ 10

p = ความดันของยางรถ (Inflation pressure) หน่วยเป็น ปอนด์/ตารางนิ้ว

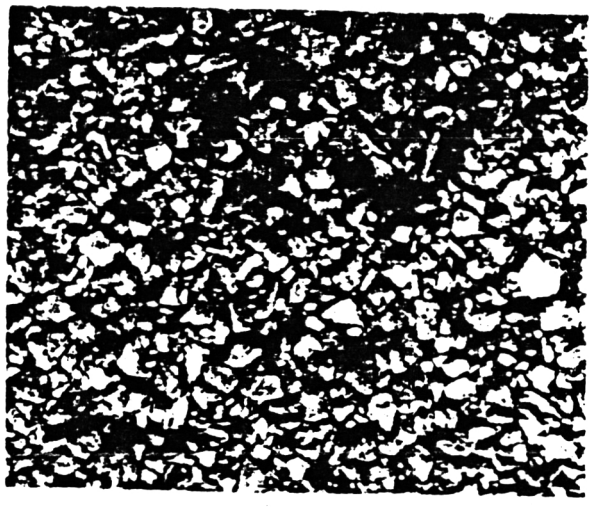
จากความสัมพันธ์นี้ เราอาจจะจำกัดความเร็วของยวดยานในสภาวะผิวทางเปียกเพื่อมิให้เกิดปรากฏการณ์ไฮโดรเพลนนิ่งกับยวดยานที่ความดันยางรถต่าง ๆ กันได้ วิธีการป้องกันไม่ให้เกิดปรากฏการณ์นี้ อาจทำได้โดยลดความหนาของชั้นผิวน้ำ (Water Layer) ไม่ให้เกิน 0.40 นิ้ว[2] (ในที่นี้ขึ้นอยู่กับลักษณะผิวทาง) ด้วยการใช้ยางรถที่มีดอกยางดี, เพิ่มความดันลมของยางรถให้มากขึ้นและพยายามก่อสร้างผิวทางที่มีลักษณะหยาบ และมีผิวจุลภาค ผิวมหภาคที่ดี

Lupton, G.N.[20] ได้ทำการศึกษาถึงผลของความเร็ว (Speed) ที่ใช้ขณะวัด ซึ่งมีผลต่อค่า BFC ในสภาพเปียกบนผิวทางต่าง ๆ กัน 4 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 จะเห็นได้ว่า บนผิวทางเรียบที่มีผิวมหภาคน้อยคือ ผิวทาง C และ D ค่า BFC จะลดลงอย่างมากเมื่อความเร็วยวดยานเพิ่มขึ้น ส่วนบนผิวทางหยาบคือ ผิวทาง A และ B ระดับของค่า BFC จะลดลงไม่มากนัก แสดงว่า ผลของความเร็วที่มีต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลในรูปของ BFC จะขึ้นอยู่กับสภาพและลักษณะของผิวทางเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับการทดลองของ Research on Road Safety[24] ตามรูปที่ 2.12 และ 2.13

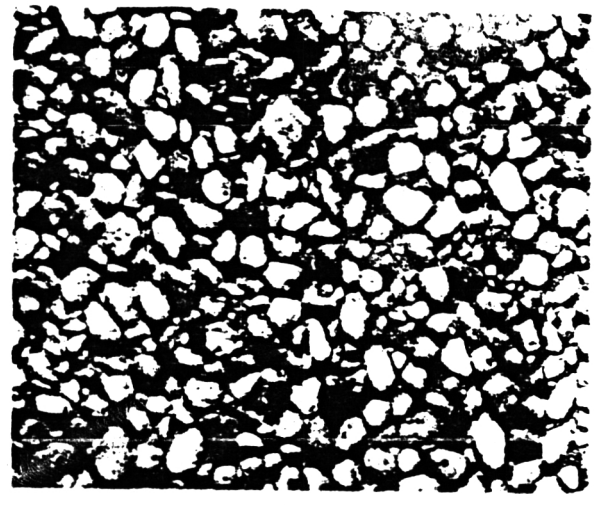
2.2.7 <u>ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลคือ</u> อายุการใช้งานของผิวทาง, ค่า PSV ของวัสดุมวลรวมที่ใช้และปริมาณการจราจรบนผิวทางซึ่งมีผลมากเช่นกัน โดย Salt, G.F.[8] ได้สรุปและรวบรวมผลจากการทดลองที่ผ่านมาพบว่า

2.2.7.1 บนผิวทางที่มีปริมาณการจราจรเท่ากัน ค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางจะลดลงเมื่ออายุการใช้งานของผิวทางเพิ่มขึ้น โดยจะลดลงมากในช่วงแรกของการใช้งาน และจะลดลงด้วยอัตราลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งค่าที่ลดลงนี้จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับค่า PSV ของวัสดุมวลรวมที่ใช้ (ถ้า PSV สูง ค่า SFC เมื่อเวลาผ่านไปจะสูงกว่าวัสดุที่มีค่า PSV ต่ำกว่า) ตามรูปที่ 2.14

2.2.7.2 บนผิวทางที่ใช้วัสดุมวลรวมที่มีค่า PSV อยู่ในระดับเดียวกันตามรูปที่ 2.15 (คือ ช่วง 58-60 หน่วย) พบว่า ผิวทางที่มีปริมาณการจราจรมากจะทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลลดลง เช่นเดียวกับรูปที่ 2.16 ซึ่งค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณการจราจรบนผิวทางลดน้อยลง



Surface A



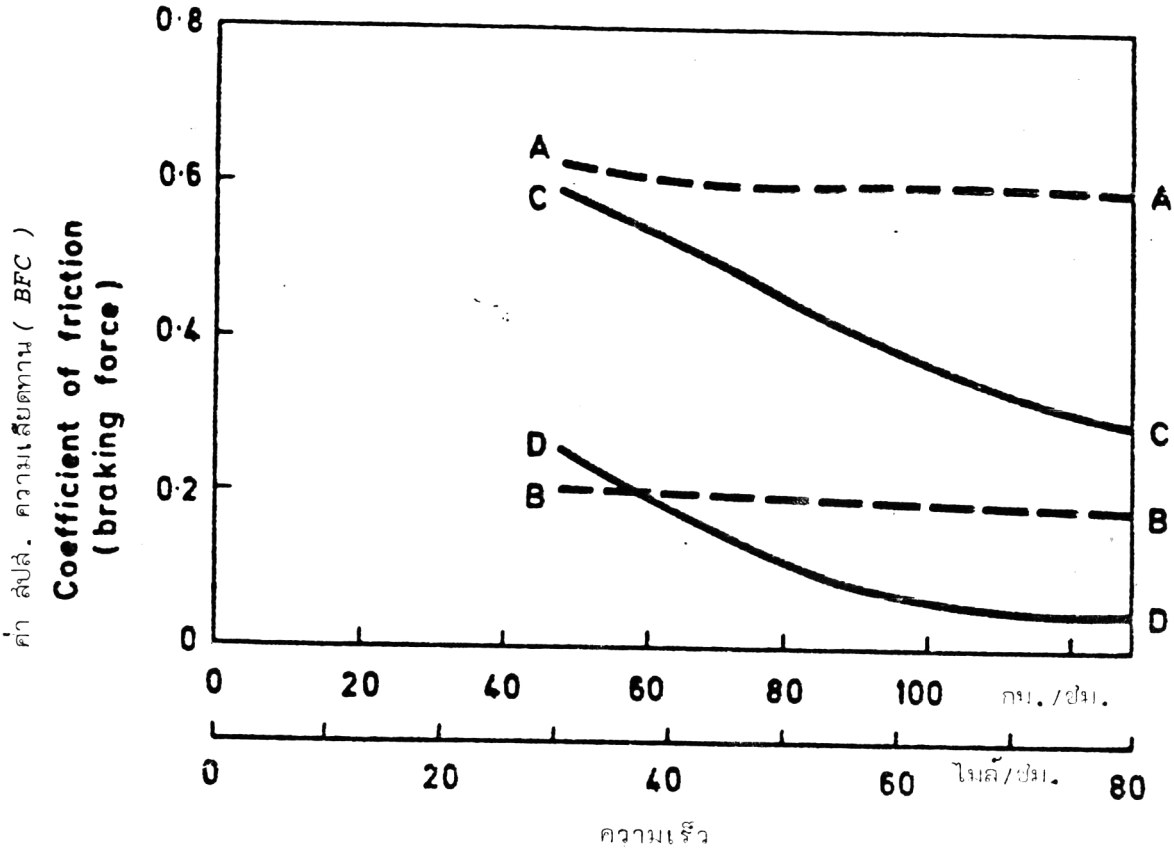
Surface B

Surface C

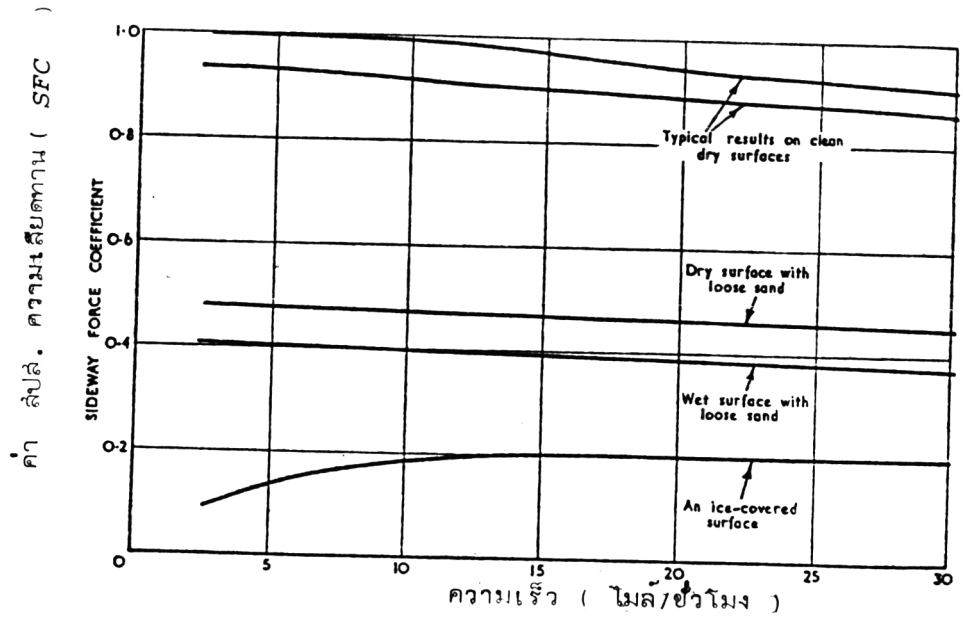
Surface D

รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะผิวทางประเภทต่าง ๆ ที่ทำการวัดค่า สปส. ความเสียดทาน (*BFC*)

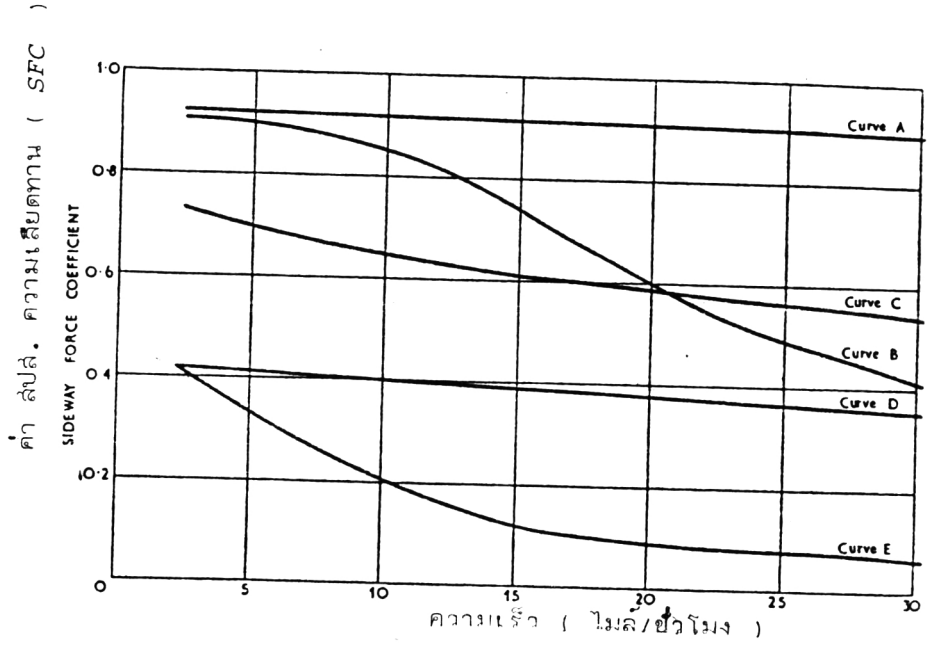
(มาตราส่วน 1 : 2)



รูปที่ 2.11 แสดงผลของ สัปส่. ความเสียดทาน (*BFC*) ของผิวทางที่ลักษณะผิวทางต่าง ๆ ตามรูปที่ 2.10 (วัดโดยใช้ดอกยางเรียบ)

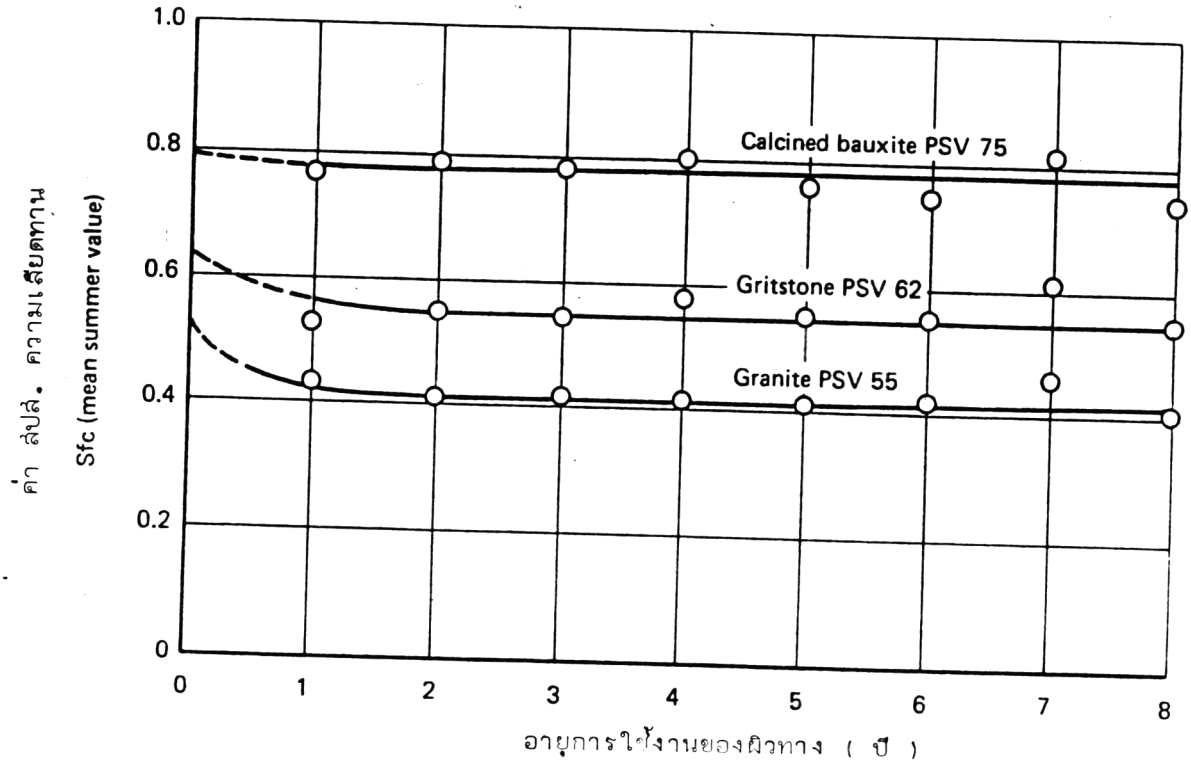


รูปที่ 2.12 แสดงผลของความเร็วยวดยานที่มีต่อ ค่า สัปส่.ความเสียดทาน (*SFC*) ใน สภาพผิวทางต่าง ๆ

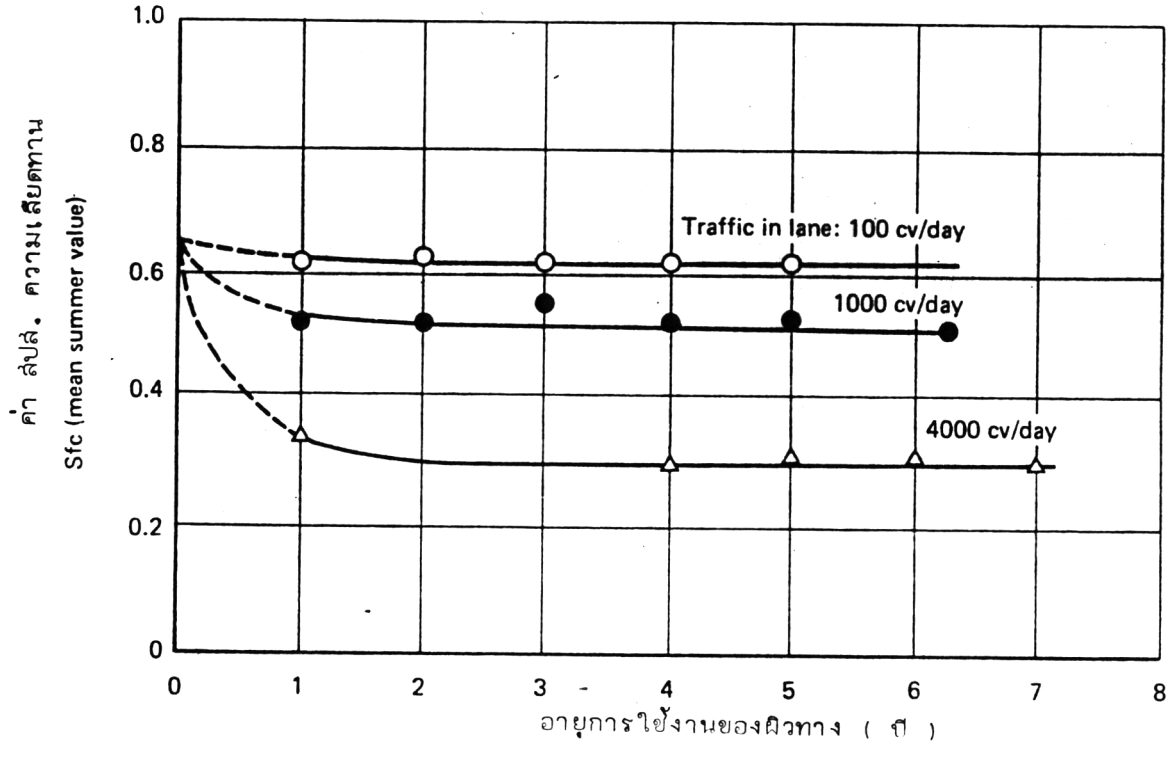


รูปที่ 2.13 แสดงผลของความเร็วยวดยานที่มีต่อ ค่า สัปส่.ความเสียดทาน (*SFC*) ใน สภาพผิวทางต่าง ๆ กันดังนี้

