ข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทเพอร์ฟอร์แมนซ์เกรด โดยวิธีทดสอบความคืบคืนตัวกลับจากการกระทำซ้ำของแรงเค้น

โดย

ดร.ไชยวัฒน์ ณ เชียงใหม่

วิศวกรโยธาปฏิบัติการ ส่วนออกแบบและตรวจสอบผิวทางแอสฟัลต์
สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ

บทความนี้เป็นความคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น กรมทางหลวงไม่มีส่วนเกี่ยวข้องแต่อย่างใด

ข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทเพอร์ฟอร์แมนซ์เกรด โดยวิธีทดสอบความคืบคืนตัวกลับจากการกระทำซ้ำของแรงเค้น

ดร.ไชยวัฒน์ ณ เชียงใหม่

วิศวกรโยธาปฏิบัติการ ส่วนออกแบบและตรวจสอบผิวทางแอสฟัลต์ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ

1. บทนำ (Introduction)

ยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ซีเมนต์(Asphalt Cement) เป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการการกลั่นน้ำมันดิบ (Distillation Process of Crude Petroleum) ซึ่งโดยทั่วไปยางแอสฟัลต์มีคุณสมบัติ ณ อุณหภูมิห้องจะมีลักษณะสีดำ เหนียว เป็นสะสารกึ่งของแข็งกึ่งของเหลว (semisolid-semiliquid) อีกทั้งเป็นวัสดุที่มีความหนืดสูง (highly Viscosity) ลักษณะพิเศษของยางแอสฟัลต์คือเป็นสารเชื่อมประสานที่มีความแข็งแรงทนทานและสามารถใช้เป็นวัสดุกันน้ำได้เป็นอย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังมีลักษณะที่ทนทานต่อปฏิกิริยาของกรดและเกลือ (Acids and Salt Resistance)

สำหรับการใช้งานหลักการของยางแอสฟัลต์ในปัจจุบันคือใช้เป็นวัสดุสำหรับทำส่วนผสมงานทาง โดยใช้เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมเพื่อผลิตเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์ (Asphalt Concrete Pavement) แอสฟัลต์ซีเมนต์จะถูกเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวเมื่อสัมผัสความร้อนเพื่อใช้ในระหว่างขั้นตอนการผสม (mixing) และมีลักษณะเหนียวเพื่อเคลือบผิวและเชื่อมประสานมวลรวมจนถูกผลิตเป็นส่วนผสม Hot Mix Asphalt, HMA หลักจากที่อุณหภูมิลดต่ำลงสู่อุณหภูมิปกติโดยรอบส่วนผสม HMA จะมีคุณสมบัติที่แข็งแรงมีความทนทานต่อการจราจรและสภาพอากาศ นอกเหนือจากงานก่อสร้างถนนส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตยังถูกใช้สำหรับการก่อสร้างผิวทางของสนามบิน (Airfield pavement) สำหรับประเทศไทยจากการรวบรวมข้อมูลของสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่ง (สนข) ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่ามีถนนแอสฟัลต์คอนกรีตคิดเป็นร้อยละ73 ของถนนทั่วประเทศ และสำหรับกรมทางหลวงมีถนนแอสฟัลต์คอนกรีต (ถนนลาดยาง) อยู่ร้อยละ 92 ของถนนทั้งหมดที่อยู่ในความรับผิดชอบดังนั้นคุณภาพของวัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตจึงต้องมีคุณภาพที่ดีเยี่ยม เพื่อให้ถนนในประเทศไทยมีความแข็งแรง คงทน และยั่งยืน

ตาราง 1 สรุปปริมาตรการใช้งานถนนประเภทต่างๆ ทั่วประเทศ

หน่วยงานที่รับผิดชอบ	พื้นผิวจราจร (กิโลเมตร, km)				รวม
	คอนกรีต	ลาดยาง	ลูกรัง	อื่นๆ	
กรมทางหลวง	5,497.03	61,134.35	239.98	-	66,871.36
กรมทางหลวงชนบท	1,424.02	41,962.93	5,693.20	-	49,080.16
เทศบาล	8,128,48	7,745,75	386.11	15.72	16,726.06
อื่นๆ	23,132.22	47,548.29	14,803.99	84.99	85,869.48
รวม	38,181.75	158,391.32	21,123.28	100.71	217,797.06

(ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาจัดทำแผนหลักการพัฒนาระบบการขนส่งและการจราจร พ.ศ.2558 ถึง พ.ศ.2563 ของสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, สนข.)

จากอดีตถึงปัจจุบัน มีการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ซีเมนต์อยู่ 3 ระบบคือ (1) ระบบการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ตามเพนนิเทรชั่น (Penetration Grading System) เป็นระบบการแบ่งเกรดยางที่ใช้อยู่ปัจจุบันในประเทศไทย (2) ระบบการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ตามความหนืด (Viscosity Grading System หรือ AR (Aged Residue) Viscosity Grading System) เป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศสหรัฐอเมริกาในอดีต และ (3) ระบบการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ตามประสิทธิภาพ (Performance Grading System) เป็นระบบที่ใช้อยู่ปัจจุบันในประเทศสหรัฐอเมริกา

ระบบแรก การแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ตามเพนนิเทรชั่น(Penetration Grading System) ถูกกำหนดในมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.401/2531 หรือเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM D946 “Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement For Use in Pavement Construction” เป็นการควบคุมคุณภาพยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามค่าการทดสอบของการทะลวง (Penetration)ณ ปัจจุบันประเทศไทยมียางที่อยู่ในระบบนี้ได้แก่AC60-70 และ AC40-50 โดยตัวเลขกำกับระบุถึงค่าการทะลวงในหน่อยของ 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งAC60-70 เป็นยางแอสฟัลต์ที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทย ระบบที่สอง การแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ตามความหนืด (Viscosity Grading System) ถูกกำหนดในมาตรฐาน ASTM D3381 “Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction” เป็นการควบคุมคุณภาพยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามค่าความหนืดที่ได้จากการทดสอบ Viscosity Test โดยสามารถทดสอบกับยางได้อยู่สองประเภทคือยางแอสฟัลต์ตั้นต้น(Original Asphalt Cement) หรือยางที่ไม่มีการทำให้เสื่อมอายุการใช้งาน(Unaged Asphalt Cement) และยางแอสฟัลต์ที่ทำให้เสื่อมอายุการใช้งานระยะสั้น (Aging in Rolling Thin Film Oven (RTFO) test) ตัวอย่างของยางระบบนี้สำหรับยางแอสฟัลต์เดิมได้แก่ AC-20 AC-30 และ AC-40 ซึ่งตัวเลขดังกล่าวระบุถึงค่าความหนืดในหน่วยของหนึ่งร้อยของพอยส์ และสำหรับยางแอสฟัลต์ที่ผ่านกระบวนการเสื่อมอายุ ตัวอย่างได้แก่ AR-

1000 AR-2000 AR-4000 AR-8000 และ AR-16000 โดยตัวเลขดังกล่าวระบุถึงค่าความหนืดในหน่อยพอยส์ สำหรับระบบสุดท้าย เป็นการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ตามประสิทธิภาพ (Performance-Graded (PG) System) ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญของเป็นสารเชื่อมประสานการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในระบบ *Su*perior *Per*forming Asphalt *Pave*ment หรือชื่อย่อคือระบบ Superpaveโดยรายละเอียดที่มาและความสำคัญ เครื่องมือการทดสอบและวัตถุประสงค์การทดสอบ มาตรฐาน รวมถึงวิธีการเลือกใช้งานของยางแอสฟัลต์ตามการแบ่งเกรดตามประสิทธิภาพ (Performance-Graded, PG) ได้อธิบายไว้ในเอกสารฉบับนี้

2. ระบบการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ซีเมนต์(Asphalt Cement Grading System)

ระหว่างปีพ.ศ. 2421 ถึง พ.ศ. 2443 ยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกใช้สำหรับงานก่อสร้างถนนในยุคนั้นเรียกว่า Sheet Asphalt, Penetration Macadam หรือ Mixed Macadam ส่วนใหญ่ยางชนิดนี้จะได้มาจากทะเลสาบทรินิแดด (Trinidad Lake) โดยบริษัท The Barber Asphalt Paving Company เป็นบริษัทแรกที่นำยางแอสฟัลต์จากทะเลสาบทรินิแดดมาจำหน่ายและก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ต่อมามีความต้องการใช้แมคคาดัมในปริมาณที่มากขึ้นซึ่งได้มีขุดหาแหล่งวัสดุใหม่และได้มีการค้นพบแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่แรกในทะเลสาบ Bermudez ในประเทศ Venezuela โดยมีกระบวนการการผลิตที่คล้ายกันกับที่ทะเลสาบทรินิแดด และเป็นที่มาของอุตสาหกรรมการทำเหมืองแอสฟัลต์เพื่อทำการขุดเจาะนำแอสฟัลต์ซีเมนต์ขึ้นมาใช้ โดยกระบวนการนี้จะรวมถึงขั้นตอนการขจัดน้ำและสะสารทั้งที่เป็น organic และ inorganic จากแอสฟัลต์ก่อนนำมาใช้งาน

สำหรับมาตรฐานแรกของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกใช้ในอเมริกานั้น ข้อกำหนดต่างๆ ได้ถูกตั้งข้อตามลักษณะการปรากฏที่เกิดขึ้นของแอสฟัลต์ในทะเลสาบทรินิแดด โดยอยู่บนพื้นฐานการทดสอบถึงปริมาณของบิทูมิน (Bitumin) ซึ่งสามารถละลายได้ในสารละลาย Carbon Disulfide และรวมรวบถึงการกำหนดสะสารที่เป็นทั้ง organic และ inorganic สืบเนื่องจากการเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมงานทางและอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียมที่เข้ามามีบทบาทในประเทศสหรัฐอเมริกาขณะนั้นคุณสมบัติของวัสดุจะต้องมีความแน่นอนมากขึ้นเช่นความกลมกลืน (consistency) ซึ่งโดยธรรมชาติยางแอสฟัลต์มีลักษณะเป็นสะสารกึ่งของแข็งกึ่งของเหลว ซึ่งในขณะนั้นมีความจำเป็นต้องเติมตัวทำละลายเพื่อทำให้สามารถใช้งานสำหรับเป็นสารเชื่อมประสานในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้ ดังนั้น วิธีการหรือมาตรฐานที่ใช้จึงเน้นในเรื่องของค่าความเป็นเนื้อเดียวกันของสารเชื่อมประสาน (asphalt binder) ที่ได้จากแหล่งยางแอสฟัลต์ที่แตกต่างกัน

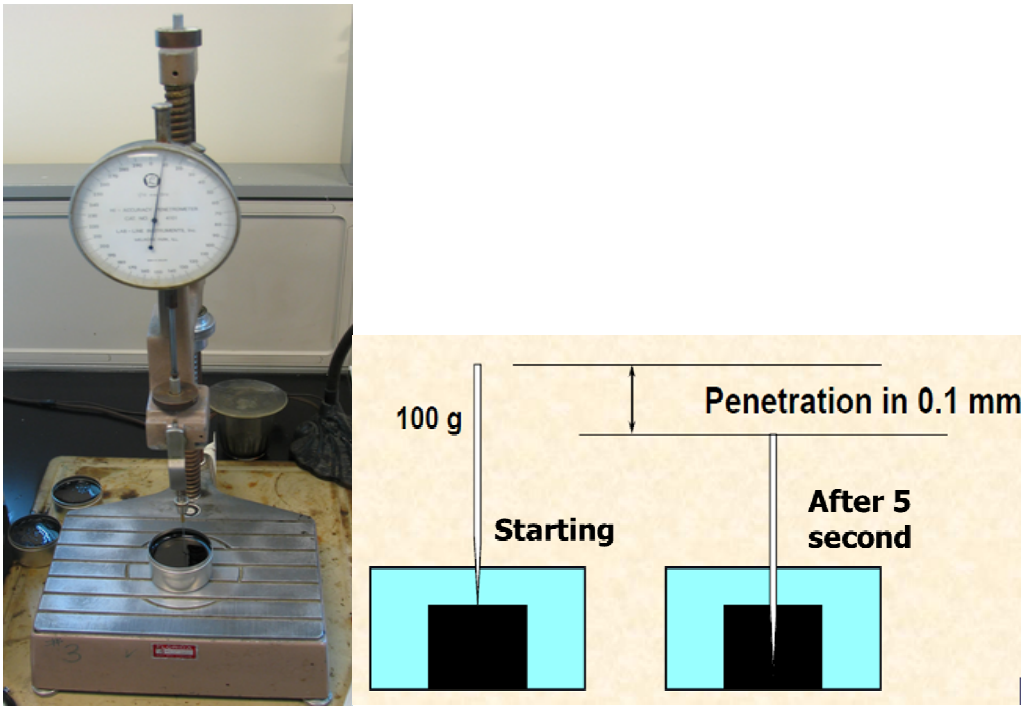
2.1 ระบบการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ตามเพนนิเทรชั่น (Penetration Grading System)

ในปี พ.ศ.2431 Mr.Bowen ได้ประดิษฐ์เครื่องทดสอบค่าการทะลวง (Penetration) หรือที่เรียกว่า Penetrometer เพื่อใช้ทดสอบค่าความกลมกลืนของยางแอสฟัลต์ ซึ่งก่อนหน้าที่จะมีการประดิษฐ์เครื่องนี้ วิธีการที่ใช้ในการทดสอบค่าความนิ่มของยางแอสฟัลต์คือการเคี้ยว

(Chewing) ยางแอสฟัลต์ถึงแม้ภายหลังจากการประดิษฐ์เครื่อง Penetrometer การทดสอบโดยการเคี้ยวก็ยังมีปรากฏให้เห็นเนื่องจากผลจากการคาดเดาจากการเคี้ยวมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากเครื่องทดสอบ

หลังจากการดัดแปลงหลายครั้งของเครื่อง Penetration Machine ปี พ.ศ.2453 เครื่อง Penetrometer ดังแสดงใน ได้กลายมาเป็นเครื่องทดสอบมาตรฐานที่ใช้วัดค่าและควบคุมความกลมกลืน (Consistency) ของยางแอสฟัลต์ที่ถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งในขณะนั้นสำนักงานงานทางสาธารณะ (Bureau of Public Roads) หรือปัจจุบันคือ Federal Highway Administration ที่ก่อตั้งในปี พ.ศ.2453 และ The American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการทดสอบแบบเพนนิเทรชั่น (Penetration Test) เพื่อควบคุมความกลมกลืนของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์

ในปี พ.ศ.2460 สำนักงานงานทางสาธารณะ (Bureau of Public Roads) ได้นำระบบการแบ่งเกรดระบบเพนนิเทรชั่นมาบังคับใช้ โดยได้มีการพัฒนาให้มีเกรดยางแอสฟัลต์ที่มีความหลากหลายเหมาะสมตามสภาพการใช้งานที่ต่างกันต่อมา The American Association of State Highway Officials (AASHO) ได้ออกมาตรฐานสำหรับการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ตามระบบเพนนิเทรชั่นในปี พ.ศ. 2474



ภาพที่ 1 เครื่องทดสอบการทะลวง (Penetormeter)

สำหรับประเทศไทย ยางแอสฟัลต์ถูกแบ่งตามระบบเพนนิเทรชั่นออกเป็น 3 เกรด ได้แก่ AC80-100 AC60-70 และ AC40-50 ซึ่งหน่วยเพนนิเทรชั่นมีค่าเท่ากับหนึ่งในสิบของหน่วยมิลลิเมตร (0.1 ม.ม.) โดยค่าเพนนิเทรชั่นที่ต่ำแสดงถึงยางแอสฟัลต์ที่มีความแข็งกว่า โดยทั่วไปAC60-70 เป็นเกรดยางที่ถูกใช้มากที่สุดในประเทศไทย แต่ปัจจุบันเริ่มมีการนำเกรดยาง AC40-50 มาใช้สำหรับงานทางในประเทศไทยเพื่อเป็นการรองรับการจราจรที่สูงขึ้นรวมถึงสภาพอากาศที่มีแนวโน้มร้อนขึ้นทุกปี

นอกเหนือจากค่า Penetration ค่าจุดวาบไฟ ค่าความเหนียว และค่าความเหนียวของยางที่ผ่านกระบวนการ TFO ถูกแสดงในตารางที่ 2 มาตรฐานยางแอสฟัลต์ตามระบบเพนนิเทรชั่น(Penetration Grading System) ของกรมทางหลวง ทล.-ก.401/2559

ระบบเพนนิเทรชั่นเกรด (Penetration Grading System) มีข้อดี ดังนี้

(1) การแบ่งเกรดอยู่บนพื้นฐานของความกลมกลืน (Consistency) ของยางแอสฟัลต์ ที่อุณหภูมิการทดสอบ 25°C ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการใช้งานเฉลี่ยของถนนในประเทศสหรัฐอเมริกา

(2) ใช้เวลาในการทดสอบค่อนข้างเร็ว

(3) การทดสอบนี้สามารถนำไปใช้กับงานสนามได้ คือผู้ควบคุมการก่อสร้างสามารถนำการทดสอบไปทดสอบตรวจหาการเจือปนของน้ำมันหรือสารไม่พึงประสงค์ในยางได้

(4) ราคาอุปกรณ์การทดสอบค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับการทดสอบระบบอื่นๆ

(5) ความไว (Susceptibility) ต่ออุณหภูมิของยางแอสฟัลต์สามารถตรวจวัดได้จากการทดสอบ Penetration

อย่างไรก็ตามระบบการแบ่งเกรดแบบเพนนิเทรชั่นมีข้อเสียเช่นกัน ได้แก่

(1) การทดสอบเพนนิเทรชั่นเป็นการทดสอบที่อยู่ขึ้นกับสภาพการทดสอบเชิงประจักษ์ (Empirical Test)

