

บททวนงานวิจัยในอดีต

ความสำคัญของการเกาะยัดที่เพียงพอมีผลต่อพฤติกรรม และการใช้งานของผิวทางแอสฟัลต์ การคาดการณ์คุณสมบัติของส่วนผสมในการใช้งานในระบบแอสฟัลต์ - มวลรวม - น้ำ การทดลองในห้องทดลองที่เหมาะสมต้องทำให้เป็นประโยชน์ ในการพิจารณาความซับซ้อนของระบบ ซึ่ง Majidzadeh and Brovold (1) สรุปไว้เป็น 3 ระบบ คือ

- ก) การทดลองที่ประเมินการเกาะยัด และความสามารถในการแผ่กระจาย
- ข) การทดลองที่ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเกาะยัด
- ค) การทดลองที่ใช้ประเมินพฤติกรรมและความทนทานของส่วนผสมเพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบ

การทดลองที่ดีในการประเมินพฤติกรรมของระบบต้องง่ายรวดเร็ว ให้ผลการทดลองซ้ำ ๆ ได้ ให้ผลที่เห็นความแตกต่างได้ชัดเจน มีพื้นฐานในการวิเคราะห์แน่นอน

3.1 การวิจัยหาตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกในการเกาะยัด

ในการศึกษาการเกาะยัดและการหลุดลอกของหยดแอสฟัลต์บนผิวมวลรวม ตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิก ที่สำคัญมี 5 อย่าง คือ มุมสัมผัส แรงตึงผิว ความหนืดของผิวมวลรวม พลังงานที่ผิว และพื้นที่ผิว

3.1.1 การหามุมสัมผัส (Contact Angle) มี 3 วิธีที่จะหามุมสัมผัส คือ การหาโดยตรง คำนวณจากขนาดหยดของเหลว และการใช้ผิวระดับ หรือแผ่นเอียง

Thelen (4) ใช้ขยายรูปของหยดแอสฟัลต์ไปบนจอ หรือจากรูปถ่ายและใช้ไมโครแทรกเตอร์ วัดมุมสัมผัสโดยตรง (Direct Measurement)



Lee (14) หามุมสัมผัสและแรงตึงผิว จากขนาดความสูงของหยดแอลกอฮอล์ (Drop Dimension) จากรูปที่ 3.1 (ข)

$$\cos \alpha = (H^2/h) - 1 \dots\dots\dots (3.1)$$

$$S = (D - d)h^2 g/2 \dots\dots\dots (3.2)$$

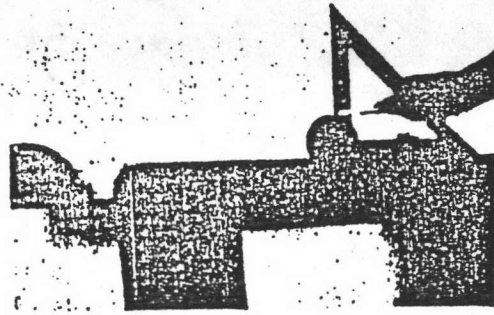
- เมื่อ S = แรงตึงระหว่างผิวสัมผัส
- D = ความหนาแน่นของแอลกอฮอล์
- d = ความหนาแน่นของน้ำ
- g = 981 cm/sec²

Fowkes and Harking (15) ได้ใช้หลักการผิวระดับหรือแผ่นเอียง (Level Surface of Tilting Method) จากรูปที่ 3.2 พื้นที่หน้าตัดของแผ่นของแข็งที่อยู่ในของเหลว จะเกิดการเอียง เมื่อของเหลวเปียกผิวของแข็งมันจะถูกดึงดูดไปตามด้านข้างทั้ง 2 ด้าน หามุมสัมผัสของแผ่นของแข็งเอียงกับแนวระดับของผิวของเหลว Beckman et al (16) ทดลองกับน้ำ และแอลกอฮอล์ พบว่า มุมสัมผัสของแอลกอฮอล์อยู่ระหว่าง 0° - 47° เมื่อมีน้ำบนผิวของแข็งมุมสัมผัส จะเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อมุมสัมผัส คือ ค่า pH ของน้ำ การปนเปื้อน ความหยาบของผิว ไม่มีวิธีการหามุมสัมผัสใด ที่ให้ผลโดยตรงต่อระบบแอลกอฮอล์ - มวลรวม เพราะลักษณะผิวมวลรวมต่างกัน

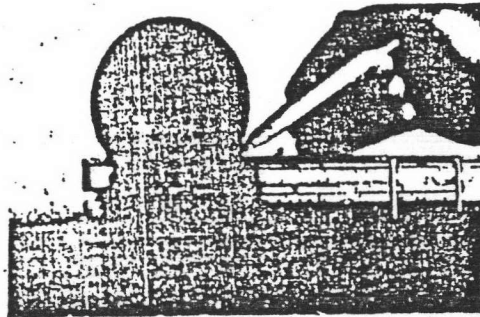
3.1.2 การหาแรงตึงผิว (Surface Tension) หรือพลังงานผิวอิสระของแอลกอฮอล์
ทำได้หลายวิธี Saal (17) ได้ใช้ Du Nouy Tensiometer หรือ (Ring Method) เครื่องมือ เป็นลักษณะวงแหวน ยกผ่านผิวของแอลกอฮอล์ จากรูปที่ 3.3 แรงที่ต้องการยกหาได้จากแรงตึงผิว

$$F = 4\pi R \gamma \dots\dots\dots (3.3)$$

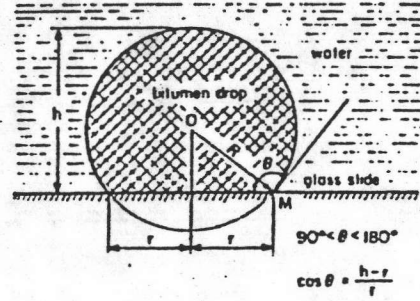
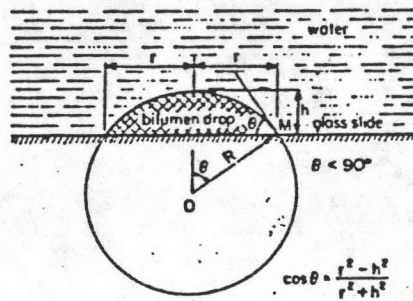
- R = รัศมีเฉลี่ยของวงแหวน
- F = พลังงานผิวอิสระของ ของเหลว
- f = แรงต้านทาน



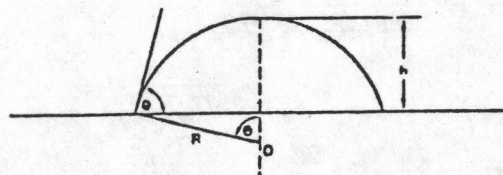
Measuring h.



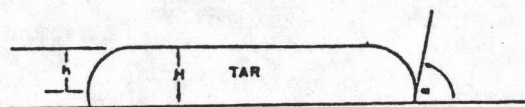
Measuring 2r.



ก). Interpretation of h and r for Evaluating $\cos \theta$.



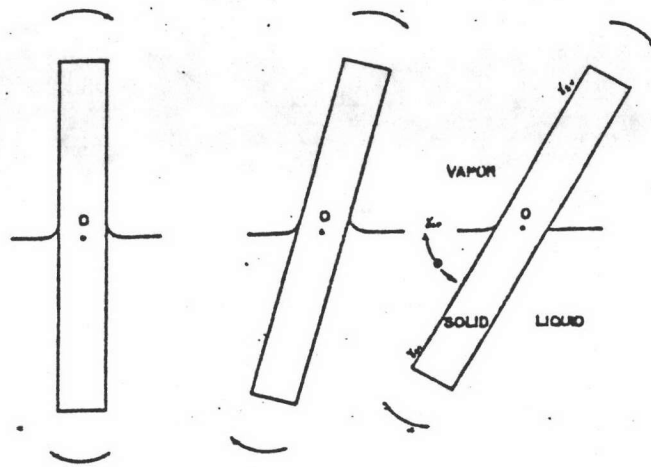
A. BIKERMAN'S METHOD



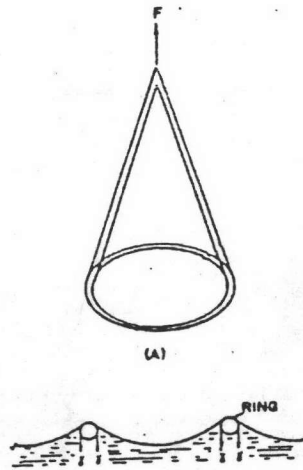
ข) .LEE'S METHOD

Computation of contact angle from the drop size.

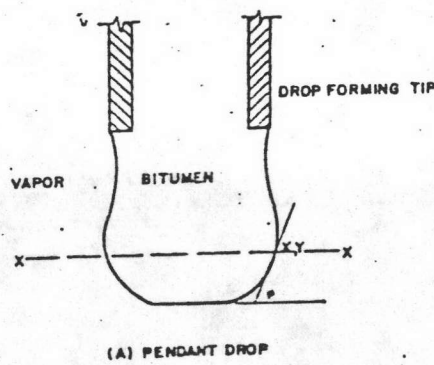
รูปที่ 3.1 การคำนวณมุมสัมผัสจากขนาดหยดน้ำ



รูปที่ 3.2 การหาขนาดมุมสัมผัสด้วยแผ่นเอียง



รูปที่ 3.3 Du Nouy Tensiometer (ring method).



(B) FORCE DIAGRAM IN THE PLANE OF MAXIMUM RADIUS (X-X)
Surface tension measurement by pendant drop method.

รูปที่ 3.4 การหาแรงตึงผิวโดย Pendant Drop Method



F = ตัวประกอบปรับแก้

วิธีนี้มีข้อจำกัด คือ ใช้ไม่ได้กับแอสฟัลต์ ที่มีความหนืดต่ำและอุณหภูมิมากกว่า 100 °C
Mack (18) ใช้ Pendant Drop Method หาแรงดึงผิวของแอสฟัลต์ที่มีอุณหภูมิต่ำ
ดูรูปที่ 3.4 หยดแอสฟัลต์สมดุลย์ แรงในแนวตั้งที่กระทำต่อแนวราบที่สมดุลย์ คือ

$$2\pi \gamma \sin\phi = V\rho g + \pi \gamma^2 P \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

เมื่อ

V	=	ปริมาตรของ Pendant Drop
P	=	ความดันที่ความโค้งของผิว
γ	=	แรงดึงผิว
g	=	แรงดึงดูดของโลก
ρ	=	ความหนาแน่นของแอสฟัลต์

Nellensteyn and Roodenberg (19) ใช้วิธี Jaeger Bubble Pressure หาแรงดึงผิวของแอสฟัลต์ในช่วงอุณหภูมิ 60 - 225 °C โดยใช้หลอดแก้วเล็ก ๆ จุ่มในแอสฟัลต์ และใช้ลูกยางอัดลมเข้าไป ค่าความดันสูงสุดคำนวณได้จาก

$$P = (2\gamma/R) + z\rho g \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

เมื่อ

R	=	เป็นรัศมีที่ความโค้งที่จุดต่ำสุด
P	=	ความดันสูงสุด
γ	=	แรงดึงผิว
z	=	ความลึกที่จุ่มหลอดแก้ว
g	=	แรงดึงดูดของโลก
ρ	=	ความหนาแน่นแอสฟัลต์

Mack (20) ใช้วิธี Free Hanging Thread Method โดยแขวนเส้นแอสฟัลต์ไว้ใน

แนวตั้ง และปล่อยให้แรงตึงผิวและแรงดึงดูดของโลกกระทำ แอสฟัลต์จะยึดตัวเมื่อแรงดึงดูดของโลกมากกว่าแรงตึงผิว และแอสฟัลต์หลุดยึดตัวเกิดการสมดุลง่ายเมื่อแรงดึงดูดของโลกเท่ากับแรงตึงผิว ความยาวของเส้นแอสฟัลต์แทนความสูงที่จะตั้งตัวในหลอดแก้ว ตามทฤษฎี Capillary rise

$$\gamma = lrdg/2 \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

เมื่อ

$$\gamma = \text{แรงตึงผิว}$$

$$l = \text{ความยาวของเส้นแอสฟัลต์}$$

$$r = \text{รัศมีของเส้นแอสฟัลต์}$$

$$d = \text{ความกว้างจำเพาะของแอสฟัลต์}$$

$$g = \text{แรงดึงดูดของโลก}$$

วิธีการนี้สามารถหาแรงตึงผิวของแอสฟัลต์ทั่วไปที่อุณหภูมิต่ำ และผลเปรียบเทียบกับใกล้เคียงกับวิธีการอื่น ๆ ในตารางที่ 3.1 จากการทดลองวิธีต่าง ๆ พบว่ามีค่าแรงตึงผิวอยู่ระหว่าง 25 - 35 ไดน์ต่อซม. และ Thelen (4) พบว่าแรงตึงผิวของแอสฟัลต์มีค่า 25.8 ± 0.6 ไดน์ต่อซม. ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงตึงผิวกับอุณหภูมิแปรผันโดยตรงต่อกัน Nellensteyn and Roodenberg (19) พบว่าอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิวมีขอบเขตแน่นอน เมื่อมีการขาดของเส้นแอสฟัลต์ เพราะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอสฟัลต์และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงตึงผิว ซึ่ง Mack (20) ได้หาแรงตึงผิวของแอสฟัลต์ที่ $20 - 45^{\circ}\text{C}$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงตึงผิว อยู่ระหว่าง 0.057 - 0.074

3.1.3 การหาพลังงานอิสระระหว่างผิว (Interfacial Free Energy)

หรือแรงตึงระหว่างผิว Bartell and Miller (21) หาแรงตึงระหว่างผิวของน้ำและแอสฟัลต์โดยวิธี Capillary rise รูปที่ 3.5 (ก) ความสูงของแอสฟัลต์จะถูกแรงดันกลับ โดยน้ำที่จุด A

$$\gamma_{Lw} = rhp \quad g/2 \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

เมื่อ	γ_{LW}	=	แรงดึงระหว่างผิวแอสฟัลต์กับน้ำ
	r	=	รัศมีของรูหลอดเล็ก ๆ
	h	=	ความสูงของระดับแอสฟัลต์จากผิวน้ำ
	ρ	=	ความหนาแน่นของแอสฟัลต์
	g	=	แรงดึงดูดของโลก

มีเครื่องอื่นที่ใช้หาพลังงานระหว่างผิวอิสระ จากรูปที่ 3.5 (ข) ใส่ น้ำ ในอ่าง B จนกระทั่งถึงขอบล่างอ่าง A ใส่แอสฟัลต์ในอ่าง A จนกระทั่งน้ำเลื่อนตัวมาจุด C บนหลอด Capillary แรงดึงระหว่างผิวดำนวนจากสูตร

$$\gamma_{LW} = rg(h\rho - h'\rho')/2 \dots\dots\dots (3.8)$$

เมื่อ	γ_{LW}	=	เป็นพลังงานระหว่างผิวสัมผัส
	r	=	เป็นรัศมีของรูหลอดเล็ก ๆ
	h	=	ความสูงของแอสฟัลต์จากผิวสัมผัส
	ρ	=	ความหนาแน่นของแอสฟัลต์
	h'	=	ความสูงของระดับน้ำจากผิวสัมผัส
	ρ'	=	ความหนาแน่นของน้ำ

Thraxler and Pittman (22) ใช้วิธี Du Nouy Tensiometer หาแรงดึงระหว่างผิวแอสฟัลต์กับน้ำได้ 15.7 - 16.7 ไดน์/ซม. ที่ 85° F สำหรับแอสฟัลต์อ่อน

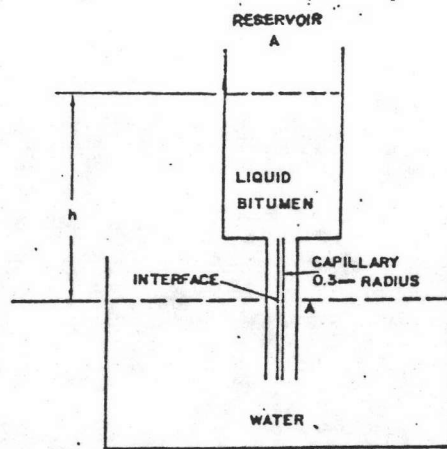
Thelen (4) หาแรงดึงระหว่างผิวของน้ำบนแอสฟัลต์ โดยหามุมสัมผัสของหยดน้ำบนแอสฟัลต์พบว่า แอสฟัลต์ที่ใช้ศึกษามีแรงดึงระหว่างผิว 25 - 35 ergs/cm² ที่ 77° F ค่าพลังงานระหว่างผิวดำเป็นค่าของแอสฟัลต์เหลวและลดลง 3 ergs/cm² ทุก ๆ 100° F ที่เพิ่มขึ้น

เมื่อหยดแอสฟัลต์บนผิวน้ำได้ค่า

แรงดึงระหว่างผิว (น้ำ - อากาศ)	=	72	ergs/cm ²
แรงดึงระหว่างผิว (แอสฟัลต์ - อากาศ)	=	26	ergs/cm ²

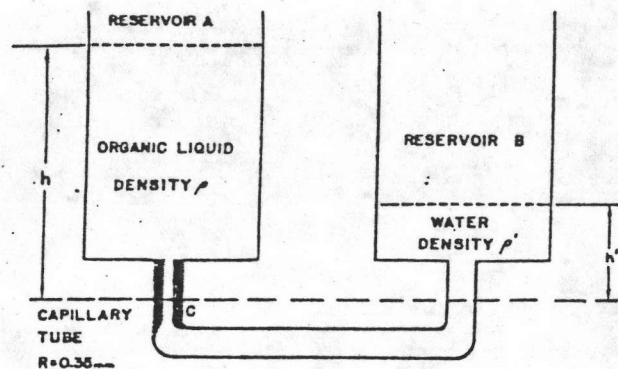
ตารางที่ 3.1 แรงตึงผิวของแอสฟัลต์
SURFACE TENSION OF ASPHALTIC MATERIALS

Source	Penetration	Softening Point	Temperature of Test (deg C)	Surface Tension (dynes/cm)	Method	Reference
California reduced	93	44	25	36.2	Pendant drop	Mack
Midcontinent reduced	92	48	25	29.0	Pendant drop	
Midcontinent oxidized	100	48	25	28.0	Pendant drop	
Mexican reduced	83	48	25	35.8	Pendant drop	
Mexican reduced	190	42	Extrapolated to 25	33.5	Du Nouy	Saal
Mexican oxidized	34	85		32.1	Du Nouy	
Indian reduced	250	33.0				
NARC asphalts—11 different types	—	—	25	25.8 ± 0.6	Capillary method	Thelen
Venezuelan	—	—	26-84	34.5-27.0	Du Nouy	Traxler
Heavy Trinidad	—	—	25-85	34.0-30.5	Du Nouy	Traxler
Various domestic crude petroleum	—	—	85	29.0-31.2	Du Nouy	Traxler and Pittman
Oxidized Venezuelan	—	64.2	100-225	20.7-37.4	Jaeger	Nellensteyn and Roodenburg
Mexican	—	58.5	100-225		Jaeger	
6 Different asphalts	74-120	46-57	20	26.3-38.9	Hanging thread	Mack



ก) Apparatus for measuring interfacial tension.