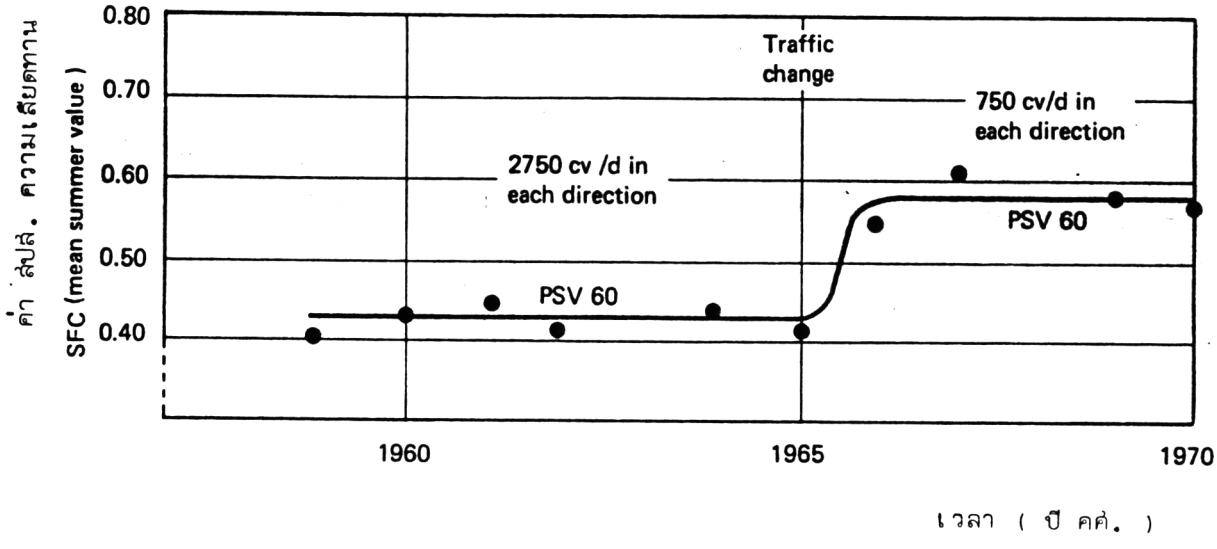
กราฟ *A* สภาพผิวทางดีมาก
กราฟ *B* และ *E* สภาพผิวทางค่อนข้างเรียบ และ เรียบมาก ตามลำดับ
กราฟ *C* และ *D* สภาพผิวทางหยาบมาก และ ค่อนข้างหยาบ ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 แสดงระดับค่า สปส. ความเสียดทาน (*SFC*) บนผิวทางชนิดต่าง ๆ (*Surface Dressing* โดยใช้ *Chippings* ขนาด 13 มม. มีปริมาณการจราจร 2,100 คัน ต่อ ช่องทางต่อวัน)



รูปที่ 2.15 แสดงผลของปริมาณการจราจรต่อ ค่า สปส. ความเสียดทาน (*SFC* ในฤดูร้อน) บนผิวทางมาตรฐาน *MOTORWAY (Rolled Asphalt* ด้วย *Precoated Chippings* ที่มีค่า *PSV* ในช่วง 58-60)



รูปที่ 2.16 แสดงการเพิ่มของค่า สปส. ความเสียดทาน (*SFC*) บนผิวทาง *Trunk Road A 4 , COLNBROOK BY-PASS* เมื่อการจราจรลดลง

2.3 ผลการศึกษาความต้านทานการลื่นไถลที่ผ่านมาในประเทศไทย[1, 17] อาจจะสรุปได้คือ

2.3.1 จากการวิเคราะห์ความผิดของผิวทางชนิดต่าง ๆ คือ คอนกรีต, แอสฟัลท์ติคคอนกรีต และแมคคาแดม โดยใช้หลักการของผิวมหภาคและผิวจุลภาค พบว่า ผิวทางในประเทศไทยทุกชนิดดังกล่าวมีระดับความผิดเพียงพอเมื่อผิวทางแห้ง แต่เมื่อผิวทางเปียกผิวทางประเภทแอสฟัลท์ติคคอนกรีต และแมคคาแดม จะมีความผิดต่ำกว่า

2.3.2 ความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางในสภาพผิวทางแห้งและเปียกจะเพิ่มขึ้น เมื่อความลึกผิวทาง (Surface Texture Depth) เพิ่มขึ้น

2.3.3 ความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางจะลดลง เมื่อความเร็วของยวดยานสูงขึ้นและอายุการใช้งานมากขึ้นทั้งในสภาพผิวทางแห้งและเปียก

2.3.4 ความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางดังกล่าว ค่าที่วัดได้ในสภาพผิวทางเปียกจะมีค่าน้อยกว่าในสภาพผิวทางแห้ง เมื่ออายุการใช้งานเท่ากัน

2.3.5 ความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางจะลดลง เมื่อความหนาของฟิล์มน้ำหรือชั้นน้ำบนผิวทางแอสฟัลท์ติคคอนกรีตเพิ่มขึ้น

2.3.6 สำหรับผิวทางแอสฟัลท์ติคคอนกรีตที่ใช้งานหนักมาประมาณ 2 ปี พบว่าความลึกผิวจะลดลงมาก เช่นเดียวกับค่าความต้านทานการลื่นไถลในสภาพผิวทางเปียกที่ลดลงจนอาจเป็นอันตรายต่อผู้ขับขี่ยวดยานได้

2.4 การศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการลื่นไถล

Maclean และ Shergold[16] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า PSV ที่วัดในห้องทดลองด้วยเครื่อง British Portable Tester และค่าความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance Value, SRV) ที่วัดในสนาม โดยการฝังหินตัวอย่างแบบต่าง ๆ บนถนนที่มีปริมาณการจราจรต่าง ๆ พบว่า ค่าทั้งสองคล้ายกันเมื่อถนนนั้นมีปริมาณการจราจรหนัก 60,000 ตัน/วัน และพบอีกว่าสภาพหินตัวอย่างที่ถูกขัดสีมากที่สุดในห้องทดลองจะมีสภาพเหมือนกับผิวทางจริงเมื่อเวลาผ่านไปคือ หินบนทางตรงจะถึงสภาพดังกล่าวเมื่อให้ยวดยานผ่านไปมาเป็นเวลา 45 วัน แต่บนทางโค้งจะถึงสภาพนี้ในเวลาเพียง 14 วัน เท่านั้น

Giles, et al[14] ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการลื่นไถลที่วัดโดยเครื่อง British Portable Tester กับเครื่องมือชนิดอื่นในสนามบนผิวทางจริง พบว่า ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมีความสัมพันธ์กันดีกับเครื่องมือที่ใช้ยางมีดอกยางที่ความเร็ว 30 ไมล์ต่อ ชั่วโมง ส่วนยางที่ไม่มีดอกยางค่าสัมพันธ์กันก็ต่อเมื่อวัดบนผิวทางที่หยาบ โดยค่าเฉลี่ยของ British Portable Tester จะสูงกว่าเครื่องมืออื่นประมาณ 5 หน่วย

Bunnag, S. และ Sukhawan, C.[1] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบผล และแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางระหว่างเครื่อง British Portable Tester กับมูมิเตอร์ (Mu-Meter, Side-Force Friction Test Trailer) โดยได้ทำการทดสอบบริเวณร่องล้อบนผิวทางต่าง ๆ กัน 14 จุดในสภาพผิวทางเปียกมีความหนาฟิล์มน้ำตลอดการทดสอบเท่ากับ 0.508 มม. ปรากฏผลว่า ค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ได้มาในรูปของ Mu-Meter Value (M-MV) ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ British Portable Tester Value (BPTV) มีความสัมพันธ์กันดีตามสมการ Regression Line, $Y = 1.09\ x + 17.45$ และมีค่าสัมประสิทธิ์ $r = 0.987$ ดังรูปที่ 2.17

Szatkowski และ Hosking[6] ได้ทดลองหาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการลื่นไถลที่วัดได้จากเครื่อง Side-Force Friction Tester (SFC) กับค่า PSV จากเครื่อง British Portable Tester ในห้องทดลองเมื่อทราบปริมาณการจราจรของยวดยานพาณิชย์ (Q_{cv}) ดังนี้ คือ

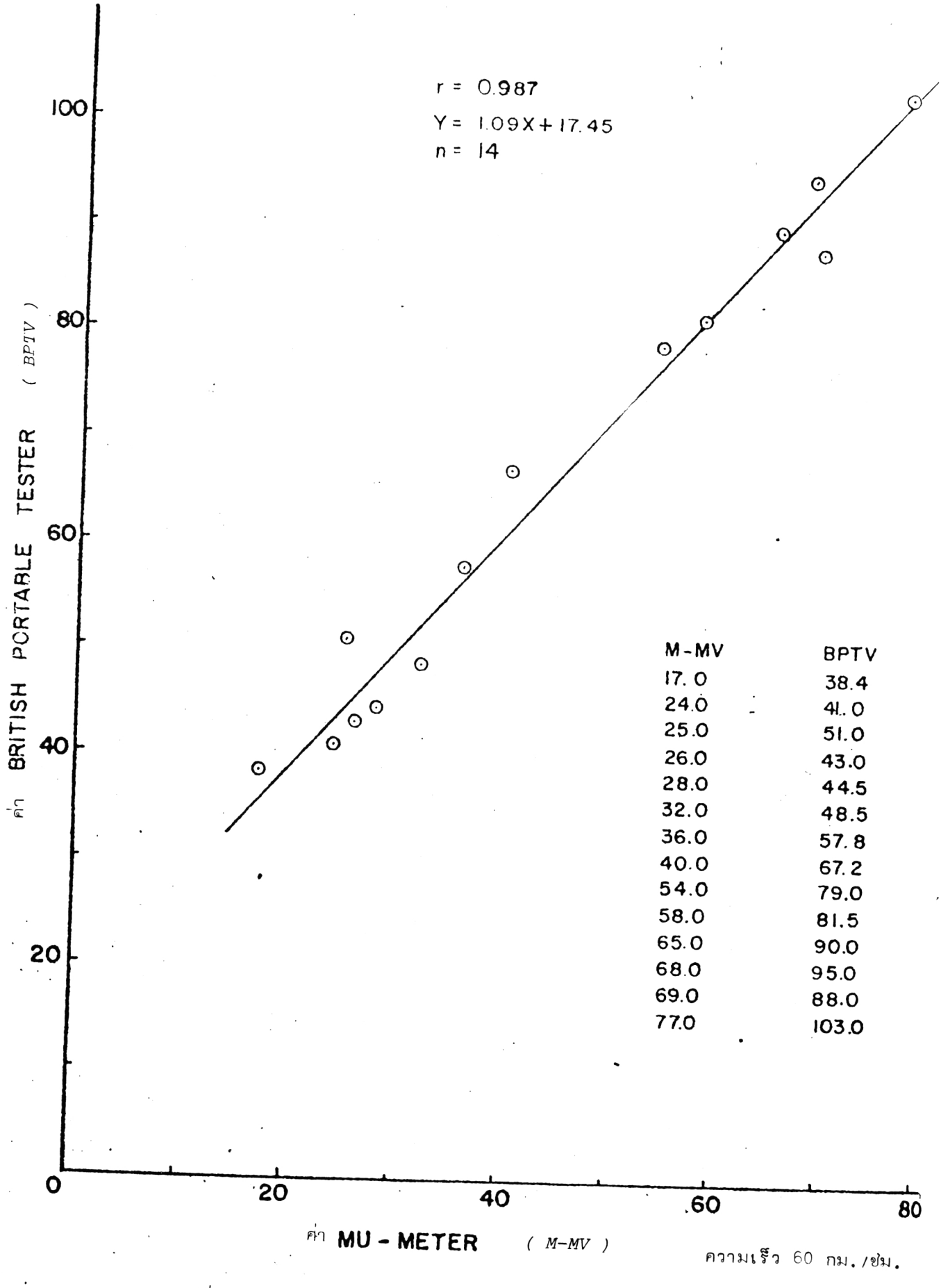
$$SFC_{50} = 0.024 - 0.663 \times 10^{-4} Q_{cv} + 1 \times 10^{-2}\ PSV$$

(ที่ความเร็ว 50 กม./ชม.)

เมื่อ Q_{cv} = ปริมาณการจราจรของยวดยานพาณิชย์ (คัน/ช่องทาง/วัน ในทิศทางเดียว)

PSV = ค่าแรงเสียดทานของมวลรวมที่หล่อเป็นแผ่นหลังจากขัดสีด้วยเครื่องขัดแล้ววัดค่านี้โดยใช้เครื่อง British Portable Tester โดยทำการทดสอบกับวัสดุมวลรวมชนิดเดียวกัน

ความสัมพันธ์นี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกวัสดุมวลรวมที่จะนำไปใช้ในงานผิวทางประเภทต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความต้านทานการลื่นไถลตามมาตรฐาน และจากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะพบว่า เมื่อค่า PSV เปลี่ยนไป 1 หน่วย จะมีผลให้ค่า SFC_{50} ที่ความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เปลี่ยนไป 0.01 หน่วย



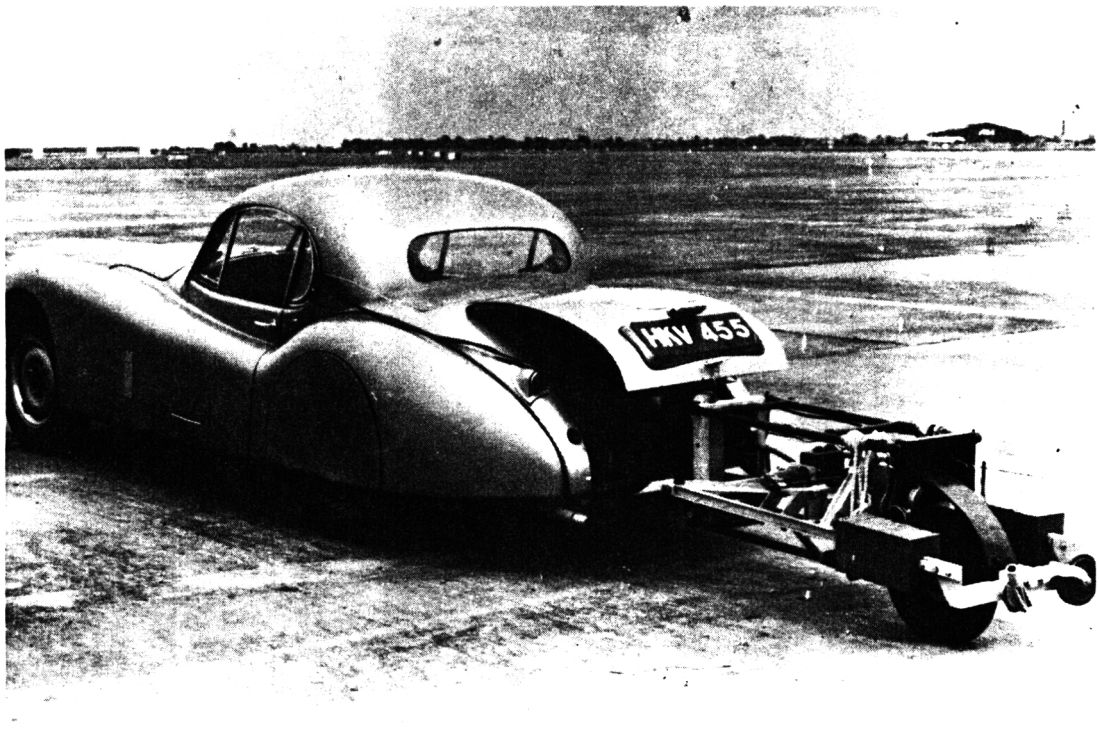
M-MV	BPTV
17.0	38.4
24.0	41.0
25.0	51.0
26.0	43.0
28.0	44.5
32.0	48.5
36.0	57.8
40.0	67.2
54.0	79.0
58.0	81.5
65.0	90.0
68.0	95.0
69.0	88.0
77.0	103.0

รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ของค่า *M-MV* กับ ค่า *BPTV*

2.5 การวัดค่าความต้านทานการลื่นไถลบนผิวทาง เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า สภาวะที่อาจจะเกิดการลื่นไถลขึ้นได้เมื่อยวดยานแล่นผ่านด้วยความเร็วสูงนั้น ผิวทางจะต้องอยู่ในสภาพเปียก ซึ่งถือว่าเป็นสภาพวิกฤต (Critical Condition) ดังนั้น การวัดค่าความต้านทานการลื่นไถลบนผิวทางมักจะกระทำในสภาพนี้ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้แพร่หลายในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด ใหญ่ ๆ คือ