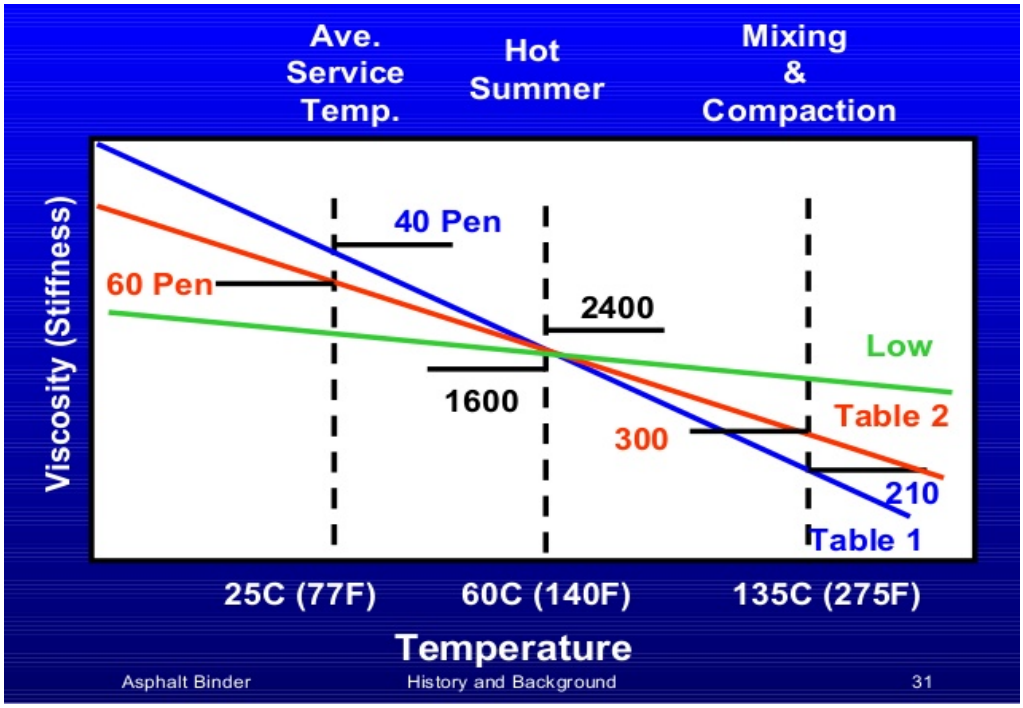
(2) ไม่มีความสัมพันธ์กับความหนืด (Viscosity) และความกลมกลืน (Consistency) ของยางที่แน่ชัดมีค่าความหนืดที่ซ้ำกันในเกรดยางที่ต่างกัน (Overlaying Behavior)

(3) อัตราแรงเฉือนสูง (Shear Rate) ระหว่างการทดสอบ

(4) อัตราแรงเฉือนไม่คงที่เนื่องจากขึ้นอยู่กับค่าความกลมกลืนของยาง (Consistency of Asphalt)

(5) ไม่มีค่าความหนืดที่แนะนำสำหรับอุณหภูมิการผสม (mixing) และการบดอัด (compaction)

(6) ความเหมือนกัน (Similitude) ของผลการทดสอบที่ 25°C ไม่ได้บ่งชี้ถึงคุณสมบัติที่เหมือนกันของยางที่อุณหภูมิการทดสอบอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 2 ความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิของระบบเพนนิเทรชั่นเกรดของยางแอสฟัลต์



ภาพที่ 2 ความไวต่ออุณหภูมิ (Temperature Susceptibility) ของยางแอสฟัลต์ในระบบเพนนิเทรชั่นเกรด

ตารางที่ 1 มาตรฐานยางแอสฟัลต์ตามระบบเพนนิเทรชั่น (ทล.-ก.401/2559)

ลำดับที่	คุณลักษณะ		AC 40–50		AC 60–70		AC 80–100		วิธีทดสอบ
			Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	
แอสฟัลต์ซีเมนต์									
1	เพนิเทรชัน (Penetration) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที	0.1 มิลลิเมตร	40	50	60	70	80	100	มยด.1201
2	จุดวาบไฟ (Flash Point)	องศาเซลเซียส	232	-	232	-	232	-	มยด.1182 เล่ม 2
3	จุดอ่อนตัว (Softening Point)	องศาเซลเซียส	48	58	45	55	42	52	มยด.1216
4	ความยืดตัว (ductility) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อนาที	เซนติเมตร	100	-	100	-	100	-	มยด.1202
5	การละลายในไตรคลอโรเอทิลีน (Solubility in trichloroethylene)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	99.0	-	99.0	-	99.0	-	มยด.1203
6	ความต้านแรงเชือนไดนามิก G*/sinδ ที่ 10 rad/s (Dynamic Shear Rheology)								
	ที่อุณหภูมิ 64 องศาเซลเซียส	kPa	-	-	1.0	-	1.0	-	AASHTO T315
	ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	kPa	1.0	-	-	-	-	-	
สภาพที่เหลือจากการอบ									
7	น้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อน	ร้อยละ	-	0.8	-	0.8	-	1.0	มยด.1223
8	เพนิเทรชันร้อยละของเพนิเทรชันเดิม	0.1 มิลลิเมตร	58	-	54	-	50	-	มยด.1223 และ มยด.1201
9	ความยืดตัว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อนาที	เซนติเมตร	48	-	50	-	75	-	มยด.1223 และ มยด.1202

2.2 ระบบการแบ่งเกรดยางตามความหนืด (Viscosity Grading System)

การเปลี่ยนแปลงครั้งสำคัญสำหรับมาตรฐานการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์เกิดขึ้นในปี พ.ศ.2503 โดยความร่วมมือของ Federal Highway Administration, ASTM, AASHTO, และสำนักงานทางหลวงในรัฐต่างๆ โดยมีความต้องการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์จากค่าความหนืด (Viscosity) ที่อุณหภูมิการทดสอบ 60°C จุดประสงค์ของการเปลี่ยนแปลงครั้งนี้คือ (1) แทนการทดสอบแบบเพนนิเทรชั่นที่ให้ผลการทดสอบที่ขึ้นอยู่กับสภาพการทดสอบเชิงประจักษ์ (Empirical) โดยเปลี่ยนมาใช้หลักการที่เป็นวิทยาศาสตร์ที่สมเหตุสมผลมากขึ้น (2) เป็นการวัดค่าความกลมกลืนของยาง (consistency) ที่อุณหภูมิ 60°C (แทนการทดสอบของเพนนิเทรชั่นที่วัดค่าการทดสอบที่ 25°C) ซึ่งเป็นค่าประมาณการของอุณหภูมิบนพื้นผิวถนนสูงสุดในฤดูร้อนของพื้นที่ส่วนใหญ่ในประเทศสหรัฐอเมริกา เกรดตามระบบความหนืด (Viscosity Grades) ถูกพัฒนาเพื่อให้ได้ยางแอสฟัลต์ที่เหมาะสมกับการใช้งานและสภาพอากาศที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละพื้นที่

สำหรับระบบการแบ่งเกรดระบบนี้ที่อยู่บนพื้นฐานของค่าความหนืดของยางแอสฟัลต์ (Viscosity of asphalt cement) เป็นระบบที่นิยมใช้อย่างก้าวขวางในประเทศสหรัฐอเมริกาก่อนที่จะมีการในระบบSuperpaveมาใช้โดยตารางที่ 2แสดงมาตรฐานสำหรับการแบ่งเกรดตามความหนืด (Viscosity Grading) ที่อุณหภูมิ 60°C ดังปรากฏในมาตรฐาน ASTM D3381 ซึ่งสามารถแบ่งยางแอสฟัลต์ออกเป็นแต่ละเกรดดังนี้ AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20 และ AC-40

ตารางที่ 2 มาตรฐานการแบ่งเกรดยางตามความหนืด (ASTM D3381)

D3381/D3381M – 09a

TABLE 1 Requirements for Asphalt Cement, Viscosity Graded at 60°C [140°F]

NOTE 1—Grading based on original asphalt.

Test	Viscosity Grade					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosity, 60°C [140°F], Pa·s	25 ± 5	50 ± 10	100 ± 20	200 ± 40	300 ± 60	400 ± 80
Viscosity, 135°C [275°F], min, mm^2/s	80	110	150	210	250	300
Penetration, 25°C [77°F], 100 g, 5 s, min	200	120	70	40	30	20
Flash point, Cleveland open cup, min,°C [°F]	165 [325]	175 [350]	220 [425]	230 [450]	230 [450]	230 [450]
Solubility in trichloroethylene, min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Tests on residue from thin-film oven test:						
Viscosity, 60°C [140°F], max, Pa·s	125	250	500	1000	1500	2000
Ductility, 25°C [77°F], 5 cm/min, min, cm	100[A]	100	50	20	15	10

[A] If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15°C [60°F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.

หน่วยมาตรฐานสำหรับการวัดค่าความหนืดคือพอยส์ (poise) โดยค่าที่น้อยในหน่อย poise บอกถึงค่าความหนืดที่ต่ำของยางแอสฟัลต์ เช่น AC-2.5 (ยางแอสฟัลต์ที่มีค่าความหนืด 250 poise ที่อุณหภูมิ 60°C) เป็นยางที่นิ่มกว่า (softer) ยาง AC-40 (ยางแอสฟัลต์ที่ค่าความหนืด 4000 poise ที่อุณหภูมิการทดสอบเดียวกัน) โดย AC-20 เป็นยางที่ถูกใช้มากที่สุดสำหรับการก่อสร้างถนนในขณะนั้น นอกเหนือจากค่าความหนืดที่ถูกระบุไว้ในมาตรฐาน ยังมีค่าเพนนิเทรชั่น ที่อุณหภูมิ 25°C ค่าความหนืดที่

อุณหภูมิ 135°C และค่าความเหนียว Ductility ที่อุณหภูมิ 25°C ของยางที่ผ่านกระบวนการเสื่อมอายุระยะสั้น (Thin Film Oven Test, TFOT) และค่าวาบไฟ Flash point ระบุไว้ในมาตรฐานนี้เช่นกัน

ค่าเพนนิเทรชั่นเกรดที่ถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ถูกใช้ควบคุมความกลมกลืน (consistency) ของยางที่แสดงพฤติกรรมที่อุณหภูมิเฉลี่ยของการใช้งานจริง ส่วนค่าความหนืด (Viscosity) ที่ถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 135°C ถูกใช้ควบคุมความกลมกลืน (consistency) ขณะผสมและบดอัด มาตรฐานนี้ที่มีทั้งค่าเพนนิเทรชั่นและค่าความหนืดยังสามารถใช้ควบคุมความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิของยางแอสฟัลต์ได้

ระบบการแบ่งเกรดตามความหนืด (Viscosity Grading System) มีข้อดี ดังนี้

(1) ค่าความหนืด (Viscosity) เป็นค่าคุณสมบัติพื้นฐาน (Fundamental Property) ซึ่งดีกว่าการทดสอบแบบเชิงประจักษ์ (Empirical Test)ที่ขึ้นอยู่กับระบบของการทดสอบและขนาดของก้อนตัวอย่าง

(2) เป็นการทดสอบที่เหมาะกับสภาพแวดล้อมโดยกว้าง ควบคุมอุณหภูมิของถนนทั้ง 25°C ถึง 60°C

(3) ทดสอบที่อุณหภูมิ 60°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยของผิวทางแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิวิกฤตสำหรับประสิทธิภาพของถนนในฤดูร้อน

(4) ลดการซ้ำซ้อน (Reduced Overlay) ของผลการทดสอบของยางระบบอื่น

(5) ความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ (Temperature Susceptibility) ของยางแอสฟัลต์สามารถประเมินได้ เนื่องจากมีการทดสอบยางแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ กันอยู่ 3 อุณหภูมิ คือ 25°C 60°C และ 135°C

อย่างไรก็ตาม ระบบการแบ่งเกรดตามความหนืดมีข้อเสีย ดังนี้

(1) การแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิการทดสอบที่ 60°C ก็ไม่สามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติยางที่อุณหภูมิต่ำได้

(2) ค่าคุณสมบัติต่างๆ ไม่สามารถเป็นเครื่องยืนยันได้ว่าจะป้องกันการแตกร้าวของถนนที่อุณหภูมิการใช้งานต่ำ

(3) อุปกรณ์ของระบบการทดสอบนี้ค่อยข้างแพงกว่าระบบ Penetration

(4) ระยะเวลาการทดสอบยาวนานกว่าระบบ Penetration

(5) ความหนืดของยางที่ผ่านกระบวนการ TFOT สำหรับยางที่มาจากต่างแหล่งผลิตสามารถให้ค่าความหนืดที่มีช่วงกว้างและไม่แน่นอน เช่น ยาง AC-20 จาก 2 แหล่งผลิตที่แตกต่างกันเมื่อทดสอบค่าความหนืดยางจากแหล่งที่หนึ่งสามารถมีค่าความหนืด 3500 poise และยางจากแหล่งที่ 2 สามารถมีค่าความหนืด 10,000 poise ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานจริงยางทั้งสองจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

ในขณะที่ระบบการแบบเกรดตามความหนืด (Viscosity Grading System) กำลังถูกพัฒนาอยู่ ทางอีกฝั่งของประเทศสหรัฐอเมริกาที่รัฐ California นำโดย California Dapartment of Highways (CalDOT) ก็ได้พัฒนาการแบบเกรดยางตามความหนืดของยางที่มีการเสื่อมอายุ (Aged Residue (AR) Viscosity Grading) รวมกับกลุ่มผู้ผลิตและผู้ใช้งานทางฝั่งตะวันตกของสหรัฐอเมริกา โดยการแบ่งเกรดยางระบบนี้อยู่บนพื้นฐานของค่าความหนืดของยางที่ผ่านกระบวนการทำให้ยางเสื่อมอายุการใช้งานจากเครื่องทดสอบ Rolling Thin Film Oven (RTFO) โดย CalDOTเคยประสบปัญหาว่าเมื่อนำยางบางชนิดไปใช้ผสมในระหว่างขั้นตอนการผสม ยางดังกล่าวมีความข้นหรือความหนืดที่เปลี่ยนไปซึ่งมีพฤติกรรมต่างไปจากเดิมก่อนที่จะนำมาผสม ดังนั้น การนำมาใช้ซึ่งต้องการทำให้แน่ใจว่าหลักจากผ่านการเสื่อมอายุในช่วงระยะเวลาสั้นๆ แล้ว (RTFO) ยางยังคงมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันทั้งระหว่างการผสมกับระหว่างการก่อสร้าง

สำหรับระบบการแบ่งเกรด AR Viscosity Grading System ที่มีพื้นฐานของค่าความหนืดของยางที่ถูกทำให้เสื่อมอายุระยะสั้น(Aged Residue, AR) จากเครื่องการทดสอบ Rolling Thin Film Oven (RTFO) ซึ่งมาตรฐานนี้ถูกใช้ในบางรัฐทางแถบตะวันตกของประเทศสหรัฐอเมริกาเท่านั้น ตารางที่ 3แสดงมาตรฐานสำหรับการแบ่งเกรดตามความหนืดของยางที่เสื่อมอายุระยะสั้น (AR Viscosity Grading) ตัวอย่างของยางแอสฟัลต์ตามระบบนี้ได้แก่ AR-1000 AR-2000, AR-4000, AR-8000, และ AR-16000 โดย AR-1000 เป็นยางแอสฟัลต์ที่แสดงค่าความหนืดที่ 1000 poises ณ อุณหภูมิการทดสอบ 60°C ในมาตรฐานยังระบุให้มีการทดสอบค่าเพนนิเทรชั่นและค่าความหนืดเหมือนมาตรฐานการแบ่งเกรดตามระบบความหนืดที่กล่าวไว้ก่อนหน้า

ตารางที่ 3 มาตรฐานการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ตามความหนืดสำหรับยางที่เสื่อมอายุระยะสั้น (AR Viscosity)

NOTE 1—Grading based on residue from rolling thin-film oven test.

Tests on Residue from Rolling Thin-Film Oven Test:[A]	Viscosity Grade				
	AR-1000	AR-2000	AR-4000	AR-8000	AR-16000
Viscosity, 60°C [140°F], Pa•s	100 ± 25	200 ± 50	400 ± 100	800 ± 200	1600 ± 400
Viscosity, 135°C [275°F], min, mm^2/s	140	200	275	400	550
Penetration, 25°C [77°F], 100 g, 5 s, min	65	40	25	20	20
% of original penetration, 25°C [77°F], min	...	40	45	50	52
Ductility, 25°C [77°F], 5 cm/min, min, cm	100[B]	100[B]	75	75	75
Tests on original asphalt:					
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [°F]	205 [400]	220 [425]	225 [440]	230 [450]	240 [460]
Solubility in trichloroethylene, min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0

[A] Thin-film oven test may be used but the rolling thin-film oven test shall be the referee method.
[B] If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15°C [60°F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.