รูปที่ 3.5 เครื่องมือหาแรงตึงระหว่างผิว



ข) Apparatus for measuring interfacial tension.

$$\begin{aligned} \text{แรงดึงระหว่างผิว (แอสฟัลต์ - น้ำ)} &= 30 \pm 5 \text{ ergs/cm}^2 \\ \text{งานในการเกาะยึด} &= 16 \text{ ergs/cm}^2 \end{aligned}$$

และหาค่าแอสฟัลต์บนผิวมวลรวมที่มีชั้นเคลือบน้ำ ได้ค่า

$$\begin{aligned} \text{แรงดึงระหว่างผิว (ของแข็ง - อากาศ)} &= 76 \text{ ergs/cm}^2 \\ \text{แรงดึงระหว่างผิว (แอสฟัลต์ - ของแข็ง)} &= 17 \pm 3 \text{ ergs/cm}^2 \\ \text{การเปลี่ยนแปลงพลังงาน} &= 33 \text{ ergs/cm}^2 \end{aligned}$$

การหลุดลอก หรือการถอดถอนของแอสฟัลต์ออกจากมวลรวม โดยการแทนที่ของน้ำได้ค่า

$$\begin{aligned} \text{แรงดึงระหว่างผิว (มวลรวม - น้ำ)} &\sim 0 \text{ ergs/cm}^2 \\ \text{พลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลง} &= 47 \text{ ergs/cm}^2 \end{aligned}$$

อัตราการเกิดการหลุดลอกไม่ขึ้นอยู่กับพลังงานอิสระ แต่ในทางปฏิบัติถูกควบคุมโดยความหนืดแอสฟัลต์

การหาลัมประสิทธิ์การหลุดลอก (Stripping Coefficient Measurement) สัมพันธ์กับแรงดึงระหว่างผิวของแอสฟัลต์กับมวลรวม น้ำกับแอสฟัลต์ และมวลรวมกับน้ำ โดยใช้มวลรวมผิวเรียบอบแห้ง แล้วผ่านไอไนโตรเจนแห้ง หยอดแอสฟัลต์บนผิวมวลรวม บ่มที่ 80 °C แล้วเติมน้ำ กระบวนการหลุดลอกเกิดขึ้น ภาพเงาถูกขยายไปบนกระดาษรับภาพ หามุมสัมผัสและคำนวณอัตราการหลุดลอก

$$\text{อัตราการหลุดลอก} = \gamma_{Aw} (1 - \cos\theta) \dots\dots\dots (3.9)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad \gamma_{Aw} &= \text{แรงดึงระหว่างผิวแอสฟัลต์กับน้ำ} \\ \theta &= \text{มุมสัมผัส} \end{aligned}$$

Hughes et al (23) หาแรงดึงเกาะยึด (Adhesion Tension) หรือพลังงานในการจุ่มตัว (Energy of Immersion) โดยได้ปรับปรุงเครื่องมือในรูปที่ 3.6 ประกอบด้วยหลอดแก้ว A เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2 ซม. มีชั้นมวลรวมภายในต่าง ๆ หนา 1 ซม. แท่งกวดบนล่าง F และ G ตั้งขึ้นตัวอย่าง ด้านล่างเชื่อมต่อกับหลอด B เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. และมีอ่างน้ำ

E ต่อกับหลอด A, C, D ใส่ น้ำในหลอด A จนถึงระดับสูงสุดชั้นสุดท้าย และใส่ แอสฟัลต์ 3 มิลลิเมตรในหลอด A ให้ไหลไประหว่างชั้นมวลรวม ความดันของน้ำจะหยุดการไหลของแอสฟัลต์ในชั้นมวลรวม อ่านค่าความดันที่ Manometer ที่หลอด B ค่าแรงดึงเกาะยึดหรือพลังงานในการจมนตัวของแอสฟัลต์ต่าง ๆ พบว่ามีค่า 16 - 20 ไตน์ต่อซม.

Majidzadeh and Brovold (1) สรุปว่ามีการหาแรงดึงฟิล์มแอสฟัลต์ออกจากผิวมวลรวม โดยวิธี Peeling Test แรงดึงจะเกี่ยวกับการเกาะยึดและงานในการเกาะยึด กลวิธีในการดึงมี 4 แบบ คือ L หรือ 90° , U หรือ 180° , T และ โค้ง L จากรูปที่ 3.7 ในมุมดึงที่ต่ำ แรงในระหว่างผิวจะเป็นแรงเฉือน จากรูปที่ 3.8 ที่จุดดึงสมมติว่าจุดร่วมของแรง จะมีความเร็วสม่ำเสมอสัมพันธ์กับจุดอ้างอิง ค่าแรงดึงจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P^2 = P_u^2 + P_c^2 \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

เมื่อ P = ค่าแรงดึง
 P_u = แรงเฉือน ที่แรงยึดเกาะระหว่างผิว และรับโดย q แรงต้านแรงเฉือน
 P_c = เป็น Cleavage Force ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแรงยึดเกาะ และรับโดยแรงต้านแรงดึง f_u และแรงต้านแรงกด f_c

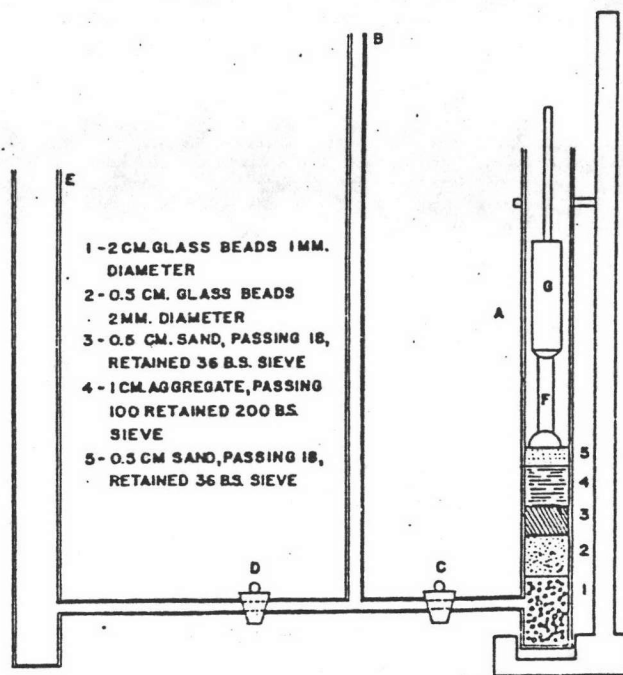
$$P_c = P \sin \omega = \Sigma f_u - \Sigma f_c \quad \dots\dots (3.11)$$

$$P_u = P \cos \omega = \Sigma q \quad \dots\dots (3.12)$$

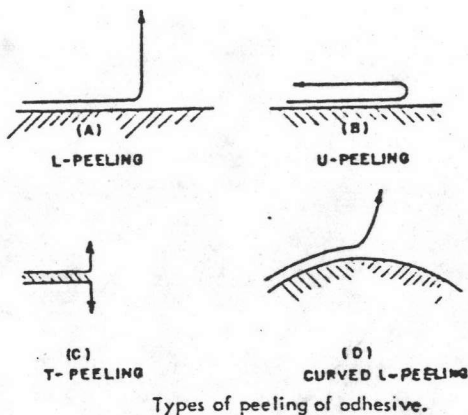
แรงยึดเกาะอาจจะแสดง ในรูปของพลังงานในการดึง W ที่ให้แรงดึง P และแทนที่ฟิล์มแอสฟัลต์ เคลือบ ในทิศทางของแรง

$$W = P(1 - \cos \omega) \Delta x \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

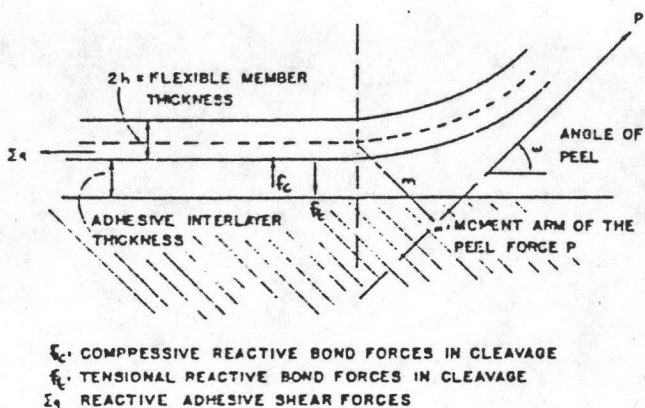
เมื่อ ω = มุมดึงและ Δx เป็นการแทนที่ของฟิล์มแอสฟัลต์เคลือบ



รูปที่ 3.6 เครื่องมือหา แรงดึงเกาะยึด



รูปที่ 3.7 ชนิดการดึงชั้นเกาะติด Peel Test



Schematic view of a point in the peeling zone.

รูปที่ 3.8 รายละเอียดจุดดึง Peel Test

Brown and Kuntze (24) ทดลองใช้แอลพัลต์เคลือบบนแผ่นอลูมิเนียมควบคุมอุณหภูมิ 25 °C ความเร็วในการดึง 20 กิโลไดน์ต่อชม. และดึงในแนวตั้งจาก จับเวลาและแรงที่ใช้ดึงทดลองในอากาศ ในน้ำ และน้ำเกลือ พบว่าฟิล์มแอลพัลต์เคลือบที่บางจะเพิ่มแรงดึงเล็กน้อย ความหนาประมาณ 10 μ เป็นความหนาที่ให้แรงดึงสูงสุด ซึ่งถ้ามากกว่านี้แรงดึงจะลดลงอย่างรวดเร็ว

3.1.4 การหาความหยาบของผิว (Surface Roughness) โดย Wright (25) ได้สรุปว่ามี 4 วิธีในการหาความหยาบของผิว คือ

ก) ใช้เครื่อง Stylus หาค่าระดับของผิวยกกำลังสองแล้วเฉลี่ยโดยการถอดรากที่ 2 เทียบกับผิวเรียบจินตนาการ ข้อเสียของวิธีการนี้คือ หาคความขรุขระได้เฉพาะส่วนที่รัศมีใหญ่กว่ารัศมีของเครื่อง Stylus

ข) Cutting ตัดมวลรวมหารระดับแต่ละด้าน โดยมวลรวมจะเคลือบด้วยสารสังเคราะห์ที่รักษาสภาพผิวระหว่างการตัดให้ผลดีในการทดลองซ้ำ ๆ แต่ต้องใช้ตัวอย่างมาก และความละเอียด ความชำนาญของผู้ทดลองต้องสูง

ค) Casting สังเกตระดับรอบนอก

ง) Oblique สังเกตเส้นรอบรูป

3.1.5 การหาพื้นที่ผิว (Surface Area) โดยใช้เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านแต่ละตะแกรงคูณด้วยตัวประกอบพื้นที่ผิว

3.1.5.1 สมมติรูปร่างมวลรวมแต่ละเม็ดเป็นทรงกลมมีชั้นตอนดังนี้

ก) หาจำนวนก้อนเฉลี่ยต่อกรัม

ข) หาปริมาตรเฉลี่ยต่อก้อน

ค) สมมติว่าแต่ละก้อนเป็นรูปทรงกลมเล็ก ๆ คำนวณพื้นที่ผิวต่อ

หน่วยน้ำหนัก

3.1.5.2 หากจากการดูดซึม โดยมีสมมติฐานว่าจำนวนการดูดซึมเป็นชั้นเดียวสม่ำเสมอและอาจเลือกจากการดูดซึม ที่ความร้อนเท่ากันมีชั้นตอนดังนี้

- ก) หาจำนวนโมเลกุลของแก๊ส หรือของเหลวที่ถูกดูดซึม
 ข) สมมติพื้นที่หน้าตัดของ โมเลกุลแก๊สหรือของเหลว
 ค) คำนวณพื้นที่หน้าตัดของ โมเลกุลแก๊ส หรือของเหลวด้วยจำนวน
 โมเลกุลแก๊ส หรือของเหลว ได้เป็นพื้นที่ผิวรวมรวมต่อกรัม

การวิจัยคุณสมบัติกายภาพเคมีของการเกาะยึดของผิวรวมรวม โดย Peterson et al (26) ได้ศึกษาโดยใช้สารละลายและน้ำแยกส่วนประกอบแอสฟัลต์ออกจากผิวรวมรวมโดยวิธี Pyridine Absorption Technique ด้วยเครื่องมือ Infrared Spectrometry และ Microcalorimetry พบว่า มวลรวมที่ถูกล้างด้วยเบนซีนและแทนที่ด้วยน้ำภายใต้ความดันจะมีฟิล์ม โมเลกุลแอสฟัลต์ถูกดูดซึมเหลืออยู่ โดยเฉพาะบนผิวที่มีความหนาแน่นผิวสูงจะมีปริมาณมากกว่า รูปที่ 3.9 ฉะนั้นมวลรวมที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าหรือมีรูพรุนและความหยาบมากจะมีการเกาะยึดดีกว่า ไม่อ่อนไหวต่อน้ำ และเมื่อวิจัยส่วนประกอบทางเคมีของแอสฟัลต์ ส่วนที่ถูกดูดซึมเหลืออยู่บนผิวรวมรวม ภายหลังล้างแอสฟัลต์ออกจากผิวรวมรวมด้วยเบนซีนเป็น โมเลกุลที่มีขั้วประจุสูงมีน้ำหนัก โมเลกุลต่ำ กลุ่ม Carboxylic Acids ถูกดูดซึมมีอัตราส่วนสูงสุด และ Phenols, Anhydrides, Sulfoxides และ 2 quinolene ให้การรวมตัวที่ผิวสูง แต่เมื่อแทนที่ด้วยน้ำต่อส่วนของ Phenols และ Sulfoxides ยังคงถูกดูดซึมอยู่บนผิวรวมรวม

Thelen (4) พบว่ามวลรวมมักจะดูดซึมน้ำได้ดีในสภาพปกติในรูพรุนหรือรอยแตกแยก และยึดไว้ด้วยแรง Capillary โดยเฉพาะมวลรวมใหม่มักดูดซึมน้ำเป็นชั้น โมเลกุลหนากว่า แม้ว่าจะอยู่ในขอบเขตการเผาที่ 100 °C มีชั้นน้ำ 2.5 โมเลกุลถูกขับออก ชั้นอื่น ๆ จะระเหยที่ 280 °C และชั้นสุดท้ายที่ 1000 °C มวลรวมที่ดูดซึมน้ำถูกให้ความร้อนเพื่อให้มีการระเหยของน้ำ ทำให้แรงดึงผิวของแอสฟัลต์ลดลงแอสฟัลต์จะเคลือบมวลรวมร้อนได้แข็งแรงกว่ามวลรวมเย็น

3.2 การพัฒนาการทดลองการเกาะยึด และการหลุดลอก

พงษ์ศักดิ์ (27) ได้สรุปจากHRB SR 98 (1) ไว้ว่าการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ ส่วนผสมที่ไม่บดอัดและบดอัด ในส่วนผสมที่ไม่บดอัดเป็นการทดลองธรรมดาและง่าย ไม่มีวิธีการใดได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ส่วนใหญ่ใช้มวลรวมขนาด 3/8" - #4 ผสมแอสฟัลต์

แล้วแช่ในน้ำกลั่นตามวิธีการต่าง ๆ ประเมินเปอร์เซ็นต์การเคลือบด้วยตาและเครื่องมือ ต้องมีการเคลือบมากกว่า 95 % และในส่วนผสมที่บดอัดจะหาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ด้านปริมาณความแข็งแรงที่เหลือหลังจากได้ถูกกระทำด้วยน้ำให้เกิดการหลุดลอก จะใช้ส่วนผสมที่ก่อสร้างจริง ทดลองในห้องทดลองและจำลองสภาพใกล้เคียงในสนาม

3.2.1 การประเมินเปอร์เซ็นต์การเคลือบด้วยตา แยกตามวิธีการแช่ในน้ำได้ดังนี้ การแช่ในสารเคมี (Chemical Immersion Test) เป็นวิธีการของ Riedel and Weber โดยการใช้การต้มส่วนผสมในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต แล้วนำมาทิ้งไว้ให้แห้ง ทดลอง 5 รอบ ที่ปริมาณสารเคมีเพิ่มขึ้นแต่ละรอบ

การแช่ในน้ำนิ่ง (Static Immersion Test) ได้แก่ Lee Test ที่ทดลองกับตัวอย่างที่เคลือบไม่สมบูรณ์ และเคลือบสมบูรณ์ด้วย Zinc Plate และ Jar Test ตามลำดับ, Holme Water Displacement Test, Oberbach Test, German U-37 Test, ASTM D - 1664 และ Detachment Test ช่วงเวลาการแช่ในน้ำอยู่ระหว่าง 16 - 24 ชั่วโมง อุณหภูมิการต้ม และแช่น้ำระหว่าง 20 - 60 °C แตกต่างกันแต่ละวิธี

การแช่ในน้ำแบบเคลื่อนไหว (Dynamic Immersion Test) มีลักษณะคล้ายการแช่ในน้ำนิ่ง แต่ใช้วิธีการหมุนเขย่า ตัวอย่างที่ช่วงเวลา 5 - 30 นาที ได้แก่ Nicholson Test, Dow or Toyler Wash และ Texas Boiling Test