2.5.1 เครื่อง Braking Force Trailer ตามรูปที่ 2.18 ประกอบด้วยรถพ่วงซึ่งมีล้อทดสอบ (Test Wheel) 1 ล้อ หรือ มากกว่า, เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติและถังน้ำ หลักการของวิธีนี้คือ เมื่อหยุดล้อทดสอบของรถพ่วงขณะที่รถกำลังวิ่งอยู่ จะเกิดแรงต้านหรือแรงหน่วง ที่ระนาบผิวสัมผัสของล้อทดสอบ ซึ่งจะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลโดยอัตโนมัติ แล้วจะนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานเรียกว่า "Braking-Force Coefficient (BFC)" โดยปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานการลื่นไถลจะถูกบันทึกด้วยเวลาอันรวดเร็วและมีความคลาดเคลื่อนเพียง ± 1-2 เปอร์เซ็นต์[2] ถึงแม้ว่าราคาต้นทุนจะสูงแต่เมื่อเปรียบเทียบราคากับการทดสอบในสนาม (Unit Testing Cost) จะเห็นว่า ได้ผลคุ้มค่าต่อการใช้เครื่องนี้ จึงเป็นที่นิยมใช้ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ และฝรั่งเศส ในหลักการเดียวกันนี้ได้มีผู้คิดค้นวิธีการหาค่า สปส.ความเสียดทานขึ้นใหม่ โดยนำเครื่องวัดค่าความหน่วง (Decelerometer) มาติดไว้กับรถทดสอบ เมื่อรถทดสอบวิ่งด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ผ่านส่วนที่ต้องการทดสอบก็หยุดรถทันที และปล่อยให้รถลื่นไถลไป จดบันทึกอัตราหน่วงของรถทดสอบไว้ตั้งแต่ความเร็วเริ่มต้นจนถึงเมื่อรถหยุดไถล ค่า สปส.ความต้านทานการลื่นไถลจะมีค่าเท่ากับ อัตราหน่วงของรถทดสอบเมื่อแสดงในรูปจำนวนเท่าของค่าความโน้มถ่วงของโลก เช่น 0.20 g. เป็นต้น.[2] วิธีการหาค่า สปส.ความเสียดทานโดยวิธีนี้จะได้ผลใกล้เคียงกับวิธี Sideway-Force เมื่อรถทดสอบใช้ยางล้อรถเป็นชนิดดอกยางเรียบ[2] และวิธีนี้นิยมใช้ในอังกฤษ และสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน ± 2-3 เปอร์เซ็นต์ ข้อดีของวิธีนี้คือ รวดเร็ว และราคาต่ำ

Giles[40] (1957) ได้หาความสัมพันธ์ของค่า BFC กับ SFC เมื่อวัดด้วยเครื่องมือทั้งสองพบว่า ค่า BFC โดยเฉลี่ยจะน้อยกว่าค่า SFC เล็กน้อยคือ ค่า BFC เฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ 0.80. SFC



รูปที่ 2.18 เครื่อง *Braking-Force-Trailer*

รูปที่ 2.19 เครื่อง *Sideway Force Tester* รูปแบบ ๆ

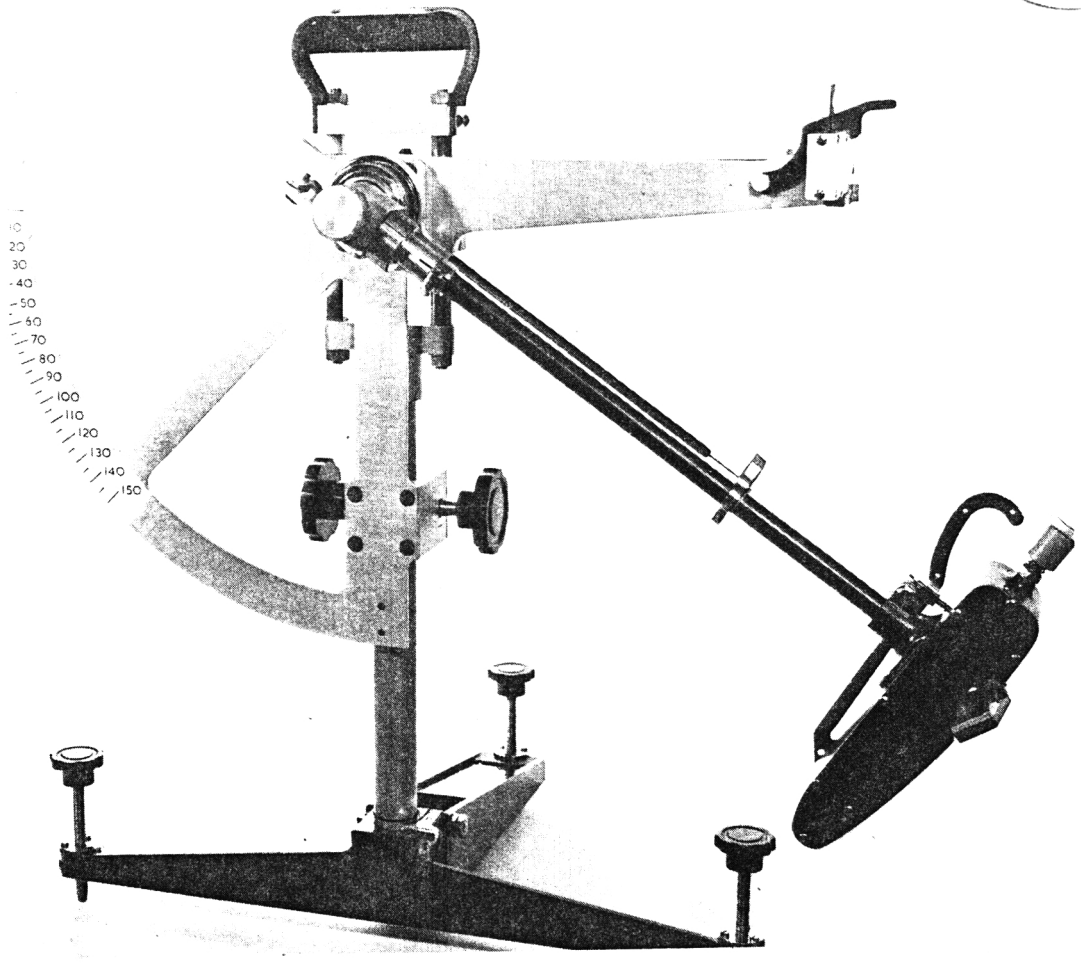
รูปที่ 2.20 เครื่อง *SCRIM*

2.5.2 เครื่อง SCRIM (Sideway-Force Coefficient Routine Investigation Machine) ตามรูปที่ 2.19 และ 2.20 เครื่อง SCRIM นี้เริ่มใช้ครั้งแรกในประเทศอังกฤษ เมื่อปี คศ. 1968 โดย TRRL วิธีการหาค่า สปส.ความต้านทานการลื่นไถลนี้เรียกว่า "Sideway-Force Coefficient (SFC)" เป็นค่า อัตราส่วนของแรงด้านข้างของล้อทดสอบต่อน้ำหนักกระทำต่อล้อในแนวดิ่ง (Vertical Load) คือ ล้อทดสอบจะถูกติดตั้งทำมุมประมาณ 20° กับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถทดสอบ[8,9,10] ล้อทดสอบที่ใช้จะเป็นล้อยางที่มีดอกยางเรียบ รถทดสอบนี้จะมีภาชนะที่สามารถใส่น้ำได้จำนวนมาก เพื่อทำให้ผิวทางบริเวณด้านหน้าของล้อทดสอบเปียกเพียงพอส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของเครื่อง SCRIM คือ เครื่องบันทึกผลของแรงด้านข้างที่ล้อทดสอบในขณะที่รถทดสอบแล่นผ่านไป บนผิวทางที่จะหาค่า สปส.ความเสียดทานความเร็ว (โดยปกติจะวิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม.) และตำแหน่งของการทดสอบจะถูกบันทึกออกมาเป็นช่วง ๆ ในกระดาษกราฟ ซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อนเพียง $\pm$ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ข้อดีของวิธีนี้ คือ สามารถวัดค่าได้ต่อเนื่องตลอดผิวทาง ซึ่งไม่จำเป็นจะต้องคอยควบคุมการจราจรในบริเวณที่จะทดสอบ จึงเป็นที่นิยมใช้กันมากในขณะนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอังกฤษ และฝรั่งเศส รวมทั้งในประเทศไทยด้วย

2.5.3 เครื่อง British Portable Tester (BPT) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เครื่องมือนี้นิยมใช้กันแพร่หลายสำหรับหาค่าความเสียดทานของพื้นผิวทางเฉพาะจุด (Spot-Check) โดยการวัดความฝืดระหว่างแผ่นยางที่ติดอยู่ที่ปลายของแขนแกว่ง (Pendulum Arm) กับผิวทางขณะเปียกออกมาในรูปของ Skid Resistance Value (SRV) ข้อดีของเครื่องมือนี้ก็คือ สามารถทดสอบได้รวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณทางโค้ง ทางแยก ที่มีการจราจรคับคั่งสามารถใช้ทดสอบค่าในห้องทดลองเพื่อวัดค่า PSV ของวัสดุมวลรวมก่อนและหลังขัดด้วยเครื่องขัด แต่ข้อเสีย คือ มียึดจำกัดในการวัดค่าความเสียดทาน เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือชนิดอื่น และจะเกิดข้อผิดพลาดได้ในกรณีผิวทางขรุขระ อาจจะทำให้ค่าที่อ่านคลาดเคลื่อนได้ง่ายถึงแม้ว่า จะใช้ผู้ที่มีความชำนาญก็ตาม

จากที่กล่าวมาแล้วอาจจะสรุปได้ว่า เครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานประจำวันในผิวทางจริงควรจะต้องมีลักษณะดังนี้ คือ[8]

- มีความแข็งแรงทนทานเพียงพอสำหรับงานสนาม
- สามารถใช้งานได้ภายในช่วงการจราจรปกติ
- สามารถทดสอบได้เฉลี่ยวันละ 100 กิโลเมตรขึ้นไป



รูปที่ 2.21 เครื่อง *British Portable Skid-Resistance Tester (BPT)*

- สามารถให้ผลสัมฤทธิ์ได้ดีในช่วงความเร็วของการจราจรปกติ

2.6 การศึกษาการใช้ดินเหนียวเป็นวัสดุมวลรวมประดิษฐ์ในงานผิวทาง

Hosking[3] ในปี คศ. 1970 ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการใช้ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ คือ Accrington shale, Colliery shale, Silt, Etruria marl และ White ball clay ซึ่งมีแคลไซน์ด์ บอกไซด์ (Calcined Bauxite) ขนาด 150-400 ไมครอน (ผ่านการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,600°C แล้ว) เป็นกรัตในอัตราส่วน 10-20% โดยน้ำหนัก อาจเพิ่มปริมาณน้ำลงไปในส่วนผสมเพื่อให้เข้ากันดีตามชนิดของดินเหนียวประเภทต่าง ๆ แล้วอัดส่วนผสมที่ได้เป็นแผ่นกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 75 มม. หนา 45 มม. ใช้ความดันในการอัดจาก 2-5 ตันต่อตารางนิ้ว เผาที่อุณหภูมิ 1,050-1,200°C ด้วยเตาเผาไฟฟ้า (Electric Furnace) หลังจากนั้นทำการบดแตกและร่อนให้ได้ขนาดตามต้องการ มาทำการทดสอบค่า PSV และ AAV ได้ผลดังนี้คือ

ชนิดของดินเหนียว	ไม่มีส่วนผสมของแคลไซน์ด์ บอกไซด์เป็นกรัต		มีส่วนผสมของแคลไซน์ด์ บอกไซด์เป็นกรัต	
	ค่า PSV	ค่า AAV	ค่า PSV	ค่า AAV
Accrington Shale	59.0	4.8	70.0	5.7
Silt	65.0	30.0	70.0	14.0
White Ball Clay	-	-	67.0	7.9

หมายเหตุ การทดสอบนี้ใช้มาตรฐานของ BS 812[42] ซึ่งกำหนดค่า PSV ต่ำสุดเท่ากับ 62 และค่า AAV สูงสุด เท่ากับ 10

จากผลการทดสอบพบว่า ค่า PSV และ AAV หลังจากที่ใส่แคลไซน์ด์ บอกไซด์เป็นกรัตแล้วจะให้ค่าที่นำไปใช้เป็นวัสดุผิวทางดีกว่าเมื่อไม่มีส่วนผสมของแคลไซน์ด์ บอกไซด์อยู่ คือค่า PSV สูง แต่ค่า AAV ต่ำ เขายังพบอีกว่า ความดันที่ใช้ในการอัดดินนี้ ไม่มีผลต่อค่า PSV และ AAV แต่อย่างใด. ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อค่าทั้งสองคือ เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่า PSV จะลดลง แต่ค่า AAV จะเพิ่มขึ้นดังตารางข้างล่างนี้

I16034847

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (ดินเหนียว Accrington Shale)	ค่า PSV	ค่า AAV
ต่ำ	55	1.7
กลาง	52	2.1
สูง	46	2.5

นอกจากนี้เขายังพบว่า ปริมาณกริตที่เหมาะสมและให้ค่าที่ดีที่สุดถึง ในช่วง 10-20% ขนาด 150-200 ไมครอน เมื่อคำนึงถึงราคาและอัตราการเพิ่มของค่า PSV ลดลง เมื่อปริมาณกริตเพิ่มขึ้น และพบอีกว่า ขนาดของกริตที่มีขนาดเดียวกันจะให้ความต้านทานการลื่นไถลที่สูงกว่าขนาดกริตที่เรียงกัน

ในปี คศ. 1974 Hosking[3] ก็ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุพรุนเพื่อจะนำมาใช้เป็นวัสดุสังเคราะห์สำหรับต้านทานการขัดสีของยวดยานบนผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ พบว่าวัสดุดินเหนียวประเภทมอสไซท์ (Mossite Clay) ที่มีปริมาณอลูมินา (Alumina) สูง เมื่อเผาแล้วทดสอบดู ปรากฏว่ามีค่า PSV สูงพอ (72 หน่วย) แต่มีค่า AAV สูงด้วย (14 หน่วย) เขาจึงได้พยายามคิดค้นหาวิธีที่จะปรับปรุงเพื่อลดค่า AAV ลงโดยเพิ่มสาร Additive (Combustible Powder) ลงไปในส่วนผสมก่อนทำการเผาเพื่อรักษาหรือเพิ่มความพรุนของเนื้อวัสดุเพราะเมื่อเผาดินที่อุณหภูมิสูง ๆ ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความแข็งและค่า AAV จะเพิ่มขึ้น แต่ค่า PSV จะลดลงที่ความหนาแน่นมากที่สุดเช่นเดียวกัน ดังนั้น จึงต้องทำการทดลองหาขนาดและปริมาณสาร Additive (Combustible Power) ที่ใช้ เพื่อให้ได้ค่า PSV และ AAV ที่เหมาะสมที่สุดพบว่าเมื่อใช้สาร Additive ที่มีขนาด 125 ไมครอน จะให้ค่า PSV ในช่วง 74-79 และค่า AAV ในช่วง 9-10 เมื่อความพรุนของเนื้อวัสดุอยู่ระหว่าง 25-35% (ถ้าความพรุนน้อยกว่านี้ ค่า PSV จะต่ำเกินไปหรือถ้าความพรุนมากกว่านี้ ค่า AAV จะสูงเกินไป) เขายังพบอีกว่าสัดส่วนของสาร Additive มีผลต่อความพรุนของวัสดุดินเผา โดยเมื่อเพิ่มสาร Additive ขึ้น 1% จะทำให้ความพรุนเพิ่มขึ้นประมาณ 0.7% ต่อมาในปีเดียวกัน Jacobs, F.A. และ Hosking, J.R.[5] ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับรูปร่างของวัสดุสังเคราะห์ (ในที่นี้คือ ดินเหนียวมอสไซท์เผา) ว่า มีผลต่อความลึกผิวและความต้านทานต่อการลื่นไถลอย่างไร เมื่อนำมาใช้ทำผิวทางเซอร์ เฟสทรีตเมนท์ประเภทชั้นเดียวโดยทำการทดสอบ

ในสภาพถนนจริงที่ Colnbrook By-Pass ในประเทศอังกฤษ เขาได้ทดลองผลิตมวลรวมเป็นรูปร่างและแบบต่าง ๆ กัน 7 ลักษณะพบว่า มวลรวมรูปแท่งทรงกระบอกกลมและทรง-ปริซึมหกเหลี่ยมที่มีความยาว $1\frac{1}{2}$ เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง จะให้ความลึกผิวของผิวทางมากที่สุด (วัดโดยวิธี Sand-Patch) และมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับผิวหน้ายางมากที่สุด (ผิวจุลภาคเพิ่มขึ้น) ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลดีขึ้น

ส่วนในประเทศไทยได้มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุดินเหนียวมาใช้เป็นวัสดุผิวทางคือ

ปรียา ไกรลิรเดช[18] (2521) ได้สรุปผลการทดลองว่า การใช้เม็ดดินปทุมธานีผสมทรายละเอียด (ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 ความถ่วงจำเพาะปรากฏ 2.650) 20% โดยน้ำหนัก เผาตั้งแต่อุณหภูมิ 800-1,200°C จะให้ค่า PSV และ AAV อยู่ในเกณฑ์ที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุผิวทางได้ ส่วนเม็ดดินราชบุรีมีค่า AAV สูงเกินไป (มากกว่า 40%) ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานทาง แต่ค่าการหลุดลอกของมวลรวมจากยางแอสฟัลท์ของเม็ดดินผสมทรายเผาของทั้งสองแหล่งมีค่าเกินที่กำหนดในมาตรฐาน คือ 20% จำเป็นจะต้องใช้สารผสมเพิ่ม (Additive) เพื่อให้ยางแอสฟัลท์กับมวลรวมเกาะตัวกันดีขึ้นซึ่งจะต้องศึกษาต่อไป