ระบบการแบบเกรดยาง AR Viscosity Grading System มีข้อได้เปรียบที่เพิ่มเติมจากระบบ Viscosity Grading System ดังนี้

(1) ค่าการทดสอบจะเป็นตัวแทนที่ใช้บอกคุณสมบัติของยางแอสฟัลต์หลังจากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตถูกผลิตจากโรงผสม

(2) ยางแอสฟัลต์ที่มาจากแหล่งผลิตที่แตกต่างกันจะถูกทดสอบบนพื้นฐานหรือมีพฤติกรรมที่เป็นเกรดยาง AR เดียวกัน เพื่อให้แน่ใจว่าเมื่อนำยางไปใช้ระหว่างการผสมและก่อสร้างยางจะมีคุณสมบัติการคงที่และเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

ข้อเสียของการแบ่งยางระบบนี้ ได้แก่

(1) ต้องการอุปกรณ์การทดสอบที่มากขึ้นกว่าเดิมเพื่อทดสอบ Rolling Thin Film Oven (RTFO)

(2) ระยะเวลาการทดสอบยาวนานขึ้นเพราะต้องนำยางแอสฟัลต์ไปทำให้เสื่อมสภาพระยะสั้นก่อน (RTFO) Test

(3) การตรวจวัดการบนเปื้อนทำได้ยางเพราะไม่มีการทดสอบที่ไว้ตรวจสอบค่าความกลมกลืน (consistency) สำหรับยางแอสฟัลต์ที่ถูกส่งไปใช้หน้างาน

(4) การทดสอบการทำยางแอสฟัลต์ให้เสื่อมอายุ (Aged Residue) อาจไม่มีความสัมพันธ์กับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิตหากมีการใช้โรงงานแบบ Drum Mix Process

2.3 ระบบการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ตามสมรรถนะ (Performance Grading (PG) System)

การแบ่งประเภทยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามระบบการแบ่งเกรดตามสมรรถนะถูกพัฒนามาจากแนวคิดที่ต้องการให้มีการทดสอบยางที่สามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติยางแอสฟัลต์เพื่อตอบสนองการใช้งานอย่างแท้จริง และสามารถกำจัดข้อบกพร่องของระบบการแบ่งเกรดเดิมที่มีอยู่ เมื่ออ้างถึงการทดสอบและมาตรฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีอยู่ของ Penetration and Viscosity Grades สามารถสรุปข้อจำกัดของระบบทั้งสองได้ดังนี้

1. การทดสอบเพนนิเทรชั่น(Penetration Test) การทดสอบความหนืด (Viscosity Test) และการทดสอบความเหนียว (Ductility Test) มีผลการทดสอบที่มีความแปรปันไปตามสภาวะการทดสอบที่หลากหลายและไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

2. การทดสอบเพนนิเทรชั่น(Penetration Test) ถูกทดสอบที่อุณหภูมิเดียวที่ 25 องศาเซลเซียส ($^{\circ}$C)และการทดสอบความหนืด (Vicosity Test) ถูกทดสอบที่อุณหภูมิเดียวที่ 60 องศาเซลเซียส ($^{\circ}$C) ทั้งๆ ที่ความเป็นจริง ณ สถานที่ก่อสร้างมีสภาพอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบของทั้งสองการทดสอบไม่ได้สะท้อนถึงประสิทธิภาพที่แท้จริงของยางแอสฟัลต์สำหรับอุณหภูมิการใช้งาน

3. มาตรฐานที่มีอยู่ไม่ได้มีการพิจารณาช่วงอุณหภูมิที่หลากหลายภายในโครงสร้างถนนตัวอย่างเช่นไม่มีการทดสอบใดๆ ของระบบเพนนิเทรชั่นที่สามารถบ่งชี้ถึงความสามารถทนต่อการแตกร้าวของถนนที่อุณหภูมิต่ำ

4. การทดสอบและมาตรฐานที่มีอยู่มีการพิจารณาการเสื่อมอายุของยางระยะสั้น (Short-Term Aging) ระหว่างการผลิตและการก่อสร้างโดยอาศัยเครื่องมือ Thin Film Oven (TFO) หรือ Rolling Thin Film Oven Oven (RTFO) อย่างไรก็ตาม การเสื่อมอายุของยางระยะยาว (Long-Term Aging) สำหรับจำลองสถานการณ์การใช้งานของถนนตลอดอายุการใช้งานไม่ได้ถูกพิจารณา

ระบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งพฤติกรรมของยางดังกล่าวมีผลต่อประสิทธิภาพในการต้านทานความล้า (Fatigue Cracking) ของถนน

5. ยางแอสฟัลต์มีคุณสมบัติที่สามารบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของถนนที่แตกต่างกันภายใต้ระบบการแบ่งเกรดที่เหมือนกันหากถูกนำไม่ทดสอบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

6. การทดสอบและมาตรฐานของยางแอสฟัลต์ในปัจจุบันถูกพัฒนามาจากประสบการณ์ของผู้ใช้งาน(empirical) ซึ่งการทดสอบเหล่านี้ไม่เหมาะสำหรับยางแอสฟัลต์ชนิดปรับปรุงคุณภาพเช่น Polymer Modified Asphalt (PMA) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้มากขึ้นในปัจจุบัน

จากความร่วมมือของสหพันธ์งานทางแห่งชาติของประเทศสหรัฐอเมริการ่วมกับมหาวิทยาลัยชั้นนำต่างๆ ภายในประเทศ ได้ก่อตั้งโครงการวิจัยเพื่อพัฒนาระบบงานทางโดยใช้ชื่อว่า Strategic Highway Research Program (SHRP) เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2531 โดยมีงบประมาณงานวิจัยมากกว่า 50 ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกาหรือมากกว่า 1,000 ล้านบาทในเวลาขณะนั้น โดยมีระยะเวลาการวิจัยรวมทั้งสิน 5 ปี จุดประสงค์เพื่อพัฒนามาตรฐานการทดสอบยางแอสฟัลต์และการทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยอยู่บนพื้นฐานของประสิทธิภาพของถนน (Performance-Based) โดยมาตรฐานและการทดสอบดังกล่าวถูกเรียกว่า Superpave (*Su*perior *Per*forming Asphalt *Pave*ments) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่มีคุณลักษณะโดนเด่นดังนี้

1. มาตรฐานและการทดสอบต่างๆ ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งประเภทโมดิฟายด์และไม่โมดิฟายด์ (Modified and Unmodified Asphalt Cements)

2. อุณหภูมิที่ถูกเลือกมาใช้เป็นตัวแปรในการทดสอบต้องเป็นอุณหภูมิที่สอดคล้องการใช้งานจริงของยางแอสฟัลต์ ณ สถานที่ที่นำยางไปใช้

3. คุณสมบัติทางกายภาพซึ่งถูกทดสอบตามระบบ Superpaveมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพของถนน เช่น ความต้านทานร่องล้อ และความต้านทานต่อความล้าของถนน

4. มาตรฐานการทดสอบของยางแอสฟัลต์ตามระบบ Superpave ถูกออกแบบมาเพื่อจำลอง 3 สถานการณ์หลักในระหว่างการก่อสร้าง คือ ช่วงที่ 1 เป็นการทดสอบยางตั้งต้นซึ่งเป็นตัวแทนของขั้นตอนการขนถ่ายยาง การจัดเก็บ ก่อนนำไปผสมกับมวลรวม ช่วงที่ 2 เป็นการทดสอบเพื่อจำลองสถานการณ์ของยางที่มีการเสื่อมอายุในระยะสั้น (short-term aging) ซึ่งเกิดขึ้นในขั้นตอนของการผลิตส่วนผสม (production) และการก่อสร้างถนน (construction) ช่วงที่ 3 เป็นการทดสอบเพื่อจำลองสถานการณ์ของยางที่มีการเสื่อมอายุในระยะยาว (long-term aging) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการใช้งานของถนน

5. มีการพิจารณาคุณสมบัติของยางแอสฟัลต์บนช่วงอุณหภูมิทั้งหมดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นบนถนนที่ทำการออกแบบ

6. มาตรฐานและการทดสอบถูกออกแบบเพื่อควบคุมความเสียหายหลัก 3 อย่างที่อาจเกิดขึ้นบนถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ ความเสียหายทางร่องล้อ (Rutting) ความเสียหายจาก

ความล้า (Fatigue Cracking) และความเสียหายจากการแตกร้าวทางความเย็น (Thermal Cracking) สำหรับประเทศไทยมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายของถนนได้เพียงสองลักษณะเท่านั้น คือความเสียหายทางร่องล้อเนื่องจากอุณหภูมิร้อนและความเสียหายจากความล้าที่มีเกิดขึ้นที่อุณหภูมิปานกลาง (Intermediate Temperature)

อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการทดสอบยางแอสฟัลต์ตามระบบ Superpave ยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง รวมถึงเกณฑ์มาตรฐานและการทดสอบต่างๆ ก็ยังคงถูกดัดแปลงขึ้นอยู่กับคุณลักษณะและสภาพการใช้งานจริงของยางแอสฟัลต์ในแต่ละท้องถิ่น

3. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามระบบสมรรถนะ (PG System)

ตารางที่ 4 แสดงรายละเอียดของชื่ออุปกรณ์การทดสอบที่ใช้ทดสอบยางแอสฟัลต์ในระบบ Superpave รวมถึงจุดประสงค์และตัวแปรบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของยางแอสฟัลต์ อย่างไรก็ตามตัวแปรเหล่านี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพของถนน เพราะนอกเหนือจากยางแอสฟัลต์แล้ว คุณสมบัติของหิน (Aggregate) และส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Hot Mix Asphalt Mixture) และโครงสร้างถนน (Pavement Structure) มีผลกระทบในเชิงนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางที่ 4 ชุดอุปกรณ์และจุดประสงค์ของการทดสอบยางแอสฟัลต์ตามประสิทธิภาพ (Test Suite for Performance-Graded System)

ชุดอุปกรณ์	จุดประสงค์	ตัวบ่งชี้สมรรถนะของถนน
Rolling Thin Film Oven (RTFO)	จำลองการเสื่อมอายุของยางระยะสั้นระหว่างการผลิตและก่อสร้าง HMA	ป้องกันการเสื่อมสภาพของยางระหว่างการผลิตและการก่อสร้าง
Pressure Aging Vessel (PAV)	จำลองการเสื่อมอายุของยางระยะยาวระหว่างการเปิดใช้งานถนนช่วง 5-10 ปี	ป้องกันการเสื่อมสภาพของยางก่อนอายุการใช้งานของถนนที่ออกแบบไว้
Rotational Viscosity (RV)	วัดคุณสมบัติยางที่อุณหภูมิสูงเพื่อการจ่ายและขนส่งยาง	เพื่อหาอุณหภูมิการส่งจ่ายยางที่เหมาะสม และเพื่อหาอุณหภูมิการผสมและการบดอัดส่วนผสม HMA ที่เหมาะสม
Dynamic Shear Rheometer (DSR)	วัดคุณสมบัติยางที่อุณหภูมิใช้งานปานกลางถึงอุณหภูมิสูง	ป้องกันการก่อนร่องล้อและการแตกเนื่องจากความล้า
Bending Beam Rheometer (BBR)	วัดคุณสมบัติยางที่อุณหภูมิต่ำ	ป้องกันการแตกของถนนที่อุณหภูมิต่ำ
Direct Tension Test (DTT)	วัดคุณสมบัติยางที่อุณหภูมิต่ำ	ป้องกันการแตกของถนนที่อุณหภูมิต่ำ

3.1 Rolling Thin Film Oven (RTFO)

การทดสอบ Rolling Thin Film Ovenอ้างถึงมาตรฐาน AASHTO T240 และ ASTM D2872 เป็นการจำลองการเสื่อมสภาพยางในระยะสั้นระหว่างขั้นตอนของการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตและการก่อสร้างถนน การทดสอบ RTFO ถูกเลือกใช้ด้วยเหตุผล ดังนี้

ก) ยางแอสฟัลต์สดถูกให้ความร้อนและหมุนเวียนผ่านอากาศระหว่างการหมุนของตัวเครื่องทดสอบ

ข) หากยางที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารโมดิฟายเออร์(modifiers) จะทำให้สารโมดิฟายเออร์นี้กระจายตัวในยางแอสฟัลต์ดีเพื่อให้มีการสัมผัสกับความร้อนได้ดีขึ้นขณะมีการหมุนของเครื่องทดสอบ ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบ Thin Film Oven (TFO) ที่ไม่มีการเคลื่อนตัวของยางแอสฟัลต์จึงทำให้มีแต่เพียงผิวหน้าของยางที่มีการเสื่อมสภาพ

ค) ใช้เวลาเพียง 75 นาที (1 ชั่วโมง 15 นาที) ซึ่งเป็นระยะเวลาการทดสอบที่น้อยกว่าการทดสอบแบบ TFO

ภาพที่ 3 แสดงเครื่องมือทอสอบ Rolling Thin Film Oven (RTFO) โดยการทดสอบแบบ RTFO เป็นการเตรียมยางแอสฟัลต์ที่มีการเสื่อมอายุระยะสั้นที่อุณหภูมิ 163°C เพื่อที่จะนำยางแอสฟัลต์ที่ถูกเตรียมไปใช้ทดสอบ Dynamic Shear Rheometer (DSR) ในขั้นตอนต่อไป อีกทั้งการทดสอบแบบ RTFO เป็นการหาค่าน้ำหนักของยางที่มีสูญเสียไประหว่างการทดสอบ โดยน้ำหนักเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณการเสื่อมอายุของยางที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตส่วนผสมและการก่อสร้างส่วนผสม อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้ที่ยางแอสฟัลต์จะมีน้ำหนักเพิ่มภายหลังการทดสอบแล้วเสร็จ เนื่องจากผลผลิตของกระบวนการอ๊อกซิเดชั่น(Products of Oxidation) ระหว่างการทดสอบ RTFO

ภาพที่ 3 เครื่องมือการทดสอบ RTFO Test

3.2 Pressure Aging Vessel (PAV)

เครื่อง Pressure Aging Vessel ถูกใช้สำหรับงานวิจัยแอสฟัลต์สำหรับการทำให้ยาง (rubber) เสื่อมอายุมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยกระบวนการทดสอบการเสื่อมอายุโดยใช้ความดันนี้ถูกพัฒนาโดย Dr. D. Y. Lee ที่มหาวิทยาลัยรัฐไอโอวา ประเทศสหรัฐอเมริกาเพื่อใช้จำลองสภาพการเสื่อมอายุของยางแอสฟัลต์ระยะยาว ซึ่งปัจจุบันถูกทำเป็นมาตรฐานการทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM D454 และ ASTM D572 โดยประโยชน์ของการทดสอบการเสื่อมอายุของยางระยะยาวจากการใช้เครื่องความดันนี้คือ

ก) จำกัดการสูญเสียเนื้อยางเนื่องจากการระเหย

ข) กระบวนการอ๊อกซิเดชั่นถูกกระทำโดยปราศจากการใช้ความร้อนสูง

ค) สามารถเตรียมยางใช้เพียงพอสำหรับการทดสอบทั้งหมดภายในครั้งเดียว

การทดสอบ Pressure Aging Vessel ถูกพัฒนาในโครงการ SHRP เพื่อจำลองการเสื่อมอายุของยางที่เกิดขึ้นในระยะ 5 ถึง 10 ปีระหว่างการในงานจริงของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต (In-service HMA Pavement) หลังจากยางแอสฟัลต์ผ่านกระบวนการทำให้ยางเสื่อมอายุระยะสั้นเนื่องจากการผลิตและการก่อสร้างจากการทดสอบ RTFO แล้ว ยางแอสฟัลต์จะต้องถูกนำมาผ่านการทดสอบ PAV เป็นขั้นตอนต่อไป แสดงเครื่องมือการทดสอบของ PAV Test

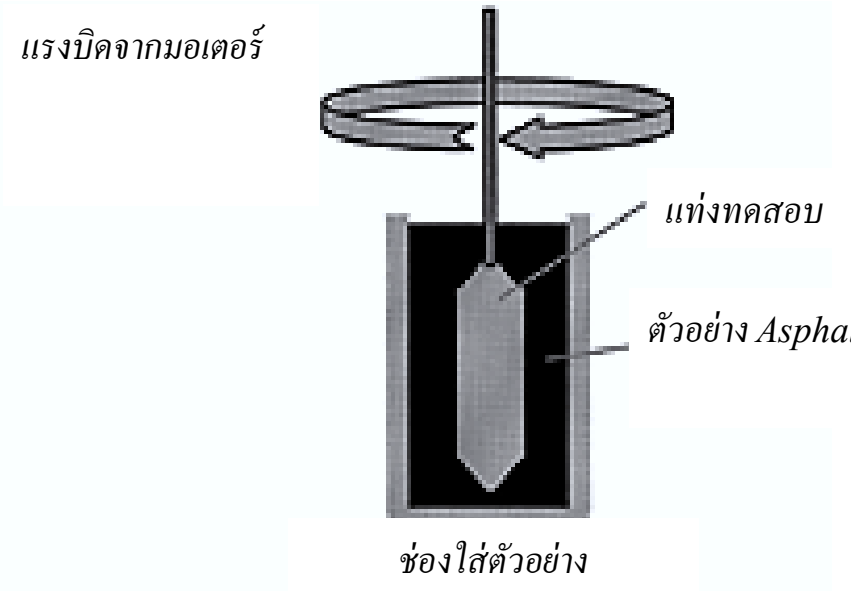
ภาพที่ 4 เครื่องมือการทดสอบ PAV Test

ยางที่ผ่านการทดสอบ RTFO จะถูกนำมาผ่านเครื่องความดันอากาศสูงในอุณหภูมิที่กำหนดในระยะเวลาประมาณ 20 ชั่วโมงในเครื่องการทดสอบ PAV เพื่อเป็นการจำลองสถานการณ์การเสื่อมอายุระยะยาวของยางแอสฟัลต์ เครื่อง PAV ส่วนใหญ่จะทำจาก stainless steel และสามารถรับแรงดันภายใต้การการทำของแรงดันที่ 2070 kPaและอุณหภูมิระหว่าง 90°C ถึง 110°C ขึ้นอยู่กับประเภทของยางแอสฟัลต์ ชุดอุปกรณ์ Vessel สามารถบรรจุถาดตัวอย่างที่ซ้อนกันได้ถึง 10 ถาด สำหรับการทดสอบ 1 ครั้ง

โดยทั่วไป 1 หลอดแท่งทดสอบตัวอย่างของการทดสอบ RTFO สามารถเตรียมตัวอย่างได้ประมาณ 50 กรัม เพื่อที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ PAV ต่อไป โดยชั้นวางตัวอย่างที่ประกอบไปด้วยถาดตัวอย่างประมาณ 10 ถาดเพื่อไว้ในทดสอบ PAV จะถูกวางลงในช่อง Vessel ที่ถูกเตรียมความร้อนไว้ก่อนการทดสอบ และจะต้องทำการปิดฝาโดยทันทีเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน เมื่อ PAV ทำอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการแล้ว ความดัน 2070 kPaจะถูกปล่อยสู่ห้อง Vessel ประมาณ 20 ชั่วโมง หลังจากนั้นความดันจะถูกปล่อยออกอย่างช้าๆ (โดยใช้เวลาประมาณ 10 นาที)จากการใช้วาล์วปล่อย (Bleed Value) ถ้ามีการปล่อยความดันเร็วจะทำให้เนื้อยางมีลักษณะเป็นโฟม(foaming) ตัวอย่างที่ถูกเตรียมจากการทดสอบ PAV จะถูกนำไปในสำหรับการทดสอบ Dynamic Shear Rheometerเพื่อตรวจสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของยางแอสฟัลต์ในขั้นตอนต่อไป

3.3 Rotational Viscometer (RV)

เครื่องทดสอบ Rotational Viscometer (RV) ถูกพัฒนาขึ้นในระบบ Superpave เพื่อหาค่าความหนืดของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิการก่อสร้างที่สูงมากกว่า 100°C เพื่อให้มั่นใจว่ายางแอสฟัลต์จะอยู่ในสภาพของเหลวเพียงพอต่อการไหลว่าผ่านท่อการส่งและสามารถผสมเข้ากับมวลรวมได้อย่างดี ยางแอสฟัลต์ส่วนมากจะมีพฤติกรรมเป็นของเหลวแบบ Netonianคือความหนืดไม่ขึ้นตรงกับอัตราแรงเฉือน ดังนั้นการวัดค่าความหนืดนี้เพื่อให้เป็นมั่นใจว่ายางจะอยู่ในสภาวะที่สามารถใช้งานได้ (workability) โดยการทดสอบ RV นี้สามารถนำไปทดสอบกับยางแอสฟัลต์ชนิดโมดิไฟด์ได้ เช่นยางที่มีส่วนผสมของยางธรรมชาติ (Nutural Rubber) เมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบแบบเดิมของการทดสอบ Capillary Viscosity เนื่องจากหลอดแก้วทดสอบอาจจะอุดตันเพราะความหนืดที่สูงมากเกินไปของยางแอสฟัลต์ที่มีส่วนผสมของยางธรรมชาติ ทั้งนี้ มาตรฐานการทดสอบของ Superpaveกำหนดไว้ว่าให้ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 135°C มีค่าไม่เกิน 3 Pa.s.