Kennedy et al (28) พบว่าวิธี Texas Boiling Test ลดปัญหายุ่งยากในการทดลองและค่าใช้จ่ายในการทดลอง เพราะใช้เวลาในการต้มตัวอย่างในน้ำเดือด 1-3 นาที ประเมินการหลุดลอก และประสิทธิภาพสารผสมได้โดยอุณหภูมิ และน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อผลการทดลอง

3.2.2 การประเมินเปอร์เซ็นต์การเคลือบด้วยเครื่องมือ โดยใช้ทดสอบมวลรวมกับการเคลือบสารต่างๆ ก่อนการเคลือบแอสฟัลต์ ตรวจจับพื้นที่การหลุดลอกและการเคลือบด้วยเครื่องมือเฉพาะ ได้แก่ การทดลองการดูดซึมสีย้อม (Dye Absorption Test) การใช้

เครื่องกลตรวจนับ (Mechanical Intregation Method) เทคนิคการตรวจจับสารกัมมันตภาพรังสี (Radioactive Isotope Tracer Technique) วิธีการตรวจสอบปริมาณเกลือ (Tracer Salt Method) และวิธีการสะท้อนแสง (Light Reflection Method)

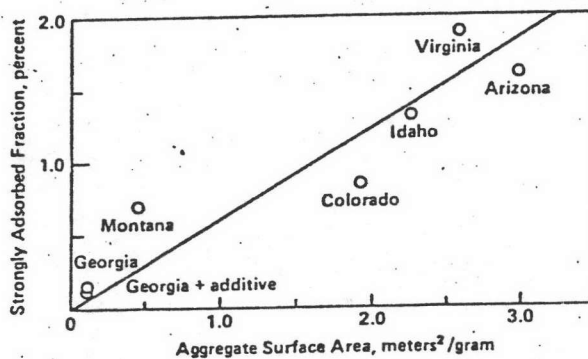
ต่อมา Ford (29) ใช้การทดลองปฏิกิริยาที่ผิว (Surface Reaction Test) โดยใช้มวลรวมเคลือบแอสฟัลต์และไม่เคลือบแอสฟัลต์ทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCL สำหรับมวลรวมประเภท Calcareous และสารละลาย HF สำหรับมวลรวมประเภท Siliceous ให้เกิดปฏิกิริยาได้แก๊ส CO_2 และ SiF_4 ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิว จากรูปที่ 3.10 บันทึกเวลาความดัน และอุณหภูมิ ในหม้อวัดความดัน จากรูปที่ 3.11 และคำนวณการหลุดลอกจากรูปที่ 3.12

$$RC = 100 - (\Delta P_u / \Delta P_s) * 100 \dots\dots\dots (3.14)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_s &= P_{2s} - P_{1s} &&= \text{การเปลี่ยนแปลงความดันสำหรับตัวอย่างที่หลุดลอก} \\ \Delta P_u &= P_{2u} - P_{1u} &&= \text{การเปลี่ยนแปลงความดันสำหรับตัวอย่างที่ไม่เคลือบ} \\ P_1 &&&= \text{ค่าความดันครั้งแรกที่ 15 วินาที} \\ P_2 &&&= \text{ค่าความดันที่ 90 วินาที} \end{aligned}$$

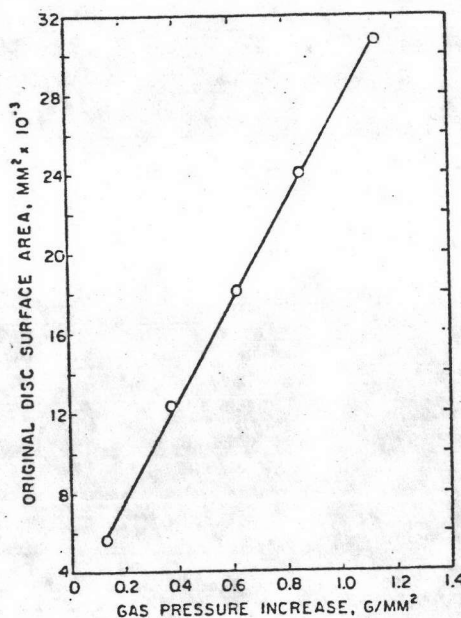
ผลการทดลองความต้านทานในการหลุดลอกโดยวิธีนี้ มีแนวโน้มเหมือนกับที่ได้จากการทดลอง Immersion Compression Test ซึ่งพบว่าหินปูนมีความต้านทานดีกว่า กรวด หินทราย ผลการทดลองซ้ำมีความเบี่ยงเบนน้อยกว่า 4 % และค่าการหลุดลอกในห้องทดลองยังมีความสัมพันธ์กับค่าในสนาม การทดลองนี้มีความสัมพันธ์กันน้อยมากกับวิธีการแช่ในน้ำนิ่งและแบบเคลื่อนไหวที่ประเมินด้วยตา การประเมินด้วยตามีปัจจัย ด้านสีของมวลรวม มิติ และผู้ประเมินพบว่ามวลรวมสีชาจะให้ค่าที่ต่ำกว่าวิธีนี้ ประมาณ 5 - 10 % และมวลรวมสีคล้ำจะให้ค่าที่สูงกว่าวิธีนี้ประมาณ 20 % การประเมินด้วยตาเฉพาะด้านบน 2 มิติไม่ทั่วทั้งก้อนเหมือนวิธีนี้พบว่าผู้ประเมินต่างกันในตัวอย่งชนิดเดียวกันหลาย ๆ แหล่งให้ความแตกต่างได้ถึง 2 - 44 % แต่การหลุดลอกน้อย ความแตกต่างจะมีน้อย วิธีนี้จะไม่ได้ผลถ้าปฏิกิริยาไม่เกิดแก๊ส

Comparison of aggregate surface area and amount of strongly adsorbed asphalt fraction.



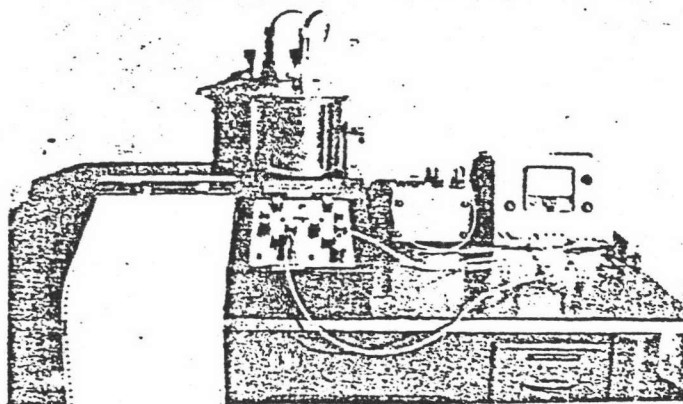
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวรวมกับ ปริมาณ การดูดซึมแอสฟัลต์

Original disk surface area versus gas pressure increase, Cooperton limestone.

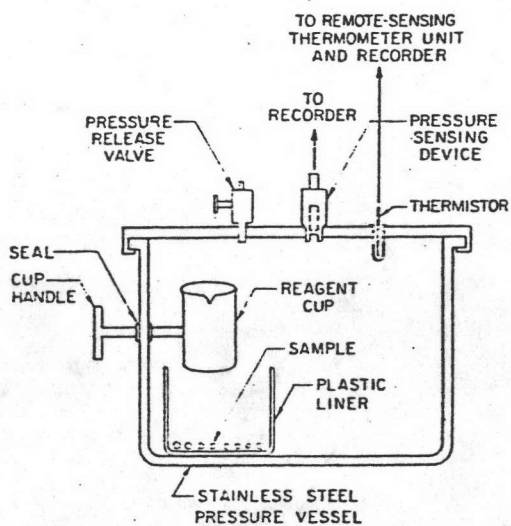


รูปที่ 3.10 พื้นที่ผิวรวมหินปูน กับความดันแก๊ส

Surface reaction test equipment.

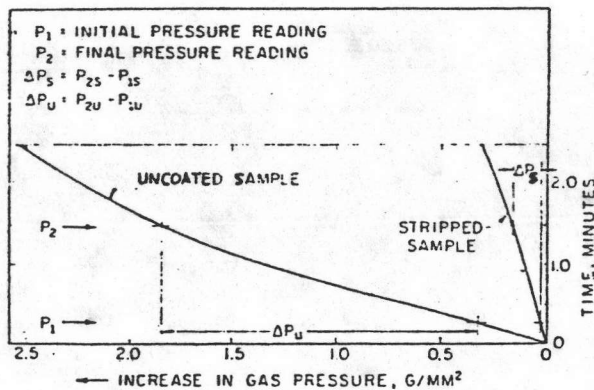


Details of pressure container device.



รูปที่ 3.11 เครื่องมือ Surface Reaction Test

Typical SRT pressure-time curves for limestone aggregate.



รูปที่ 3.12 กราฟ ความดันแก๊ส กับ เวลา

3.2.3 การทดลองแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Test) โดยการใช้การสั่นสะเทือนของคลื่นเสียง (Sonic Test) กับตัวอย่างสภาพแห้ง สภาพอืดตัว ที่เตรียมในห้องทดลอง หรือเจาะมาจากสนามหาค่า Modulus of Elasticity, Poisson's Ratio, Stiffness Modulus และการหลุดลอกได้

3.2.4 การทดลองแบบจำลองสภาพการจราจร (Simulated Traffic Tests) ให้มีสภาพเหมือนในสนาม โดยมีน้ำหนักหรือล้อวิ่งบนตัวอย่างที่มีน้ำขัง ใช้เวลาหรือจำนวนรอบ และอุณหภูมิต่างกันไป ทาเปอร์เซนต์น้ำหนักสูญหายหรือการหลุดลอก หรือเวลาที่ตัวอย่างชำรุด ได้แก่ การทดลองการสึกกร่อนในน้ำเย็น (Cold Abrasion Test) การทดลองการสึกกร่อนของผิวที่มีน้ำขัง (Surface Water Abrasion Test) การทดลองล้อวิ่งแบบอังกฤษ (English Trafficking Test) หรือการทดลองล้อวิ่งบนผิวที่มีน้ำขัง (Immersion Wheel Tracking Test) และการทดลองแบบจำลองทางล้อวิ่ง (Test Tracks)

3.2.5 การทดลองทางกลของตัวอย่างที่แช่น้ำ (Immersion Mechanical Tests) หากการเปลี่ยนแปลงทางกล คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างบดอัดที่ผ่านการแช่น้ำ สัมพันธ์กับการหลุดลอก เช่น การกด การดึง การบวมตัว ได้แก่ การทดลองแช่น้ำขึ้นตัวอย่าง (Briquet Soaking Test) การทดลองการบวมตัว (Swell Test) AASHTO T 101-42 การทดลองความอ่อนไหวต่อน้ำ (Moisture Susceptibility) ทาเสถียรภาพ และแรงยึดเหนี่ยวโดยเครื่องมือ HVEEM Stabilometer และ Cohesimeter

3.2.5.1 การทดลองการกดตัวอย่างแบบไม่มีแรงด้านข้าง (Unconfined Compression Test) หรือการทดลองการกดตัวอย่างที่ผ่านการแช่น้ำอืดตัว (Immersion Compression Test) มาตรฐาน ASTM D 1075 (30) เสถียรภาพของส่วนผสมเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวของแอสฟัลต์ มีการเกาะยึดดี เมื่อเกิดการหลุดลอกและถอดถอนจะทำให้ส่วนผสมบดอัดที่แช่น้ำรับค่าแรงกดลดลง โดยใช้ตัวอย่าง 6 ก้อน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4" สูง 4" และใช้การบดอัดแบบ Double Plunger หรือ HVEEM Kneading Compactor ทดลองหาแรงกดที่ 77°F อัตรา 0.2 นิ้ว ต่อ นาที 3 ก้อน และอีก 3 ก้อน แช่น้ำ 4 วัน ที่ 120°F แล้วแช่ในน้ำ 77°F 2 ชั่วโมง ก่อนทดลองหาแรงกด

$$\text{ดัชนีความแข็งแรง} = (S_2 / S_1) * 100 \% \dots\dots\dots (3.15)$$

$$S_2 = \text{แรงกดของตัวอย่างแช่น้ำ}$$

$$S_1 = \text{แรงกดของตัวอย่างแห้ง}$$

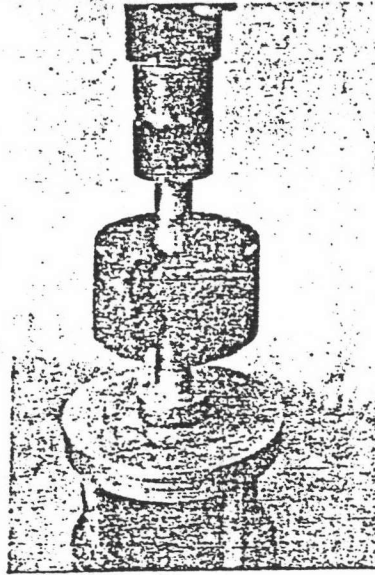
Tunncliffe and Root (31) สรุปว่าเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาดัชนีความแข็งแรงต้องมากกว่า 75 % ผลการทดลองไม่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมจริงในสนาม และเป็นการยากที่จะจำลองตัวอย่างที่แช่น้ำและแห้งเหมือนกัน วิธีการเตรียมตัวอย่าง ปริมาณแอสฟัลต์ ขนาดคละของมวลรวมล้วนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของส่วนผสม ฉะนั้นจึงต้องมีการระมัดระวังอย่างมากในการเตรียมตัวอย่าง ข้อเสียวิธีนี้ต้องใช้เครื่องมือในการประกอบตัวอย่างและกดตัวอย่าง เฉพาะ ซึ่งไม่พบในห้องทดลองทั่วไปไม่สามารถหาการสูญเสียของแรง ยึดเหนี่ยว หรือการเกาะยึดได้โดยตรง เพราะน้ำหนักกดที่ได้จะมีแรงเสียดทานภายใน หรือการขัดกันของมวลรวมรวมอยู่ด้วย

ต่อมา Fang and Chen (32) ใช้วิธีการ Double Punch Test โดยตัวอย่างกดตรงศูนย์กลางด้านบนและล่างด้วยแท่งโลหะทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ที่อัตรา 1 นิ้ว ต่อนาที ที่ 25 °C จากรูปที่ 3.13 ขนาดตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 2 1/2 นิ้ว ที่บดอัดโดย Kneading Compactor และแบ่งตัวอย่างเป็น 2 ชุด สภาพแห้ง และสภาพอ้อมตัว ทดลองหาค่าแรงเค้นดึง และอัตราส่วนแรงเค้นดึง จากสูตร

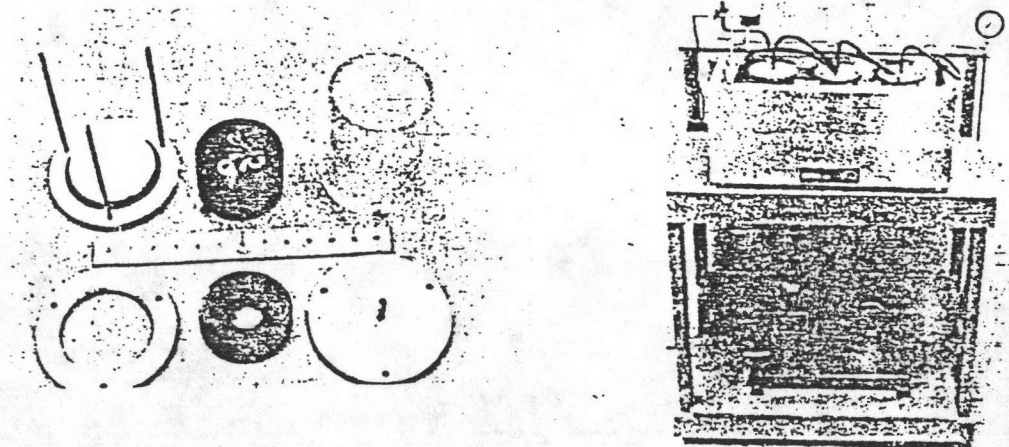
$$\sigma_c = \frac{P}{\pi(1.2bH - a^2)} \dots\dots\dots (3.16)$$

- เมื่อ σ_c = แรงเค้นดึง
 P = น้ำหนักกดสูงสุด
 a = รัศมีแท่งกด
 b = รัศมีของตัวอย่าง
 H = ความสูงของตัวอย่าง

Double punch test.