เฉลิม บุญชื่อ[17] (2523) ได้ทำการศึกษาวัสดุเม็ดดินเผาที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมของผิวทางแอสฟัลท์ติคคอนกรีต โดยนำวัตถุดิบคือ ดินเหนียวมาจากแหล่งบางเขน บางมด และหนองงูเห่า อุณหภูมิที่เผาอยู่ในช่วง 800-1,200°C แล้วนำมาทดลอง Marshall Stability Test, PSV และอื่น ๆ ในห้องทดลองพบว่า เม็ดดินเผาทั้งสามแหล่ง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,000°C จะให้ค่า Maximum Marshall Stability ในช่วง 515-665 กิโลกรัม (มากกว่า 341 กิโลกรัมตามมาตรฐาน The Asphalt Institute) และค่า PSV ก่อนขัดที่อุณหภูมิ 20°C ในช่วง 70-76, PSV หลังขัดที่อุณหภูมิ 20°C อยู่ในช่วง 62-64 (มากกว่า 45 สำหรับทางหลวงที่มีปริมาณการจราจรเกิน 1,500 คันต่อวัน จากผลการศึกษาของ Bunnag, et al[1]) ซึ่งเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นผิวทางแอสฟัลท์ติคคอนกรีตได้

วิชัย สังวรปทานกุล[17] (2523) ได้ศึกษาถึงการผลิตเม็ดดินเผาซึ่งทำมาจากดินเหนียวกรุงเทพฯ พบว่า ในการเตรียมเม็ดดินที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีความยาวเท่ากับ

เส้นผ่าศูนย์กลางจะได้ผลผลิตที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับรูปร่างอื่นคือ ทรงกลมและรูปร่างไม่แน่นอน (เป็นรูปเหลี่ยมค่อนข้างแบน) ข้อดีก็คือ สามารถควบคุมรูปร่างและขนาดเม็ดดินได้, เม็ดดินที่ได้จะมีเหลี่ยมมุมพอสมควร ทำให้มีแรงเสียดทานและแรงยึดเกาะอยู่ในเกณฑ์สูง, สามารถควบคุมส่วนผสมและน้ำหนักของเม็ดดินได้ และเวลาเผาจะเกิดฝุ่นน้อยกว่ารูปร่างแบบอื่น ซึ่งผลสรุปที่ได้นี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Jacobs, F.A. และ Hosking, J.R.[5] ดังที่ได้กล่าวไปแล้วแต่เป็นการวิเคราะห์ผลคนละแนว

2.7 นิยามของผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ ในปัจจุบันยังไม่มีคำนิยามที่ให้ความหมายของผิวทางแบบเซอร์เฟสทรีตเมนท์หรือแบบซีลโค้ท (Seal Coat) ว่าแตกต่างหรือเหมือนกันอย่างไรที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วโลก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะใช้คำนิยามของ McLeod[28] ที่ให้ไว้ว่า

เซอร์เฟสทรีตเมนท์ คือ การลาดยางแอสฟัลท์และวัสดุมวลรวมชั้นเดียวหรือหลายชั้นทับกันลงไปบนชั้นพื้นทางที่อาจเป็นวัสดุจำพวกกรวด หินคลุก หรือวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน ซึ่งได้ทำการบดอัดแน่นแล้ว

ซีลโค้ท คือ การลาดยางแอสฟัลท์ และวัสดุมวลรวมชั้นเดียวหรือหลายชั้นทับกันลงไปบนผิวจราจรเดิม (Existing Paved Surface)

2.8 ประโยชน์ของผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ ที่สำคัญ ๆ มีดังต่อไปนี้

2.8.1 เพื่อป้องกันชั้นพื้นทางไม่ให้เกิดการลึกกร่อนเนื่องจากการจราจรบนผิวทาง หรือเป็นการปรับปรุงผิวทางจราจรที่ลึกกร่อนไป ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของผิวทางนั้น

2.8.2 เพื่อเพิ่มความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางที่ถูกเสียดสีจากยางรถยนต์ ซึ่งเป็นการเพิ่มความปลอดภัยและความสะดวกสบายในการขับขี่ยวดยาน

2.8.2 เพื่ออุดช่องว่าง เคลือบ และยึดเกาะวัสดุมวลรวมที่หลวมทั้งยังช่วยทำให้พื้นผิวทางทนทานดีขึ้น เป็นการป้องกันมิให้น้ำบนผิวทางซึมลงไปในชั้นพื้นทางหรือผิวทางเก่า ที่มีรอยแตกอยู่เดิมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของผิวทางประเภทแมคคาแดม (Bituminous Macadam) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ถนนเสียหายคือ เมื่อน้ำและอากาศจากภายนอกเข้าไปในผิวทางจะทำให้เกิดการหลุดลอกของวัสดุมวลรวมออกจากยางแอสฟัลท์ เกิดการออกซิไดซ์ของยางแอสฟัลท์ ถ้าน้ำและอากาศซึมลงไปมากขึ้นจะทำให้เสถียรภาพของชั้นพื้นทางหรือชั้นดินคันทางลดลง อันจะนำไปสู่ความเสียหายของโครงสร้างถนนทั้งหมดได้

2.8.4 เพื่อปรับปรุงซ่อมแซมผิวทางเก่าก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้น ทำให้ผิวหน้าเรียบขึ้น เชื่อมรอยแตกร้าวหรือหลุดร่อนเนื่องจากสภาพยวดยาน สภาวะอากาศที่เลวร้าย หรือการก่อสร้างที่ไม่ได้มาตรฐาน

2.8.5 เพื่อเสริมหรือเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างถนน เนื่องจากการสร้างผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์บนชั้นพื้นทางจะสามารถลดหน่วยแรงกระทำที่ชั้นดินคันทาง (Subgrade) ด้านล่าง ทำให้ถนนรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น Lohn และ Nevitt[26] มีความคิดว่าการที่ผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์มีส่วนทำให้โครงสร้างของถนนแข็งแรงขึ้นเพราะมันจะอุดช่องว่าง รอยแตก และประสานผิวทางเดิม ทั้งยังเสนอแนะว่าการใช้ยางแอสฟัลท์ที่มีค่า Tensile Strength สูงและมีความเหนียวสูง (แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสูง) จะมีผลทำให้ผิวทางมีความแข็งแรงทนทานดีขึ้น

2.8.6 ประโยชน์อื่น ๆ โดยทั่วไป เช่น เป็นการป้องกันฝุ่นบนผิวทางให้ลดน้อยลง ใช้เป็นการปูผิวทางชั่วคราว (Temperary Covers) ในกรณีที่การก่อสร้างไม่เสร็จทันเวลา แต่จำเป็นต้องเปิดการจราจรโดยเร็ว อาจใช้เป็นการแบ่งแยกช่องทางเดินรถในถนนที่ต้องรับปริมาณการจราจรมาก โดยจะทำการปูผิวไหล่ทาง (Shoulders) ด้วยผิวทางเซอร์เฟสทรีต-เมนท์ที่ใช้วัสดุมวลรวมสีอ่อน (Light-Colored Aggregates) เช่น พวกหินปูน ซึ่งทำให้มีสีและความหยาบแตกต่างจากส่วนของผิวช่องทางจราจร (Traffic Lanes)

2.9 <u>องค์ประกอบที่มีผลต่อการก่อสร้างผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์</u> อาจจะแบ่งออกได้เป็น

2.9.1 <u>องค์ประกอบที่เกี่ยวกับวัสดุมวลรวม</u> วัสดุมวลรวมมีส่วนสำคัญอย่างมากในงานผิวทางประเภทนี้เพราะส่วนของผิวทางที่จะสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกหนักหรือ จะมีความต้านทานการลื่นไถลเมื่อเปียกดีเพียงพอก็คือ วัสดุมวลรวมนี้เอง ดังนั้นประโยชน์ของวัสดุมวล-รวมอาจกล่าวได้คือ

ก. ช่วยป้องกันการลื่นกร่อนเนื่องจากล้อรถ

ข. ช่วยให้เกิดความต้านทานการลื่นไถลดีขึ้น

ค. ช่วยถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากผิวทางลงไปยังชั้นพื้นทางและชั้นดินคันทางด้านล่าง

2.9.1.1 <u>จำนวนของวัสดุมวลรวม</u> (Amount) ในการก่อสร้างผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์นั้น จำนวนวัสดุมวลรวมที่ใช้มีความสำคัญคือ ถ้าจำนวนวัสดุมวลรวมน้อยเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่างของเนื้อยางแอสฟัลท์ จนเกิดความต้านทานการลื่นไถลน้อยลงเมื่อผิวทางเปียก เกิดความเหนียวหนืดเมื่อผิวทางมีอุณหภูมิสูงและมีผลทำให้ค่าความต้านทานการลึก-หรอของผิวทางลดลงอีกด้วย จำนวนวัสดุมวลรวมที่ใช้จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และหน่วยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม โดยปกติจำนวนวัสดุมวลรวมที่ใช้งานจะต้องเผื่อไว้ให้มากกว่าที่คำนวณได้ประมาณ 5-20 เปอร์เซ็นต์[25] เพราะในระหว่างการโรยวัสดุมวลรวมลงบนผิวถนนมักจะเกิดการสูญหายไปเนื่องจากการโรยที่ไม่แน่นอน หรือเกิดการหลุดร่อนออกไปเนื่องจากยวดยานที่วิ่งผ่าน ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า ปริมาณวัสดุมวลรวมที่แน่นอนจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของวัสดุมวลรวม ตลอดจนลักษณะการก่อสร้างของแต่ละหน่วยงานนั่นเอง

2.9.1.2 <u>อัตราส่วนคละ</u> (Gradation) จากการศึกษาที่ผ่านมาและรายงานของ HRB[25] พบว่า วัสดุมวลรวมที่มีขนาดเดียว (One-Size Aggregate) เหมาะสมที่จะใช้ในการก่อสร้างผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ที่สุดเพราะวัสดุมวลรวมที่มีขนาดเดียวจะสามารถยึดเกาะ (Interlock) กันระหว่างเม็ดได้ดีกว่าวัสดุมวลรวมที่ต่างขนาดกัน ซึ่งจะสามารถป้องกันการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (คือเป็น Lateral Support) ของวัสดุมวลรวมแต่ละเม็ดได้เมื่อถูกแรงกระทำจากยวดยานที่แล่นผ่าน และอีกประการหนึ่งที่สำคัญที่สุด คือ จะเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างยางล้อและพื้นผิวทาง ทำให้เกิดความต้านทานการลื่นไถลดีขึ้นเมื่อปริมาณยางแอสฟัลท์ที่ใช้ถูกต้อง

2.9.1.3 <u>ขนาดและรูปร่าง</u> (Size & Shape) ขนาดของวัสดุมวลรวมที่มีขนาดเดียวจะมีผลต่อพื้นผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์เมื่อก่อสร้างเรียบร้อยแล้ว โดยทั่วไปจะใช้วัสดุมวลรวมขนาดใหญ่สำหรับผิวทางที่ต้องรับปริมาณการจราจรหนัก (Heavy Traffic) และใช้วัสดุมวลรวมขนาดเล็กสำหรับผิวทางที่รับปริมาณการจราจรเบา (Light Traffic) ในกรณีที่ขนาดของวัสดุมวลรวมเล็กจะต้องควบคุมปริมาณยางแอสฟัลท์ให้ถูกต้องแน่นอน เพราะเมื่อผิดพลาดเพียงเล็กน้อยจะเกิดความเสียหายต่อผิวทางอย่างมาก เช่น ถ้าปริมาณยางแอสฟัลท์มากเกินไปจะเกิดการเยิ้มขึ้น (Bleeding) ในกรณีที่ขนาดของวัสดุมวลรวมไม่สม่ำเสมอ จะมีผลทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างยางล้อกับผิวทางน้อยลง ดังนั้นเมื่อผิวทางเปียก ค่าความต้านทานการลื่นไถลจะลดลง ทั้งยังมีผลทำให้การคำนวณวัสดุมวลรวมและยางแอสฟัลท์ทำได้ยากขึ้น ในกรณีที่ขนาดของวัสดุมวลรวมใหญ่จะมีผลดีคือ ผิวทางจะค่อนข้างเรียบกว่าเมื่อใช้วัสดุมวลรวมเล็ก

เวลายับยี่ยวดยานจะรู้สึกเรียบไม่สะดุด เสียงที่เกิดระหว่างล้อรถกับผิวทางในขณะขับรถผ่านจะน้อยลง ทั้งยังง่ายต่อการซ่อมบำรุงผิวทางอีกด้วย ขนาดใหญ่ที่สุดที่แนะนำให้ใช้ทั่วไปในประเทศออสเตรเลีย คือ ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว[25] เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวมาแล้ว

ส่วนรูปร่างของวัสดุมวลรวมจะมีผลเกี่ยวกับการยึดเกาะของวัสดุมวลรวมแต่ละเม็ด (เกี่ยวกับเสถียรภาพความคงทนของผิวทาง) จากการศึกษาวิจัยพบว่า วัสดุมวลรวมที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม (Angular) จะให้ผลของการยึดเกาะดีกว่ารูปร่างอื่น ๆ เพราะวัสดุรูปร่างนี้เมื่ออยู่ติดกันจะมีจุดสัมผัสอยู่หลายจุด จึงมีเสถียรภาพดีไม่เปลี่ยนตำแหน่งง่าย ผิดกับวัสดุมวลรวมรูปกลมจะมีจุดสัมผัสเพียงจุดเดียว ความแข็งแรงหรือเสถียรภาพของผิวทางจะน้อยกว่าเมื่อถูกน้ำหนักกระทำในที่นี้ก็คือ ยวดยานที่วิ่งผ่านไปมาบนผิวทาง

Kearby, J.P.[27] ได้เสนอแนะนำว่า ในกรณีที่ต้องใช้วัสดุมวลรวมที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ควรจะมีจำนวนวัสดุมวลรวมที่แบนและยาวไม่เกิน 10% ของอัตราส่วนคละที่ต้องการ โดยเขาได้กำหนดว่า "ความแบนของวัสดุมวลรวมจะต้องหนาน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความกว้างเฉลี่ยของวัสดุมวลรวม ส่วนความยาวของวัสดุมวลรวมจะต้องยาวกว่าสองเท่าของส่วนที่สั้นที่สุดของวัสดุมวลรวมนั้น"

2.9.1.4 <u>ความต้านทานการสึกหรอ</u> (Abrasion Resistance) ความสึกหรอเป็นสาเหตุของความเสียหายของผิวทางซึ่งเกิดจากเหลี่ยมมุม ความหยาบที่ผิวของวัสดุมวลรวมลดลง เนื่องจากยวดยานที่วิ่งผ่านตามระยะเวลาที่ผ่านไป ทำให้ค่าความฝืดของผิวทางลดลงจนอาจเป็นอันตรายต่อผู้ขับขี่ยวดยานในสภาวะต่าง ๆ โดยเฉพาะในขณะผิวทางเปียก Benson, F.J.[29] เสนอแนะว่า ค่าความต้านทานการสึกหรอของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์โดยทั่วไปไม่ควรเกิน 35% อาจกล่าวสรุปได้ว่าอัตราการสึกหรอจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ความแข็ง และคุณสมบัติของยางล้อรถ เช่น ชนิดและลักษณะของดอกยาง เป็นต้น

2.9.1.5 <u>ความทนทาน</u> (Durability) เนื่องจากวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์จะต้องถูกแรงกระทำจากภายนอกโดยตรงทั้งจากธรรมชาติ ลมฟ้าอากาศ อุณหภูมิ การเสียดสีจากล้อรถและอื่น ๆ ความทนทานของวัสดุมวลรวมนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุมวลรวมแต่ละท้องถิ่นไม่แน่นอน ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุมวลรวมจึงต้องอาศัยการทดสอบด้วยวิธีต่าง ๆ ตามมาตรฐานประกอบกับประสบการณ์และการตัดสินใจ

ที่ดีของผู้ควบคุมงาน จึงจะได้ผิวทางที่ดี วิธีการทดสอบในห้องทดลองที่นิยมทดสอบกัน เช่น Los Angeles Abrasion Test, Page Impact Test[25] เป็นต้น อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่า ผลของการทดสอบจะเป็นที่น่าพอใจแต่ก็ไม่ได้หมายความว่า วัสดุมวลรวมที่ได้ทดสอบแล้วจะสามารถทนทานต่อยบวนการทำลายตามธรรมชาติ (Weathering) และจากการกระทำของยวดยานได้ดีเสมอไป

2.9.1.6 <u>คุณสมบัติการยึดเกาะของวัสดุมวลรวมกับยางแอสฟัลท์</u> (Adhesion Characteristics) คุณสมบัตินี้เป็นส่วนสำคัญประการหนึ่งคือ วัสดุมวลรวมที่ใช้ทำผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์จะต้องสามารถยึดเกาะกับยางแอสฟัลท์ได้ดี เพื่อที่จะสามารถคงตัวอยู่ในตำแหน่งที่มีเสถียรภาพ (Stable Position) ภายใต้ยวดยานที่วิ่งผ่านไปมา[25] การยึดเกาะที่ดีนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบที่ถูกต้องเหมาะสมและการควบคุมการก่อสร้างได้ถูกต้องตามขั้นตอน ส่วนปัญหาที่จะทำให้การยึดเกาะลดลงคือ ความชื้นของวัสดุมวลรวมมีมากเกินไป และวัสดุมวลรวมที่มีส่วนที่เล็กกว่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 10 อยู่มากจะทำให้เกิดการหลุดลอกขึ้นได้[30]