ภาพที่ 5 หลักการทดสอบ Rotational หรือ Brookfield Viscometer

โดยวิธีการทดสอบหาค่าความหนืด (Viscosity) ถูกระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM D 4402 หรือ AASHTO TP48 “Viscosity Determination of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus.” ภาพที่ 5 แสดงถึงหลักการการทดสอบ Rotational หรือ Brookfield Viscometer ความหนืด Rotational Viscometer ถูกหาได้จากการวัดค่าแรงบิดที่ใช้เพื่อรักษาระดับความเร็วของ 20 รอบต่อนาที ของแท่ง spindle ทรงกระบอกที่จมอยู่ในยางแอสฟัลต์ ณ อุณหภูมิการทดสอบ ค่าแรงบิดที่ถูกวัดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนืดของยางแอสฟัลต์

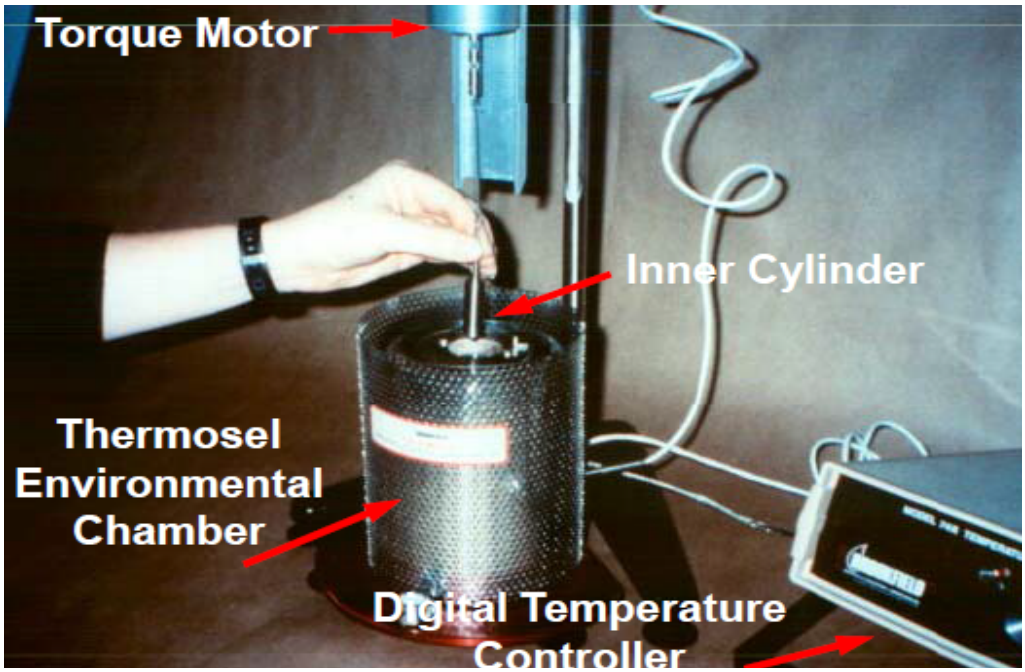
ชุดอุปกรณ์การทดสอบที่ใช้วัดค่าความหนืด (Rotational Viscosity) ดังแสดงในภาพที่ 6 ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือเครื่อง Brookfield Viscometer และระบบความคุมอุณหภูมิ Thermosel^{TM} ในเครื่อง Brookfield Viscometer จะประก อบไปด้วยมอเตอร์ แกนหมุน และหน้าปัดความคุมการทำงาน สำหรับแท่งหมุน (Spindle) จะมีอยู่หลายขนาดเพื่อใช้สำหรับค่าความหนืดของยางที่หลากหลาย โดยส่วนใหญ่ยางแอสฟัลต์จะถูกทดสอบโดยใช้แท่นหมุนเบอร์ 21 สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิ (Themosel^{TM}) จะประกอบไปด้วยเหล็กป้องกันสนิมในช่องใส่ตัวอย่าง อุปกรณ์ควบคุมความร้อนแบบใช้ไฟฟ้า และหน่วยควบคุมอุณหภูมิแบบระบบดิจิตอล

สำหรับขั้นตอนการทดสอบ จะต้องเตรียมยางแอสฟัลต์ประมาณ 30 กรัม โดยปริมาณการใช้จะเปลี่ยนไปตามขนาดของแท่งหมุน (spindle) โดยทั่วไปแล้วปริมาณยางที่ถูกใช้ในการทดสอบจะไม่เกิน 11 กรัม หลักจากที่เตรียมตัวอย่างเรียบร้อยแล้วจะทำการหย่อนกระบอกตัวอย่างลงไปในชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและรอจนกว่าจะได้อุณหภูมิการทดสอบที่กำหนดไว้ซึ่งจะสามารถเริ่มการทดสอบ ก่อนเริ่มการทดสอบแท่งหมุน spindle จะถูกหย่อนลงไปในกระบอกตัวอย่างอย่างช้าๆ ซึ่งแท่งหมุนได้ถูกติดตั้งไว้กับเครื่องวัด viscometer ภายหลักจากอุณหภูมิคงที่เครื่องทดสอบจะถูกเปิดให้ทำงานที่การหมุน 20 รอบต่อนาที การอ่านค่าความหนืดจะถูกแสดงบนหน้าจอพร้อมกับหมายเลขของแท่งหมุนที่ถูกใช้รวมถึงอุณหภูมิการทดสอบ

โดยส่วนมากค่าที่แสดงบนหน้าจอจะมีหน่วย centipoise (cP) ซึ่งเป็นหน่วยที่ระบุไว้ในมาตรฐานการทดสอบของ Superpaveซึ่งหน่วยนี้สามารถแปลงให้เป็นหน่วยของ Pa.s. จากสูตรการคำนวณดังนี้

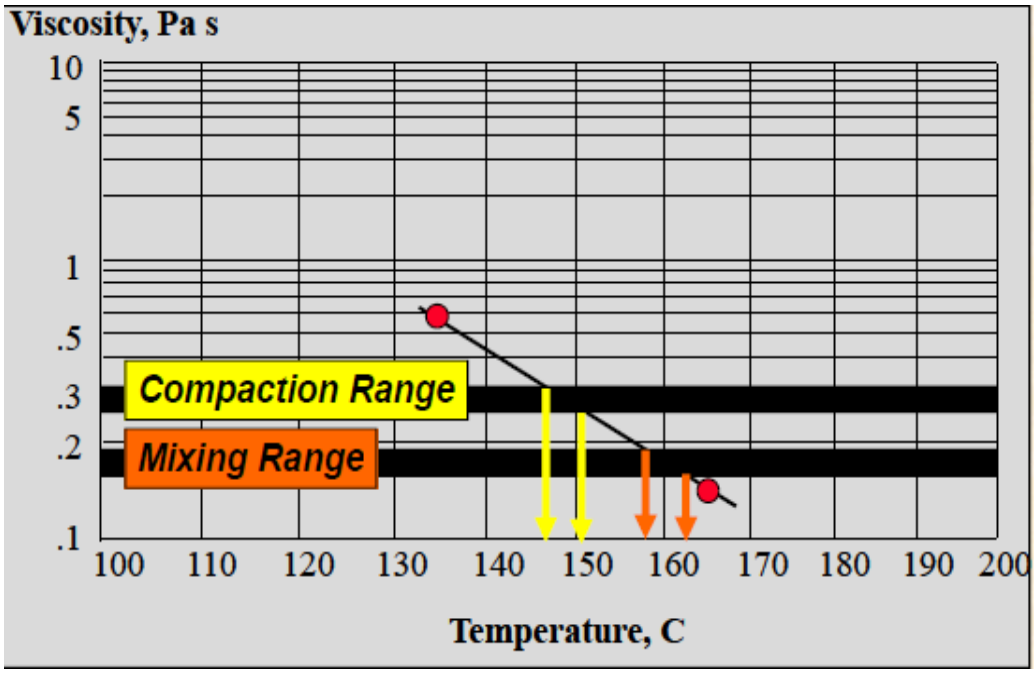
1000 cP = 1 Pa.s.

ดังนั้น ค่าความหนืด Brookfield Viscosity ในหน่วย cP สามารถคูณด้วย 0.001 เพื่อให้ได้หน่วยของ Pa.s.



ภาพที่ 6 เครื่องมือทดสอบ Rotational หรือ Brookfield Viscosity

ในหลายๆ รัฐจะใช้ค่าความหนืดนี้เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผสมส่วนผสม HMA และการบดอัดขณะทำการก่อสร้าง โดยทำการวัดค่า Rotational หรือค่า Brookfield Viscosity ที่อุณหภูมิที่หลากหลายแล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืด (Temperature-Viscosity Curve) ดังตัวอย่างในภาพที่ 7



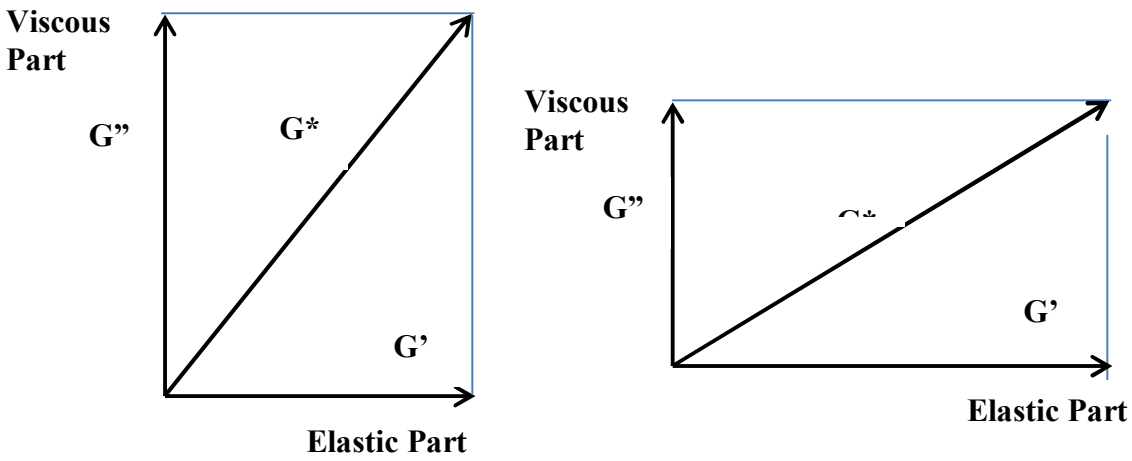
ภาพที่ 7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืดเพื่อหาอุณหภูมิการผสมและบดอัดที่เหมาะสม

3.4 Dynamic Shear Rheometer (DSR)

ชุดเครื่องมือทดสอบ Dynamic Shear Rheometerถูกใช้เพื่ออธิบายคุณลักษณะของพฤติกรรมความหนืด (Viscous) และความยืดหยุ่น (Elastic) ของยางแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิการใช้งานระดับปานกลางและระดับสูง การทดสอบ DRS บางครั้งอาจถูกเรียกว่า Dynamic Rheometerหรือ Oscillatory Shear Rheometerซึ่งถูกใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกมาเวลานาน เครื่อง DSR สำหรับงานทางถูกใช้เพื่อวัดค่า Complex Shear Modulus (G* หรือที่เรียกว่า G star) และ Phase Angle (delta, δ) ของยางแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิและความถี่ที่ถูกทดสอบ ค่า G* ถูกพิจารณาให้เป็นค่าการต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของยางเมื่อถูกกระทำด้วยแรงเฉือนซ้ำๆกัน ดังแสดงในภาพที่ 8ค่า Complex Shear Modulus (G*) ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ

(1) ส่วนที่คืนตัวได้ (Elastic หรือ Recoverable part) ที่แสดงโดยค่า Storage Modulus (G', G prime)

(2) ส่วนที่คืนตัวไม่ได้ (Viscous หรือ Non-Recoverable part) ที่แสดงโดยค่า Loss Modulus (G", G double prime)



ภาพที่ 8 องค์ประกอบของค่า Complex Modulus (G*)

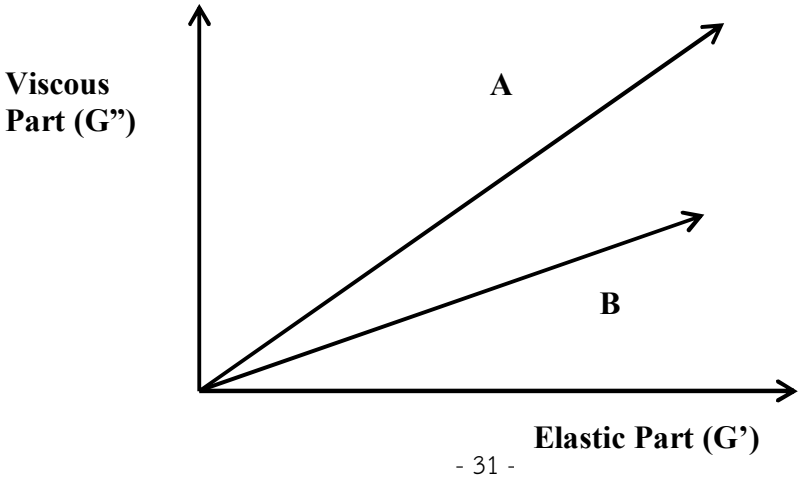
ทั้งอุณหภูมิและความถี่ของการกระทำ (Loading) มีผลอย่างเห็นได้ชัดต่อค่าของ G* และ δของยางแอสฟัลต์ ยางแอสฟัลต์มีพฤติกรรมคล้ายกับของแข็งที่ยืดหยุ่น (Elastic Solid) ได้ดังแสดงตามแกนแนวนอนของ

ภาพที่ 9

เมื่อถูกทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ ในทางตรงกันข้ามยางแอสฟัลต์จะมีพฤติกรรมคล้ายกับของเหลวที่มีความหนืด (Viscous Fluids) เมื่อถูกทดสอบที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงตามแกนแนวตั้งของภาพที่ 9

ภาพที่ 9 อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปอุณหภูมิการใช้งานปกติของถนนหรือยางแอสฟัลต์จะอยู่ในช่วงกลางๆ หรือมีลักษณะพฤติกรรมแบบกึ่งของแข็งที่ยืดหยุ่นและกึ่งของเหลวที่มีความหนืด (Viscoelastic Materials) ดังแสดงในลูกศร A และ B ในภาพที่ **9**

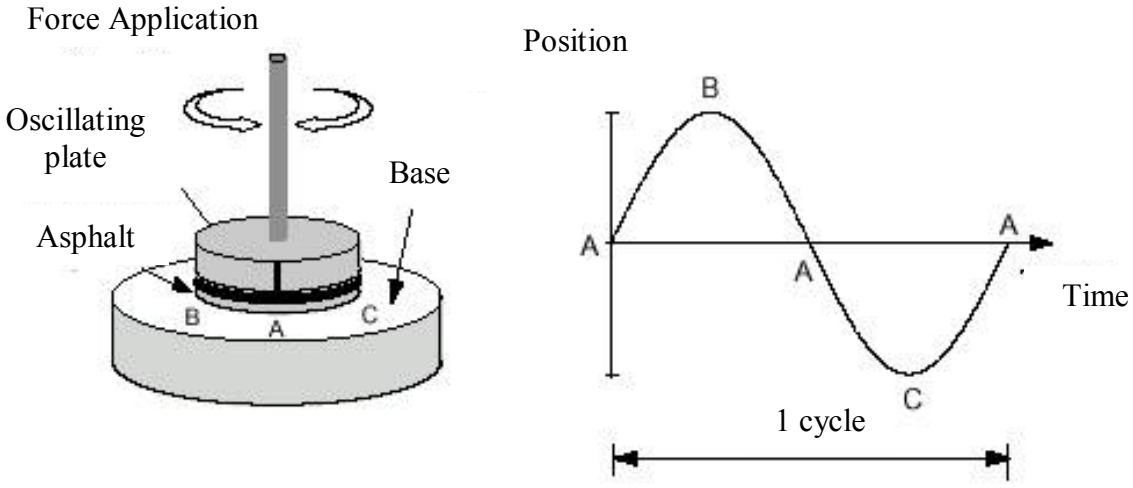
ภาพที่ 9 เมื่อยางแอสฟัลต์ถูกกระทำการเปลี่ยนรูปส่วนหนึ่งจะมีลักษณะเป็น elastic (recoverable) และอีกส่วนหนึ่งจะเป็นแบบ Viscous (Non-recoverable) ผลการทดสอบของ DSR จะให้ภาพรวมของพฤติกรรมของยางแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิการใช้งานจริงของถนนโดยวัดจากค่า G* และค่า δ



ภาพที่ 9 แสดงพฤติกรรมความหนืด (Viscous) และความยืดหยุ่น (Elastic) ของยางแอสฟัลต์

จากภาพที่ 8 แสดงให้เห็นถึงยางแอสฟัลต์ 2 ชนิดที่มีค่า G* และมุม delta ที่แตกต่างกัน (ซึ่งสามารถดูได้จากความยาวของเส้นทแยงมุมและมุมองศาที่แตกต่างกัน) อย่างไรก็ตาม ยางแอสฟัลต์ชนิด B มีส่วนที่สามารถคืนตัวได้ (Elastic component) ที่ใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยางชนิด A เมื่อยางทั้งสองชนิดถูกกระทำโดยแรงเฉือน ยาง B จะมีพฤติกรรมที่ยืดหยุ่นมากกว่า (more elastic or recoverable) และมีส่วนที่มีความหนืดน้อยกว่า (Less Viscous or non-recoverable) เมื่อเปรียบกับยางชนิด A จากตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่าค่า complex modulus (G*) เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายคุณลักษณะของยางแอสฟัลต์ได้ทั้งหมด ซึ่งต้องมีการพิจารณา phase angle (delta, δ) ที่เปลี่ยนไปในขณะเดียวกันด้วย