รูปที่ 3.13 การทดลอง Double Punch



รูปที่ 3.14 ชุดเครื่องมือให้ความเค้น และการยึดตัว

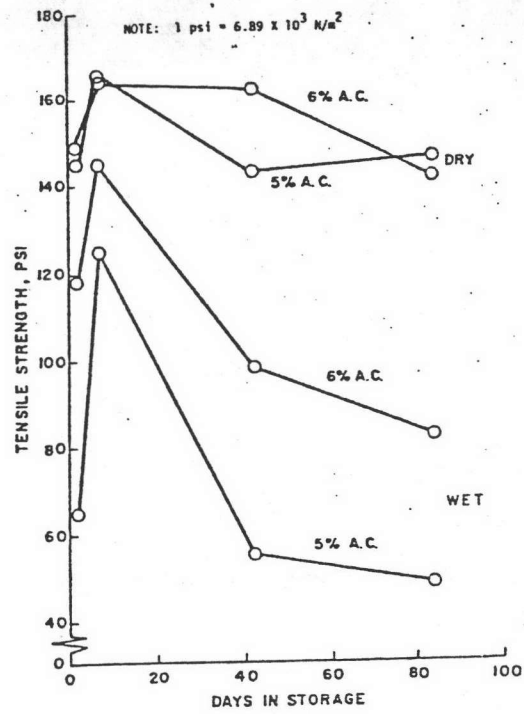


Jimenez (33) วิจัยพบว่า การดูดอากาศตัวอย่างในน้ำให้อิมมิตีวมีประสิทธิภาพในการแทนที่ช่องว่างด้วยน้ำ ชีตจำกัดการทดลองอยู่ที่การหาช่วงเวลาการดูดอากาศที่จะทำให้ตัวอย่างอิมมิตีว การทดลองพบว่าดูดอากาศที่ 20 นิ้วปรอทในน้ำ 24 °C เป็นเวลา 5 นาที และทิ้งไว้ในน้ำที่ความดันบรรยากาศปกติ 5 นาที ไม่มีผลในการสูญเสียกำลังขณะดูดอากาศ แต่เมื่อใช้อุณหภูมิ 50 °C มีการสูญเสียแรงดึงเกือบ 20 % เมื่อเทียบกับตัวอย่างแห้ง มีการพัฒนาให้ความเค้นตัวอย่างเพื่อจำลองสภาพน้ำหนัวยวดยาน รูปที่ 3.14 ใช้ตัวอย่างเส้นในแท่งแก้วที่มีน้ำกลั่นท่วมสูง 2 นิ้ว ควบคุมอุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 15 นาที และดูดอากาศ 5 นาที ที่ความดัน 20 นิ้วปรอท หยุดการดูดอากาศ นำไปแช่ในน้ำอีก 30 นาที จึงย้ายมาใส่อ่างควบคุมความเค้นหมุนเวียน ที่มีน้ำท่วมตัวอย่างสูง 1/4" - 1/2" ใช้แรงเค้น 5 - 30 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว อัตรา 580 รอบต่อนาที ซึ่งเปรียบเสมือนน้ำหนัวยวดยานกระทำ เมื่อสิ้นสุดเวลาที่ต้องการนำมาแช่ในน้ำ 25 °C ควบคุมอุณหภูมิ 45 นาที ก่อนทดลอง Double Punch Test

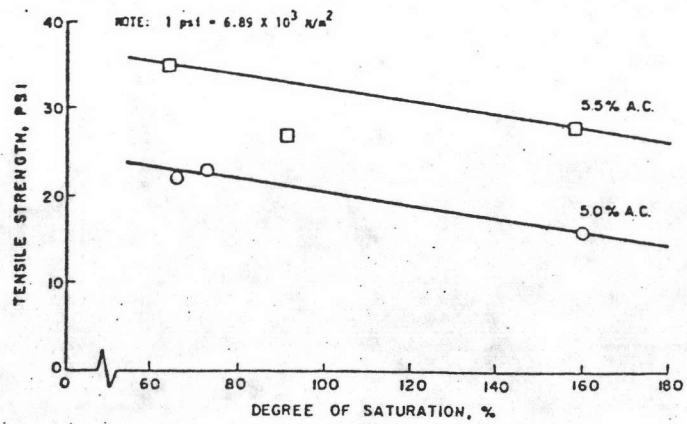
Jimenez ยังได้ทดลองศึกษาขนาดตัวอย่างกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแท่งกดพบว่า เมื่อความสูงตัวอย่างคงที่ค่าแรงดึงลดลง ขณะที่อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่างต่อเส้นผ่าศูนย์กลางแท่งกด (D/d) เพิ่มขึ้น และเมื่อความสูงตัวอย่างและอัตราส่วน D/d คงที่ ค่าแรงดึงจะลดลงตามเส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่างที่ลดลง เมื่อทดลองหาผลของการบ่มต่อความแข็งแรง พบว่าตัวอย่างในสภาพแห้งความแข็งแรงไม่เปลี่ยนแปลง แต่ในสภาพอิมมิตีวค่าความแข็งแรงจะสูงสุดที่ 7 วัน และจะลดลง รูปที่ 3.15 แต่เมื่อทดลองแปรเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์การอิมมิตีวต่างกัน พบว่าค่าแรงดึงลดลงตามเปอร์เซ็นต์การอิมมิตีวที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 3.16

3.2.5.2 การทดลองหาค่าเสถียรภาพแบบมาร์แชลล์ ของตัวอย่างที่แช่น้ำอิมมิตีว (Immersion Marshall Stability) โดยใช้ตัวอย่างมาตรฐาน เส้นผ่าศูนย์กลาง 4" สูง 2.5" บดอัดโดย Marshall Hammer แบ่งตัวอย่างเป็น 2 กลุ่มที่มีความหนาแน่นเท่ากัน กลุ่มหนึ่งทิ้งไว้ในสภาพแห้ง อีกกลุ่มทำให้อิมมิตีว หาค่าเสถียรภาพที่ 25 °C และประมาณค่าการทำลายของน้ำเป็นดัชนีความแข็งแรง

$$\text{ดัชนีความแข็งแรง} = \frac{\text{เสถียรภาพของตัวอย่างอิมมิตีว}}{\text{เสถียรภาพของตัวอย่างแห้ง}} * 100 \quad \dots (3.17)$$



รูปที่ 3.15 ผลของระยะเวลาการบ่ม ต่อค่าแรงดึง



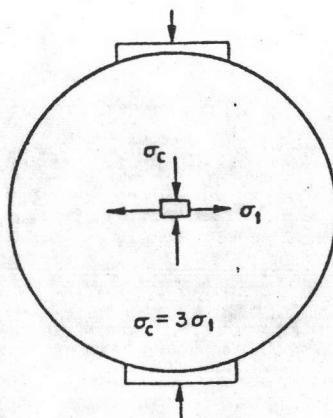
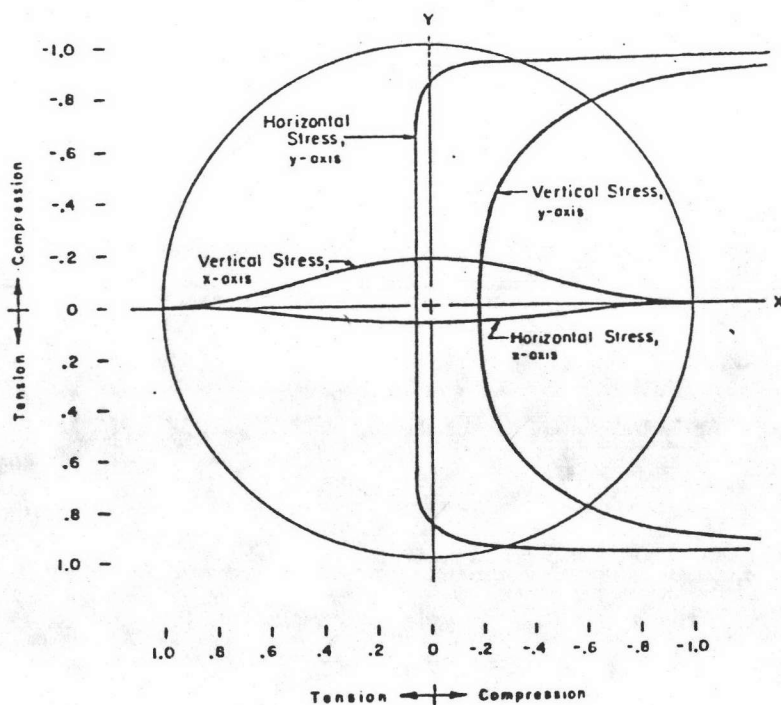
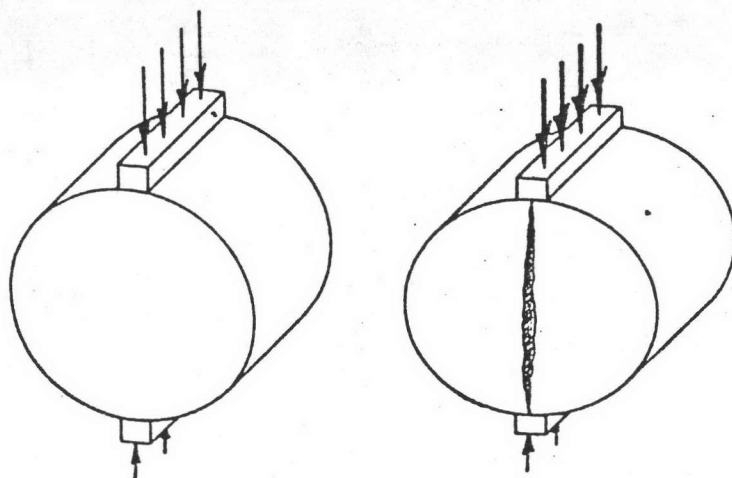
รูปที่ 3.16 ผลของ % การอิ่มตัว ต่อค่าแรงดึง

มีการปรับปรุงวิธีการหลายวิธี คือ บดอัดโดย Double Plunger ตามวิธี ASTM D - 1074 (30) การดูดอากาศในน้ำให้มิดตัวก่อนการแช่ในน้ำประมาณ 1 ชม. ความดัน 30 นิ้วปรอท น้ำที่ใช้อาจเป็นน้ำเกลือเพื่อเร่งการหลุดลอก ค่าที่ยอมรับมักใช้ดัชนีความแข็งแรงมากกว่า 75 %

3.2.5.3 การทดลองหาแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tension Test) หรือ (Split Cylinder Test) Lottman (34) สรุปว่าแรงที่กระทำต่อแอสฟัลต์คอนกรีต อาจจะเป็นแรงภายนอกจากการจราจร แรงดันของน้ำภายในช่องว่าง แรงเค้นของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แรงดันโพรง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ขาดแรงยึดเกาะของแอสฟัลต์จากผิวมวลรวม เกิดการหลุดลอก และอาจเกิดรอยแตกเนื่องจากแรงดึง จึงมีการพิจารณาหาค่าแรงดึง เพราะการใช้วิธีการธรรมดาผลที่ได้จะรวมแรงเฉือนของการขัดสีของมวลรวม แต่ค่าแรงดึงมาจากแรงยึดเหนี่ยวกับแรงเกาะติดของแอสฟัลต์ มีการวิจัยจำนวนมากที่จะหาค่าแรงดึงโดยตรง แต่มีปัญหาในการยึดตัวอย่าง และจัดปัญหาขึ้นที่อ่อนตัวในตัวอย่าง มีการทดลองทางอ้อม เรียกว่า Split Cylinder Tension Test ซึ่งใช้หาแรงดึงในคอนกรีตในระยะเริ่มแรก มีการทดลองแปรเปลี่ยนอุณหภูมิ อัตราการกด ความแบนของส่วนโค้งตัวอย่าง เนื่องจากการกด ผลการทดลองนี้ให้ค่าแรงดึงที่แท้จริงของแอสฟัลต์คอนกรีต และการทดลองนี้มีความสัมพันธ์กับค่าเสถียรภาพ โดยวิธีมาร์แชล Breen and Stephens (35) ได้วิเคราะห์ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 0 - 40 °F พบว่าแอสฟัลต์ติกเปราะง่ายกว่าที่อุณหภูมิต่ำแม้ว่าน้ำหนักกดจะเพิ่มอย่างช้า ๆ และค่าแรงดึงก็ลดลงในที่อุณหภูมิต่ำด้วย การทดลองนี้ประกอบด้วยน้ำหนักกดตรงข้ามบนแท่งเหล็ก (Loading Strip) กว้าง 1/2 นิ้ว ที่มีส่วนโค้งตามตัวอย่าง โดยทดลองที่ 55 °F อัตราการกด 0.065 นิ้วต่อนาที และใช้อัตราการกด 2 นิ้วต่อนาที ที่อุณหภูมิการทดลอง 77 °F การกดจะให้สภาพเหมือนค่าแรงดึงในสนามจริง และเมื่อค่าแรงดึงตลอดหน้าตัด มากกว่าค่าแรงดึงสูงสุดที่ตัวอย่างจะรับได้ จะเกิดรอยแตกตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้ำหนักกดกระทำตามแนวเส้นความเค้นดึงสูงสุด ดูรูปที่ 3.17

$$\text{ความเค้นดึงสูงสุด } TS = 2P/\pi tD \quad (\text{ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว}) \dots\dots\dots (3.18)$$

$$\text{เมื่อ } P = \text{แรงกดสูงสุด} \quad (\text{ปอนด์})$$



Relative Stress Distributions and Element Showing Biaxial State of Stress for the Indirect Tensile Test.

รูปที่ 3.17 การทดลองแรงดึงทางอ้อม

t = ความหนาตัวอย่าง (นิ้ว)

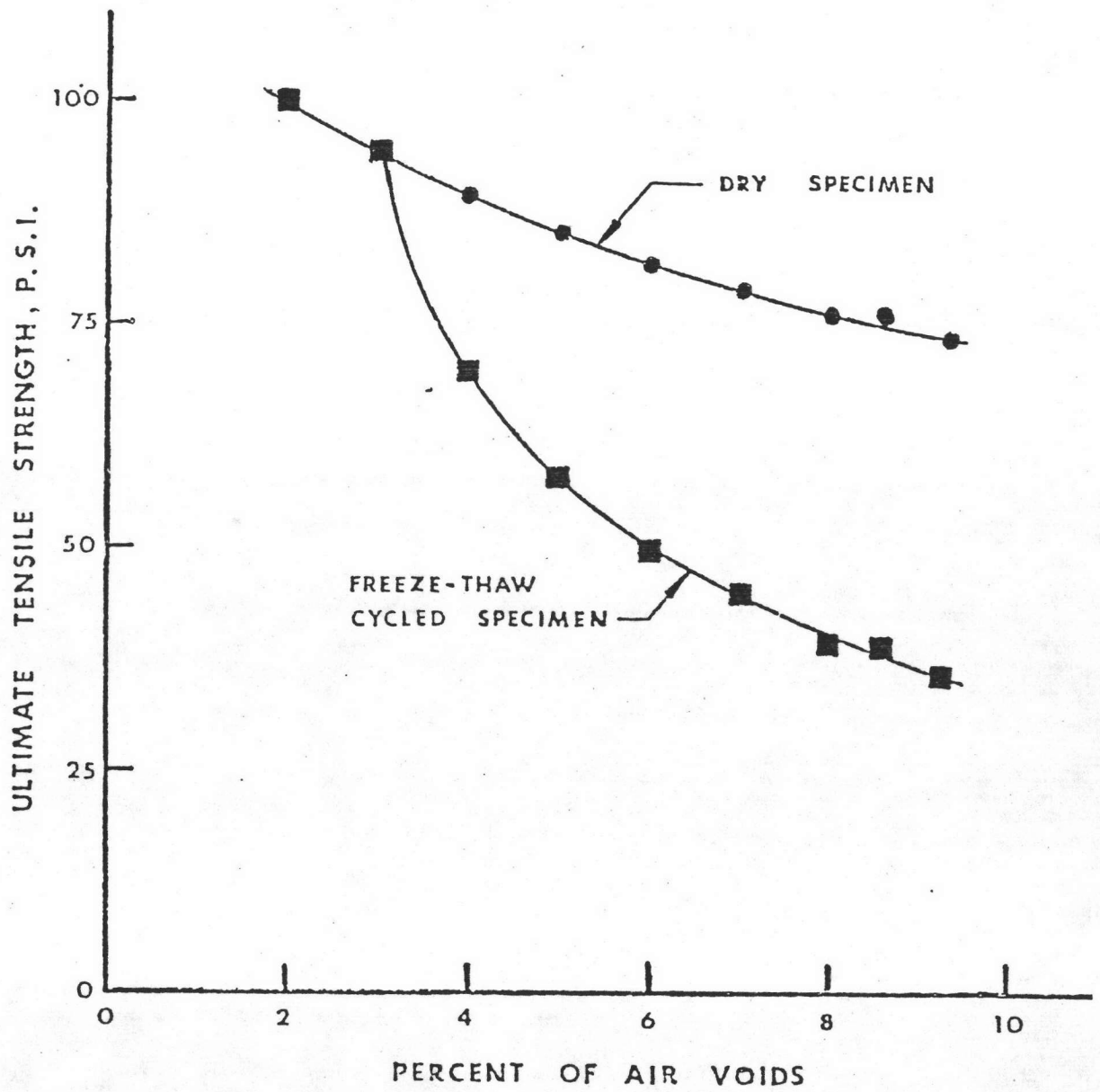
D = เส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่าง (นิ้ว)

ในการศึกษาผลของการทำลายของน้ำที่ทำให้เกิดการหลุดลอก และค่าแรงดึงจะลดลง การเตรียมตัวอย่างใช้วิธีการบดอัดได้ทุกวิธี เพื่อให้ได้ปริมาณช่องว่างอากาศ 6 - 8 % แบ่งตัวอย่างเป็น 2 กลุ่มที่มีความหนาแน่นเท่ากัน กลุ่มหนึ่งทิ้งไว้ในสภาพแห้ง อีกกลุ่มจะควบคุมสภาพการอิมตัวโดยการดูดอากาศให้อิมตัว 55 - 80 % แล้วตามด้วยการแช่น้ำที่ 60° C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดสอบหาค่าแรงดึงตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มที่ 25° C และคำนวณหาค่าอัตราส่วนแรงดึง (Tensile Strength Ratio; TSR) เกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาค่าอัตราส่วนแรงดึงใช้ 0.70 จะพบความเสียหายเนื่องจากน้ำ