2.9.1.7 <u>ความต้านทานการแตกหัก</u> (Crushing Resistance) การแตกหักของวัสดุมวลรวมอาจเกิดจากวัสดุมวลรวมอ่อนเกินไป น้ำหนักรถบดอัดมากเกินไป หรืออาจเกิดจากผิวถนนที่มีอยู่เดิมแข็งมากจนวัสดุมวลรวมใหม่ที่โรยไปเสริมไม่สามารถฝังลงไปในเนื้อผิวถนน เมื่อทำการบดอัดจึงเกิดการแตกหักของวัสดุมวลรวมขึ้น คุณสมบัติความต้านทานการแตกหักของวัสดุมวลรวมจะขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งวัสดุจึงเป็นการยากที่จะตั้งข้อกำหนด (Criteria) เกี่ยวกับความแข็งของวัสดุมวลรวมที่จะใช้ในแต่ละสถานที่ที่จะก่อสร้าง ซึ่งบางครั้งอาจจะต้องใช้วิจารณญาณและประสบการณ์ของผู้ควบคุมงานเองในการเลือกใช้วัสดุในแต่ละท้องถิ่น จากการทดลองของ Shelburne[31] พบว่า การบดอัดวัสดุมวลรวมด้วยรถบดล้อเหล็กเมื่อชั้นพื้นทางเป็น Rigid จะแตกมากกว่าเมื่อชั้นพื้นทางเป็น Flexible ประมาณสองเท่าและวัสดุเม็ดใหญ่จะมีโอกาสแตกมากกว่าวัสดุเม็ดเล็ก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงควรพิจารณาใช้วัสดุมวลรวมขนาดเล็กเพื่อให้จำนวนการแตกหักน้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้[25]

2.9.1.8 <u>ฝุ่นและความชื้น</u> (Dust & Moisture) วัสดุมวลรวมที่ชื้นและมีฝุ่นผงมากจะมีผลอย่างมากต่อการยึดเกาะระหว่างวัสดุมวลรวมกับยางแอสฟัลท์ Benson และ Gallaway[35] พบว่า ฝุ่นที่เคลือบและความชื้นตามผิวจะมีผลทำให้การยึดเกาะระหว่าง

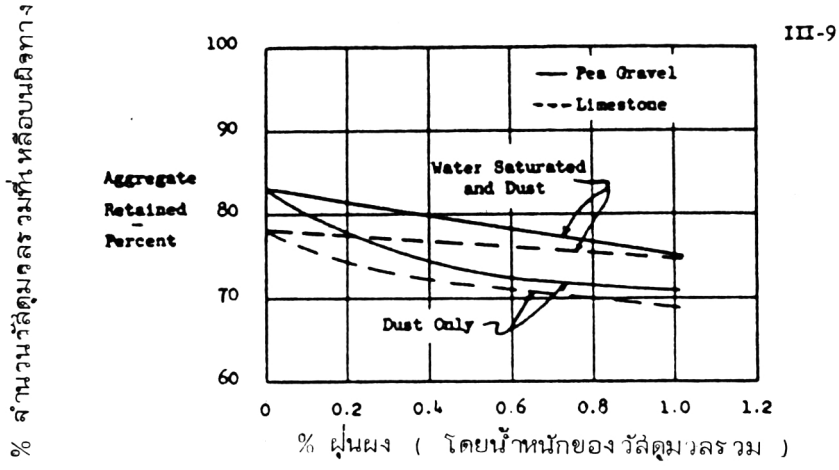
วัสดุมวลรวมกับยางแอสฟัลท์ลดน้อยลงหรือช้าลง ซึ่งเป็นสาเหตุที่สำคัญที่จะทำให้วัสดุมวลรวมมีปริมาณการหลุดร่อนสูง ผลจากการทดลองดังกล่าวพบว่า เมื่อปริมาณฝุ่นเพิ่มเพียง 1% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม จะมีผลทำให้จำนวนวัสดุมวลรวมที่หลุดร่อนเพิ่มขึ้นถึง 12% โดยน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เมื่อปริมาณฝุ่นน้อยลงอัตราการหลุดร่อนของวัสดุมวลรวมจะลดลงไม่เป็นลักษณะเส้นตรง (Non-Linear Rate) ตามรูปที่ 2.22

ส่วนความชื้นตามผิวของวัสดุมวลรวมจะมีผลทำให้การยึดเกาะของวัสดุมวลรวมและยางแอสฟัลท์ลดลงเช่นกัน และเมื่อเปิดการจราจรบนผิวทางก่อนที่การยึดเกาะจะเกิดเต็มที่แล้ว อาจมีผลทำให้เกิดการหลุดร่อนอย่างรวดเร็ว จากการทดลองของ Benson[35] ตามรูปที่ 2.23 พบว่า เมื่อเพิ่มความชื้นของวัสดุมวลรวมกรวดและหินปูนเกิน 2% จำนวนวัสดุมวลรวมที่เหลืออยู่บนผิวทางจะเหลือน้อยกว่า 60% ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ผิวทางเนื่องจากยวดยานที่สัญจรไปมาอย่างแน่นอน

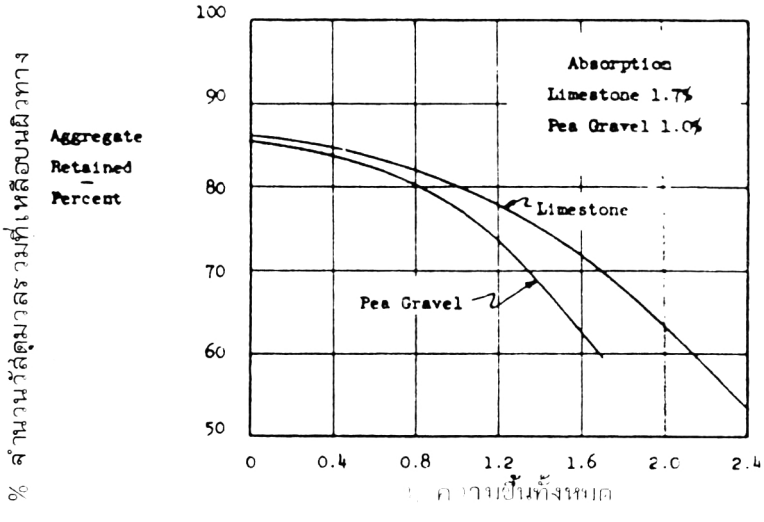
วิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ การล้างและผึ่งให้แห้ง (Washing & Drying) ก่อนที่จะนำไปใช้งานซึ่งเป็นวิธีที่ได้ผลดีที่สุด และอีกวิธีหนึ่งคือ การเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะโดยการเคลือบผิววัสดุมวลรวมด้วยสารบิทูเมนหรือน้ำมันก๊าดก่อนที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งในการเคลือบผิวดังกล่าววัสดุมวลรวมจะต้องสะอาดและแห้งสนิท โดยปกติปริมาณน้ำมันก๊าดที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0.5-1.0 แกลลอนต่อจำนวนวัสดุมวลรวม 1 ตัน[28]

2.9.2 <u>องค์ประกอบที่เกี่ยวกับวัสดุประสานบิทูมินัส</u> (Bituminous Binder) โดยทั่วไปวัสดุประสานบิทูมินัสมักจะเป็นยางแอสฟัลท์ชนิดต่าง ๆ หน้าที่ของยางแอสฟัลท์ที่สำคัญคือ ใช้เป็นที่ยึดเกาะของวัสดุมวลรวมและเชื่อมกับพื้นทางด้านล่าง ใช้เชื่อมและอุดรอยแตกของผิวทางเดิม เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศและความชื้นเข้าไปได้ ทำให้สามารถยืดอายุถนนเดิมให้ใช้งานได้ต่อไป ดังนั้นเพื่อให้ได้ผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ที่ดี สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเกี่ยวกับยางแอสฟัลท์คือ

2.9.2.1 <u>ปริมาณยางแอสฟัลท์</u> (Quantity) ลักษณะของผิวทางเซอร์-เฟสทรีตเมนท์ที่ดี จะต้องมีปริมาณยางแอสฟัลท์ที่ถูกต้องเหมาะสม ถ้าปริมาณยางแอสฟัลท์มากเกินไปจะเกิดการเยิ้มของยางแอสฟัลท์ทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลลดลงเมื่อผิวทางเปียก แต่ถ้าปริมาณยางแอสฟัลท์น้อยไปจะเกิดการหลุดร่อนของวัสดุมวลรวมได้ ดังนั้น ปริมาณยาง-แอสฟัลท์จึงมีความสำคัญอย่างมาก สิ่งที่จะต้องพิจารณาเกี่ยวกับปริมาณยางแอสฟัลท์ที่มากที่สุดใน



รูปที่ 2.22 ผลของฝุ่นผงที่มีต่อ% จำนวนวัสดุมวลรวมที่เหลือบนผิวทาง (ข้อมูลจาก *Benson*[35])



รูปที่ 2.23 ผลของความชื้นที่มีต่อ% จำนวนวัสดุมวลรวมที่เหลือบนผิวทาง (ข้อมูลจาก *Benson*[35])

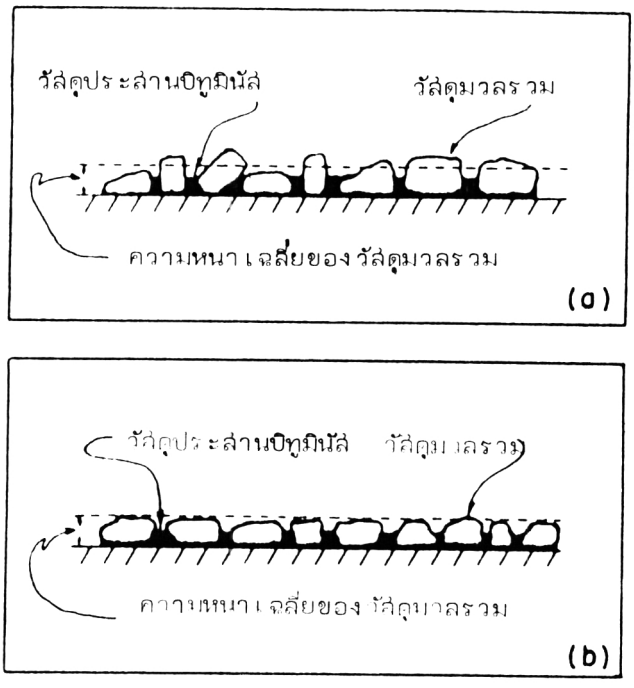
การออกแบบ (Optimum Bitumen Content) เพื่อใช้งานคือ ปริมาตรของช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม (ซึ่งปริมาตรนี้จะเกี่ยวข้องกับขนาด รูปร่าง จำนวนรอบของการบดอัด และจำนวนยวดยานที่แล่นผ่าน), สภาพของผิวทางเดิม, ชนิดของยางแอสฟัลท์เหลวที่ใช้ และปริมาตรของยางแอสฟัลท์ที่เปลี่ยนไปเมื่อถูกความร้อน

2.9.2.2 <u>การยึดเกาะ</u> (Adhesion) ในที่นี้คือ การยึดเกาะที่ดีระหว่างวัสดุมวลรวมกับยางแอสฟัลท์ซึ่งเป็นหน้าที่ที่สำคัญมากสำหรับยางแอสฟัลท์ เพราะการยึดเกาะนี้จะมีผลโดยตรงต่อจำนวนวัสดุมวลรวมที่เหลืออยู่บนผิวทาง (นั่นคือ จำนวนวัสดุมวลรวมที่หลุดร่อนไป) ความทนทานของวัสดุมวลรวมตลอดจนถึงระยะเวลาใช้งานของผิวทาง (Service-Life) ส่วนสาเหตุของแรงยึดเกาะที่ลดลงนั้นได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.9.1.6

2.9.2.3 <u>ความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยว</u> (Cohesive Strength) คือ ก่อนที่จะเปิดใช้ผิวทางที่ก่อสร้างเสร็จใหม่ ๆ ยางแอสฟัลท์จะต้องมีความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวเพียงพอที่จะป้องกันการหลุดร่อนของวัสดุมวลรวมจากยวดยานที่วิ่งผ่านเมื่อเปิดผิวจราจรแล้ว คุณสมบัติของยางแอสฟัลท์ที่ดีสำหรับงานผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์นี้จะต้องมีลักษณะเหลวพอที่จะพ่นฉีดลงบนผิวทางในอุณหภูมิที่กำหนดได้อย่างทั่วถึง และต้องสามารถคืนสู่สภาพแข็งตัวในระยะเวลารวดเร็วก่อนที่จะเปิดใช้ผิวทาง

2.9.2.4 <u>ความสม่ำเสมอของการลาดยาง</u> (Uniformity) การลาดยางอย่างสม่ำเสมอนี้จะเกี่ยวข้องกับความหนืดและอุณหภูมิของยางแอสฟัลท์ Mcleod[28] แนะว่า ความหนืดสูงสุดสำหรับการใช้งานควรอยู่ในช่วง 25-50 Sec. Saybolt Furol หรือ 60-110 เซนติสโต๊ค (Centristokes) และเขาได้สร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิและความหนืดของยางแอสฟัลท์แต่ละชนิดเพื่อใช้ในการลาดและอื่น ๆ ตามรูปที่ 2.25

2.9.2.5 <u>ความทนทาน</u> (Durability) ยางแอสฟัลท์ที่มีคุณสมบัติทนทานต่อขบวนการทำลายตามธรรมชาติ (Weathering) และสภาพการใช้งานทั่วไปได้ดีเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการยืดอายุบริการ (Service Life) ของถนน และเหมาะสมในการใช้ก่อสร้างงานผิวทางชนิดต่าง ๆ สาเหตุที่ทำให้ความทนทานของยางแอสฟัลท์ลดลงคือ ความเปราะและการแข็งตัวของยางแอสฟัลท์ซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำมัน (Oils) ออกจากสารบิทูเมน หรือจากปฏิกิริยาเคมีของออกซิเจนในบรรยากาศกับสารบิทูเมนในยางแอสฟัลท์ เมื่อเวลาผ่านไปปฏิกิริยาทั้งสองจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง และเมื่อความหนาของผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์เพิ่ม

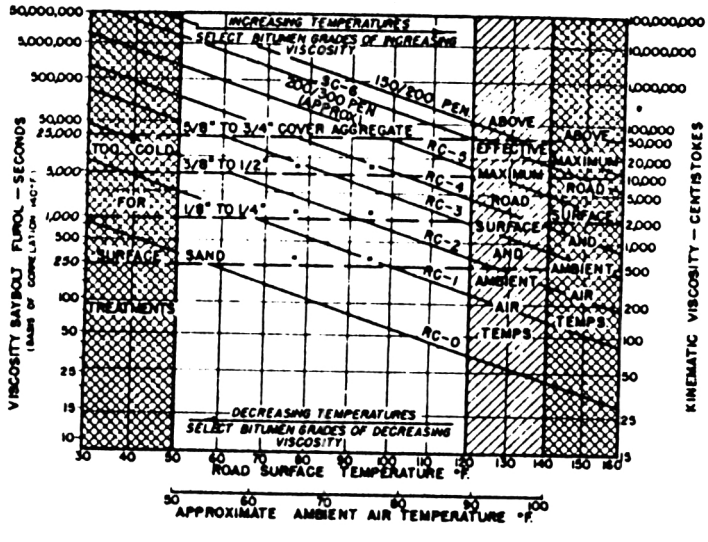


รูปที่ 2.24 แสดงรูปหน้าตัดของผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ในขณะ

(a) ทันทีหลังจากการโรยวัสดุมวลรวมเรียบร้อย

(b) หลังจากได้รับการบดอัดจนวัสดุมวลรวมอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายของมัน

(ข้อมูลจาก *Mcleod*[28])



รูปที่ 2.25 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิบนผิวทางและอุณหภูมิของอากาศ ต่อขนาดของวัสดุมวลรวมในการคัดเลือกวัสดุประสานบิทูมินัส สำหรับผิวทางเซอร์เฟส-ทรีตเมนท์ หรือ ซีลโค้ท ในประเทศแคนาดา (ข้อมูลจาก *Mcleod*[28])

ขึ้น จะมีผลให้ปฏิกิริยาทั้งสองลดลง ทำให้ความทนทานของยางแอสฟัลท์เพิ่มขึ้น จึงเป็นวิธีการแก้ไขประการหนึ่ง[34]

2.9.3 องค์ประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์

2.9.3.1 ลักษณะผิวพื้นทาง หรือผิวทางเดิม (Underlying Surface) เพื่อที่จะได้ผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ที่ดีนั้นจะต้องประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ วัสดุชั้นพื้นทางจะต้องมีการยึดเกาะกันและมีคุณสมบัติในการรับน้ำหนักกระทำดีโดยได้ทำการบดอัดที่เหมาะสม ส่วนผิวบนของชั้นพื้นทางจะต้องเรียบได้ระดับ แห้งและสะอาดก่อนทำการลาดยาง เมื่อสามารถทำตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้ว จะได้ผิวทางที่มีความเรียบสม่ำเสมอดี ส่วนชนิดและปริมาณของยางแอสฟัลท์รวมทั้งขนาดและจำนวนวัสดุมวลรวมที่ใช้บู่ผิวทางก็จะต้องพิจารณาถึงสภาพผิวเดิมที่มีอยู่ด้วย เพื่อนำมาปรับค่าที่ได้จากการคำนวณออกแบบในห้องทดลอง อาทิเช่น