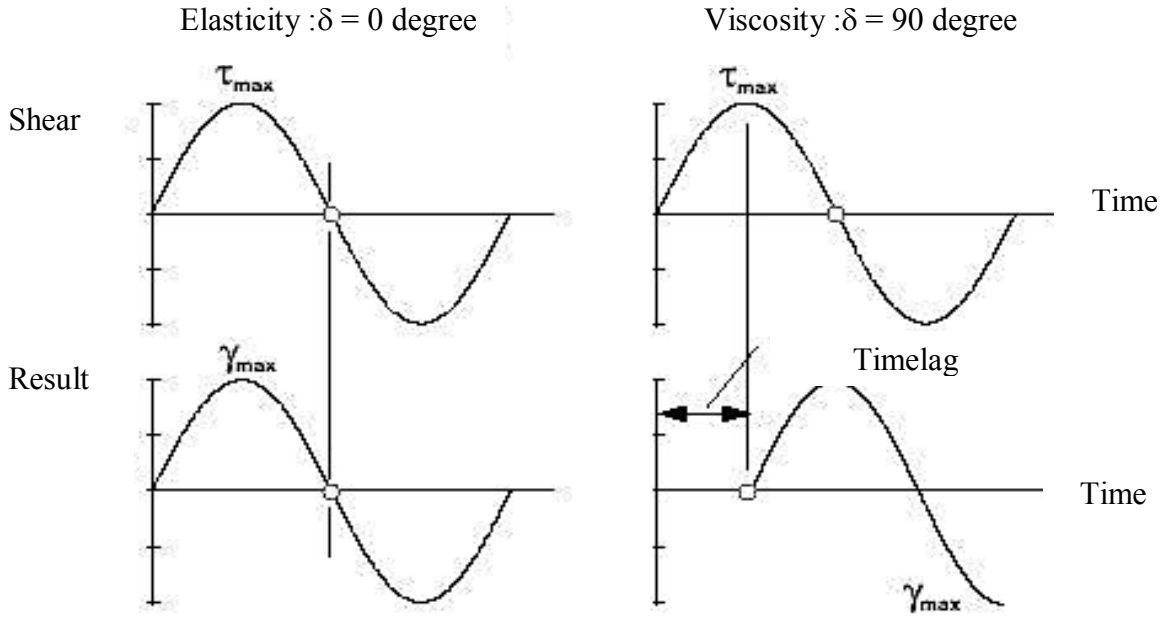
ส่วนที่คืนตัวได้ (Elastic component หรือ storage modulus) มีความสัมพันธ์กับปริมาณพลังงานที่ถูกกักเก็บในตัวอย่างยางแอสฟัลต์ระหว่างในแต่ละรอบการทดสอบ ส่วนที่คืนตัวไม่ได้ (Viscous component หรือ loss modulus) มีความสัมพันธ์กับปริมาณพลังงานที่สูญเสียไว้ระหว่างในแต่ละรอบการทดสอบ การวิเคราะห์ผลนั้นมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องเข้าใจพฤติกรรมของวัสดุชนิดกึ่งของแข็งยืดหยุ่นและกึ่งของเหลวหนืด (Viscoelastic Materials) โดยวัสดุชนิดนี้จะมีพฤติกรรมการตอบสนองที่ล่าช้าจากการคืบคืนตัวกลับของยางเมื่อไม่มีการใส่แรงกระทำ ทั้ง storage และ loss modulus จะมีส่วนประกอบของการตอบสนองที่ล่าช้านี้ (Delayed Elastic Response) ดังนั้น การวิเคราะห์ผลไม่สามารถพิจารณาว่า storage เป็นเพียงการยืดหยุ่นอย่างเดียวหรือ loss modulus เป็นเพียงความหนืดอย่างเดียวได้



ภาพที่ 10 พื้นฐานของ Dynamic Shear Rheometer (DSR)

หลักการการทำงานของเครื่อง DSR ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งกระบวนการการทดสอบถูกระบุไว้ในมาตรฐาน AASHTO T315 หรือ AASHTO T350 ดังแสดงในภาพที่ 10 ตัวอย่างยางแอสฟัลต์จะถูกวางไว้ระหว่างแผ่นเหล็กสองแผ่นโดยแผ่นหนึ่งจะสามารถหมุนบิดไปกลับได้ตามลักษณะการใส่แรงกระทำรูปแบบของ Sine waveform เมื่อใส่แรงกระทำหรือแรงบิด (Torque) แผ่นที่ประกบกับตัวอย่างยางจะเคลื่อนตัวจากจุด A ไปยังจุด B และกลับมายังจุด A เมื่อหมุนไว้ยังจุด C แล้วย้อนกลับมาที่จุด A อีกครั้ง โดยการเคลื่อนตัวในรูปแบบนี้จะถูกว่าเป็น 1 รอบการทดสอบ ซึ่งถ้าใน 2 รอบการทดสอบเกิดขึ้น 1 วินาที ความถี่ในการหมุนบิดจะเป็น 2 รอบต่อวินาทีหรือ 2 Hertz (Hz) โดยความถี่ในการหมุนสามารถแสดงตามระยะวงรอบหรือ radians จากการหมุนแผ่นใน 1 วินาทีการทดสอบ DSR ทั้งหมดของระบบ Superpaveจะถูกทดสอบที่ความถี่ 10 radians/second ซึ่งเท่ากับ 1.59 Hz โดยการเคลื่อนไหวนี้จะอยู่ในรูปแบบของค่าความเครียดคงที่ (constant stress mode)

ความหนาของตัวอย่างยางแอสฟัลต์ที่ถูกประกบระหว่างแผ่นเหล็กจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการทดสอบ สำหรับอุณหภูมิสูง (ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 46°C) มาตรฐานจะกำหนดให้มีช่องว่างระหว่างแผ่นประกอบอยู่ที่ 1000 microns (1 mm) สำหรับอุณหภูมิต่ำ (ที่มีอุณหภูมิระหว่าง 4°C ถึง 40°C) จะกำหนดให้มีช่องว่างระหว่างแผ่นประกอบอยู่ที่ 2000 microns (2 mm) เส้นผ่าศูนย์กลางของแท่นหมุนจะมีอยู่ 2 ขนาดคือ ขนาดใหญ่ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 25 ม.ม. สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิสูงและขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 8 ม.ม. สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง



ภาพที่ 11 ผลลัพธ์ของ Stress-strain ของค่าแรงเครียดที่คงที่ (Constant Stress)

หลังจากตัวอย่างยางแอสฟัลต์ถูกประกบเข้ากับแผ่นของเครื่องทดสอบและอยู่ในอุณหภูมิทดสอบที่เหมาะสมแล้ว (การควบคุมอุณหภูมิสามารถใช้ได้ทั้งระบบน้ำหรือระบบอากาศ) เมื่อก้านทดสอบเริ่มหมุนไปและกลับในระดับความเครียดคงที่ (constant stress) ผลการทดสอบของค่าความเค้น (Strain) จะถูกวัดค่าโดยอัตโนมัติและความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงความเครียดที่กระทำกับค่าแรงความเค้นที่วัดได้จะถูกใช้คำนวณค่า G* (ดังแสดงตามภาพที่ 11) โดยค่า G* เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนสูงสุดที่กระทำ (Maximum Shear Stress, τ_{max}) ต่อค่าความเค้นของแรงเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Strain, γ_{max}) การล่าช้าของเวลาที่เกิดขึ้นระหว่างแรงกระทำกับความเค้นที่วัดได้คือค่า phase angle (delta, δ) สำหรับวัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ (Perfectly Elastic Material) ซึ่งมีการตอบสนองทันทีทันใด ดังนั้นค่าเวลาล่าช้า (time lag) ระหว่างแรงกระทำกับผลของค่าความเค้น หรือ phase angle (δ) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่สำหรับวัสดุที่มีความหนืดอย่างสมบูรณ์ (Perfectly Viscous Material) ค่าเวลาล่าช้าจะมีขนาดใหญ่และ phase angle (δ) จะมีค่าเข้าใกล้ 90 องศา อย่างไรก็ตาม ยางแอสฟัลต์จะมีพฤติกรรมการตอบสนองระหว่าง stress กับ strain ที่อยู่ระหว่างวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสมบูรณ์และวัสดุที่มีความหนืดสมบูรณ์นี้ที่อุณหภูมิการใช้งานจริง ดังแสดงใน ภาพที่ 12ซึ่งเป็นผลของการทดสอบที่มีค่า phase angle อยู่ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา

สมการที่ปรากฏข้างล่างนี้เป็นสมการที่ใช้คำนวณค่า τ_{max} และค่า γ_{max} โดยโปรแกรมในเครื่อง DSR

$$\tau_{max} = \frac{2T}{\pi r^3}$$

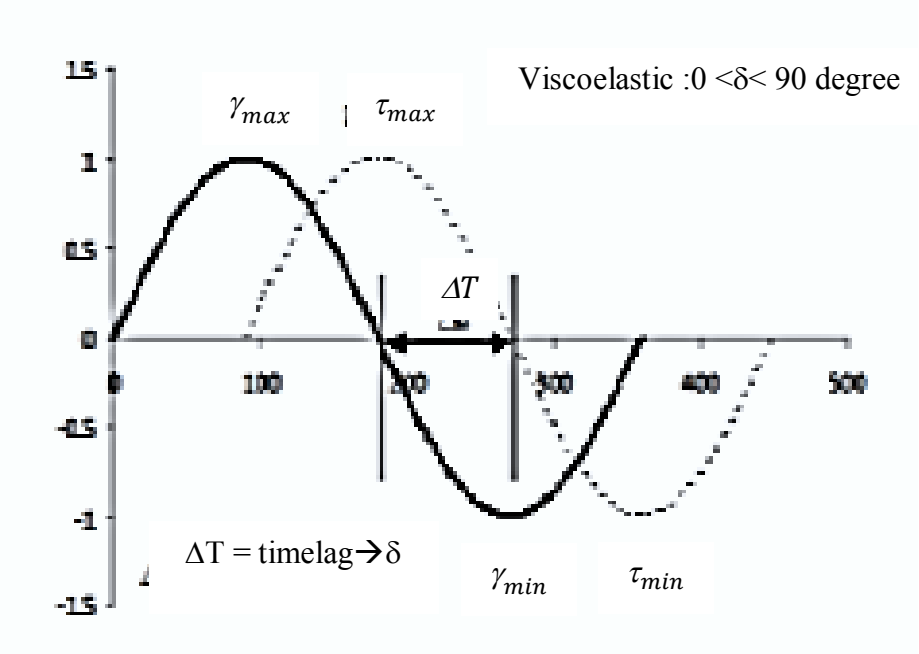
$$\gamma_{max} = \frac{\theta r}{h}$$

โดย T คือค่าแรงบิดกระทำสูงสุด

r คือค่า *radius* ที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง

θ คือค่ามุมองศาที่หมุน *(Deflection* หรือ *rotation)*

h คือค่าความสูงของตัวอย่างยางแอสฟัลต์ (1 ม.ม. หรือ 2 ม.ม.)



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ของวัสดุ Viscoelastic material

ภายใต้พลศาสตร์ของไหล (Rheology) ที่ถูกใช้ในงานการทดสอบงาน Superpave ความเครียดคงที่(constant stress) ที่ถูกใช้ในการทดสอบควรจะได้ผลของความเค้นแรงเฉือน (shear strain) อยู่ที่ประมาณร้อยละ 10 – 12เมื่อยางถูกทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิสูง ตัวอย่างเช่น ยางแอสฟัลต์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการ *aging* หรือยางที่ผ่านการทดสอบ RTFO และควรมีผลความเค้นแรงเฉือนอยู่ที่ที่ประมาณร้อยละ 1 เมื่อยางที่ถูกทดสอบอยู่ในสภาพกึ่งแข็ง ตัวอย่างเช่น ยางที่ผ่านกระบวนการ PAV และถูกทดสอบที่อุณหภูมิปานกลาง ในปัจจุบันเครื่องทดสอบ DSR ส่วนใหญ่จะสามารถรายงานผลการทดสอบ G* และ δ อัตโนมัติ

สำหรับมาตรฐานการทดสอบแบบ Superpave การทดสอบ DSR ถูกใช้วัดค่าคุณสมบัติของยางแอสฟัลต์อุณหภูมิปานกลางถึงอุณหภูมิสูง โดยอุณหภูมิการทดสอบที่แท้จริงถูกกำหนดจาดอุณหภูมิใช้งานจริงของถนนที่ถูกออกแบบที่ซึ่งยางแอสฟัลต์จะถูกนำไปใช้ผสมกับมวลรวมเพื่อผลิตส่วนผสม HMA โดยอุณหภูมิสูงสุด (อุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบ) คือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุดของถนนรอบ7 วันตลอดช่วงเวลาของฤดูร้อน ดังนั้นการทดสอบสำหรับ DSR ที่อุณหภูมิสูง จะใช้อุณหภูมิการทดสอบจากการหาค่าอุณหภูมิสูงสุดของถนนรอบ 7 วันนี้ ค่าอุณหภูมิทดสอบปานกลางถูกกำหนดจากค่าเฉลี่ยโดยประมาณของอุณหภูมิสูงสุด 7 วันและอุณหภูมิต่ำสุด สำหรับอุณหภูมิการออกแบบต่ำสุดถูกเลือกจากอุณหภูมิคาดการณ์ที่ต่ำสุดบนพื้นที่ของถนนที่ถูกออกแบบ โดยค่าการคาดการณ์นี้ได้มาจากการเก็บข้อมูลจากการบันทึกฐานข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา

การวัดค่าคุณสมบัติกายภาพของ G* และค่า δ สำหรับยางแอสฟัลต์ชนิดต่างๆ จะถูกวัดอยู่ 3 ช่วงโดยเครื่องทดสอบ DSR คือ

(1) ทดสอบยางแอสฟัลต์ชนิดไม่มีการเสื่อมอายุ (Unaged) โดยเป็นการทดสอบที่อุณหภูมิสูงสุด เพื่อประเมินความสามารถของยางแอสฟัลต์ในการต้านทานร่องล้อ (Rutting) โดยมาตรฐานกำหนดให้ค่า $G^*/\sin\delta$ ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1 KPa

(2) ทดสอบยางแอสฟัลต์ชนิดจำลองการเสื่อมอายุระยะสั้น (oven aged หรือ RTFO residue) โดยเป็นการทดสอบที่อุณหภูมิสูง เพื่อประเมินความสามารถของยางแอสฟัลต์ในการต้านทานร่องล้อ (Rutting) โดยมาตรฐานกำหนดให้ค่าคุณสมบัติต่างๆ เป็นไปตามการทดสอบ Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test

(3) ทดสอบยางแอสฟัลต์ชนิดจำลองการเสื่อมอายุระยะยาว (PAV aged) เป็นการทดสอบที่อุณหภูมิปานกลาง เพื่อเป็นการประเมินความสามารถของยางแอสฟัลต์ต่อความต้านทานความล้าของถนน (Fatigue Cracking) โดยมาตรฐานกำหนดให้ค่า $G^*\sin\delta$ ต้องมีค่าเกิน 5000 KPa หรือ 6000 KPa ขึ้นอยู่กับสภาพการจราจร

โดยตัวแปรต่างๆ ที่ใช้เพื่อการประเมินคุณสมบัติของยางแอสฟัลต์ที่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานร่องล่อ (Rutting Resistance) และความสามารถในการต้านทานการแตกจากความล้า (Fatigue Cracking) โดยรายละเอียดได้ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

3.5 BBR และ DTT

สำหรับการทดสอบที่เหลืออีก 2 การทดสอบในระบบ Superpave คือการทดสอบ Bending Beam Rheometer (BBR) และการทดสอบ Direct Tension Tester (DTT) ไม่ได้ถูกอธิบายไว้ในเอกสารฉบับนี้ เนื่องจากทั้งสองการทดสอบเป็นการประเมินคุณสมบัติของยางแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่ำเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกายภายที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำ (Thermal Cracking) โดยทั่วไปพฤติกรรมของถนนในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นที่สภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ในเขตร้อนและจากสถิติที่ผ่านมาประเทศมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดที่สูงกว่าศูนย์องศาเซลเซียส ดังนั้น ไม่มีความจำเป็นที่ต้องประเมินประสิทธิภาพของยางแอสฟัลต์สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

สมรรถนะของถนนบนพื้นฐานของคุณสมบัติยางแอสฟัลต์ (Pavement Performance Based on Asphalt)

ตัวแปรกำหนดความสามารถในการต้านทานความล้า (Fatigue Parameter)

เพื่อเป็นการหาค่าตัวแปรสำหรับกำหนดความต้านทานต่อความล้าในมาตรฐานยางระบบ PG จะต้องพิจารณาถึงกลไกการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความล้าก่อน (Fatigue Cracking) ซึ่งโดยส่วนมากความล้าของถนนถูกพิจารณาให้เป็นปรากฏการณ์เสมือนการควบคุมความเครียดได้ (Stress controlled phenomenon) ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาและสามารถถูกพิจารณาให้เป็นปรากฏการณ์เสมือนการควบคุมความเค้นได้ (Strain-controlled Phonemenon) สำหรับถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาไม่มากหรือน้อยกว่า 50 ม.ม. ส่วนใหญ่การแตกร้าวเนื่องจากความล้าเป็นหนึ่งใน