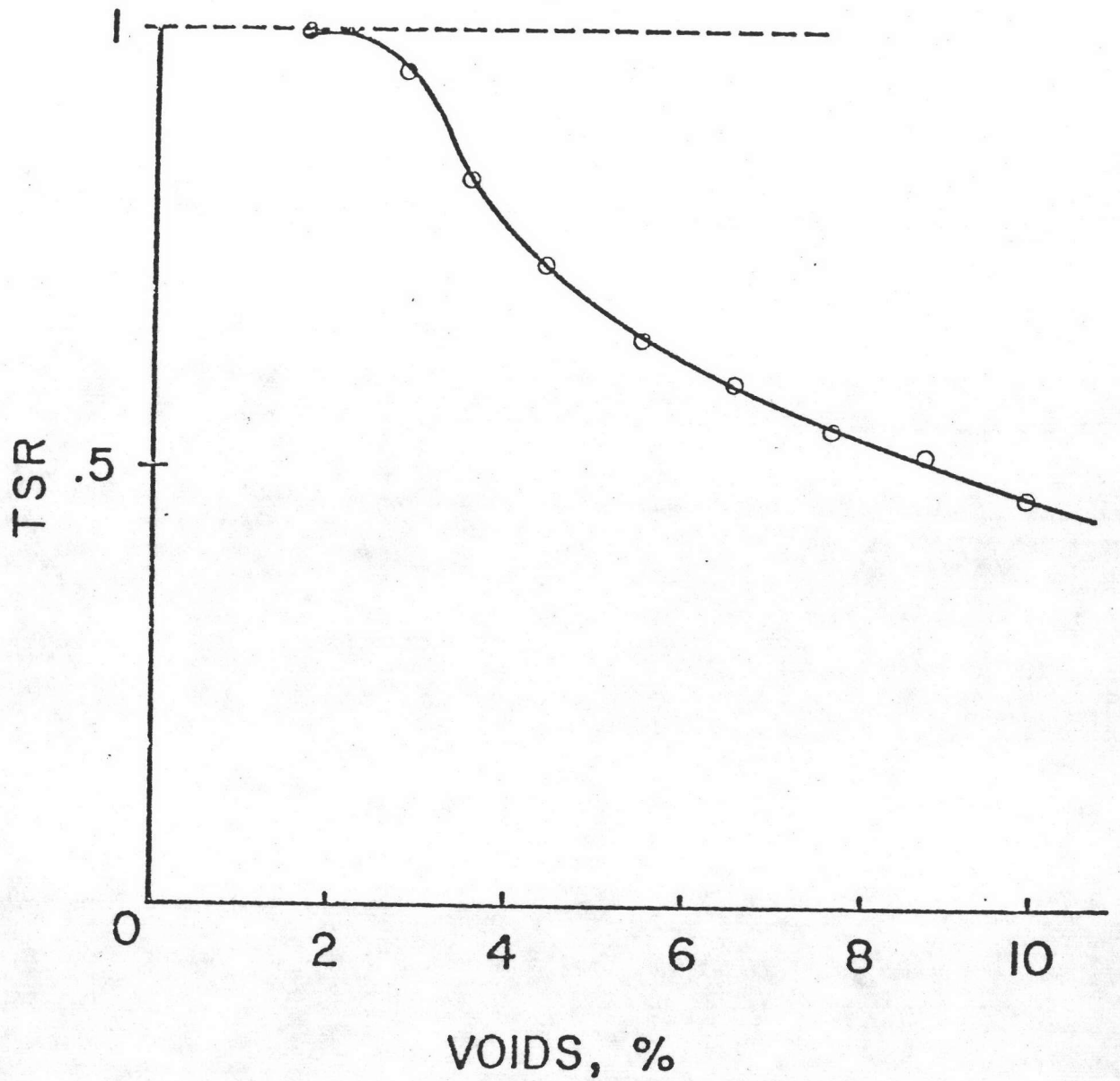
$$\text{TSR} = \frac{\text{แรงดึงตัวอย่างในสภาพอิมตัว}}{\text{แรงดึงตัวอย่างในสภาพแห้ง}} \dots\dots\dots (3.19)$$

ข้อดีของวิธีนี้ใช้กับตัวอย่างทั่วไปที่เจาะจากสนามและที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ หากความแตกต่างระหว่างสารผสมและปริมาณการใช้ จากการศึกษาของโครงการ NCHRP โดย TRB ในปี 1975-1985 พบว่ามีความสัมพันธ์กับการทำลายจริงของน้ำในสนาม กับการทดลองในห้องปฏิบัติการ และค่า TSR จะเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาณช่องว่างที่น้ำซึมได้ลดลง จาก 7 % เป็น 4 % แต่การเพิ่มค่า TSR จะยิ่งมากเมื่อปริมาณช่องว่างเพิ่มจาก 4 % เป็น 2 % ดูรูปที่ 3.18 และ 3.19

Gilmore et al (36) ทดสอบแปรวัตการเกาะยึดและแรงยึดเหนี่ยวจากค่าแรงดึงและเปอร์เซ็นต์ การหลุดลอก เมื่อส่วนผสมแช่น้ำอิมตัวมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพด้านการเกาะยึดแรงยึดเหนี่ยวอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้ง 2 อย่าง เมื่อทดสอบหาแรงดึงในสภาพแห้งและอิมตัว และนำมาประเมินพื้นที่การหลุดลอก ก็สามารถทราบว่ามี การเปลี่ยนแปลงการเกาะยึดหรือแรงยึดเหนี่ยวอย่างไร



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ของ ค่าแรงดึงสูงสุด กับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ ของอัตราส่วนแรงดึง

กับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ

$$\Delta TS_{1-0} = CL_0(\Delta S_{0-1}) + \Delta CL_{1-0}(1-S_1) \dots \dots \dots (3.20)$$

เมื่อ

$$\Delta TS_{1-0} = TS_1 - TS_0 = \text{การสูญเสียแรงดึง}$$

$$\Delta S_{0-1} = S_0 - S_1 = \text{การหลุดลอกที่เพิ่มขึ้น}$$

$$\Delta CL_{1-0} = CL_1 - CL_0 = \text{การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว}$$

0 = ตัวอย่างสภาพแห้ง

1 = ตัวอย่างสภาพอิมมัตว

TS = แรงดึง psi

S = การหลุดลอก %

CL = $TS/(1-S)$ = แรงยึดเหนี่ยว psi

$CL_0(\Delta S_{0-1})$ = การเปลี่ยนแปลงการเกาะยึด

$\Delta CL_{1-0}(1-S_1)$ = การเปลี่ยนแปลงแรงยึดเหนี่ยว

Lottman (37) ได้หาค่า Tensile Stiffness Modulus (TSM) หรือ Elastic Modulus Test โดยใช้ตัวอย่างขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 4" สูง 2 1/2" สภาพแห้งและสภาพอิมมัตว วางในแนวนอนเหมือนการทดลอง Indirect Tension อัตราการกด 0.065 นิ้ว ต่อนาที ที่ 55°F และ 0.150 นิ้ว ต่อนาที ที่ 73°F ทำอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวนอน จากรูปที่ 3.20 เครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แนวนอน และบันทึกค่าความเครียด ทุก ๆ 5, 10 หรือ 15 วินาที และชุดเครื่องมือที่ต่อกับเครื่องบันทึกกราฟ X - Y โดยมีผู้จุดตำแหน่งทุก ๆ ช่วงเวลา 5, 10 หรือ 15 วินาที บนกราฟ อีกคนจะบันทึกค่าการเปลี่ยนรูปร่างในแนวนอน คำนวณค่า Stiffness หรือ E- Modulus จาก Schmidt (38, 39)

$$TSM = \frac{P(v + 0.2734)}{L\Delta} \dots \dots \dots (3.21)$$

เมื่อ

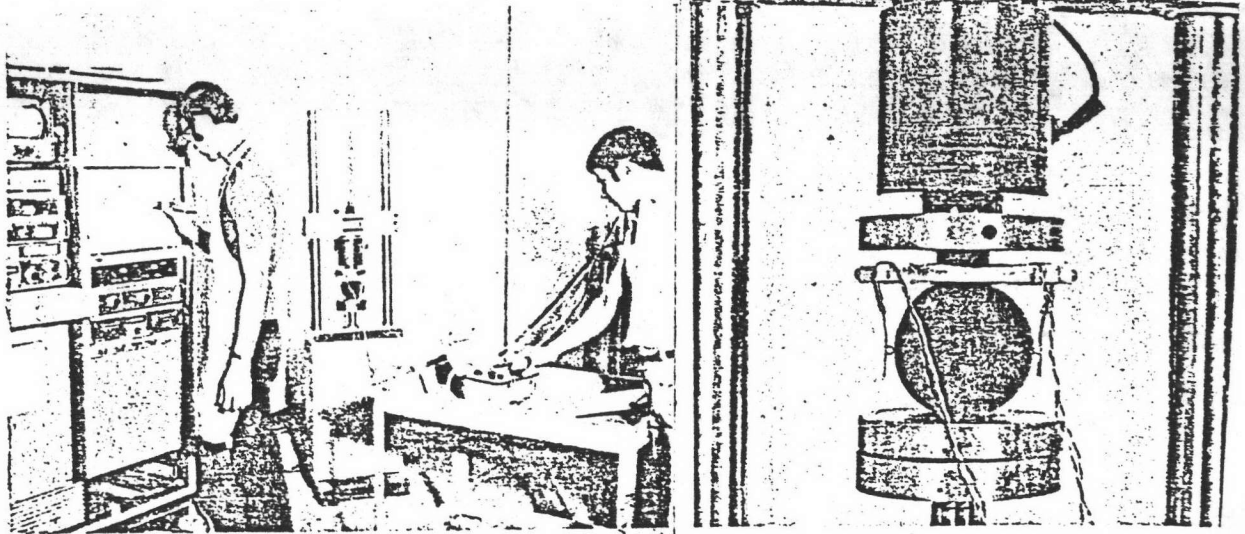
TSM = Tensile Stiffness Modulus ปอนด์ ต่อดารางนิ้ว

P = น้ำหนักกดสูงสุด ปอนด์

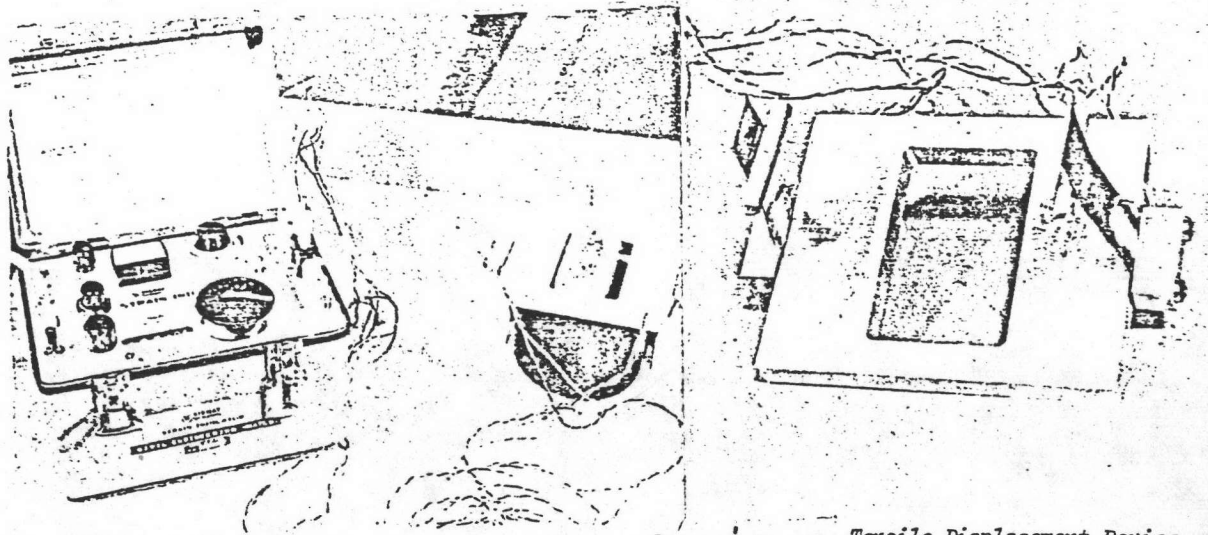
v = ค่า Poisson's Ratio ~ 0.35

L = ความหนาตัวอย่าง นิ้ว

Δ = การเปลี่ยนรูปร่างตามแนวนอน นิ้ว

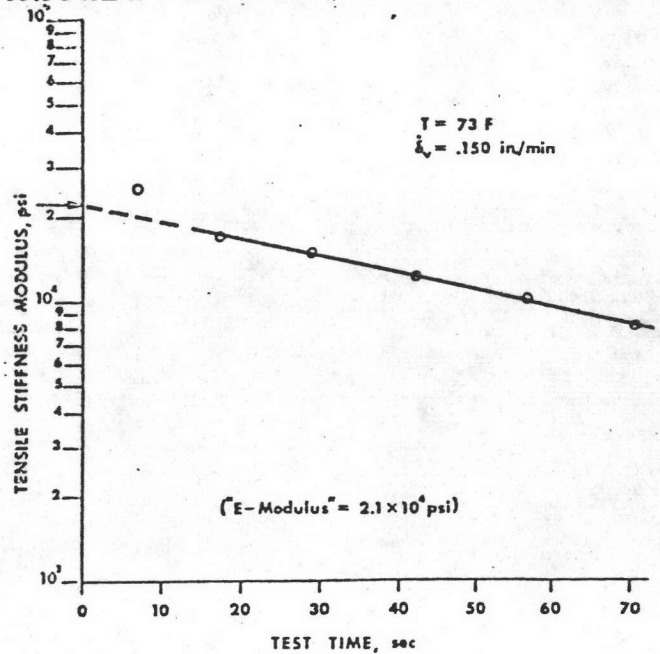


General Indirect Tension Set-up



Tensile Displacement Device

รูปที่ 3.20 เครื่องมือทดลองแรงดึงทางอ้อมที่บ้านพัก
การเปลี่ยนรูปร่าง ในแนวตั้ง แนวนอน อัตโนมัติ



รูปที่ 3.21 การหาค่า
E-Modulus จากการทดลอง

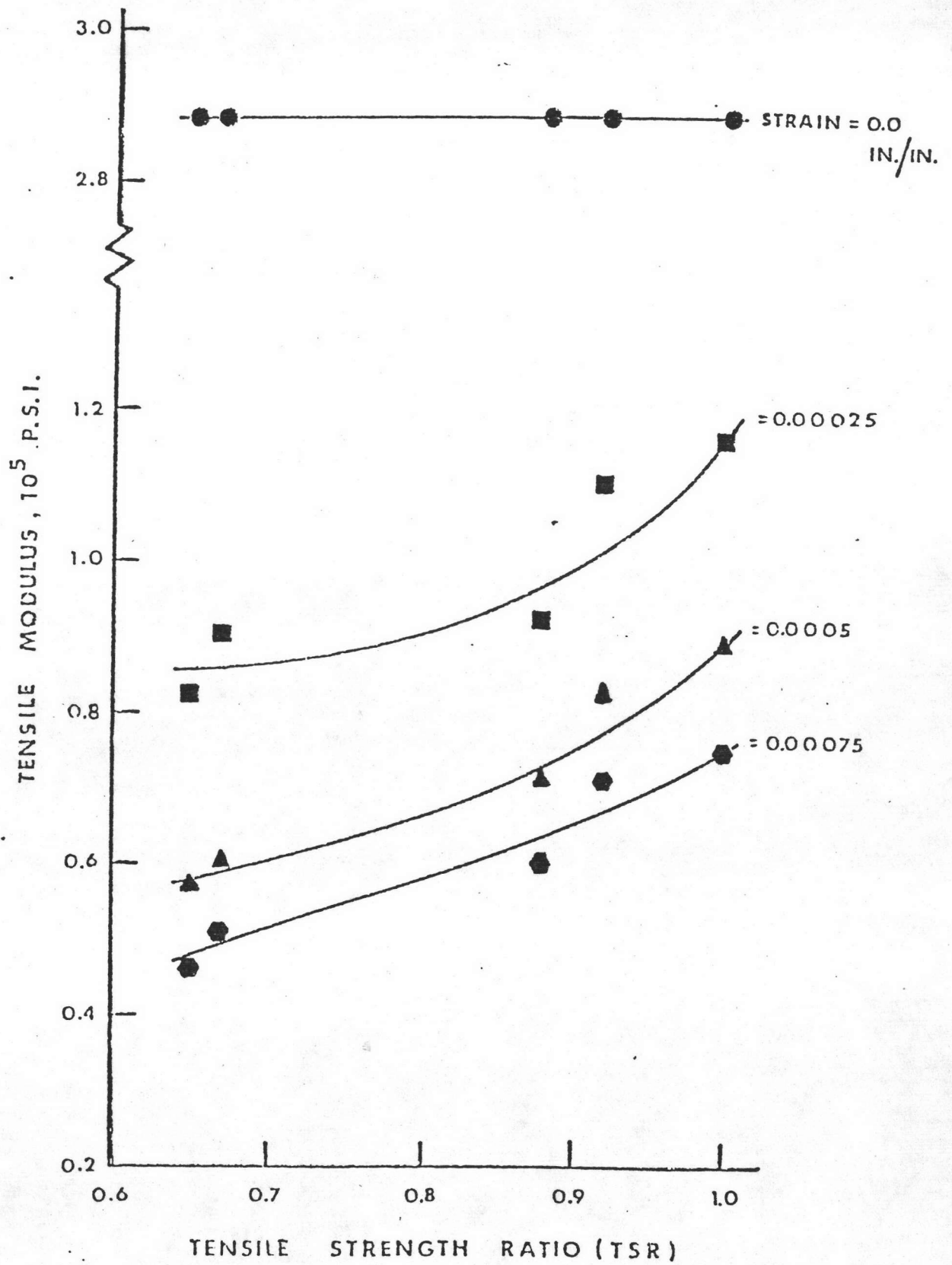
Extrapolation Graph for Determination of Instantaneous Modulus (E-Modulus).