ในกรณีเมื่อผิวทางเดิมเป็นผิวทางแอสฟัลท์ จะต้องพิจารณาถึงปริมาณยางแอสฟัลท์ที่เหลืออยู่ว่ามีมากน้อยเพียงใด ถ้ามีมากอาจใช้ความร้อนและยุดยางแอสฟัลท์ส่วนที่เกินนี้ออกหรือถ้ามีน้อยอาจจะเพิ่มปริมาณยางแอสฟัลท์มากขึ้นกว่าที่ออกแบบไว้ โดยการปรับอัตราการลาดยางของเครื่องลาดยาง (Distributor) ให้เหมาะสมอีกวิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหานี้คือ การเพิ่มหรือลดขนาดของวัสดุมวลรวมที่ใช้เมื่อปริมาณยางแอสฟัลท์ที่เหลืออยู่มีมากหรือน้อยตามลำดับ ซึ่งในแต่ละกรณีจะต้องพยายามให้เปอร์เซนต์ช่องว่างหลังจากก่อสร้างเรียบร้อยแล้วเท่าหรือใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้แต่เดิม

ในกรณีที่ผิวทางเดิมเป็นผิวทางคอนกรีต ซึ่งโดยปกติจะมีลักษณะผิวที่ไม่เรียบหรือไม่เป็นระดับเดียวกัน จึงต้องทำการปรับระดับผิวเสียก่อนซึ่งมักจะใช้สารผสมบิทูมินัส (Bituminous Mixes) ก่อนที่จะก่อสร้างผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ทับอีกครั้งหนึ่ง

ในกรณีที่ผิวทางเดิมเป็นหินคลุก จะต้องทำการลาดยาง Tack Coat เพื่อเชื่อมหินคลุกเดิมนั้นแล้วลาดยางแอสฟัลท์ต่อด้วยโรยวัสดุมวลรวมตามขนาดที่ออกแบบจัดเตรียมไว้ต่อไป ซึ่งในแต่ละกรณีที่กล่าวมานั้นไม่ได้แสดงว่า ผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ที่สร้างแล้วจะไม่เกิดการโก่งตัว (Bumps) ของผิวทางแต่จะมีความคงทนเพียงพอถ้าสามารถกำจัดฝุ่นผงและความชื้นออกจากผิววัสดุมวลรวมเดิมให้เหลือน้อยที่สุด

2.9.3.2 การควบคุมการก่อสร้าง (Construction Control) เป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างมาก เพราะแม้ว่าการออกแบบจะดีและถูกต้องหรือวัสดุมวลรวมและยาง-

แอสฟัลท์จะมีคุณภาพดีเท่าไรก็ตาม แต่ถ้าการควบคุมงานไม่ดีและละเอียดรอบคอบพอ ก็จะทำให้ผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ที่ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งส่วนที่สำคัญที่จะกล่าวถึงคือ การควบคุมยวดยาน (Control of Traffics) ระหว่างการก่อสร้างและทันทีหลังจากแล้วเสร็จจะต้องควบคุมไม่ให้ยวดยานแล่นผ่านด้วยความเร็วสูงเกิน 48 กิโลเมตรต่อชั่วโมง[25] (สำหรับมาตรฐานของกรมทางหลวง ที่ ทล-ม 401/2518 กำหนดไว้ไม่เกิน 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ซึ่งวิธีการนี้จะสามารถป้องกันผิวทางขณะที่อยู่ในช่วงที่มีเสถียรภาพต่ำสุด (คือทันทีหลังจากผิวทางแล้วเสร็จ) ได้ผลดีที่สุด อีกประการหนึ่งคือ ในกรณีที่ยวดยานแล่นผ่านด้วยความเร็วตามที่กำหนดซ้ำซาก (Repeated Slow Speed Traffic) จะเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของผิวทางเซอร์เฟสทรีต-เมนท์ เพราะจะทำให้การจัดเรียงตัวของเม็ดวัสดุมวลรวมอยู่ในตำแหน่งที่มีเสถียรภาพมากที่สุด และจะเป็นการเพิ่มแรงยึดเกาะของวัสดุมวลรวมกับยางแอสฟัลท์โดยการนวดและบดอัดไปในตัวขณะที่ผิวทางถูกใช้งาน

ในระหว่างการควบคุมงานก่อสร้าง สิ่งที่จะต้องปฏิบัติอย่างสม่ำเสมอก็คือการสำรวจตรวจสอบสภาพผิวทางก่อน ระหว่างและหลังการก่อสร้างทุกขั้นตอนให้ละเอียดรอบคอบ ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ ต้องอาศัยประสบการณ์และการตัดสินใจที่ดี จึงจะได้ผิวทางเซอร์-เฟสทรีตเมนท์ที่สมบูรณ์

2.9.3.3 <u>ชนิดและปริมาณของการจราจร</u> (Volume & Type of Traffic) จะมีผลต่อชนิดและอายุใช้งานของผิวทาง (Service Life) คือ เมื่อปริมาณการจราจรมาก ถนนจะต้องรับน้ำหนักมาก วัสดุที่ใช้ทำชั้นพื้นทางจะต้องมีคุณภาพดีและผิวทางส่วนบนสุด คือ เซอร์เฟสทรีตเมนท์ก็จะต้องดีมากขึ้นตามไปด้วย โดยทั่วไป ผิวทางเซอร์เฟสทรีต-เมนท์ควรจะใช้สำหรับถนนที่รับการจราจรเบาและปานกลาง คือในปริมาณน้อยกว่า 2,000 คันต่อวัน[25] ในสภาพที่ปริมาณและชนิดของการจราจรที่เปลี่ยนไปตามสภาวะต่าง ๆ ทำให้เป็นการยากที่จะคาดคะเนปริมาณการจราจรที่แน่นอนในอนาคต ดังนั้น ผิวทางในปัจจุบันจึงอาจเกิดความเสียหายขึ้นได้เมื่อปริมาณและชนิดของการจราจรเกินกำลังรับน้ำหนักของถนนนั้น

2.9.3.4 <u>สภาพอากาศ</u> (Climate) สภาพอากาศในแต่ละท้องถิ่นมีผลต่อขั้นตอนการก่อสร้างและอายุการใช้งานของผิวทางนั้น เมื่อสภาพอากาศร้อนมาก ๆ ยางแอสฟัลท์จะอ่อนตัว ทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวลดลง และจะเกิดการหลุดร่อนขณะยวดยานแล่นผ่าน

ไปมา ส่วนสภาพอากาศเย็น ยางแอสฟัลท์จะแข็งและเปราะ ทำให้เกิดการแตกร้าวเมื่อถูกแรงกระแทกจากยวดยาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูฝนจะเป็นอุปสรรคอย่างมากต่อการก่อสร้าง ทำให้ผิวทางมีอายุการใช้งานน้อยลงกว่าปกติ ปัญหาอีกอย่างหนึ่งที่มักจะเกิดในสภาพอากาศชื้น ก็คือความชื้นรอบผิววัสดุมวลรวมถ้าไม่สามารถกำจัดออกได้หมดจะทำให้เสถียรภาพของผิวทางลดลง จนเกิดความเสียหายขึ้นได้ไม่เฉพาะที่ผิวทางเท่านั้น แต่เป็นปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งต่อวัสดุมวลรวมเช่นเดียวกัน[25]

2.10 <u>การศึกษาถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อการออกแบบของผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ที่ผ่านมา</u>[25]

ในต้นปี คศ. 1930 Hanson, F.M. ชาวนิวซีแลนด์ เป็นคนแรกที่ศึกษาถึงองค์ประกอบที่มีต่อการออกแบบผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ ซึ่งผลการค้นคว้าของเขาถือเป็นพื้นฐานของวิธีการออกแบบโดยทั่วไป จนถึงกลางปี คศ. 1940 ก็ได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวิธีการออกแบบเพิ่มเติม ตลอดจนองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องนี้ ในการออกแบบผิวทางประเภทนี้ สิ่งที่จะต้องหา คือ ชนิดและจำนวนของวัสดุมวลรวม และยางแอสฟัลท์ที่พอเหมาะในการก่อสร้าง องค์ประกอบที่ต้องพิจารณาแบ่งเป็น

2.10.1 <u>องค์ประกอบที่จะต้องพิจารณาในการหาจำนวนและชนิดของวัสดุมวลรวม</u>

2.10.1.1 <u>จำนวนวัสดุมวลรวมที่ใช้</u> จะขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง หน่วยน้ำหนักและช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวม ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับปริมาณยางแอสฟัลท์ที่ต้องใช้ จำนวนวัสดุมวลรวมที่ออกแบบจะอยู่ในรูปของปริมาณขั้นมูลฐาน (Basic Quantity) และในงานสนามจะเป็น ปริมาณที่ใช้จริง (Field Spread Quantity)

ปริมาณขั้นมูลฐานนี้ เป็นการหาปริมาณวัสดุมวลรวมทางตรง ซึ่งเป็นวิธีง่ายๆ สะดวกและรวดเร็ว เรียกว่า <u>วิธี Test-Board</u>[25,27] โดยทำการโรยวัสดุมวลรวมลงบนถาดทดสอบที่รู้พื้นที่หน้าตัดให้เต็มพอดี ไม่ให้เม็ดวัสดุมวลรวมซ้อนกัน หรือเกยกันให้น้อยที่สุด ชั่งหาน้ำหนักวัสดุมวลรวมบนถาดทดสอบ เราก็จะสามารถหาปริมาณขั้นมูลฐานได้ในหน่วยน้ำหนักต่อพื้นที่ของถาดทดสอบ (กิโลกรัมต่อตารางเมตร) ส่วนวิธีคำนวณหาปริมาณขั้นมูลฐานนี้ จะต้องหาค่าขนาดเฉลี่ยของวัสดุมวลรวม Hanson[30] เรียกว่า "<u>Average Least Dimension</u>" (ALD) Hanson ได้หาค่า ALD โดยการวัดขนาดเล็กที่สุดของวัสดุมวลรวมที่จะออกแบบอย่างน้อย 100 ก้อน ด้วยแคลิปเปอร์ (Calipers) ทำการหาค่าเฉลี่ยขนาดของตัวอย่างที่วัดได้ จะ

เป็นค่า ALD ของวัสดุมวลรวมนั้น แต่วิธีที่ใช้กันมากที่สุด คือ วิธีการร่อนคัดขนาด (Sieve Analysis) หาขนาดเฉลี่ยของวัสดุมวลรวม โดยกำหนดว่า"ขนาดเฉลี่ยของวัสดุมวลรวมคือขนาดที่มีจำนวนวัสดุมวลรวมเล็กกว่าขนาดนี้ 50 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก (50% passing by Weight)" ส่วนค่าอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องคือ ค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมในสภาพหลวม (Loose Unit Weight) หาจากน้ำหนักวัสดุมวลรวมที่สามารถใส่ลงไปในภาชนะบรรจุหนึ่งหน่วยปริมาตรโดยไม่ต้องทำการบดอัด, ค่าความถ่วงจำเพาะรวมของวัสดุมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM (Bulk Specific Gravity), ค่าปริมาณช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวม (Void Fraction) ซึ่งจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ อย่างละเอียดในภาคผนวก ก.

เกี่ยวกับรูปร่างของวัสดุมวลรวม Hveem, et al[33] พบว่า วัสดุมวลรวมที่มีอัตราส่วนคละ (Gradation) เหมือนกัน แต่มาจากคนละแหล่งวัตถุดิบ จะโรยพื้นที่บนผิวทางได้ไม่เท่ากันเนื่องจากรูปร่างของวัสดุมวลรวมต่างกัน Nevitt[32] พบว่าวัสดุมวลรวมที่มีรูปร่างค่อนข้างเหลี่ยม (Cubic) จะต้องใช้ปริมาณวัสดุมวลรวมมากกว่ารูปร่างอื่นในพื้นที่ที่เท่ากัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า วิธี Test-Board นั้นเป็นวิธีที่รวมถึงผลของรูปร่างหน่วยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมที่มีต่อปริมาณวัสดุมวลรวมเอาไว้แล้ว จึงเป็นวิธีการที่น่าจะได้ผลถูกต้อง

เกี่ยวกับปริมาณช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม Hanson[30] พบว่า เมื่อโรยวัสดุมวลรวมลงไปบนผิวทางทันที หลังจากลาดยางแอสฟัลท์ครั้งแรกก่อนทำการบดทับจะมีปริมาณช่องว่างถึง 50 เปอร์เซนต์ แต่หลังจากการบดทับด้วยเครื่องมือต่าง ๆ แล้วปริมาณช่องว่างจะลดลงเหลือประมาณ 20 เปอร์เซนต์ ซึ่งค่าที่ทดลองได้นี้เป็นค่าประมาณโดยทั่วไปเท่านั้น ส่วนค่าที่แน่นอนจะต้องพิจารณาถึงส่วนอื่นประกอบด้วย เช่น รูปร่าง ขนาดและชนิดของวัสดุมวลรวม เป็นต้น

ส่วน<u>ปริมาณที่ใช้จริง</u> จะมีปริมาณมากกว่าปริมาณขั้นมูลฐาน เนื่องจากการสูญเสียไปของวัสดุมวลรวมในระหว่างการบรรทุกขนย้าย การโรยวัสดุที่ไม่แน่นอนของเครื่องมือในสนาม หรือจากการหลุดร่อนไปบ้างขณะยวดยานแล่นผ่านซึ่งเป็นเหตุผลที่สำคัญ ดังนั้น The Country Roads Board of Victoria ประเทศออสเตรเลีย กำหนดว่า "ให้เพิ่มปริมาณวัสดุขั้นมูลฐาน 15 เปอร์เซนต์ ในการนำไปใช้ในงานสนาม" โดยจากการสังเกตพบว่า ถ้าเป็นวัสดุมวลรวมขนาดใหญ่จะเกิดการหลุดร่อนประมาณ 2 เปอร์เซนต์ วัสดุมวลรวม

ขนาดเล็กประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์เกิดจากการสูญหาย (Wastage Loss) ไประหว่างการขนย้ายและบรรทุก

2.10.1.2 ชนิดของวัสดุมวลรวมที่ใช้ การเลือกใช้จะต้องพิจารณาถึงคุณภาพ อัตราส่วนคละและขนาดของวัสดุมวลรวม

- คุณภาพของวัสดุมวลรวม วัสดุมวลรวมจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้คือ ต้องแห้งและสะอาด สามารถยึดเกาะติดกับยางแอสฟัลท์หรือวัสดุประสานอื่นได้ดี ไม่หลุดร่อนเมื่อถูกน้ำ ต้องทนทานและมีความต้านทานการลื่นไถลได้ดี

- อัตราส่วนคละ ควรเลือกใช้วัสดุมวลรวมขนาดสม่ำเสมอหรือมีขนาดใกล้เคียงกัน เกี่ยวกับอัตราส่วนคละนี้มีผู้กำหนดแนะนำไว้หลายคน เช่น Mcleod[28] กำหนดว่า "ขนาดเดี่ยวของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ (One-Size Aggregate) จะต้องมีอัตราส่วนคละ 60-70 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดที่กำหนดและค้างบนตะแกรงมาตรฐานขนาด $\frac{7}{10}$ ของขนาดที่กำหนดนั้น" Benson[34] เสนอแนะว่า "ขนาดเดี่ยวของวัสดุมวลรวมควรมีอัตราส่วนขนาดใหญ่สุดและเล็กสุดเท่ากับ 2:1 และอาจมีขนาดใหญ่กว่าหรือเล็กกว่าขนาดที่กำหนดได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์" อีกประการหนึ่งที่สำคัญคือ จะต้องพิจารณาราคาของวัสดุมวลรวมเมื่อใช้ขนาดเดี่ยว กับขนาดคละ (Open-Graded) ว่าจะเหมาะสมอย่างไรหรือไม่กับผิวทางที่จะทำการก่อสร้าง

- ขนาดของวัสดุมวลรวม จากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้วัสดุมวลรวมขนาดเล็กเกินไป มักจะเกิดการเยิ้ม หรืออาจเกิดการหลุดร่อนง่าย เนื่องจากความผิดพลาดในการก่อสร้าง อาทิเช่น การลาดยางแอสฟัลท์ไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่ผิว เป็นต้น และเมื่อใช้วัสดุมวลรวมขนาดใหญ่เกินไปจะมีผลทำให้เกิดเสียงดังเนื่องจากยางสัมผัสผิวทางขณะที่ยวดยานแล่นผ่าน ซึ่งก่อให้เกิดความรำคาญต่อผู้ขับขี่ ดังนั้นจึงได้มีผู้ทำการศึกษาและแนะนำขนาดวัสดุมวลรวมที่เหมาะสมในสภาพใช้งานทั่วไป เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเสียงดังของยางขณะสัมผัสผิวทาง สำหรับถนนที่รับปริมาณการจราจรหนักขนาดที่แนะนำคือ $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$ นิ้ว และ $\frac{3}{8}$ นิ้ว สำหรับถนนที่รับปริมาณการจราจรเบา[28,30,33,34]

2.10.2 องค์ประกอบที่จะต้องพิจารณาในการหาปริมาณวัสดุประสานบิทูมินัส ในการคำนวณออกแบบหาปริมาณยางแอสฟัลท์ โดยมากจะเป็นปริมาณยางที่เหลือ (Residual Bituminous Material) บนผิวทางหลังการบดอัดแล้ว ซึ่งปริมาณดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ปริมาณขั้นมูลฐานและปริมาณที่ใช้จริง เช่นเดียวกับวัสดุมวลรวม