ความเสียหายหลักมักจะเกิดขึ้นบนถนนแอสฟัลต์ที่มีความบาง(Thin Pavement) ดังนั้นนักวิจัยของหน่วยงาน SHRP ได้กำหนดให้ว่าการพิจารณาความต้านทานความล้าเป็นในรูปแบบของการควบคุมความเค้น ซึ่งสามารถอธิบายจากสมการทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานของพลังงานที่กระจายลงไปบนถนนต่อหนึ่งรอบการกระทำ (Work Dissipated per Loading Cycle, W_c) ที่ความเค้นคงที่ได้ดังนี้

$$W_c = \pi x \epsilon_0^2 [G^* \sin\delta\ ]$$

ที่ $\in$ คือค่าความเค้น, G* คือค่า complex modulus และδ คือค่า phase angle จากสมการนี้สามารถบอกได้ว่าถ้า G* หรือค่า δ เพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานที่ถูกปลดปล่อยลงไปบนถนนเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งถ้าค่า δ มีค่าน้อยจะทำให้มีพฤติกรรมที่ยืดหยุ่นและสามารถคืนตัวสู่สภาพปกติได้ โดยปราศจากพลังงานที่ถูกกักเก็บบนพื้นถนน พลังงานดังกล่าวสามารถกระจายลงสู่ถนนได้หลายรูปแบบ เช่น พลังงานจากการกระจายความร้อน จากการไหลของพฤติกรรมพลาสติก (Plastic) หรือจากการเคลื่อนตัวของรอยแตกในถนน อย่างไรก็ตามรูปแบบการกระจายตัวของพลังงานทั้งหมดนี้จะนำไปสู่ความเสียหายของถนน ดังนี้ค่า G*sinδ จึงเป็นค่าตัวแปรที่ใช้กำหนดเพื่อจำกัดพลังงานที่กระจายเข้าไปสู่ผิวถนนจึงนำไปสู่ความเสียหายจากความล้า (Fatigue) โดยตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทำให้เสื่อมอายุระยะยาว (PAV Aged Samples) จะถูกนำมาทดสอบ DSR เพื่อทดสอบค่าความสามารถในการต้านทานความแตกร้าวเนื่องจากความล้าเพราะยางแอสฟัลต์จะมีการเสื่อมอายุตลอดระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งทำให้ยางแข็งขึ้นและเป็นสาเหตุทำให้เสี่ยงต่อความเสียหายจากความล้า

*ตัวแปรกำหนดความสามารถในการต้านทานร่องล้อ (*Rutting Parameter)

ตัวแปรสำหรับกำหนดความสามารถในการต้านทานร่องล้อในมาตรฐาน Superpave ได้กำหนดไว้ให้ทดสอบยางโดยใช้เครื่องการทดสอบ Dynamic Shear Rheometor (DSR) สำหรับยางแอสฟัลต์ที่มีคุณสมบัติอยู่ 2 ช่วงคือ (1) ยางแอสฟัลต์ชนิดไม่มีการเสื่อมอายุ (Unaged) ประเมินความสามารถของยางแอสฟัลต์ในการต้านทานร่องล้อ (Rutting) โดยพิจารณาจากค่า G*/sinδ และ(2) ยางแอสฟัลต์ที่ผ่านกระบวนการเสื่อมอายุระยะสั้น (oven aged หรือ RTFO residue) และอาศัยหลักการการทดสอบแบบ Multiple StressCreep Recovery (MSCR) Test เพื่อประเมินความสามารถของยางแอสฟัลต์ในการต้านทานร่องล้อ (Rutting) รายละเอียดของทฤษฎี การทดสอบและการวิเคราะห์ผลของทั้งสองรูปแบบมีดังต่อไปนี้

สำหรับยางแอสฟัลต์เดิมหรือไม่มีผ่านกระบวนการทำให้เสื่อมอายุ (Original or Unaged Asphalt)

การต้านทานร่องล้อที่ดีของยางควรมีค่า Complex modulus (G*) สูงและค่า δ ที่น้อยเพื่อมีพฤติกรรมที่ยืดหยุ่น Elastic โดยค่า G* ที่สูงบ่งบอกถึงความแข็งทื่อ (Stiffer) ของยางที่สูง และมีความเป็นไปได้ที่จะมีความสามารถในการต้านทานร่องล้อได้ดีขึ้น เช่นเดียวกับการมีค่า δ ที่น้อยจะทำให้ยางมีความหยืดหยุ่นมีความสามารถในการยืนตัวได้ดีกว่า

การเพิ่มขึ้นของค่าความหยืดหยุ่น (Elasticity) ทำให้ยางสามารถต้านทานการเสียรูปถาวรของถนนได้ดีขึ้น สำหรับการทดสอบ DSR ที่มีการทดสอบยางแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิสูงไม่ผ่านกระบวนการทำให้เสื่อมอายุ (Unaged Asphalt) เพื่อประเมินการเสียรูปถาวร ซึ่งมาตรฐานสำหรับการทดสอบ DSR ของยางแอสฟัลต์เดิม (Original Asphalt) ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้ผลการทดสอบมีความรัดกุมเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ในการทดสอบ DSR บนยางที่ผ่านกระบวนการเสื่อมอายุระยะสั้น (Short term Aging) จาก RTFO Test ที่ผลการทดสอบไม่ได้เป็นตัวแทนที่ดีของการเสื่อมอายุระหว่างการผลิตหรือการปูส่วนผสมหน้างาน

นักวิจัยของ SHRP พิจารณาว่าการเกิดร่องล้อเกิดจากปรากฏการณ์เสมือนการควบคุมความเครียด (Stress-controlled phenomenon) ภายใต้การกระทำซ้ำๆ ในการกระทำแต่ละครั้งจะมีงาน (Work) ที่เกิดขึ้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของถนน ซึ่งส่วนหนึ่งของงานหรือพลังงานนี้สามารถสะท้อนคืนที่พฤติกรรมความยืดหยุ่น (Elastic) ของยางได้ ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งไม่สามารถกลับคืนมาเป็นพลังงานกระจายสู่ใต้โครงสร้างถนนในทำให้ถนนเปลี่ยนรูปหรือเกิดร่องล้อขึ้น โดยงานที่กระจายต่อหนึ่งรอบการกระทำสามารถแสดงตามสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$W_c = \pi x \sigma_0^2 [\frac{1}{G^*/\sin\delta}]$$

ที่ซึ่ง W_c คืองานที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการกระทำ

σ_0^2 คือแรงกระทำคงที่สำหรับแต่ละรอบการกระทำ

G^* คือ Complex Modulus

$\sin\delta$ คือ phase angle

สมการนี้แสดงให้เห็นถึงงานที่เกิดขึ้นต่อรอบการกระทำซึ่งเป็นค่าผกผันกับค่า $G^*/\sin\delta$ ดังนั้นในมาตรฐานยางแอสฟัลต์ของ Superpave จึงกำหนดให้ค่า $G^*/\sin\delta$ เป็นค่าควบคุมความสามารถในการต้านทานร่องล้อของยางแอสฟัลต์ที่ไม่ผ่านการเสื่อมอายุ (Original or Unaged Asphalt)

สำหรับยางแอสฟัลต์ที่ผ่านกระบวนการเสื่อมอายุระยะสั้น (Short-term Aged Asphalt)

เมื่ออ้างถึงมาตรฐานการแบ่งเกรดแอสฟัลต์ตามสมรรถนะ(Performance-Graded System) ของระบบ Superpave ในปัจจุบัน ได้กำหนดให้ประเมินค่าความต้านทานร่องล้อสำหรับยางแอสฟัลต์ที่ผ่านกระบวนการเสื่อมอายุระยะสั้นจากการทดสอบ RTFO Test โดยใช้ค่าตัวแปรของ $G^*/\sin\delta$ ที่มีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับค่าความแข็ง (Complex Modulus) และค่าความบ่งชี้การคืนตัวของยาง phase angle (δ) เหมือนกับการประเมินค่าความต้านทานร่องล้อสำหรับยางแอสฟัลต์ตั้งต้นหรือที่ไม่ผ่านการเสื่อมอายุ (Original or Unaged Asphalt) ซึ่งกำหนดให้ค่า $G^*/\sin\delta$ มีค่าไม่น้อย 2.2 kPa

ค่าขั้นต่ำพื้นฐานของ $G^*/\sin\delta$ สำหรับยางแอสฟัลต์ที่ผ่านกระบวนการ RTFO Test ถูกตั้งขึ้นบนพื้นฐานของค่า $G^*/\sin\delta$ ที่มีค่าไม่น้อยกว่า 1 kPaของยางที่ไม่เสื่อมสภาพผลการทดสอบ

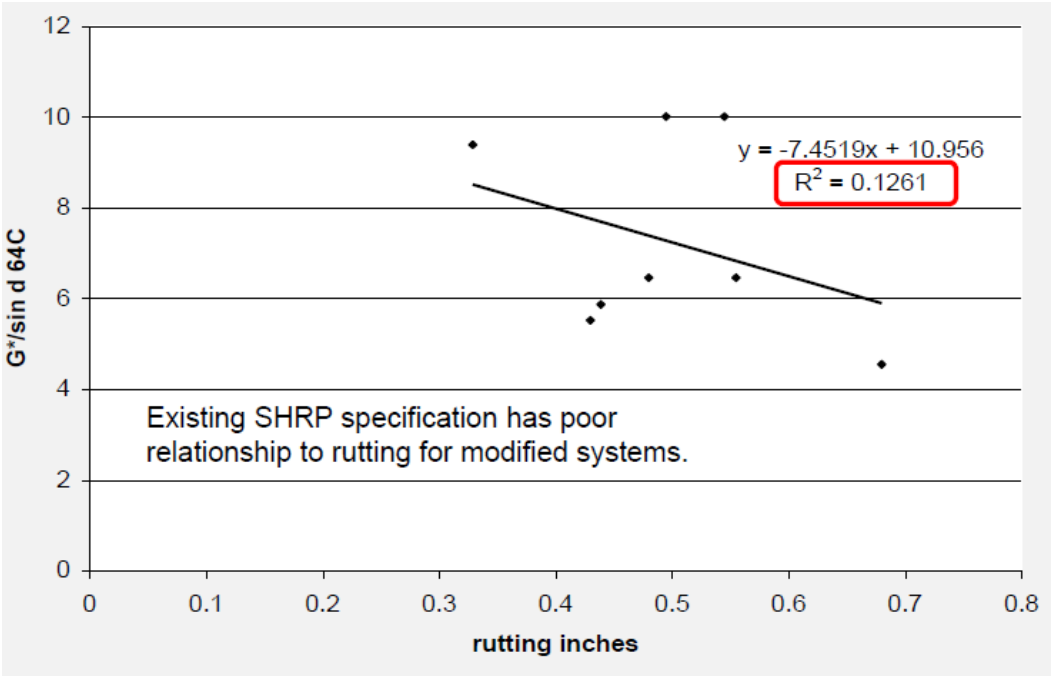
ยางที่ผ่านกระบวนการ RTFO บ่งชี้ถือค่าดัชนีการเสื่อมอายุ (คือค่าความหนืดหลังการทดสอบ RTFO ต่อค่าความหนืดก่อนการทดสอบ RTFO) มีช่วงระหว่าง 2 – 2.5 หรือสามารถอธิบายได้ว่ายางแอสฟัลต์มีค่าความแข็งประมาณ 2 ถึง 2.5 เท่าเมื่อถูกทำให้เสื่อมอายุ ดังนั้นค่าเฉลี่ยที่ 2.2 จึงถูกใช้สำหรับเป็นค่ากำหนดมาตรฐานของยางแอสฟัลต์ที่ผ่านกระบวนการเสื่ออายุระยะสั้นในระบบการแบ่งเกรดยางตามประสิทธิภาพของระบบ Superpave ระบบเก่า

ภาพที่ 13 เครื่องทดสอบ FHWA Accelerated Loading Facility

เมื่อปี ค.ศ.1996 สำนักงานทางหลวงกลางสหรัฐอเมริกา (Federal Highway Administration (FHWA) ร่วมกับสำนักงานทางหลวงรัฐมินิโซต้า (MnROAD) ทำการศึกษาการทดสอบเต็มรูปแบบ (Full scale Testing) โดยใช้เครื่องมือทดสอบความต้านทานร่องล้อของ FHWA's Accelerated Loading Facility (ALF) ภาพที่ 13 โดยรูปแบบของแปลงทดสอบสำหรับการทดสอบ ALF ประกอบไปด้วยแปลงทดสอบที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกัน 12 ส่วนผสมโดยทุกส่วนผสมมีโครงสร้างมวลรวมคละที่เหมือนกัน ยางที่ใช้ ได้แก่ ยางแอสฟัลต์ตั้งต้น (Neat Binder), ยางที่ผ่านกระบวนการเป่าร้อน (Air-blown), ยางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสาร SBS, ยางแอสฟัลต์ที่มีส่วนผสมยางรถยนต์เก่า (Crumb Rubber) แปลงทดสอบเหล่านี้ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 64°C และกระทำโดยยางรถยนต์เดียวที่มีน้ำหนัก 10,000 ปอนด์ และมีการวัดค่าร่องล้อ (Rut Depth) ภายหลักการทดสอบเสร็จ เพื่อนำค่าการวัดร่องล้อที่ได้ไปหาความสัมพันธ์กับค่าคุณสมบัติต่างๆ ของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์

ภาพที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของผลการทดสอบ FHWA Accelerated Loading Facility (ALF) ที่ Turner Fairbanks Research Center กับค่าตัวแปรความต้านทานร่องล้อ $G^*/\sin\delta$ สำหรับมาตรฐาน Superpaveเดิมจากผลการทดสอบพบว่าตัวแปรความต้านทานร่องล้อของมาตรฐาน Superpaveเดิม คือ $G^*/\sin\delta$ ไม่มีความสัมพันธ์ที่ดีกับค่าร่องล้อที่เกิดขึ้นจริงของยางแอสฟัลต์แต่ละชนิด จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่า Coefficient of Determination (R^2) มีค่าอยู่ที่ 0.1261 ซึ่งในทางสถิติถึงว่าไม่มีความสัมพันธ์เกิดขึ้นระหว่างสองตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ เหตุผลเพราะว่าค่า Complex Modulus ถูกวัดในช่วงที่ยางแอสฟัลต์มีพฤติกรรมแบบ Linear Visco-Elastic Region แต่พฤติกรรมการเสียหายทางร่องล้อจะมีพฤติกรรมแบบ Non-Linear ทั้งนี้ค่า $G^*/\sin\delta$ ใช้ได้ดีความยางแอสฟัลต์ที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ (Unmodified Asphalt) แต่ไม่สามารถนำมาใช้กับยางแอสฟัลต์กลุ่มที่

มีการปรับปรุงคุณภาพ (Modified Asphalt) ได้ เนื่องจากสำหรับยางที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ ค่าการไหล (Flow) มีพฤติกรรมเป็นแนวตรง (Linear) และขึ้นอยู่กับค่าระดับแรงที่กระทำ แต่สำหรับยางที่มีการปรับปรุงคุณภาพจะมีผลขึ้นกับระดับของแรงกระทำซึ่งมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นแนวตรง (Non-linear) และอ่อนไหวต่อค่าแรงกระทำซึ่งเหมือนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับการเกิดร่องล้อ



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง G*/sinδกับร่องล้อที่เกิดขึ้น

Multiple Stress Creep Recovery Test (MSCR Test)

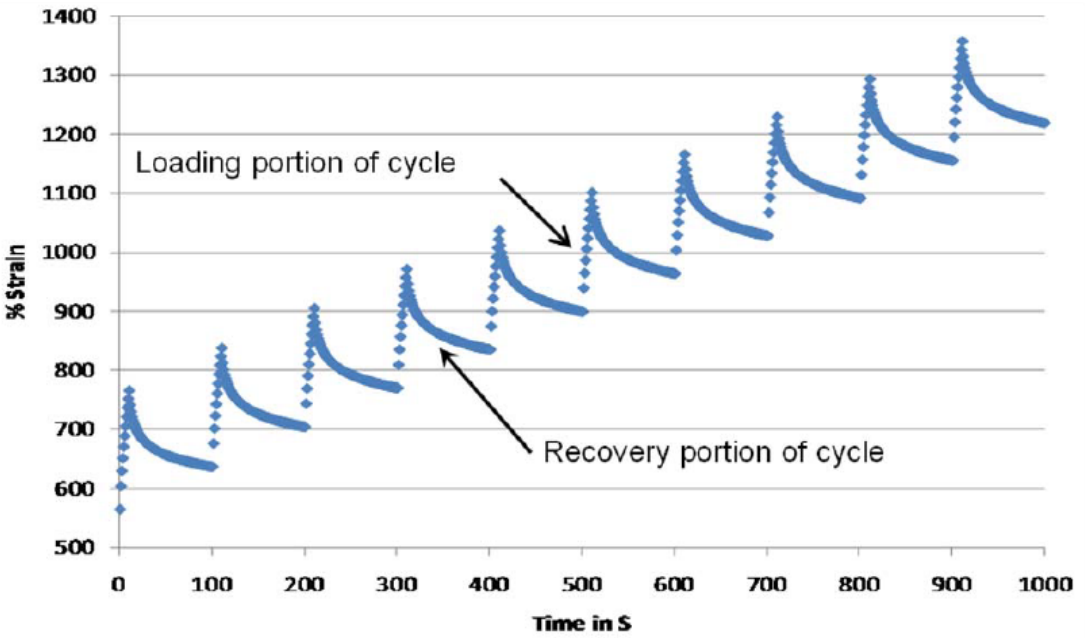
การทดสอบ Multiple Stress Creep Recovery (MSCR Test) เป็นการปรับปรุงการทดสอบและมาตรฐานล่าสุดของการแบบเกรดยางแอสฟัลต์ตามประสิทธิภาพ (Performance-Graded System) ของการออกแบบระบบ Superpave ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐาน AASHTO T350 หรือ ASTM D7405 เป็นมาตรฐานที่พูดถึงการทดสอบยางแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิสูงสำหรับทั้งยางแอสฟัลต์เดิม (Unmodified) และยางแอสฟัลต์ที่มีการปรับปรุงคุณภาพ (Modified Asphalt) ซึ่งค่าคุณสมบัติที่ได้สามารถบ่งชี้ถึงความสามารถในการต้านทานร่องล้อได้ดีกว่ามาตรฐานการแบ่งเกรดยางระบบเดิมข้อได้เปรียบหลักของมาตรฐานการทดสอบยางแอสฟัลต์แบบ MSCR Test คือจะไม่มีการทดสอบ Elastic Recovery Force Ductility และ Toughness and Tenacity Tests เพราะเพียงการทดสอบ MSCR อย่างเดียวสามารถให้ข้อมูลเชิงกายภาพของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ทั้งในระบบสมรรถนะและทั้งระบบสูตรโครงสร้างของยางแอสฟัลต์ที่มีการปรับปรุงคุณภาพ

การทดสอบ MSCR จะยังคงใช้เครื่อง Dynamic Shear Rheometer (DSR) ชุดเดียวกันกับที่ใช้ทดสอบยางแอสฟัลต์ที่ผ่านกระบวนการเสื่อมอายุในระบบเก่า โดยผลการทดสอบที่ได้จะวัดค่า