ในการคำนวณค่า TSM นำไปพล็อตกับเวลาที่ทดลองบนกราฟ Semilog โดยให้ค่า TSM อยู่บนมาตราส่วน Log จะได้เส้นตรง แล้วลากไปหาเวลาที่ศูนย์ซึ่งจุดนี้เรียกว่า E-Modulus จากรูปที่ 3.21 คำนวณ E-Modulus จาก ตัวอย่างสภาพอ้อมตัวต่อตัวอย่างสภาพแห้งให้ผลเหมือน Tensile Strength Ratio แสดงถึงความแข็งแรงที่เหลือ

Lottman (34) ในการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์ต้องใช้ค่า Tensile Stiffness Modulus แทนค่าแรงดึง ค่า TSM หรือ Secant Modulus คำนวณจากอัตราส่วนของความเค้นดึง ที่เกิดในระนาบศูนย์กลางของแรงกด กับค่าความเครียดในทิศทางที่เกิดความเค้นดึง ค่า TSM จะลดลงขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นเพราะธรรมชาติความยืดหยุ่นเหนียวของแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อทดลองจนชำรุดหาค่า TSR พบว่า ค่า TSM จะลดลงตามค่า TSR ที่ลดลง แสดงว่าค่า TSR และ TSM ของแอสฟัลต์คอนกรีต มีผลต่อการหลุดลอกเหมือนกัน จากรูปที่ 3.22

มาตรฐาน ASTM D-4123 ทหา Resilient Modulus (M_R) โดยใช้น้ำหนักกระทำซ้ำ ๆ กดขึ้น ๆ ลง ๆ ในแนวตั้งตรงระนาบศูนย์กลางทรงกระบอกของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตในช่วงอุณหภูมิและน้ำหนักต่าง ๆ ความถี่และช่วงเวลาที่น้ำหนักกระทำแบบหนึ่งหรือหลายแบบ เช่น 0.33, 0.50 และ 1 HZ ที่ 5, 25, 40, 60 °C ทหาผลการเปลี่ยนรูปร่างในแนวราบของตัวอย่าง และสมมติค่า Poisson's Ratio สามารถใช้การเปลี่ยนรูปร่างทั้งแนวตั้งและแนวนอนคำนวณค่าคุณสมบัติการยืดหยุ่นทั้งหมดของส่วนผสม จาก 1 รอบที่น้ำหนักกระทำ ค่า M_R นี้สามารถใช้ประเมิน ความสัมพันธ์ของคุณภาพวัสดุกับความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ (Temperature Susceptibility) กับอัตราน้ำหนักกระทำ หรือการเปลี่ยนของค่า M_R ของตัวอย่างแห้ง และตัวอย่างที่อ้อมตัว เพื่อหาความอ่อนไหวต่อน้ำ (Moisture Susceptibility) ได้ Schmidt et al (38, 39) พบว่าค่า M_R จะสูงกว่า E-Modulus เล็กน้อย เพราะอัตราความเครียดต่างกันแต่ผลที่ได้มีความสัมพันธ์ต่อกัน Gilmore et al (36) พบว่าค่า M_R และแรงดึงตัวอย่างสภาพอ้อมตัวมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก แต่ค่าอัตราส่วน M_R จะต่ำกว่า TSR

Porter and Kennedy (40) ใช้การทดลองแรงดึงทางอ้อมหาความล้า (Fatigue Testing) โดยควบคุมตัวอย่างให้อ้อมตัว และสภาพแห้ง 2 ชุด อุณหภูมิการทดลอง 10, 23.9, 37.8 °C (50, 75, 100 °F) กดน้ำหนักซ้ำ ๆ โดยน้ำหนักกด 0.2 วินาที ทุก 1.8 วินาที



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ ของค่า Tensile Modulus กับ TSR

หาจำนวนรอบที่กดทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างในแนวอนศาจร = 0.5 ซม. (0.2 นิ้ว) หรือมีรอยแตกเนื่องจากแรงดึง 0.8 มม. (0.03 นิ้ว) นำมาหาเส้นความล้าที่ระดับการกดต่าง ๆ กัน โดยกราฟ Log-Log ระหว่างจำนวนรอบกับความเค้น เส้นความเค้นล้าที่อยู่นอกกว่า แสดงว่ามีอายุความล้ามากกว่า

$$\epsilon_T = \frac{\sigma_T(1+3\nu)}{M_R} \dots\dots\dots (3.22)$$

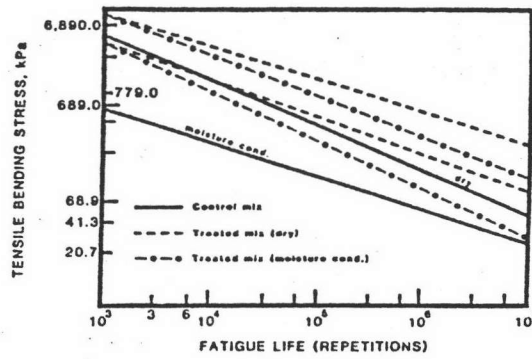
- เมื่อ
- ϵ_T = Tensile Strain
 - M_R = Tensile Resilient Modulus (KPa) ที่ 12.8 °C
 - σ_T = Repeated Tensile Stress (KPa)
 - ν = Poisson's Ratio ~ 0.30

ความสามารถของตัวอย่างที่จะรับแรงกดซ้ำ ๆ ได้ โดยไม่เกิดการแตกร้าว จากรูปที่ 3.23 เส้นความเค้นล้าได้รับจากการประเมินตัวอย่างแห้ง และมีตัว

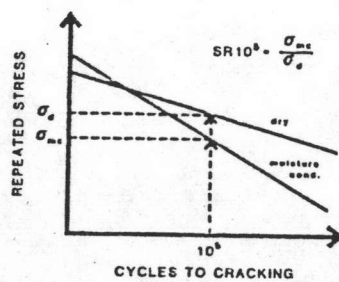
ก) มักจะใช้ที่ 100,000 รอบ ในการประเมินความล้าจากรูปที่ 3.24 ค่า SR 10^5 หากจากความเค้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่าง 0.5 ซม. (0.2 นิ้ว)

ข) หรือพิจารณาที่ค่าความเค้นคงที่ เพื่อหาจำนวนรอบที่จะทนอยู่ได้โดยไม่เกิดรอยแตก

ผลของความเค้นล้า (Fatigue Stress) หรือแรงแบบเคลื่อนไหว (Dynamic) ต่อส่วนผสมอิมิตัวซึ่ง Lottman (34) ได้ทดลองจำลองสภาพความเสียหายในสนามมาใช้ในห้องปฏิบัติการ เมื่อมีน้ำอยู่ในช่องว่างส่วนผสมโดยทดลองกดแบบเคลื่อนไหว (Dynamic) ต่อตัวอย่างอิมิตัว หากความล้าโดยแปรเปลี่ยนปริมาณช่องว่าง และความเค้นสูงสุดที่ใช้พบว่า ชนิดของส่วนผสมไม่มีผลสำคัญที่ช่องว่างมากกว่า 8 - 9 % ผลของน้ำมีต่อช่องว่างมากในการลดความแข็งแรงลง จากรูปที่ 3.25 แต่เมื่อควบคุมช่องว่างคงที่ พบว่าความเค้นกดเพิ่มขึ้น จำนวนรอบที่ซ้ำรูปจะลดลง แสดงว่าความเค้นที่สูงขึ้นจากรถบรรทุกหนักทำให้อายุความล้าสั้น โดยความเค้นที่เพิ่มขึ้น 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำให้อายุความล้าสั้นลง 40 % จากรูปที่ 3.26 ฉะนั้นปริมาณช่องว่างต่ำและความเค้นต่ำจะยืดอายุความล้าได้ การเพิ่มปริมาณช่องว่างประมาณ 2 %

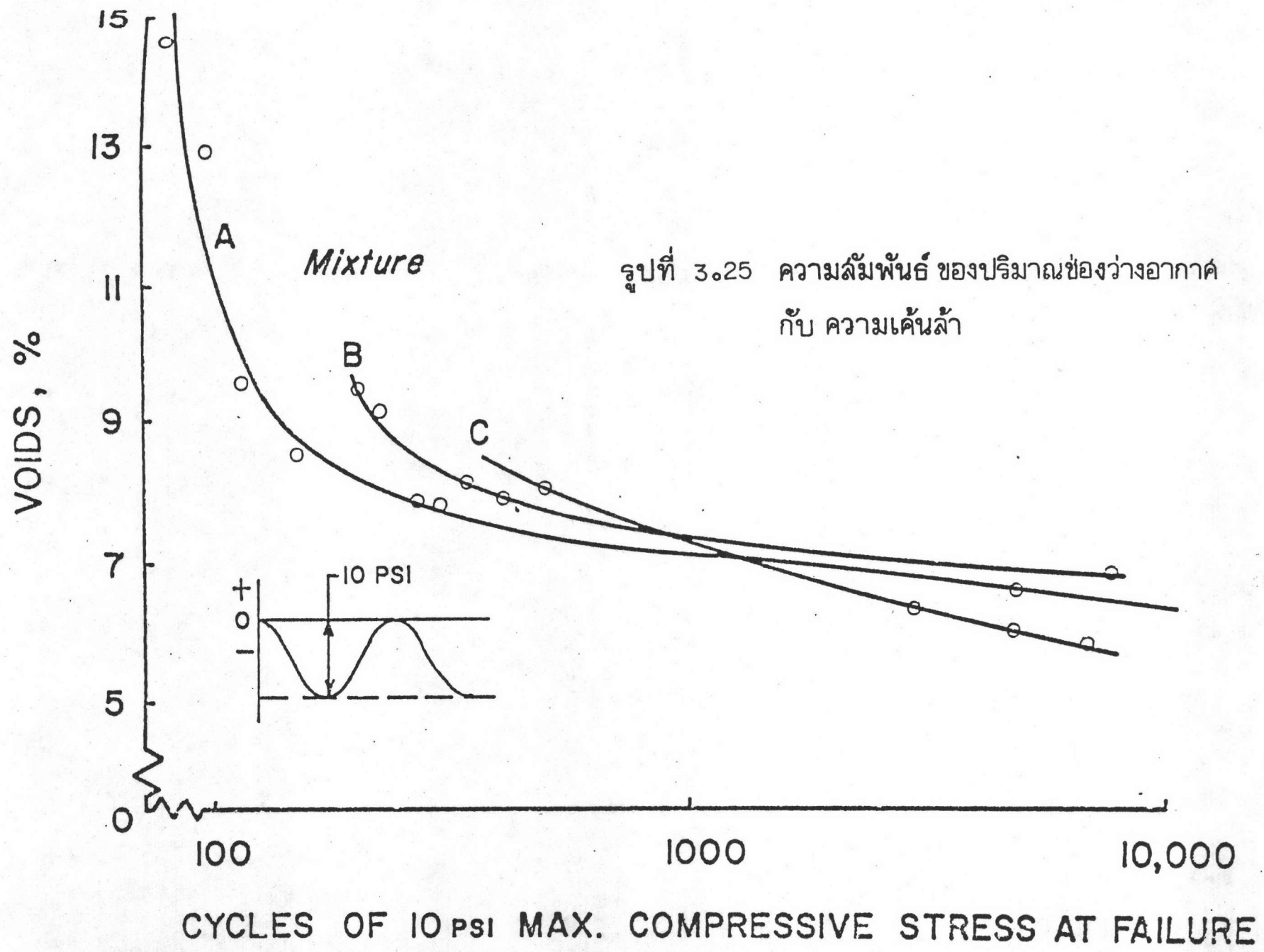


รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นดึง กับ ความล้า



Stress Ratio at 100,000 Cycles.

รูปที่ 3.24 การคำนวณความเค้นล้า



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ ของปริมาณช่องว่างอากาศ
 กับ ความเค้นล้า

MAXIMUM COMPRESSIVE STRESS, PSI

35
30
25
20
15
10
0

100

1000

10,000

CYCLES TO FAILURE (LOG)

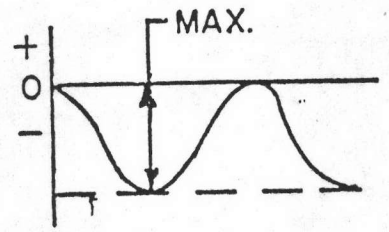
รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ของ
ความเค้นกด กับ ความล้า

Mixture

A

C

B



จะทำให้เกิดการเสียหาย และลดอายุลงถึง 10 เท่า และยังพบว่าค่า TSR และ M_R ต่ำ ทำให้อายุความล้าต่ำด้วย

3.3 การทำนายการทำลายของน้ำต่อแอสฟัลต์ติกคอนกรีต (Prediction of Asphalt Concrete Moisture Damage)

ขึ้นอยู่กับผลของแรงดึง และ Modulus ของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการโดยการจำลองสภาพการทำลายของน้ำระดับต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เจาะมาจากสนาม Lottman (37) ได้ศึกษาโดยเจาะตัวอย่าง 5 ปี ที่มีการหลุดลอกและไม่มีการหลุดลอกมาจากสภาพภูมิอากาศต่าง ๆ มาประเมินด้วยตา ทดลองหาค่าแรงดึง ตัวอย่างที่เจาะทดลองในสภาพอิมมิตัวและสภาพแห้ง เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เตรียมจากวัสดุแหล่งเดียวกันและข้อมูลการออกแบบที่ใช้จริงในสนามพบว่า วิธีการจำลองสภาพการทำลายของน้ำมีผลต่อการทำนายสภาพในสนาม เมื่อทดลองหาค่า TSR, TSM และ M_R จากพื้นฐานงานของ Tunnicliff and Root (31) พบว่าการดูดอากาศให้ตัวอย่างอิมมิตัวแล้วแช่น้ำ และทดลอง Indirect Tension เพื่อคาดการณ์ความอ่อนไหวต่อน้ำของส่วนผสมและประสิทธิภาพของสารผสมเป็นประโยชน์ในการหารูปแบบการเสียหาย ประเมินอายุของทาง ค่าใช้จ่าย และผลการทดลองแน่นอน

Busching et al (41) ได้สรุปรายงานของ Lottman ที่ศึกษาโครงการ ACMODAS โดยเจาะตัวอย่างจากเส้นทางประมาณ 800 กม. ที่พบการหลุดลอกในพื้นที่ของรัฐคาโรไลนาตอนใต้ มีฝนตกชุกแต่ไม่มีหิมะ หรือน้ำแข็ง ได้ศึกษาในห้องปฏิบัติการถึงการจำลองสภาพน้ำในสนามซึ่ง Lottman ใช้การดูดอากาศในน้ำให้ตัวอย่างอิมมิตัว 55 - 80 % โดยใช้ความดัน 20 นิ้วปรอท เวลาประมาณ 5 นาที แล้วแช่น้ำ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและควบคุมอุณหภูมิ 25 °C ก่อนทดลอง Indirect Tension ทั้งตัวอย่างอิมมิตัวและตัวอย่างแห้ง การเตรียมตัวอย่างใช้วิธีการบดอัดเพื่อให้ได้ปริมาณช่องว่าง 7±1 % เพื่อสะดวกในการให้น้ำซึมได้ทั่วถึง และมีสภาพใกล้เคียงการบดอัดในสนามระยะแรก ความหนาแน่น 92 - 96 % อีกวิธีหนึ่งบ่มไว้ในอากาศ 25 °C เป็นเวลา 60 วันและนำมาดูดอากาศในน้ำให้อิมมิตัว 76 - 98 % และแช่น้ำ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เช่นกัน พบว่าค่าแรงดึงสภาพแห้งจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัว แต่ค่าแรงดึงสภาพอิมมิตัวจะแตกต่างกันตามเปอร์เซ็นต์การอิมมิตัว แอสฟัลต์ต่างแหล่งให้ค่าความ

แข็งแรงต่างกันและส่วนผสมแกรนิตให้ค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าส่วนผสมกรวด แต่สภาพอิมิตัวจะลดลงมากกว่า

ในโครงการ ACMODAS ได้ใช้คอมพิวเตอร์ประมาณอายุในสนามของตัวอย่างที่ใส่สารผสมและไม่ใส่สารผสม และอัตราส่วน Benefic / Cost (B/C) โปรแกรมจะประกอบด้วย 2 โปรแกรมย่อย LCO (Life Cut Off) ใช้หาค่าความแข็งแรงที่เหลือ และ LBC (Life Benefit Cost) สำหรับคาดการณ์อายุในสนาม และค่าอัตราส่วน B/C ดูตารางที่ 3.2 อายุการใช้งานจะคำนวณจากอัตราส่วนของน้ำหนักที่กระทำซ้ำ ๆ ต่อตัวอย่างอิมิตัวและแห้ง เป็นสมการ

$$N_1/N_0 = (2TS_0/M_{R0})^{-K1+K0} (TSR^2/M_R R^2)^{-K1} (e^{K1}/e_0^{K0}) \dots\dots (3.23)$$

เมื่อ 0 = สภาพแห้ง

1 = สภาพอิมิตัวด้วยน้ำ

TS = Tensile strength

M_R = Resilient Modulus

TSR = Tensile Strength Ratio

M_R = Resilient Modulus Ratio

$K = -(M_R/B)^C$

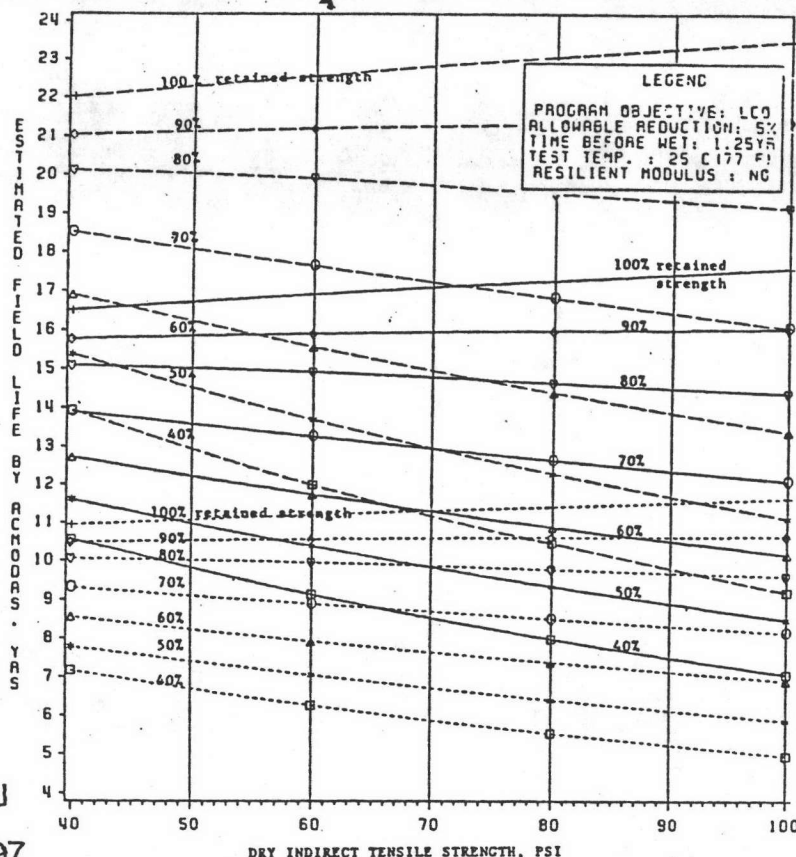
$e = \text{Field Strain} = FM_R^G$

B, C, F, G = ค่าคงที่

โปรแกรมนี้สามารถใช้ประเมินอายุที่เพิ่มหรือลดลงจากการใช้สารผสม มวลรวมและแอสฟัลต์ต่าง ๆ กันได้โดยทำเป็นกราฟในรูปที่ 3.27 สำหรับการจราจรน้อย ปานกลาง หนัก และหนักมาก ขึ้นอยู่กับแรงดึงในสภาพแห้งและอิมิตัว