2.10.2.1 <u>ปริมาณวัสดุประสานบิทูมินัส</u> ปริมาณยั้นมูลฐานสำหรับยางแอส-ฟัลท์ ยึดถือหลักการของ Hanson, F.M. ที่ว่า เป็นปริมาณยางแอสฟัลท์ที่ต้องการใช้ในการอุดช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมเพื่อให้ได้ความลึกสูงสุด (Optimum Depth)[28] ดังรูปที่ 2.24 เขาได้สรุปว่า ปริมาตรช่องว่าง 20 เปอร์เซ็นต์หลังจากการเรียงตัวของวัสดุมวลรวมจนมีความสูงน้อยที่สุดในทางดิ่ง (Least Dimension in Vertical Direction) เมื่อถูกการบดอัดแล้วจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุมวลรวม แต่จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัสดุมวลรวมนั้น เมื่อทราบปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมและทราบค่า ความลึกที่วัสดุมวลรวมจะจมลงไปในยางแอสฟัลท์ (Embedded Depth) ก็จะสามารถหาปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ที่จะใช้ได้ ปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์จะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมที่ใช้ทั้งขนาด รูปร่าง และความพรุน รวมไปถึงชนิดและปริมาณการจราจรที่ใช้ผิวทางนั้น

- <u>ขนาดของวัสดุมวลรวม</u> มีผลโดยตรงต่อปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ที่ใช้ในการอุดช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม Hanson[30] พบว่า เปอร์เซ็นต์ความลึกของวัสดุมวลรวมที่จมลงไปในยางแอสฟัลท์ควรจะอยู่ในช่วง 50-70 เปอร์เซ็นต์ของขนาดวัสดุมวลรวมที่ใช้ (30-50 เปอร์เซ็นต์สำหรับ Kearby และ Benson) Lovering[36] ศึกษาพบว่า ปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ที่ต้องการ (แกลลอน/ตารางหลา) จะเท่ากับ 0.4 เท่าของขนาดวัสดุมวลรวม (นิ้ว) โดยค่า 0.4 นี้รวมถึงปริมาตรของช่องว่างในวัสดุมวลรวมและเปอร์เซ็นต์ความลึกที่วัสดุมวลรวมจมลงไปในยางแอสฟัลท์ แต่อย่างไรก็ตามผู้ทำการศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่สรุปว่า ปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ที่ใช้ควรจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดวัสดุมวลรวมใหญ่ขึ้น

- <u>รูปร่างของวัสดุมวลรวม</u> มีผลต่อปริมาณยางแอสฟัลท์ที่ใช้เช่นกัน คือ เมื่อรูปร่างของวัสดุมวลรวมเปลี่ยนไป ปริมาตรช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมและปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย Kuipers[37] ได้ทำการทดลองพบว่า วัสดุมวลรวมที่มีรูปร่างค่อนข้างกลมจะทำให้ค่าขนาดเฉลี่ยและปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ที่ใช้เพิ่มขึ้น. Mcleod[28] ได้รายงานลงใน The Country Roads Board of Victoria ประเทศออสเตรเลีย เกี่ยวกับการใช้ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) เพื่อหาค่าขนาดเฉลี่ยของวัสดุมวลรวมที่ใช้ (Median Size) สรุปว่า วัสดุมวลรวมที่มีรูปร่างค่อนข้างกลม (ค่า F.I. ต่ำ) ทำให้ค่าขนาดเฉลี่ยของวัสดุมวลรวมสูงและปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ที่ใช้จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.

- ความพรุนของวัสดุมวลรวม Mcleod[28] เสนอแนะว่า "ปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ควรจะเพิ่มขึ้นในอัตรา 0.03 แกลลอนต่อตารางหลา สำหรับหินปูนที่อ่อนและมีการดูดซึมยางได้ดี" Hveem, Lovering และ Sherman[33] แสดงให้เห็นว่าปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความยั้นเหลว และอุณหภูมิของยางแอสฟัลท์ อาทิเช่น ในสภาพอากาศเย็นวัสดุมวลรวมจะดูดซึมยางน้อยกว่าสภาพอากาศร้อน เป็นต้น

- อิทธิพลของปริมาณการจราจร Hanson & Mcleod[28,30] พบว่า ปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ที่ต้องใช้จะลดลงเมื่อปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้น เนื่องจากผิวทางที่รับปริมาณการจราจรน้อยช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมจะมีมากกว่าผิวทางที่รับปริมาณการจราจรมาก เพราะวัสดุมวลรวมจะถูกน้ำหนักกระทำจากยวดยานน้อยกว่า ทำให้การจัดตัวของวัสดุมวลรวมแต่ละเม็ดไม่ยึดกันมาก จึงเป็นเหตุให้ปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ที่ใช้มากขึ้น จากเหตุผลดังกล่าว ปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ที่ลดลง เนื่องจากปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้นจะเปลี่ยนไปตามวิธีการออกแบบของแต่ละวิธี แต่โดยทั่วไปแล้วสำหรับผิวทางที่รับปริมาณการจราจรปานกลาง (มากกว่า 2,000 คันต่อวัน) จะสามารถลดปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ที่ใช้เมื่อเทียบกับผิวทางที่รับปริมาณการจราจรน้อยมาก (น้อยกว่า 100 คันต่อวัน) ได้ถึง 28-40 เปอร์เซ็นต์[25]

- ส่วนปริมาณยางแอสฟัลท์ที่ใช้จริงในสนาม จะมีปริมาณไม่เท่ากับปริมาณยั้นมูลฐานซึ่งจะต้องทำการแก้ไขโดยพิจารณาถึงสภาพพื้นผิวทางเดิม และปริมาตรของยางแอสฟัลท์ที่เปลี่ยนขณะลาดยางเมื่ออุณหภูมิสูง

- สภาพพื้นผิวทางเดิม Benson[34] เสนอแนะว่า สำหรับพื้นผิวทางที่เรียบได้ระดับซึ่งเป็นผิวทางสภาพใหม่ ไม่จำเป็นต้องเพิ่มหรือลดปริมาณแต่อย่างไร แต่ในกรณีที่พื้นผิวทางมีรอยแตกและมีลักษณะพรุนเป็นรู ควรจะเพิ่มปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ 0.05-0.10 แกลลอนต่อตารางหลา เพื่อป้องกันการดูดซึมของวัสดุมวลรวม ในกรณีที่พื้นผิวทางเดิมมีลักษณะของยางแอสฟัลท์เยิ้ม ควรลดปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์ของ 0.05 แกลลอนต่อตารางหลา

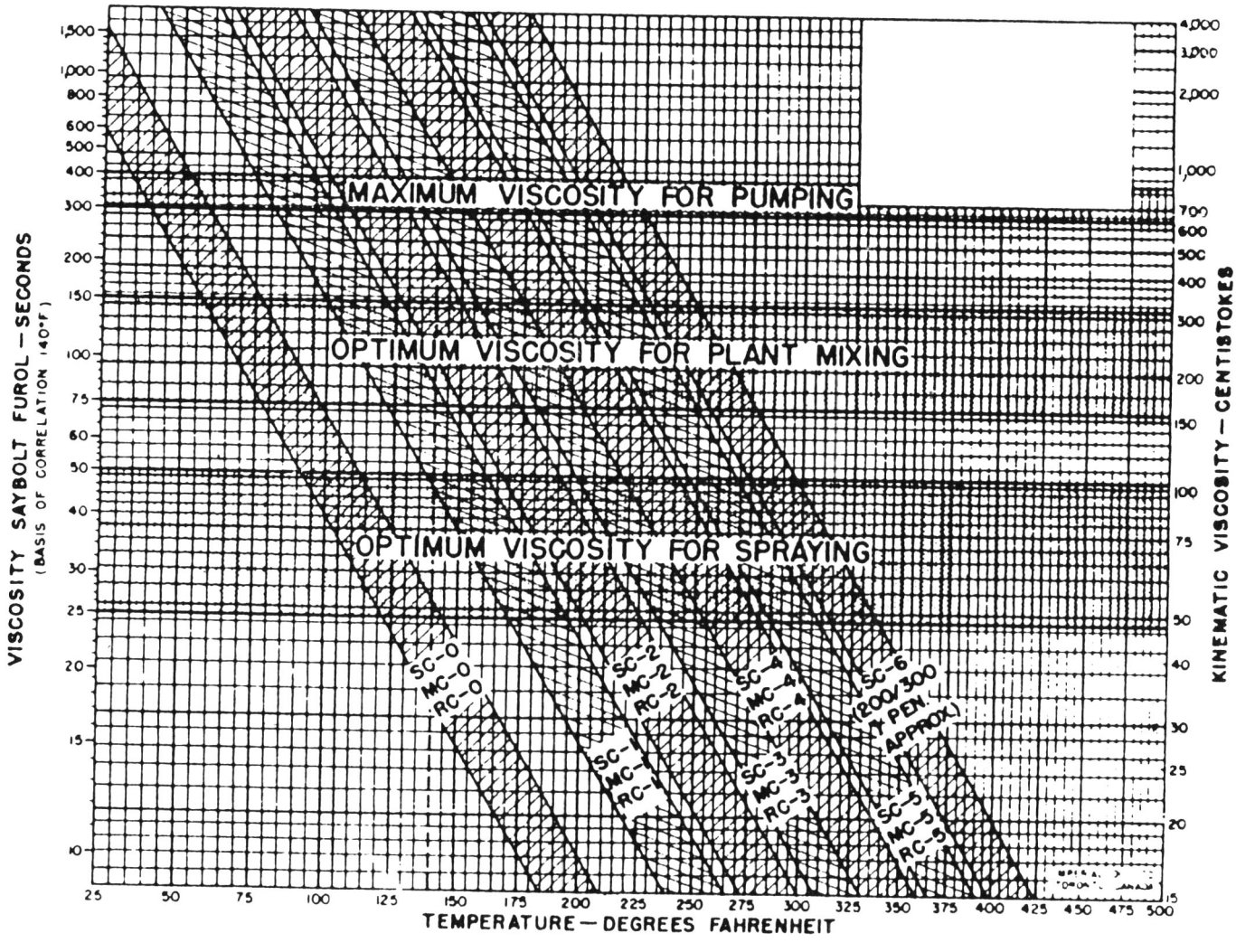
- ปริมาตรของยางแอสฟัลท์ที่เปลี่ยนเมื่ออุณหภูมิสูง เนื่องจากปริมาณยั้นมูลฐานของยางแอสฟัลท์จะหาออกมาได้นั้นจะเป็นปริมาณที่อุณหภูมิ $60^{\circ}F$ ตามมาตรฐาน ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิของยางแอสฟัลท์ขณะที่ลาดเกินกว่าอุณหภูมิกำหนด จะต้องทำการปรับค่าปริมาตรนี้ โดยถือว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุยางแอสฟัลท์จะมีค่าประมาณ 0.00035 ค่าองศา

ฟาเรนไฮท์[28,30,33,36] และค่าที่แก้ไขนี้จะเป็นปริมาณยางแอสฟัลท์ที่เครื่องลาดยาง (Distributor) ควรจะลาดหรือฉีดยางออกไปบนพื้นผิวทางที่จะทำการก่อสร้าง

2.10.2.2 <u>การเลือกวัสดุประสานบิทูมินัส</u> จะต้องคำนึงถึงอิทธิพลจากสิ่งต่าง ๆ ดังนี้คือ

- <u>อิทธิพลของอุณหภูมิ</u> มีผลต่อการเลือกชนิดของวัสดุประสานคือ อุณหภูมิของอากาศจะมีผลต่ออัตราการบ่มของวัสดุประสาน พบว่า ในวันที่อากาศร้อนระยะเวลาในการใช้บ่มจะน้อยกว่าวันที่อากาศเย็น ส่วนอุณหภูมิของผิวถนนจะมีผลต่อความหนืดของวัสดุประสาน จากการศึกษาค้นคว้าของ Mcleod[28] พบว่า อุณหภูมิของผิวถนนควรจะอยู่ในช่วง 60-130°F เพราะเมื่ออุณหภูมิผิวถนนต่ำกว่า 60°F วัสดุประสานจะมีความหนืดสูงเกินไปที่จะเกิดแรงยึดเกาะอย่างรวดเร็วกับวัสดุมวลรวม และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 130°F ผิวถนนจะร้อนเกินไปที่จะเกิดแรงยึดเกาะที่ดีต่อวัสดุมวลรวม และมีความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยวไม่เพียงพอ ส่วนอุณหภูมิของอากาศในระหว่างการก่อสร้างควรอยู่ในช่วง 50-90°F

- <u>อิทธิพลของความหนืด</u> ความหนืดนี้มีผลต่อความสามารถของวัสดุประสานที่จะยึดเกาะวัสดุมวลรวมและให้วัสดุมวลรวมเหล่านี้คงสภาพในตำแหน่งเดิมไว้ได้เมื่อถูกน้ำหนักกระทำจากยวดยานนั่นคือ ที่ความหนืดต่ำ (อุณหภูมิผิวทางสูง) วัสดุประสานไม่สามารถจะแปรสภาพให้แข็งแรงเพียงพอที่จะยึดเหนี่ยววัสดุมวลรวมให้คงสภาพอยู่ได้ในระยะเวลาอันสั้น Mcleod[28] ได้สร้างกราฟเพื่อหาค่าความหนืดของวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์หรือซีลโค้ท ขนาดของวัสดุมวลรวมที่ใช้และอุณหภูมิของพื้นถนนหรืออุณหภูมิของอากาศขณะทำการก่อสร้าง ตามรูปที่ 2.26 โดยมีหลักการว่า "ความหนืดที่ได้ต้องเพียงพอที่จะเกิดแรงยึดเกาะระหว่างวัสดุมวลรวมและวัสดุประสานอย่างรวดเร็ว และเพียงพอที่จะรักษาสภาพตำแหน่งของวัสดุมวลรวมหลังจากการเปิดรับปริมาณการจราจรแล้ว" ซึ่งจากรูปที่ 2.25 จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิสำหรับยางแอสฟัลท์ศัทแบ็คชนิด RC-0 ถึง RC-5 และยางแอสฟัลท์ซีเมนต์ (AC). เขายังเสนอแนะว่า สำหรับอุณหภูมิของผิวถนนเดียวกัน เมื่อขนาดของวัสดุมวลรวมใหญ่ขึ้นแล้วความหนืดของวัสดุประสานควรจะมีค่าเพิ่มขึ้น และการใช้กราฟรูปที่ 2.25 จะใช้ได้เฉพาะในท้องถิ่นใดท้องถิ่นหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ได้ทั่วไป เพราะอาจจะมีผลจากความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสภาพอากาศและคุณภาพของวัสดุมวลรวมในแต่ละท้องถิ่นที่แตกต่างกัน จึงควรจะหาความสัมพันธ์ของกราฟดังกล่าวเพื่อนำมาใช้โดยเฉพาะในท้องถิ่นนั้น ๆ



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และ ความหนืดของยางแอสฟัลท์เหลวเกรดต่าง ๆ พร้อมค่าความหนืดในช่วงที่แนะนำสำหรับการฉีด (ลาด) การผสม และการปู (ข้อมูลจาก Mcleod[28])

- อิทธิพลของสภาพอากาศ ที่มีผลมากที่สุดก็คือ ความชื้นของอากาศ และลมที่พัดผ่านขณะทำการก่อสร้าง พบว่า จะมีผลโดยตรงกับอัตราการบ่มของวัสดุประสาน เมื่อลมพัดแรงจะทำให้การระเหยของตัวทำละลายในยางคัทแบ็ค หรือยางอีมัลชั่นไฟต์ระเหยไปจากผิวทาง ทำให้อัตราการบ่มของยางแอสฟัลท์เพิ่มเร็วขึ้น ส่วนที่ ๆ มีความชื้นสูงอัตราการบ่มของยางแอสฟัลท์จะลดลง

- อิทธิพลของสภาพผิวถนนเดิม มีความสำคัญอย่างมากต่อการเลือกชนิดของวัสดุประสาน โดยมีหลักในการพิจารณาดังนี้ ถ้าสภาพผิวทางเดิมแตกร้าวหรือหลุดร่อนมาก ควรเลือกใช้วัสดุประสานที่มีความหนืดต่ำเพื่อให้สามารถอุดช่องว่างได้มาก ซึ่งถือเป็นการปรับระดับผิวทางเดิมก่อนการก่อสร้างวิธีการหนึ่งที่มีส่วนสำคัญ[28]

- อิทธิพลของขนาดวัสดุมวลรวม Lovering[38] ศึกษาพบว่า ถ้าใช้ขนาดวัสดุมวลรวมใหญ่ขึ้น ความแข็งแรงของวัสดุประสานที่จะต้องยึดวัสดุมวลรวมให้อยู่ในตำแหน่งเดิมจะต้องเพิ่มขึ้น นั่นคือ ความหนืดของวัสดุประสานที่ใช้จะต้องเพิ่มขึ้น เมื่อใช้วัสดุมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

- อิทธิพลของชนิดและความเร็วของยวดยาน พบว่า ยวดยานที่มีน้ำหนักมากและวิ่งเร็ว จะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายของผิวทาง และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นมากเท่าไรความเสียหายก็จะเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้น Lovering[38] จึงเสนอแนะว่าในกรณีเช่นนี้ควรจะใช้วัสดุประสานที่สามารถให้การยึดเกาะที่แข็งแรงเพียงพอที่จะรักษาสภาพและตำแหน่งของวัสดุมวลรวมไว้ อาทิเช่น ยางแอสฟัลท์ซีเมนต์ เป็นต้น

- อิทธิพลของวิธีการก่อสร้าง จะต้องนำวิธีการก่อสร้างมาพิจารณาในการเลือกชนิดของวัสดุประสานเพราะวัสดุประสานแต่ละชนิดจะใช้ขั้นตอนในการก่อสร้างไม่เหมือนกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องจักรเครื่องมือที่ใช้ก็มีส่วนสำคัญเช่นกัน

- อิทธิพลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ราคาของวัสดุประสานที่จะใช้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายเมื่อเริ่มทำการก่อสร้าง ราคาค่าบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายระหว่างการก่อสร้างต่อปีของแต่ละชนิด, ประสบการณ์ของผู้ควบคุมงานที่ผ่านมา จะมีผลต่อการเลือกชนิดของวัสดุประสานที่จะนำมาใช้งานด้วย