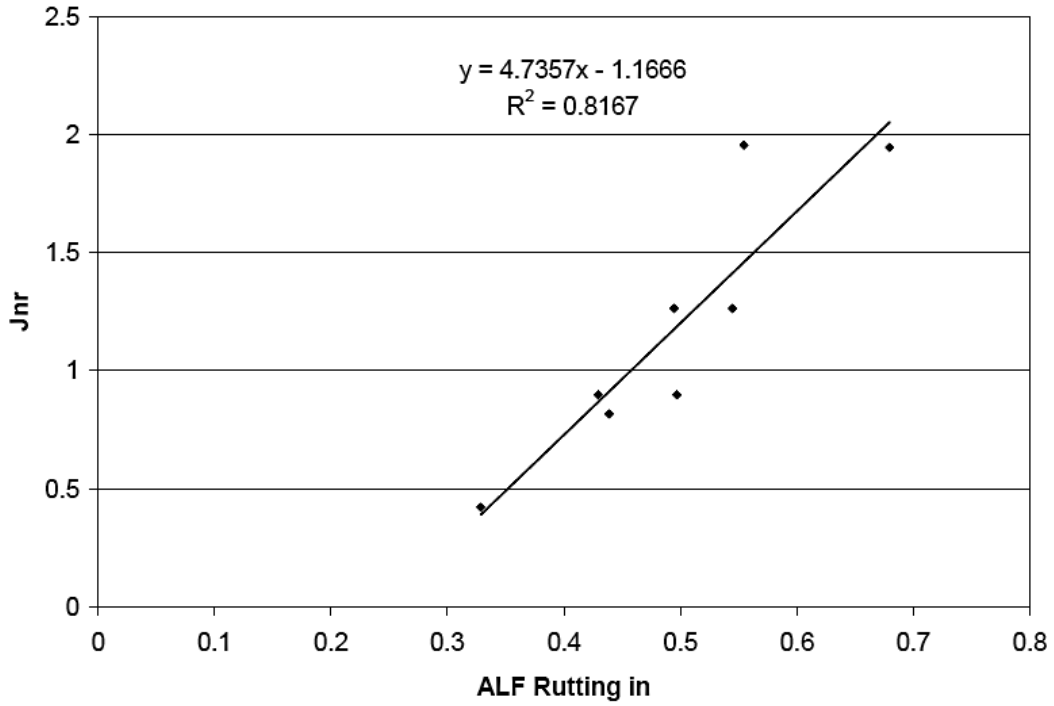
Non-recoverable Creep Compliance (Jnr) และค่าร้อยละการคืนตัว Percent Recovery ($\%R_{3.2}$) สำหรับการทดสอบโดยคร่าวยางแอสฟัลต์ซีเมนต์จะถูกนำมาประกบระหว่างจานทดสอบของเครื่อง DSR (parallel plates)และถูกกระทำโดยแรงเฉือนในระยะ 1 วินาทีและปลดแรงกระทำออก โดยจะปล่อยให้ยางอยู่ในสภาพที่คืนตัวได้หรืออยู่ในสภาวะที่ไร้แรงกระทำ 9 วินาที โดยถือเป็น 1 รอบการกระทำ (1 Cycle) ภาพที่ 15แสดงตัวอย่างผลการทดสอบและค่าที่ได้ของ Jnr และทั้งหมดจะมีการทดสอบ 10 รอบ ทั้งนี้ค่า J (compliance) คือค่าส่วนกลับโดยประมาณของค่า Complex Modulus นั้นหมายถึงค่า Jnr ที่น้อยบอกถึงยางที่มีความแข็งที่อมากโดยสามารถคำนวณค่า Jnr ได้จากสมการดังนี้

$$J_{nr} = \frac{\text{Unrecovered Shear Strain}}{\text{Applied Shear Stress}}$$

จากการศึกษาเดียวกันของการทดสอบเต็มรูปแบบ (Full scale Testing) ที่ FHWA ทำร่วมไปกับ MnROAD โดยใช้เครื่องมือทดสอบความต้านทานร่องล้อของ FHWA's Accelerated Loading Facility (ALF) นอกเหนือจากความสัมพันธ์ของการเกิดร่องล้อ (Rutting) กับค่าความต้านทานร่องล้อของ $G^*/\sin\delta$ ที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ ทีมนักวิจัยยังได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของการเกิดร่องล้อกับค่าตัวแปรความต้านทานร่องล้อที่อุณหภูมิสูงของยางแอสฟัลต์หรือค่า compliance Modulus (Jnr) ที่ได้จากการวิเคราะห์ของผลการทดสอบ MSCR

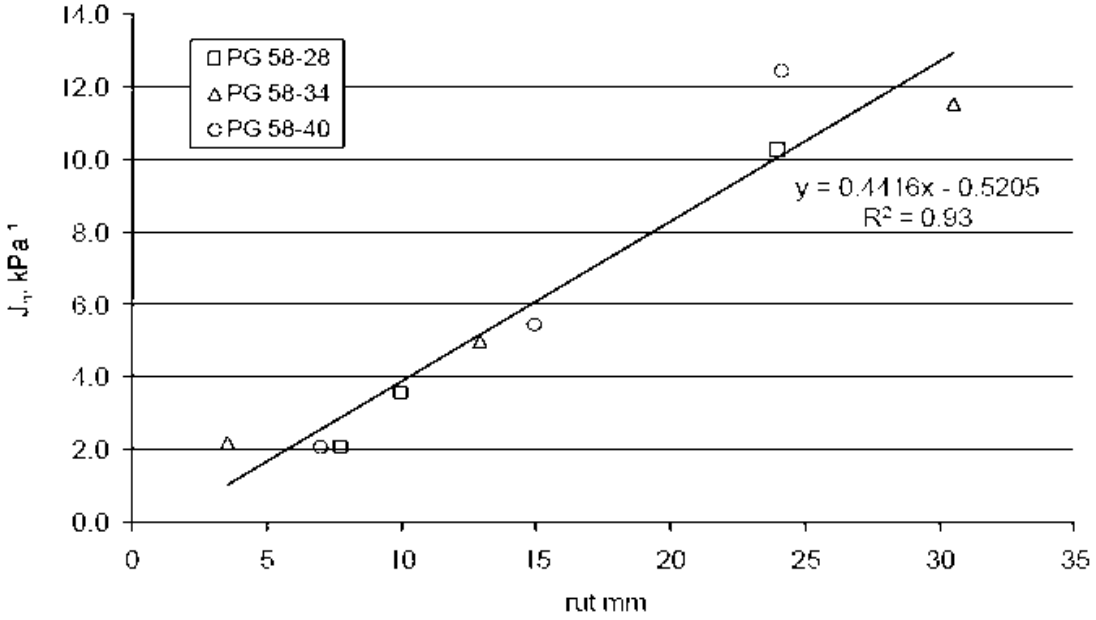


ภาพที่ 15 ผลการทดสอบ MSCR Test สำหรับการกระทำ 10 รอบ



ภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Jnr กับค่าร่องล้อที่เกิดขึ้น

จากการศึกษาพบว่าค่าความสัมพันธ์ของ Jnr ต่อการเกิดร่องล้อมีความสอดคล้อยกันเป็นอย่างดี ดังแสดงผลการทดสอบในภาพที่ 16 โดยมีค่า coefficient of determination สูงถึง 0.8187 ผลการศึกษาแสดงให้เป็นว่าค่า Jnr สามารถใช้เป็นค่าตัวแปรที่บอกถึงสรรถนะของความต้านทานร่องล้อ (Rutting Performance) โดยตัวแปรดังกล่าวสามารถนำมาเป็นตัวกำหนดได้สำหรับทั้งยางเดิมและยางที่มีการปรับปรุงคุณภาพ (Original and Modified Asphalt)เพื่อทำให้แน่ใจว่าค่า compliance modulus เป็นตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการต้านทานร่องล้อ อีกทั้งสำนักงานทางหลวงรัฐ Mississippi ได้ทำแปลงทดสอบบนถนนจริงสาย Interstate (I-55) เพื่อเป็นการยืนยัน ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ยางแอสฟัลต์ที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมหลากหลายชนิด ได้แก่ SBS SB SBR และ Crumb Rubber โดยมีการเก็บข้อมูลการเกิดร่องล้อรวมระยะเวลา 6 ปี โดยผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าตัวแปรความต้านทานร่องล้อของยางแอสฟัลต์ Jnr ที่ได้จากการทดสอบ MSCR มีความสัมพันธ์ที่ดีมากต่อค่าการเกิดร่องล้อดังแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 17 จากผลการทดสอบพบว่าค่า Jnr มีความสัมพันธ์ต่อค่าร่องล้อที่เกิดดังมีค่า Coefficient of Determination สูงถึง 0.93

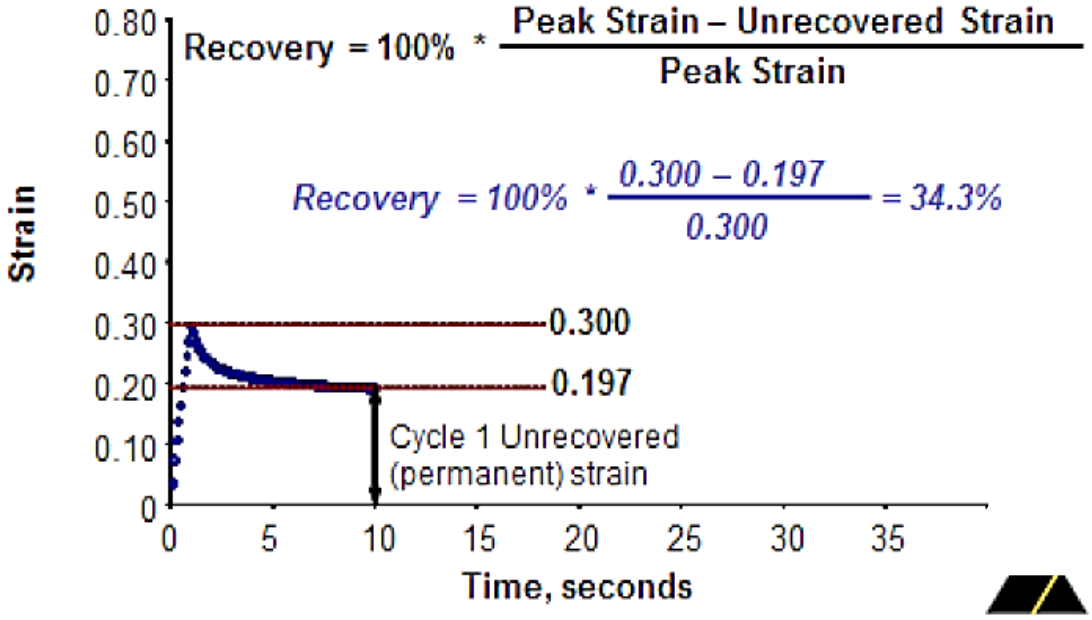


ภาพที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Jnr กับค่าร่องล้อของการทดสอบบนถนน Interstate 55

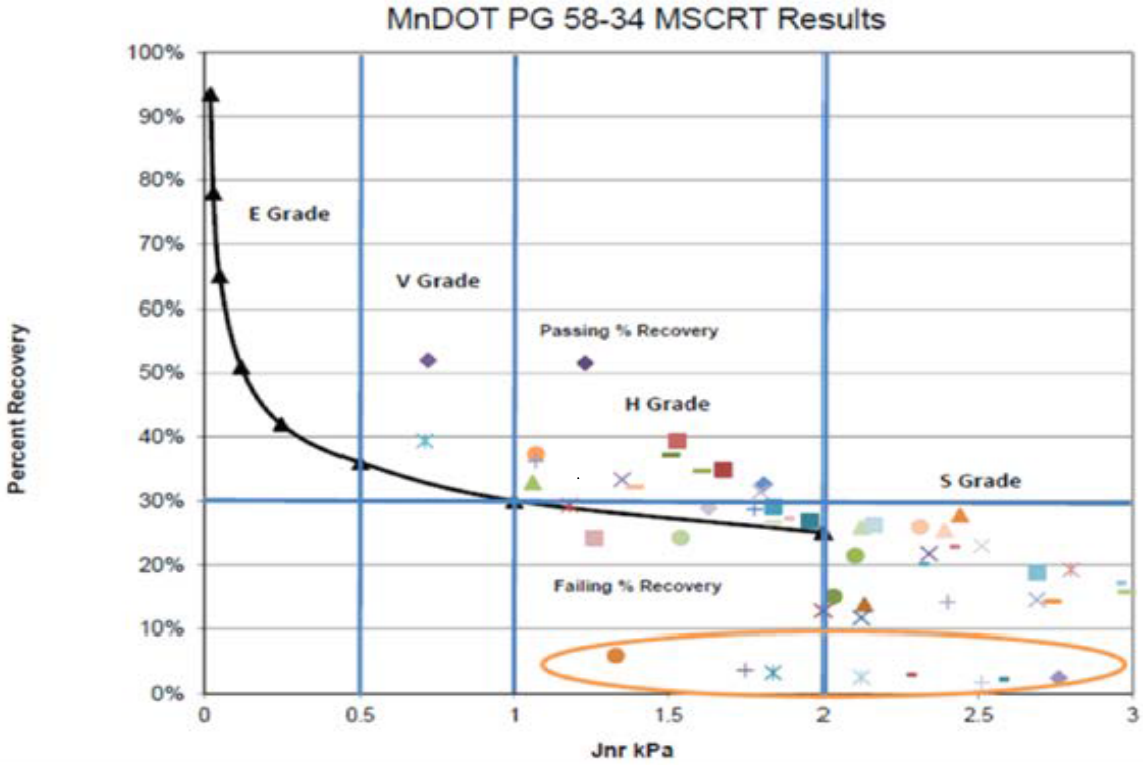
นอกเหนือจากค่า complex modulus (Jnr) ที่ถูกใช้เพื่อกำหนดบอกความสามารถในการต้านทานร่องล้อแล้ว เพื่อให้แน่ใจว่ายางแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาใช้จะมีความทนทาน (Durability) และต้านทานต่อการแตกร้าว (Cracking Resistance) การทดสอบ MSCR ยังได้กำหนดค่า $\%R_{3.2}$ ที่วัดที่แรงกระทำ 3.2KPa ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกค่าการคืนตัวของยางแอสฟัลต์โดยค่าการคืนตัวบอกถึงความสามารถของยางแอสฟัลต์ในการกลับสู่สภาพเดิมการถูกกระทำโดยแรงภายนอก **ภาพที่ 18** แสดงตัวอย่างผลการทดสอบและค่าที่ได้ของ %R3.2 และสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Percent Recovery (3.2KPa)} = \frac{\text{Recoverable Strain}}{\text{Unrecoverable Strain}} \text{x} 100\%$$

จากรูปภาพความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าค่า $R_{3.2}$ ที่สูงกว่าจะบอกถึงค่าการคืนตัวได้มากกว่าหรือมีการเสียรูปของยางแอสฟัลต์หลังจากมีการกระทำของแรงน้อยกว่า ภาพที่ 19 แสดงค่าความสัมพันธ์ของค่า non-recovery compliance modulus (J_{nr}) กับค่า Percent Recovery ($R_{3.2}$) ของยางชนิดต่างๆ ยางแอสฟัลต์ที่มีค่า $R_{3.2}$ อยู่เหนือกว่าเส้นสัมพันธ์หมายถึงยางที่มีการตอบสนองของพฤติกรรมการยืดหยุ่นได้ดี (Elasticity) ต่อแรงกระทำ ส่วนยางแอสฟัลต์ที่อยู่ในวงกลมสีส้มเป็นยางกลุ่มที่มีค่า $R_{3.2}$ ต่ำหรือยางกลุ่มมีการผลิตมาจาก Acid-modified หรือกระบวนการการพ่นลมร้อน (Air-blown Asphalt) ซึ่งค่า percent recovery สามารถบอกได้ถึงคุณสมบัติของสารผสมเพิ่มที่ใช้ในสูตรยางที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 18 สมการและตัวอย่างการคำนวณค่า Percent Recovery



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Jnr กับค่า percent recovery

การเลือกยางแอสฟัลต์ตามระบบการแบ่งเกรดตามสมรรถนะ (Selection of Performance-Graded)

การเลือกประเภทยางแอสฟัลต์ตามระบบการแบ่งเกรดตามสมรรถนะมีหลักการการพิจารณาอยู่ 2 อย่างคือ (1) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริง ณ สถานที่ก่อสร้าง (Climate Prevailing at Project Site) และ (2) ปริมาณจราจรที่คาดการณ์ (Expected Traffic Volume at Designed Year) โดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับทั้งสองตัวแปรดังนี้

เกณฑ์การพิจารณาอุณหภูมิ (Temperature Criterion)

ประเภทของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามระบบการแบ่งตามสมรรถนะ (Performance-Graded System)ได้รับการกำหนดชื่อด้วยคำว่า PG ซึ่งย่อมาจากคำว่า Performance Grade หมายถึง เกรดเชิงสมรรถนะ แล้วตามด้วยตัวเลข 2 ชุด ซึ่งจะยกตัวอย่างดังต่อไปนี้ “**PG X-Y**” โดยที่ **X**แสดงบอกถึงถึงเกรดอุณหภูมิสูง (High-Temperature Grade) และ Y แสดงให้ทราบถึงเกรดอุณหภูมิต่ำ (Low-Temperature Grade)ทั้งสองอุณหภูมิมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมรรถนะของถนน สำหรับตัวเลขที่ใช้กำหนดทั้งอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำจะมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงทีละ 6 องศาเซลเซียส ตารางที่ 4 แสดงตัวอย่างประเภทของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา

ตารางที่ 4 แสดงตัวอย่างยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ของระบบการแบ่งตามสมรรถนะ (PG)

ด้านอุณหภูมิสูง(High Temperature Grade, **X**)	ด้านอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Graded, **Y**)
PG 58	-28, -34, -40, -46
PG64	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG70	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG76	-10, -16, -22, -28, -34
PG82	-10, -16, -22, -28

สำหรับตัวเลขด้านอุณหภูมิสูงหมายถึงอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 7 วันของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความลึก 20 มิลลิเมตรหรือ 2 เซนติเมตร โดยปกติการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งดังกล่าวค่อนข้างทำได้ลำบาก นักวิจัยจึงได้สร้างสมการแปลงค่าของอุณหภูมิที่วัดได้จากในอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาเพื่อเปลี่ยนเป็นค่าอุณหภูมิที่ความลึกต่างๆในผิวถนน โดยในหลักการการวิเคราะห์จากการไหลของอากาศ ความสมดุลของพลังงานและค่าสมมุติของการดูดซึมของรังสีความร้อนในถนน ซึ่งสมการนี้ถูกพัฒนาเพื่อใช้แปลงค่าอุณหภูมิในอากาศสู่อุณหภูมิในผิวถนนที่ความลึก 20 มิลลิเมตร ดังนี้

$$T_{20mm} = 0.9545(T_{air} - 0.00618Lat^2 + 0.2289Lat + 42.2) - 17.78$$

โดย T_{20mm} คืออุณหภูมิในถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ความลึก 20 มิลลิเมตร ($^{\circ}C$)