ต่อมา Nesichi and Ishai (42) ได้พัฒนาวิธีการเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของโครงการ ACMODAS ที่คำนวณอายุของทางจากชั้นผิวอย่างเดียว โดยจะใช้รูปแบบของ AASHTO สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พฤติกรรมการใช้งาน และอายุของทางที่ทดลอง สามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของชั้นทางได้ โดยใช้ข้อมูลการทดลอง Indirect Tension ในรายงาน NCHRP 246(43) ได้ความสัมพันธ์เป็น

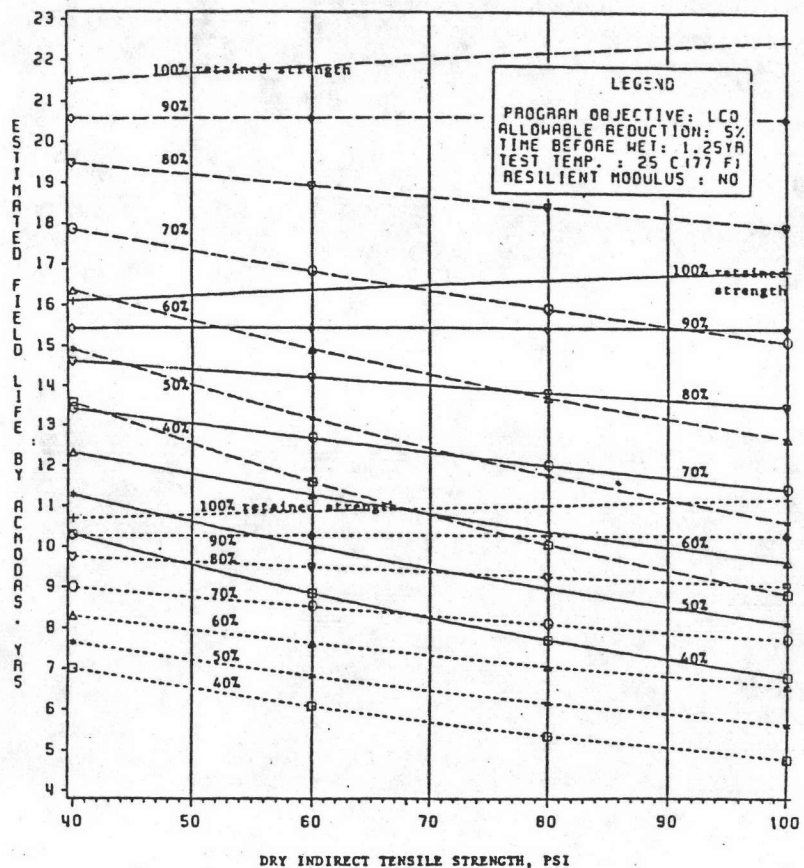
รูปที่ 3.27 การคาดการณ์อายุของทาง ที่ออกแบบไว้ 10,15,20 ปี



ก) การจราจรน้อย
Traffic Factor=0.97

DESIGN LIFE 10 YEARS -----, 15 YEARS ———, 20 YEARS - - - -

Predictions of Field Dry-Wet Life Using the ACMODAS Program for 10, 15, and 20 Year Design Lives for a Traffic (Regional) Factor of 0.97 (Moderate Traffic).



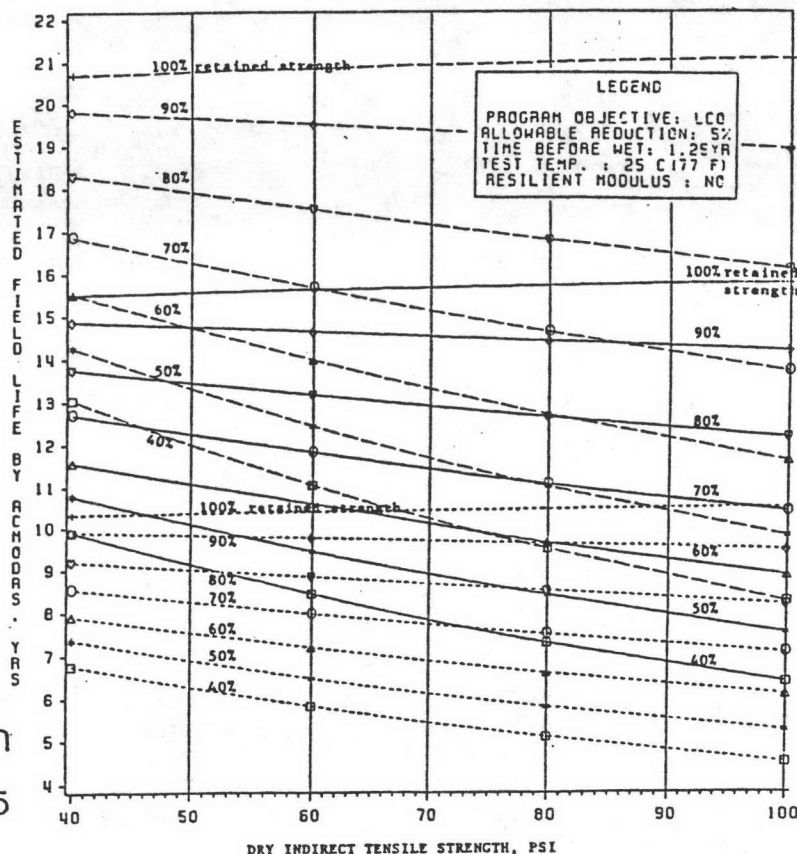
ข) การจราจรปานกลาง
Traffic Factor=1.00

DESIGN LIFE 10 YEARS -----, 15 YEARS ———, 20 YEARS - - - -

Predictions of Field Dry-Wet Life Using the ACMODAS Program for 10, 15, and 20 Year Design Lives for a Traffic (Regional) Factor of 1.0 (Intermediate Traffic).

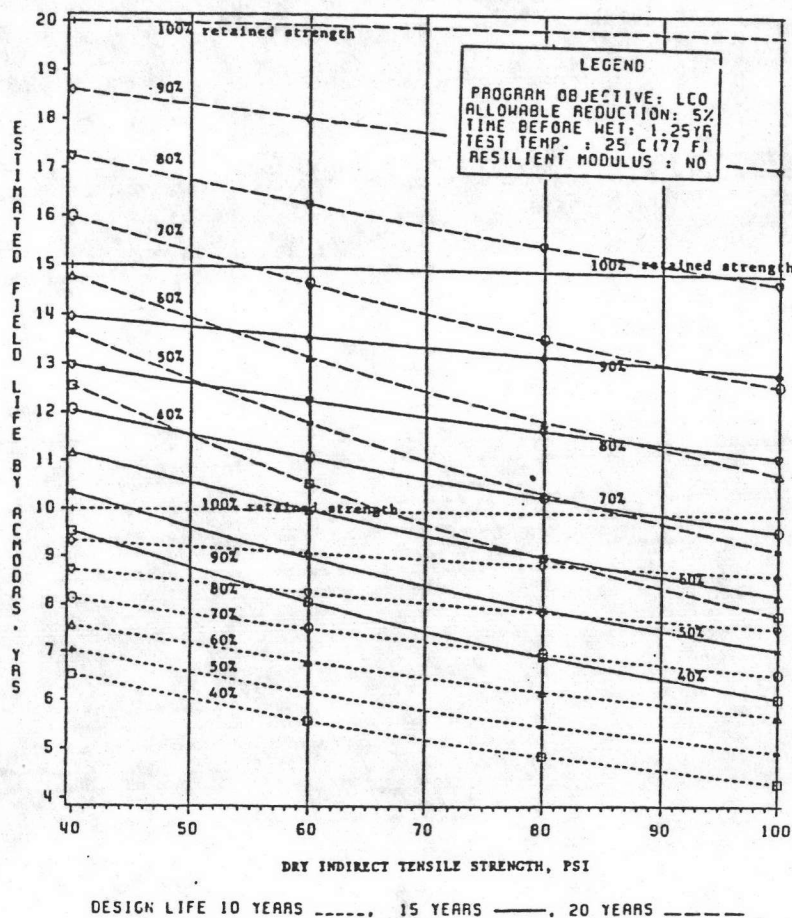
รูปที่ 3๐27 (ต่อ)

ค) การจราจรหนัก
Traffic Factor=1.05



Predictions of Field Dry-Wet Life Using the ACMODAS Program for 10, 15, and 20 Year Design Lives for a Traffic (Regional) Factor of 1.05 (Heavy Traffic).

ง) การจราจรหนักมาก
Traffic Factor=1.10



Predictions of Field Dry-Wet Life Using the ACMODAS Program for 10, 15, and 20 Year Design Lives for a Traffic (Regional) Factor of 1.10 (Very Heavy Traffic)

$$\overline{\text{TSR}} = \frac{\text{TSR}_T}{\text{TSR}_0} = (1 - e^{-K/T}) \dots\dots\dots (3.24)$$

$\overline{\text{TSR}}$ เป็นค่า TSR ในสนามที่อายุ T ปี
 $\text{TSR}_0, \text{TSR}_T$ เป็นค่า TSR จริงของผิวทางที่อายุ 0, T ปี
 K เป็นค่าคงที่

$$\text{เมื่อ } \text{TSR}_0 \sim 1, \overline{\text{TSR}} = \text{TSR}_T = 1 - e^{-K/T} \dots\dots\dots (3.25)$$

ค่า K จะแตกต่างกันตามผลของการทำลายของน้ำ การจราจร สภาพอากาศ จากข้อมูลการหาค่า TSR ในสนามหลาย ๆ ปี ในช่องทางวิ่งมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดย Multiple Linear Regression ข้อมูลการทดลอง 8 เส้นทาง ใน NCHRP 248(43) ได้ค่า K ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมในสนาม

$$K = 14.2712 + 1.0393 \left(\frac{1}{1 - \text{TSR}_2} \right) - 2.3034 \text{Log} W_{18} \dots\dots\dots (3.26)$$

W_{18} จำนวนเที่ยวต่อปีของรถบรรทุก น้ำหนักเพลา 18 kips

เมื่อปริมาณจราจรคงที่ ค่า TSR_2 ที่สูงกว่าทำให้อัตราการทำลายของน้ำต่ำกว่า และค่า K สูงกว่า แต่ถ้าค่า TSR_2 เท่ากัน การจราจรที่สูงกว่าทำให้อัตราการทำลายของน้ำสูงขึ้นและค่า K จะต่ำกว่า Takeshita (44) ได้เสนอค่า Layer Coefficient

$$a = 0.00525 * (4.048 * P/\delta)^{0.46} \dots\dots\dots (3.27)$$

เมื่อ a = Asphaltic Layer Coefficient

P = Marshall Stability (N)

δ = Marshall Flow (mm.)

การคำนวณอายุของทางคล้ายกับ Time Hardening ในการคำนวณ Rutting ของ Monismith (45)

ก) ทดลองหาค่า TSR จากตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ TSR_1 และ ตัวอย่างที่เจาะจากสนาม TSR_2

ข) หาค่า K จากสมการที่ (3.27)

ค) คำนวณอายุของทางแบ่งเป็น 3 แบบ แห้ง (Dry) กึ่งอึดตัว (Semi Wet) อึดตัว (Wet) อาจใช้สมการ (3.25) หรือกราฟในรูปที่ 3.28

$$\text{ค1) สภาพแห้ง } TSR_D = 1.0 \quad (0.9 < TSR < 1.0) \dots\dots\dots (3.28)$$

$$\text{ค2) สภาพกึ่งอึดตัว ที่อายุ } T_{sw} \text{ ควบคุม } TSR \text{ อยู่ระหว่าง } 0.9 > TSR > TSR_2 + 0.05$$

$$TSR_{sw} = 0.918 + 0.2837 \ln TSR_2 \dots\dots\dots (3.29)$$

สามารถใช้กับค่า $TSR_2 < 0.8$ แต่ถ้า $TSR_2 = 0.8$ ใช้ค่า $TSR_{sw} = 0.875$

$$\text{ค3) สภาพอึดตัว } TSR_w = TSR_2 (TSR = TSR_2 + 0.05) \dots\dots (3.30)$$

ง) คำนวณ Layer Coefficient

$$A_{1D} = A_{1OR} \dots\dots\dots (3.31)$$

$$A_{1sw} = A_{1ST} + (A_{1D} - A_{1ST}) * TSR_{sw} \dots\dots (3.32)$$

$$A_{1w} = A_{1ST} + (A_{1D} - A_{1ST}) * TSR_w \dots\dots (3.33)$$

เมื่อ A_{1w} , A_{1sw} , A_{1D} เป็น Layer Coefficient สำหรับสภาพอึดตัว กึ่งอึดตัว และแห้ง

A_{1OR} เป็น Original Layer Coefficient สภาพแห้ง

A_{1ST} เป็น Layer Coefficient เทียบเท่าการวัดที่ถูกทำลาย 100 % มัก

ใช้ 0.14

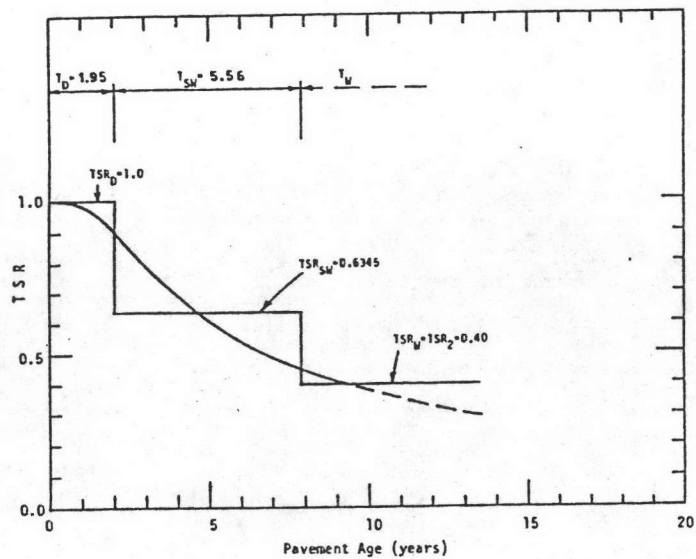
TSR_w , TSR_{sw} เป็นค่าอัตราส่วนแรงดึงที่สภาพอึดตัว และกึ่งอึดตัว

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลโปรแกรม ACMODAS

Input Data and Output for ACMODAS Program

SUBPROGRAMS

<u>LCO (LIFE CUT-OFF)</u>	<u>LBC (LIFE BENEFIT COST)</u>
(for untreated or additive-treated mixtures)	(for additive-treated mixtures)
<u>INPUTS</u>	<u>INPUTS</u>
<ul style="list-style-type: none"> - Traffic (Regional) Factor - All-dry Design Life - Percent Allowable Reduction of Field All-dry Design Life - Field Dry Stage Time - Test Temperature - ITS (Dry) Indirect Tensile Strength - ITS (Wet) Indirect Tensile Strength - Resilient Modulus Data (if any) 	<ul style="list-style-type: none"> - Traffic (Regional) Factor - All-dry Design Life - Percent Allowable Reduction of Field All-dry Design Life - Field Dry Stage Time - Test Temperature - ITS (Dry) Indirect Tensile Strength - ITS (Wet) Indirect Tensile Strength - Resilient Modulus Data (if any) - Cost Ratio of Treatment - Field Dry-Wet life of Untreated Mix
<u>OUTPUTS</u>	<u>OUTPUTS</u>
<ul style="list-style-type: none"> - Field Dry-Wet Life - Percent Change from Field All-Dry Design Life - Tensile Strength Ratio (Entry) - Tensile Strength Ratio (TSR) (Minimum) for Percent Allowable Reduction Entry 	<ul style="list-style-type: none"> - Field Dry-Wet Life of Treated Mix - Percent Change from Field All-Dry Design Life of Additive-treated Mixture - Field Life B/C Ratio (Predicted) - Minimum Field Life B/C Ratio



รูปที่ 3.28 การคำนวณอายุของทาง

- จ) หาค่า SN ทั้ง 3 แบบจาก Layer Coefficient
 ฉ) คำนวณอายุของทางโดยการรวมสภาพแห้ง, กิ่งอิมตัว, อิมตัว
 เปรียบเทียบวิธีนี้กับ Lottman สรุปได้ว่า วิธีการของ Lottman ไม่อ่อนไหวต่อ
 ปริมาณการจราจรนัก เมื่อ TSR_1 คงที่

3.4 ผลของสารผสมด้านการหลุดลอกต่อคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์

Fromm (46) กล่าวว่าความต้านทานต่อน้ำหรือการหลุดลอกเป็นหน้าที่ของส่วนประกอบ
 แอสฟัลต์เท่า ๆ กับชนิดของมวลรวม

Altgelt and Harle (47) พบว่าความเหนียวของแอสฟัลต์เพิ่มขึ้นกับพลังงานในการ
 กระจายของสารละลายใน Maltenes ลดลง และน้ำหนักโมเลกุลจากการรวมตัวของ
 Asphaltenes เพิ่มขึ้น

Dybalski (48) กล่าวว่าทางเลือกใช้สารผสมที่จะช่วยทำปฏิกิริยาระหว่างชั้นบรรจุ
 โมเลกุลจะช่วยให้ Asphaltenes มีการกระจายตัว และอาจช่วยให้มีคุณสมบัติป้องกันการเสื่อม
 สภาพของแอสฟัลต์ แม้ว่าจะไม่ช่วยด้านการหลุดลอก