2.10.2.3 ยางแอสฟัลท์ที่ใช้ในงานผิวทางเฮอร์เฟสทรีตเมนท์ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ใหญ่ ๆ ที่ใช้กันคือ

- ยางแอสฟัลท์ซีเมนต์ (AC.) นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะเป็นวัสดุประสานที่แข็งตัวแล้วยึดเกาะวัสดุมวลรวมให้อยู่กับที่ในตำแหน่งของมันได้เร็วและดีกว่าชนิดอื่น, ยางแอสฟัลท์ซีเมนต์นี้สามารถก่อให้เกิดความแข็งแรงในการยึดเกาะได้ดี และมีแนวโน้มที่จะเกิดการเยิ้มเหลวน้อยกว่ายางประเภทอื่น ๆ[25] ทั้งยังสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำลงไปในชั้นพื้นทางได้ดีด้วย แต่ข้อเสียของยางประเภทนี้ก็คือ ในกรณีที่ผิวถนนเดิมลื่นปรก เย็นเกินไป ยางแอสฟัลท์อาจจะยึดเกาะกับผิวถนนเดิมได้ยากกว่ายางประเภทอื่น และในกรณีที่ผิวถนนเดิมมีรอยแตกเล็ก ๆ มาก ยางแอสฟัลท์ซีเมนต์นี้จะไม่สามารถไหลซึมเข้าไปอุดรูร่องว่างต่าง ๆ ได้ดีเนื่องจากมักจะมีความหนืดสูง

- ยางแอสฟัลท์เหลวประเภทคัทแบ็ค ที่ใช้กันจะเป็นชนิด RC (Rapid-Curing) เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการบ่มน้อย และเมื่อบ่มหรือทิ้งไว้จนได้เวลาแล้ว ยาง RC นี้จะสามารถยึดเกาะวัสดุมวลรวมได้อย่างดียิ่ง มีค่า penetration ระหว่าง 80-120 ทั้งยังสามารถยึดเกาะกับผิวถนนเดิมได้ดีแม้ว่าผิวถนนจะเรียบ มีฝุ่นละอองบ้างก็ตาม แต่มีข้อเสียคือ จะเกิดการหลุดร่อนได้ง่ายถ้าเปิดรับการจราจรทันทีโดยเวลาบ่มน้อยเกินไป ส่วนชนิด MC จะใช้ได้ดีกับการอุดรอยแตกร้าวเล็ก ๆ ของผิวถนนเดิมเพื่อให้แข็งแรงขึ้นก่อนที่จะก่อสร้างผิวทางใหม่ แต่ข้อเสียคือ เวลาที่ใช้ในการบ่มจะมากกว่าชนิด RC ทำให้ต้องเสียเวลา หรือล่าช้าในการเปิดการจราจร จากมาตรฐานงานก่อสร้างผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ของกรมทางหลวงกำหนดว่า "เวลาอย่างน้อยที่สุดที่ใช้ในการบ่มของยางคัทแบ็คนี้ควรจะไม่น้อยกว่า 18 ชั่วโมง ในสภาพอากาศปกติเพื่อให้ Volatile Matter ระเหยออกไปเกือบหมด"

- ยางแอสฟัลท์เหลวประเภทอีมัลซิไฟด์ ที่นิยมใช้กันจะเป็นชนิด RS (Rapid-Setting)ยางอีมัลซิไฟด์นี้เหมาะสำหรับสภาพผิวที่ค่อนข้างชื้น วัสดุมวลรวมที่ใช้ต้องทำการล้างให้สะอาด (Prewet) ก่อนทำการโรยคลุมพื้นที่ที่ลาดยางเอาไว้ทันทีเพื่อให้เกิดแรงยึดเกาะที่ดีขึ้น ข้อดีอีกประการหนึ่งของยางประเภทนี้ก็คือ ง่ายต่อการขนย้าย และไม่จำเป็นจะต้องให้ความร้อนสูงขณะลาดยางจึงไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อคนงาน ในสภาพอากาศแห้งยางอีมัลซิไฟด์จะเกิดความแข็งแรงในการยึดเกาะวัสดุมวลรวมอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้สามารถเปิดผิวการจราจรได้เร็วขึ้น จากมาตรฐานการก่อสร้างผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ของกรมทางหลวง กำหนดว่า "เวลาอย่างน้อยที่สุดที่ใช้ในการบ่มของยางอีมัลซิไฟด์นี้ควรจะไม่น้อยกว่า 10 ชั่วโมง ในสภาพอากาศปกติเพื่อให้น้ำระเหยออกไปเกือบหมดหรือมากที่สุด"

2.11 การศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ที่มากกว่าชั้นเดียว

Benson[34] เสนอแนะว่า ขนาดของวัสดุมวลรวมสำหรับผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ที่มากกว่าชั้นเดียวควรจะมีขนาดลัดส่วนระหว่างชั้นแรกและชั้นถัดขึ้นไปเท่ากับ 2:1 โดยจำนวนวัสดุมวลรวมในชั้นที่สองควรจะออกแบบในลักษณะและวิธีการเดียวกับชั้นแรก ส่วนปริมาณของวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์สองชั้น ควรจะใช้ประมาณ 130-140 เปอร์เซนต์ ของปริมาณที่ใช้ในงานผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ชั้นเดียว และสำหรับผิวทางเซอร์-เฟสทรีตเมนท์สามชั้นควรจะใช้ประมาณ 140-150 เปอร์เซนต์ แต่ Benson ไม่ได้เน้นถึงลักษณะการลาดยางในแต่ละชั้นว่าจะมีความสำคัญในการก่อสร้างผิวทางดังกล่าว

Mcleod[28] ได้เสนอแนะตารางที่ 2.1 สำหรับผิวทางเซอร์เฟสหรือเมนท์สองชั้น ซึ่งได้จากประสบการณ์ในการก่อสร้างหลายโครงการ และปริมาณวัสดุมวลรวม วัสดุประสานที่แน่นอนจะต้องทำการคำนวณต่างหาก และแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะของงานต่อมา Wood[39] ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับลาดยางในแต่ละชั้นแล้วได้เสนอแนะ ว่า ปริมาณวัสดุประสานที่ลาดบนผิวทางเดิมในชั้นแรกควรจะประมาณ 40 เปอร์เซนต์ และชั้นที่สองควรจะประมาณ 60 เปอร์เซนต์ของปริมาณที่ได้ทำการคำนวณออกแบบไว้

2.12 มาตรฐานที่ใช้กำหนดความต้านทานการลื่นไถล (Standards of Skid Resistance) โดยทั่วไปมาตรฐานที่กำหนดขึ้นจะเป็นค่าขั้นต่ำ (Minimum Value) เพื่อเป็นยึดจำกัดเกี่ยวกับความปลอดภัยของผู้ใช้ยวดยานในขณะขับขี่เมื่อผิวทางเปียกเป็นประการสำคัญ และเพื่อประโยชน์ในการประเมินค่าสภาพผิวทางในการพิจารณาปรับปรุงและบำรุงทาง (Rating)

ในปี คศ. 1957 Giles[40] ได้เสนอแนะระดับของค่า SFC สำหรับประเภทและลักษณะของถนนต่าง ๆ ที่ความเร็ว 50 กิโลเมตร/ชั่วโมง ในสภาพผิวทางเปียกแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามตารางที่ 2.2 ดังนี้คือ

RATES OF APPLICATION OF ASPHALT BINDER FOR EACH APPLICATION OF A DOUBLE SURFACE TREATMENT

(Country Roads Board, Victoria, Australia)

Application	Type of Aggregate	Percentage of 20 Percent Void Space in Cover Aggregate To Be Filled With Residual Binder.																			
		Condition of Existing Surface: Primed, Smooth, or Black.																			
	One-size coarse aggregate	Traffic Volume (vehicles per day)																			
	Gravel	Less than 250								250 to 1000								Over 1000			
First application[a]	Round	65								65								65			
	Partly crushed	65								65								65			
	Wholly crushed	60								60								60			
	Crushed stone																				
	Other than limestone	60								60								60			
	Limestone	80								80								80			
	Size of aggregate first application	⅛ In., "G", or larger				Smaller than ⅛ In., "G"				⅛ In., "G", or larger				Smaller than ⅛ In., "G"				⅛ In., "G", or larger				Smaller than ⅛ In., "G"			
	Size of aggregate second application	Fine Crushed Stone ¼ In. or No. 4		Coarse Sand Passing ⅛ In.		Fine Crushed Stone No. 4		Coarse Sand Passing ⅛ In.		Fine Crushed Stone ¼ In. or No. 4		Coarse Sand Passing ⅛ In.		Fine Crushed Stone No. 4		Coarse Sand Passing ⅛ In.		Fine Crushed Stone ¼ In.		Coarse Sand Passing ⅛ In.		Fine Crushed Stone No. 4		Coarse Sand Passing ⅛ In.	
Second application[b]		Imp. Gal.	U. S. Gal.	Imp. Gal.	U. S. Gal.	Imp. Gal.	U. S. Gal.	Imp. Gal.	U. S. Gal.	Imp. Gal.	U. S. Gal.	Imp. Gal.	U. S. Gal.	Imp. Gal.	U. S. Gal.	Imp. Gal.	U. S. Gal.	Imp. Gal.	U. S. Gal.	Imp. Gal.	U. S. Gal.	Imp. Gal.	U. S. Gal.	Imp. Gal.	U. S. Gal.
	Both courses of aggregate not limestone	0.125	0.15	0.10	0.12	0.10	0.12	0.075	0.09	0.10	0.12	0.075	0.09	0.075	0.09	0.075	0.09	0.10	0.12	0.075	0.09	–	–	–	–
	First course not limestone second course limestone	0.15	0.18	0.125	0.15	0.125	0.15	0.10	0.12	0.125	0.15	0.10	0.12	0.10	0.12	0.10	0.12	0.125	0.15	0.10	0.12	–	–	–	–
	First course limestone second course not limestone	0.15	0.18	0.125	0.15	0.125	0.15	0.10	0.12	0.125	0.15	0.10	0.12	0.10	0.12	0.10	0.12	0.125	0.15	0.10	0.12	–	–	–	–
	Both courses limestone	0.175	0.21	0.15	0.18	0.15	0.18	0.125	0.15	0.15	0.18	0.125	0.15	0.125	0.15	0.125	0.15	0.15	0.18	0.125	0.15	–	–	–	–

[a] First Application: Percentage of 20 percent void space in compacted cover aggregate to be filled with residual binder

[b] Second Application: Rate of application of residual binder in gallons per square yard.

NOTES: 1. The limestone referred to above represents any porous absorptive aggregate.
2. The quantities of residual binder specified above for the first application, do not make allowance for absorption by the road surface.
3. When traffic exceeds 1500 vehicles per day, each project is considered separately.

(Data taken from McLeod, 61)-3)

ตารางที่ 2.1 อัตราการลาดยางแอสฟัลท์ สำหรับแต่ละขั้นของการปูผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนท์ชนิดสองชั้น *(DST)* (ข้อมูลจาก *Mcleod*[28])

ประเภท	ลักษณะของถนน	ในสภาพผิวทางเปียก	
		ค่า SFC_{50}	ค่า BPTV[14]
A	ถนนตามจุดอันตราย (Most Difficult Sites) เช่น - วงเวียน - ถนนโค้งที่มีรัศมีความโค้งน้อยกว่า 500 ฟุต - ทางลาดชันมากกว่า 1:20 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 45
D	ถนนสาธารณะโดยทั่วไปที่มี สปส.ความเสียดทานต่ำกว่า 0.40 (Proved Sites)	–	ถ้าต่ำกว่า 45 จะเกิดการลื่นไถล

ซึ่งค่าขั้นต่ำที่ได้เสนอแนะโดย Giles นี้มีค่าใกล้เคียงกับ The Marshall Committee ของหน่วยซ่อมบำรุงทางหลวงประเทศอังกฤษ ในปี คศ. 1970 เขายังได้กล่าวอีกว่า การลื่นไถลของยวดยานไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า SFC อย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับความเร็วของยวดยาน สภาพถนน ทางโค้ง และทัศนวิสัยโดยทั่วไปด้วยเช่นกัน

มาตรฐานที่ใช้กำหนดค่าความต้านทานการลื่นไถลนี้ ยังสามารถกำหนดในรูปของค่า PSV ของวัสดุมวลรวมที่ใช้โดยแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณการจราจร เพื่อให้ได้ค่าขั้นต่ำของ SFC ที่ความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (SFC_{50}) ตามตารางที่ 2.3 นี้ (Salt, G.F & Szatkowski, W.S.)[8, 41]

ค่า SFC_{50} ที่ต้องการ (ค่าเฉลี่ยในฤดูร้อน)		ค่า PSV ขั้นต่ำของวัสดุมวลรวมที่เล่นอแนะ					
		ปริมาณการจราจร (ยวดยานพาณิชย์ต่อช่องทางเดินรถ (Lane) ใน 1 วัน)					
		น้อยกว่า 250	1,000	1,750	2,500	3,200	4,000
0.30		30	35	40	45	50	55
0.35		35	40	45	50	55	60
0.40		40	45	50	55	60	65
0.45		45	50	55	60	65	70
0.50		50	55	60	65	70	75
0.55		55	60	65	70	75	
0.60		60	65	70	75		
0.65		65	70	75			
0.70		70	75				
0.75		75					
ค่า AAV	เซอร์เฟสทรีตเมนท์	ไม่เกิน 14	ไม่เกิน 12		ไม่เกิน 10		
	แมคคาแดม	ไม่เกิน 16	ไม่เกิน 14			ไม่เกิน 12	

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของค่า PSV ขั้นต่ำของวัสดุมวลรวม, ค่าเฉลี่ยของ SRV_{50} ในฤดูร้อนภายใต้ปริมาณการจราจรที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ : ▨ ค่า SFC_{50} ที่ปริมาณการจราจรเช่นนี้เหมาะที่จะใช้วัสดุมวลรวมที่มีความแข็งและมีความต้านทานการลื่นไหลสูงมาก เช่น วัสดุมวลรวมประดิษฐ์จำพวกแคลไซนด์บอกไซท์ เป็นต้น

ความต้านทานการลื่นไถลมีส่วนสัมพันธ์กับลักษณะผิวทาง (Surface Texture) เช่นกันโดยเฉพาะในขณะที่ยวดยานแล่นด้วยความเร็วสูง ผิวมหภาคจะมีส่วนสำคัญมาก คือ ความต้านทานการลื่นไถลจะลดลงเมื่อความเร็วของยวดยานเพิ่มขึ้น และอัตราการลดนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความลึกของผิวมหภาค (Texture Depth of Macrotexture) จากเหตุผลดังกล่าว Salt และ Szatkowski[41] จึงได้เสนอแนะว่า สำหรับถนนที่ใช้สำหรับยวดยานที่วิ่งด้วยความเร็วสูง (เกิน 95 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า SRV มากที่สุดจากความเร็วสูงไปต่ำไม่ควรเกิน 20% เพื่อจะรักษาค่า สปส.ความเสียดทานให้มากพอที่จะไม่เกิดอันตราย นั่นคือ จากตารางที่ 2.4 นี้ ค่าความลึกผิวที่น้อยที่สุดสำหรับผิวทางลาดยางเท่ากับ 1.0 มม. และผิวทางคอนกรีตเท่ากับ 0.50 มม. ซึ่งเมื่อความลึกผิวน้อยกว่าค่าดังกล่าวแล้วควรจะได้รับการซ่อมบำรุงผิวทางใหม่ (Maintenance Treatment)

ค่า SRV ที่ลดลงเมื่อความเร็วเปลี่ยนจาก 50-130 กม./ชม. (%)	ความลึกผิว (มม.)	
	ผิวทางลาดยาง	ผิวทางคอนกรีต
0	2.00	0.80
10	1.50	0.70
20	1.00	0.50
30	0.50	0.40

ตารางที่ 2.4 ผลของความลึกผิวมหภาคที่มีต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล (SRV) เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

การกำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับความต้านทานการลื่นไถลในประเทศไทยนั้น Bunnag, et al.[1] ได้เสนอแนะค่าความต้านทานการลื่นไถลขั้นต่ำในกรณีผิวทางเปียก สำหรับถนนประเภทต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.5

ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งก็คือ การกำหนดมาตรฐานดังกล่าวไม่ว่าจะเป็นในลักษณะและรูปแบบใดก็ตามพบว่า ถ้าค่ามาตรฐานสูงมาก ๆ จะเป็นการสิ้นเปลืองค่าซ่อมบำรุงและเสียค่าใช้จ่ายมากในการจัดหาวัสดุที่มีคุณภาพสูงมาใช้ ดังนั้น การกำหนดมาตรฐานใด ๆ ควรจะพิจารณาความเหมาะสมทางเศรษฐกิจควบคู่ไปด้วย

ลักษณะของถนน	ค่า BPN.	Mu-Meter Number ที่ 60 กม.ต่อช.ม.
ตามจุดอันตราย เช่น วงเวียน โค้ง ทางขัน จุดใกล้สัญญาณไฟจราจร (ตามทางแยก) และบริเวณที่เกิดอุบัติเหตุบ่อย ๆ	50	30
ทางหลวงชั้น 1, ชั้น 2 และถนนแยก (Feeder Roads) ที่มีปริมาณการจราจรเกิน 1,500 คันต่อวัน	45	25

ตารางที่ 2.5 ค่าความต้านทานการลื่นไถลขั้นต่ำของ BPT-Number และ Mu-Meter Number ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในลักษณะถนนประเภทต่าง ๆ ในกรณีผิวทางเปียก (Wet Condition)