T_{air} คืออุณหภูมิเฉลี่ยในอากาศของค่าอุณหภูมิสูงสุด *7* วันในช่วงฤดูร้อน *($^{\circ}C$)*

Lat คือค่าละติจูดทางภูมิศาสตร์ของที่ตั้งโครงการมีหน่วยเป็นองศา

สำหรับตัวเลขด้านอุณหภูมิต่ำหมายถึงอุณหภูมิต่ำสุดบนผิวถนนแอสฟัลต์ในรอบ *1* วัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิที่วัดได้ในอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา ตามสมการดังนี้

$$T_{min} = 0.859T_{air} + 1.7$$

แต่สำหรับประเทศไทยไม่เคยมีบันทึกว่ามีอุณหภูมิต่ำสุดถึงติดลบ 10 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิด้านต่ำเริ่มต้นของยางในระบบสมรรถนะ (Performance Grade, PG)ดังนั้นสำหรับมาตรฐานยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่แบ่งเกรดตามสมรรถนะจะมีเพียงตัวเลขที่บอกถึงอุณหภูมิสูง อีกทั้งจากสถิติอุณหภูมิสูงสุดในอากาศตามบันทึกของกรมอุตุนิยมวิทยาและรวมถึงการใช้สมการเปรียบเทียบอุณหภูมิดังแสดงข้างต้นพบว่าประเทศไทยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดในถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ความลึก 20 ม.ม. อยู่ระหว่าง *60* ถึง *64* และประเทศไทยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงขึ้น จึงทำให้ค่าเฉลี่ยดังกล่าวอาจมีค่ามากกว่า 64 กรมทางหลวงจึงกำหนดให้มีประเภทยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่แบ่งตามหลักเกณฑ์อุณหภูมิอยู่สองประเทศคือ PG64 *และ* PG70

*เกณฑ์การพิจารณาปริมาณจราจร (*Traffic Volume Criterion)

นอกเหนือจากการพิจารณาอุณหภูมิแล้ว สภาพการณ์ปริมาณจราจรและน้ำหนักของยนต์พาหนะที่กระทำต่อโครงสร้างถนนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาสำหรับการเลือกชนิดยางแอสฟัลต์ให้เหมาะสมสำหรับกับสภาพการจราจรที่แตกต่างกันถนนถูกออกแบบโดยมีการสมมติว่ามีความเร็วของการจราจรคงที่ เนื่องจากการออกแบบโครงสร้างถนนจะถูกควบคุมด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่มีความสัมพันธ์กับการเสียรูปอย่างถาวรหรือการเสียหายทางร่องล้อ ดังนั้นความเร็วหรือความถี่ของน้ำหนักการการสัญจรของรถมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของถนน

สำหรับหลักเกณฑ์การเลือกยางแอสฟัลต์ตามการแบ่งเกรดยางระบบสมรรถนะ (PG) ในมาตรฐานเดิมก่อนที่จะมีการเปลี่ยนมาใช้การทดสอบแบบ MSCR มาตรฐานดังกล่าวระบุไว้ว่าให้มีการปรับแก้ประเภทยางสำหรับเกรดอุณหภูมิด้านสูง (Grading Bumping for High Temperature Grade) โดยให้เลือกยางแอสฟัลต์ชนิดที่มีเกรดด้านอุณหภูมิสูงเหนือขึ้นไปอีกหนึ่งเกรด(หรือ +6$^{\circ}C$) สำหรับการใช้งานที่รถใช้ความเร็วช้าปานกลาง(Intermediate Slow Speed) เช่นเลือกใช้ยาง PG70 (64$^{\circ}C$+6$^{\circ}C$) แทนที่การใช้ยาง PG64 ที่ได้จากการพิจารณาเบื้องต้นตามหลักเกณฑ์อุณหภูมิและให้เลือกยางแอสฟัลต์ชนิดที่มีเกรดด้านอุณหภูมิสูงเหนือขึ้นไปอีก 2 เกรด (หรือ+12$^{\circ}C$) สำหรับรถที่มีการใช้ความเร็วช้ามาก (Very Slow or Standing Traffic) เช่นเลือกใช้ยาง PG76 (64$^{\circ}C$+12$^{\circ}C$) แทนที่การใช้ยาง PG64

การพิจารณาปรับแก้ชนิดยางแอสฟัลต์ตามปริมาณจราจร (Traffic Volume) และความเร็ว (Speed) ถูกเรียกอย่างสากลว่า *"Grade-Bumping"* ตารางที่ 5 แสดงสรุปเกณฑ์การปรับแก้เกรดยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ของมาตรฐาน AASHTO's Grade Bumping Policy

ตารางที่ 5 สรุปเกณฑ์การปรับแก้เกรดยางแอสฟัลต์ซีเมนต์

ปริมาณจราจร (ESAL)	*การปรับแก้สำหรับยางแอสฟัลต์* PG Grade *สำหรับ* Traffic Rate		
	Standing (<20km/h)	Slow (20-70 km/h)	Standard (>70km/h)
< 0.3	1	-	-
0.3 ถึง < 3	2	1	-
3 ถึง < 10	2	1	-
10 ถึง < 30	2	1	-
≥ 30	2	1	1

ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างมาตรฐานการแบ่งเกรดยางแบบการทดสอบ MSCR และมาตรฐาน Superpave ระบบเก่าคือการปรับแก้เกรดยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Grade-Bumping) ในมาตรฐานการทดสอบแบบเก่าการปรับแก้เกรดทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิด้านสูงยางเกรดยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามปริมาณจราจรและความเร็วของรถยนต์ดังที่แสดงไว้ในตาราง 6 ตัวอย่างเช่นถ้าออกแบบถนนที่มีอุณหภูมิสูงสุดในโครงสร้างชั้นทางไม่เกิน 64°Cจะต้องมีการเลือกใช้ยางชนิด PG64 และหากถนนดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อการจราจรที่มีความหนาแน่นสูง (Heavy Traffic) ยางที่ถูกเลือกใช้เบื้องต้นจะต้องถูกปรับใหม่ โดยให้มีอุณหภูมิด้านสูงมากขึ้นอีก 2 เกรด ซึ่งหมายความว่าถนนสายนี้จะต้องมีการใช้ยางชนิด PG76 ซึ่งหมายถึงว่ายางแอสฟัลต์ชุดนี้จะต้องถูกนำมาทดสอบที่ 76°C ภายใต้อุณหภูมิการใช้งานที่ไม่เกิน 64°C ในความเป็นจริงไม่มีความเป็นไปได้เลยที่ถนนสายดังกล่าวจะอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 76°C ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เป็นเพียงการสมมติว่าถ้าหากผลการทดสอบผ่านที่ 76°C ยางแอสฟัลต์ชุดนี้จะมีความทนทานพอดีจะใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิ 64°C ซึ่งการแบ่งปรับแก้เกรดยางแอสฟัลต์วิธีนี้ทำให้ผู้ผลิตต้องยางแอสฟัลต์ตั้งต้นมาผสมกับสารปรับปรุงคุณภาพที่มีคุณภาพสูงเพื่อให้ผ่านเกณฑ์การทดสอบต่างๆ ที่กำหนดไว้ สารปรับปรุงบางกลุ่มที่นำมาใช้มีความอ่อนไหวต่อแรงกระทำ (Stress Sensitivity) ซึ่งทำให้ยางแอสฟัลต์อ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง

สำหรับมาตรฐานการแบ่งเกรดยางระบบใหม่ตามการทดสอบ MSCR ยางแอสฟัลต์ซีเมนต์จะถูกทดสอบคุณสมบัติที่อุณหภูมิการใช้งานที่เกิดขึ้นจริง โดยการปรับแก้สำหรับปริมาณจราจรจะถูกทำกำหนดโดยค่าตัวแปรที่ได้จากการทดสอบ MSCR Test เช่นค่า non-recovery compliance modulus (J_{nr}) ค่า Percent Recovery ($R_{3.2}$)และค่า Stress Sensitivity (Jnr Different) non-recovery ทั้งนี้ มาตรฐานการแบ่งเกรดยางระบบใหม่ของระบบ PG Grade ที่มีการนำการทดสอบ MSCR (AASHTO T 350) มาใช้จะมีความสัมพันธ์กับระดับการจราจรอยู่ 4 ระดับดังนี้

- การจราจรระดับมาตรฐาน (Standard) ถูกกำหนดโดยอักษรย่อ **“S”** คือระดับที่มีปริมาณจราจรน้อยกว่า 10 ล้านคันของน้ำหนักเพลาเดียวเทียบเท่า (Equivalent Single Axle Loads, ESALs) **และ** มีความรถสัญจรเฉลี่ยมากกว่า 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (Km/Hr)

- การจราจรระดับหนัก (Heavy) ถูกกำหนดโดยอักษรย่อ **“H”** คือระดับที่มีปริมาณจราจรระหว่าง 10 ถึง 30ล้านคันของน้ำหนักเพลาเดียวเทียบเท่า (Equivalent Single Axle Loads, ESALs) **หรือ** ความรถสัญจรเฉลี่ยระหว่าง 20 ถึง 70กิโลเมตรต่อชั่วโมง (Km/Hr)

- การจราจรระดับหนักมาก (Very Heavy) ถูกกำหนดโดยอักษรย่อ **“V”** คือระดับที่มีปริมาณจราจรมากกว่า 30 ล้านคันของน้ำหนักเพลาเดียวเทียบเท่า (Equivalent Single Axle Loads, ESALs) **หรือ** ความรถสัญจรเฉลี่ยน้อยกว่า 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (Km/Hr)

- การจราจรระดับหนักมากที่สุด (Extremely Heavy) ถูกกำหนดโดยอักษรย่อ **“E”**คือระดับที่มีปริมาณจราจรมากกว่า 30 ล้านคันของน้ำหนักเพลาเดียวเทียบเท่า (Equivalent Single Axle Loads, ESALs)**และ**มีความรถสัญจรเฉลี่ยน้อยกว่า 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (Km/Hr)

เกณฑ์มาตรฐานของตัวแปรหรือคุณสมบัติต่างๆ ที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐานยางแอสฟัลต์ซีเมนต์แต่ละชนิดแบ่งตามอุณหภูมิการใช้งานจริงและตามปริมาณจราจรในแต่ละระดับได้ถูกอธิบายไวในหัวข้อต่อไป

มาตรฐานยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามระบบสมรรถนะ *(Superpave Performance-Graded Specification)*

กรมทางหลวงกำหนดมาตรฐานการแบ่งเกรดยางแอสฟัลต์ตามสมรรถนะไว้ โดยคุณสมบัติทางกายภาพที่ถูกระบุไว้ในมาตรฐานจะถูกทดสอบและวิเคราะห์ผลตามอุปกรณ์การทดสอบและหลักการต่างๆ ที่ได้อธิบายไว้ในเนื้อหาก่อนหน้านี้ สำหรับมาตรฐานนี้ได้กำหนดค่าของคุณสมบัติกายภาพต่างๆ ให้มีค่าเท่าเดิมสำหรับทุกประเภทของยาง PG แต่สิ่งที่เปลี่ยนไปคืออุณหภูมิการทดสอบ ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพเหล่านี้จะแปรผันตามแต่ละชนิดของเกรดยางขึ้นอยู่กับสภาพอากาศโดยรอบที่ยางแอสฟัลต์จะถูกนำไปใช้ เช่น เกรดยาง PG 64 ถูกพิจารณาเพื่อนำไปใช้สำหรับสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิถนนเฉลี่ยสูงสุด 7 วันไม่เกิน 64 องศาเซลเซียส

เมื่ออ้างถึงวัตถุประสงค์ของมาตรฐานยางแอสฟัลต์ตามระบบ Superpave ซึ่งถูกกำหนดมาเพื่อเป็นตัวแปรที่ใช้ควบคุม 3 สมรรถนะหลักของถนนชนิดแอสฟัลต์คอนกรีต โดยทั้ง 3 สมรรถนะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเสียหายหลักๆ ที่อาจเกิดขึ้นบนท้องถนนได้แก่ ความเสียหายทางร่องล้อหรือการเสียรูปอย่างถาวร (Rutting หรือ Permanent Deformation) การแตกที่เกิดขึ้นจากความล้าของถนน(Fatigue Cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Cracking) นอกเหนือจากความเสียหายทั้งสามรูปแบบแล้ว มาตรฐานยังได้กำหนดถึงความสัมพันธ์ในเรื่องความปลอดภัย การปั๊มและการขนถ่าย การเสื่อมอายุของยางแอสฟัลต์ อย่างไรก็ดีเนื่องจากประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนซึ่งมีโอกาสเป็นไปได้น้อยมากหรือไม่มีเลยที่จะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแตกร้าวทางอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นกรมทางหลวงไม่ได้

กำหนดตัวแปรสำหรับความเสียหายในส่วนนี้ไว้ ส่วนตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในมาตรฐาน Superpaveมีรายละเอียดดังนี้

การเสียรูปถาวรหรือร่องล้อ (Permanent Deformation or Rutting)

ตามที่อธิบายไว้ในเนื้อหาก่อนหน้าที่ ค่าที่ใช้กำหนดสมรรถนะการต้านทานร่องล้อจะถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มตามสภาพการใช้งานของยางแอสฟัลต์คือ ยางแอสฟัลต์ตั้งต้น (Original Binder) หรือยางที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้เสื่อมอายุ (Unaged Binder) และอีกกลุ่มคือยางแอสฟัลต์ที่ผ่านกระบวนการเสื่อมอายุระยะสั้น (Short-term Aging) สำหรับการทดสอบ Rolling Thin Film Oven (RTFO) Test โดยยางทั้งสองกลุ่มจะถูกทดสอบและวิเคราะห์ค่าความต้านทางร่องล้อจากเครื่องมือการทดสอบ Dynamic Shear Rheometer (DSR)

สำหรับยางแอสฟัลต์เดิม (Original Asphalt Cement)

	Original Binder
Dynamic shear, T 315: G*/sinδ, min 1.00 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	64

การแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue Cracking)

เกณฑ์การของกำหนดสำหรับความต้านทานต่อการแตกร้าวจากความล้า (Fatigue Cracking) จากมาตรฐานเดิมได้มีการกำหนดค่า G*sinδ สำหรับยาง PAV aged Asphalt ไว้ไม่เกิน 3000 kPaแต่เนื่องจากว่าจากตัวอย่างยางแอสฟัลต์ทั้งหมดมีมากกว่าครึ่งที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานนี้ ดังนี้นักวิจัยจึงได้ปรับปรุงเกณฑ์ใหม่ให้ค่า G*sinδสำหรับยาง PAV aged Asphalt ไว้ไม่เกิน 5000 kPa สำหรับใช้ในมาตรฐาน Superpaveเดิม

นับจากมีการใช้มาตรฐานยางแอสฟัลต์สำหรับระบบ Superpave Plus ที่มีการพิจารณาค่าการทดสอบ DSR โดยอาศัยหลักการ Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) มาตรฐานใหม่กำหนดให้ค่า G*sinδสำหรับยาง PAV aged Asphalt ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 5000 kPa สำหรับการจราจรระดับปกติ (Standard (S) Traffic Level) และจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 6000 kPaสำหรับการจราจรระดับสูงอื่นๆ ได้แก่จราจรระดับหนัก (Heavy (H) Traffic, จราจรระดับหนักมาก Very (V) Heavy Traffic และจราจรระดับหนักมากที่สุดExtremely (E) Heavy Traffic)

	Pressurized Aging Vessel Residue (R 28)					
PAV aging temp, °C	100					
Dynamic shear, T 315: "S" Grade G* sinδ, max 5000 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	31	28	25	22	19	16
Dynamic shear, T 315: "H, "V", "E" Grades G* sinδ, max 6000 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	31	28	25	22	19	16

เกณฑ์มาตรฐานอื่นๆ (Other Common Specification Criteria)

มาตรฐานยางแอสฟัลต์นี้กำหนดให้มีค่าจุดวาบไฟ (Flash Point) ให้มีค่าไม่น้อยกว่า 230°Cสำหรับยางแอสฟัลต์ทุกชนิด โดยค่าจุดวาบไฟถูกใช้เพื่อจุดประสงค์ด้านความปลอดภัย คือป้องกันการติดไฟของยางแอสฟัลต์ และทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวงการทดลองที่ ทล.-ท.406/2519 วิธีการทดลองหาจุดวาบไฟและจุดติดไฟ โดยใช้ Cleveland Open Cup หรือเทียบเท่ามาตรฐาน AASHTO T-48 “Standard Method of Test for Flash and Fire by Cleveland Open Cup”

อีกทั้ง มาตรฐานยังระบุค่าความหนืดสูงสุด (Maximum Viscosity) ไม่ให้ไม่เกิน 3 Pa.s ที่ 135°C สำหรับยางแอสฟัลต์ตั้งต้น (Original Binder) เพื่อให้มั่นใจว่ายางแอสฟัลต์สามารถถูกดูดและขนถ่ายหรืออยู่สภาพที่ทำงานได้ง่ายในขณะทำการผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางแอสฟัลต์ชนิดปรับปรุงคุณภาพ

ตัวแปรสุดท้ายคือการสูญเสียของเนื้อสะสารแอสฟัลต์จะต้องไม่เกินร้อยละ1.00 หลังจากผ่านกระบวนการทำให้ยางเสื่อมอายุระยะสั้นจากการทดสอบ RTFO Test การทดสอบนี้ถูกระบุเพื่อทำให้แน่ใจว่าการระเหยของยางแอสฟัลต์ระหว่างกระบวนการทำให้ยางเสื่อมอายุจะไม่เกิดขึ้นในขณะทำการผลิตและก่อสร้างส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่โรงผสม

	Original Binder
Flash point temp, T 48, min °C	230
Viscosity, T 316: max 3 Pa·s, test temp, °C	135
Dynamic shear, T 315: G*/sinδ, min 1.00 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	64
	Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240)
Mass change, max, percent	1.00