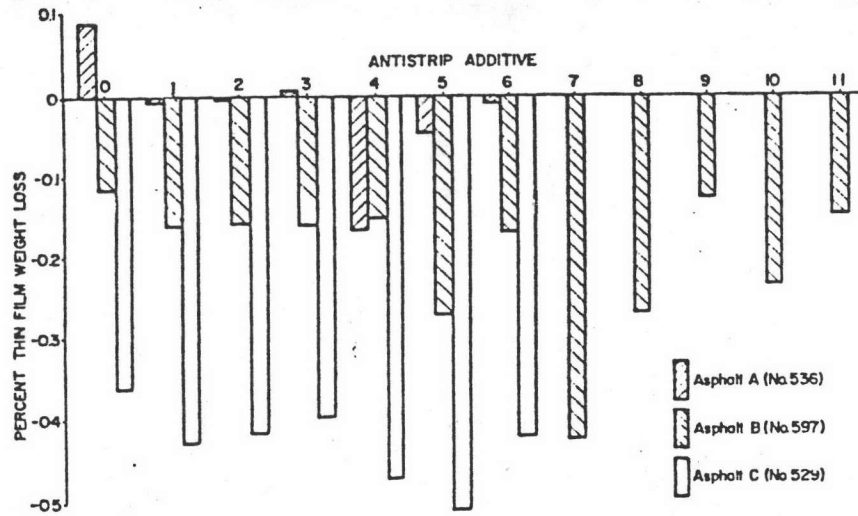
Chehovits and Anderson (49) พบว่าสารผสมเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ
 ของแอสฟัลต์ต่าง ๆ ไม่เหมือนกันเมื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยวิธี Rostler-Sternberg
 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเนื่องจากสารผสม

Anderson et al (50) ได้ประเมินผลของการใช้สารผสมด้านการหลุดลอก 10
 ชนิดกับแอสฟัลต์ 3 แหล่ง โดยการวิเคราะห์ส่วนประกอบ (Composition Analysis)
 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ (Temperature
 Susceptibility) และการแข็งตัว (Hardening) ก่อนและหลัง Thin Film Oven Test
 ไว้ดังนี้

3.4.1 ผลต่อประสิทธิภาพในการเคลือบ เมื่อทดลองโดย Bottle Test พบว่า สารผสมช่วยให้เปอร์เซ็นต์การเคลือบดีขึ้นและจะลดลงหลังการทดลอง Thin Film Oven Test ผลจะแตกต่างกันตามชนิดแอสฟัลต์ และชนิดสารผสมที่ใช้

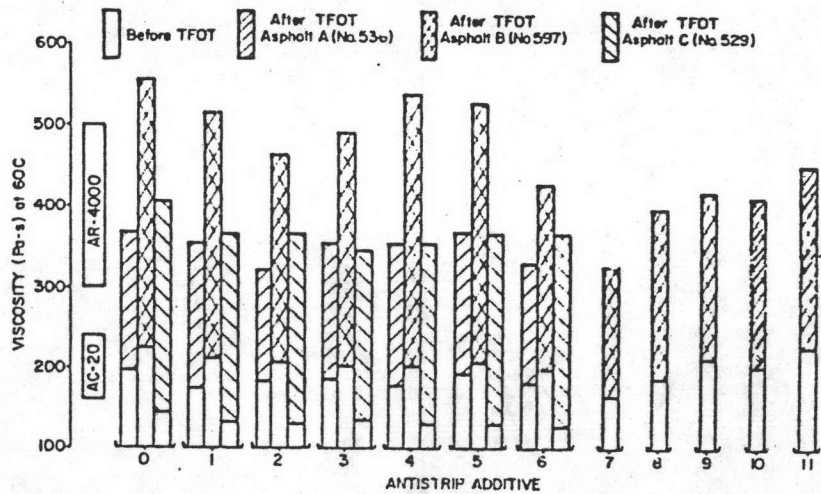
3.4.2 ผลต่อส่วนประกอบของแอสฟัลต์ (Effect on Compositional Analysis) พบว่าเมื่อวิเคราะห์โดยวิธี Rostler Sternberg แอสฟัลต์ที่ใส่สารผสมด้านการหลุดลอก ทำให้เปอร์เซ็นต์ของ 1st Acidaffins ใน Maltenes ลดลงแตกต่างกันตามแหล่งของแอสฟัลต์และค่า Nitrogen ใน Asphaltenes เพิ่มขึ้น แต่ส่วนประกอบอื่น ๆ การเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน และเมื่อทดลอง Thin Film Oven น้ำหนักที่หายไปจากแอสฟัลต์ที่ใส่สารผสมด้านการหลุดลอก มีเปอร์เซ็นต์สูงกว่าแอสฟัลต์ที่ไม่ใส่สารผสม ประมาณ 0.17 - 0.42 % แต่ไม่มากถึงน้ำหนักของสารผสมที่ใช้ จากรูปที่ 3.29 สารผสมจะทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นหัวประจุของ Asphaltenes ได้ 2 ลักษณะคือ ลักษณะแรกเป็นกลุ่มสารเคมีใหม่ เช่น สารผสม Primary และ Secondary Amine จะทำปฏิกิริยากับ Carboxylic Acids ในแอสฟัลต์เปลี่ยนรูปเป็น Amides ปฏิกิริยาอีกลักษณะเป็นการรวมกลุ่มหรือประสานกลุ่มสารเคมีเดิมของแอสฟัลต์ โดยสารผสมเพิ่มหัวประจุโมเลกุลของแอสฟัลต์ และสามารถคืนรูปได้

3.4.3 ผลต่อความชื้นเหลว (Effect on Consistency) ทั้งก่อนและหลัง การทดลอง Thin Film Oven พบว่า สารผสมด้านการหลุดลอกช่วยให้แอสฟัลต์เหลวขึ้น โดยค่าความหนืดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 °C ลดลง จากรูปที่ 3.30 แต่ที่อุณหภูมิสูง 135 °C ความหนืดไม่แตกต่างกันมากนัก และผลแตกต่างกันตามชนิดสารผสมและแอสฟัลต์ที่ใช้ ส่วนค่า Penetration ที่ 25 °C และ 4 °C จะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ 25 °C ประมาณ 10 pen ทั้งก่อนและหลังการทดลอง Thin Film Oven จากรูปที่ 3.31 และพบว่าความหนืดของสารผสมทั้งชนิดแข็งหรือเหลวไม่มี ความสัมพันธ์กับจุดอ่อนตัว (Softening Point) ของแอสฟัลต์ ต่อมา Christensen and Anderson (51) ได้ทดลองเฉพาะสารผสมประเภท Amine 4 ชนิด ที่ปริมาณต่าง ๆ กับแอสฟัลต์ 3 แหล่งพบว่า สารผสม Amide-Amine และ Polyamine ทำให้แอสฟัลต์ก่อน TFOT แข็งตัวลง แต่สารผสม Tertiary Amine และ Primary Amine ทำให้แอสฟัลต์ก่อน TFOT เหลวขึ้น แต่หลัง TFOT สารผสม Amine มีผลต่อความชื้นเหลวของแอสฟัลต์น้อยมาก และ Welch and Wiley (52) ได้ทดลองใช้ปูนขาวในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตภายหลังใช้งาน 2 ปี พบว่า



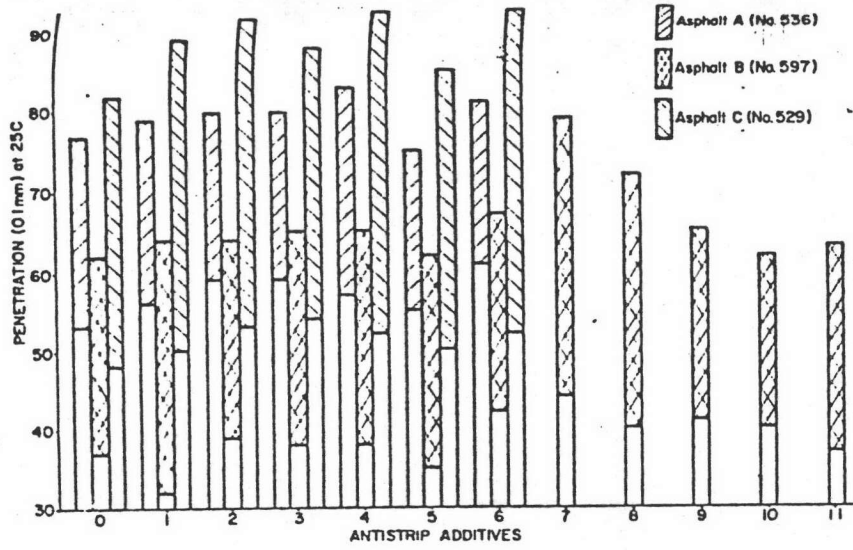
Percent Weight Loss in TFOT.

รูปที่ 3.29 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปหลัง
Thin Film Oven Test (TFOT)

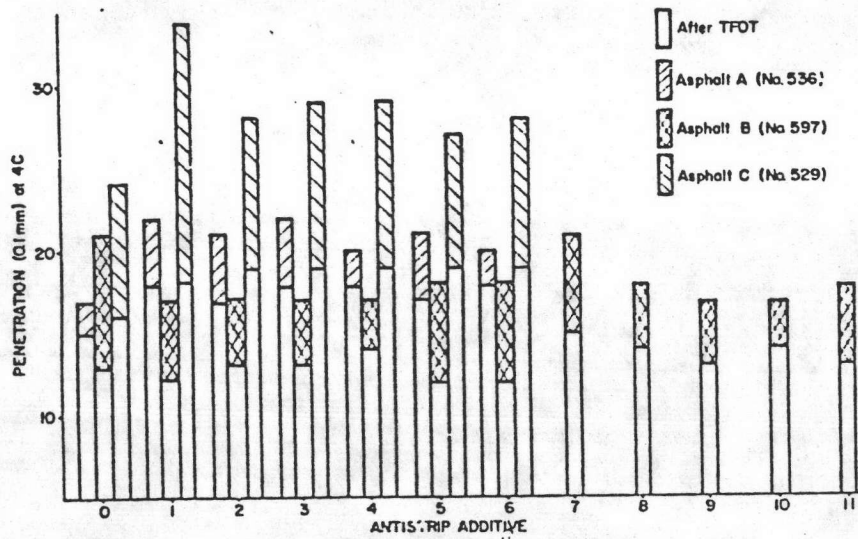


Viscosity at 60 C Before and After TFOT.

รูปที่ 3.30 ความหนืดที่ 60°C ก่อน และ หลัง TFOT



Penetration at 25 C Before and After TFOT.



Penetration at 4 C Before and After TFOT.

รูปที่ 3.31 ค่า Penetration ก่อนและหลัง TFOT



ความเหนียวของแอสฟัลต์สูงขึ้น ค่า Ductility ลดลงตามอายุการใช้งาน ขณะที่แอสฟัลต์เดิมไม่เปลี่ยนแปลง

3.4.4 ผลต่อความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ (Effect on Temperature Susceptibility) พบว่าสารผสมไม่มีผลในการปรับปรุงความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ โดยหาค่า Log-Log Temperature Susceptibility มีผลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่เมื่อหาค่า Penetration Ratio, Penetration - Viscosity Number และ Penetration Index ค่าที่ได้แตกต่างจากแอสฟัลต์ที่ไม่ใส่สารผสมมาก แต่ไม่มีแนวโน้มชัดเจน แต่ขณะที่ Christensen and Anderson (51) ได้ทดลองเฉพาะสารผสมประเภท Amine 4 ชนิดที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า ช่วยลดค่า PVN ทำให้ปรับปรุงความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิต่ำดีขึ้น

3.4.5 ผลต่อการแข็งตัว (Hardening) เมื่อหา Penetration Ductility ความเหนียวและจุดอ่อนตัวก่อนและหลัง TFOT พบว่า สารผสมช่วยให้มีการลดอัตราการแข็งตัวลงเล็กน้อย แต่ Welch and Wiley (52) ใช้ปูนขาวผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตช่วยลดอัตราการแข็งตัวของแอสฟัลต์ได้ดี

3.5 ผลของสารผสมด้านการหลุดลอกในแอสฟัลต์คอนกรีต

Tunicliff and Root (31) พบว่า ไม่มีมวลรวมชนิดใดจะเกิดการหลุดลอกเสมอ และไม่มีชนิดใดไม่เคยเกิดการหลุดลอก ลักษณะการหลุดลอกอาจเปลี่ยนแปลงแม้จะเป็นวัสดุแหล่งเดียวกัน เมื่อเคลื่อนย้ายการใช้จากชั้นหนึ่ง ไปยังอีกชั้นหนึ่งหรือจุดหนึ่ง ไปยังจุดอื่น และการไม่อาจจะเปลี่ยนลักษณะการหลุดลอกของมวลรวมบางชนิดได้ โดยเฉพาะกรวดธรรมชาติ และการใช้ทราย แทนส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 200 อาจทำให้เกิดการหลุดลอก ส่วนมวลรวมที่ไม่เคยเกิดการหลุดลอกเมื่อมีการคูดซิมก้าชหรือของเหลวบางชนิด อาจมีปฏิกิริยาในช่วงเวลาอันสั้นก่อรูปร่างบนผิวมวลรวม ยับยั้งการเกาะยึดที่ดีได้

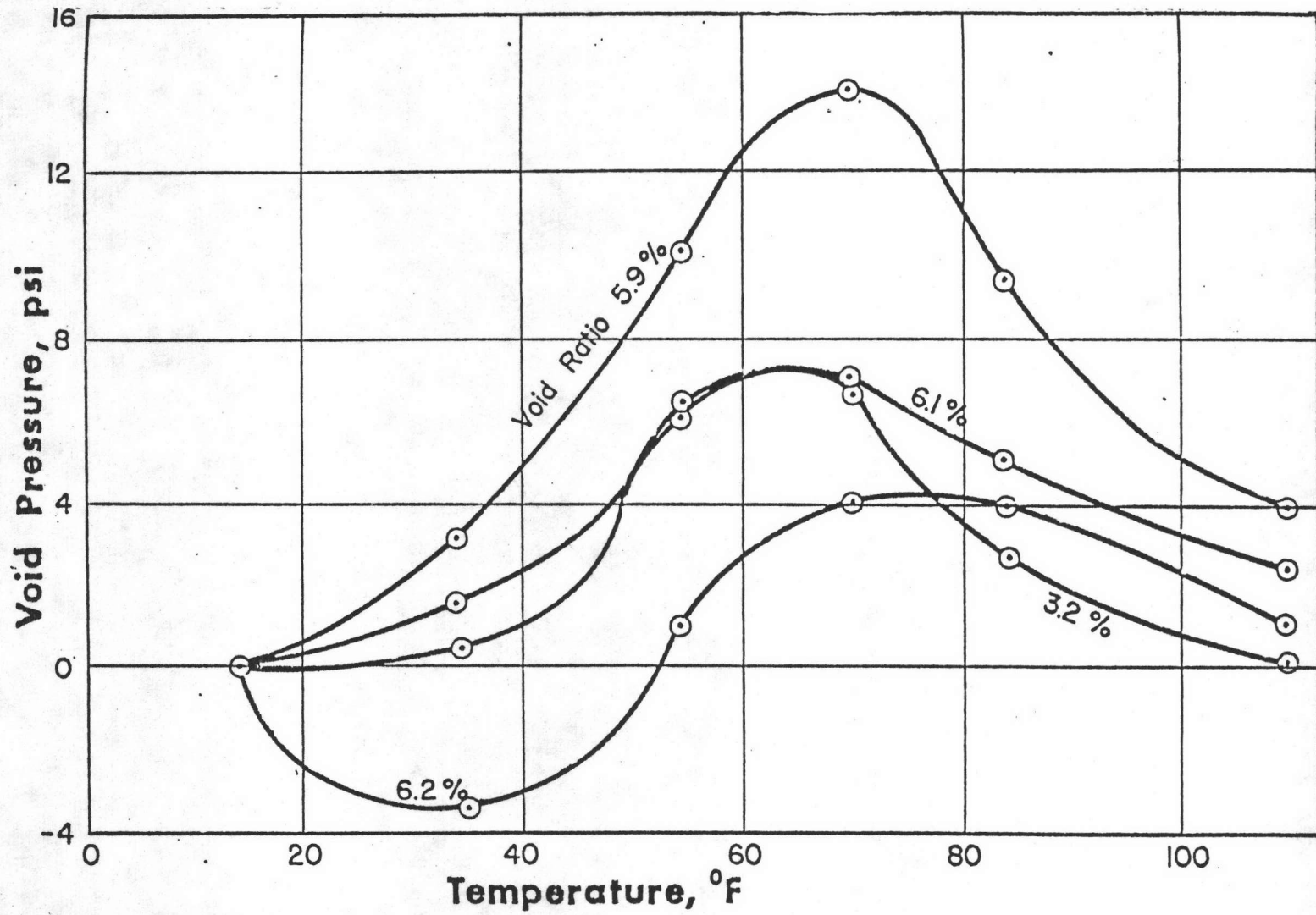
Scherocman et al (53) กล่าวว่า มีตัวแปรมากมายที่มีผลจากการหลุดลอกนอกเหนือจากมวลรวมแอสฟัลต์แล้ว คุณสมบัติของส่วนผสม สภาพอากาศและปริมาณการจราจร ล้วน

เป็นปัจจัยหลักในการหลุดลอก โดยมวลรวมหยาบมักจะเกิดการหลุดลอกมากกว่ามวลรวมละเอียด และมีวิธีการทดลองมากมายที่ใช้คาดการณ์พฤติกรรมส่วนผสม แต่ละวิธีมีตั้งแต่ง่ายจนถึงยาก ใช้เวลารวดเร็วและยาวนาน เครื่องมือที่ง่ายจนถึงยุ่งยาก มีเพียงไม่กี่วิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ในการประเมินประสิทธิภาพสารผสม ได้แก่ การต้มในน้ำเดือด, Immersion-Compression, Immersion Marshall Stability และ Indirect Tension Test

Lottman (34) กล่าวว่าการศึกษาวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิก การประเมินค่าพลังงานผิวที่แน่นอนในห้องทดลองกระทำได้ยาก การทดลองส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในสภาพบดอัดดีกว่า การใช้ส่วนผสมไม่บดอัด เพราะตัวอย่างมีสภาพเหมือนในสนามที่จะให้ค่าแรงดันภายในช่องว่าง ทำให้เกิดการหลุดลอก ผลของแรงดันโพรงของน้ำในส่วนผสมนอกจากจะยืดอายุแล้วการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ก็เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความดันโพรง พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 60 - 70 °F ให้ค่าความดันโพรงสูงสุด รูปที่ 3.32

Gilmore et al (36) กล่าวว่าการศึกษาสารผสมโดยเฉพาะมักไม่กระทำ แต่จะศึกษาเกี่ยวกับการใช้กับวัสดุและก่อสร้างจริงการทดลองต้องเป็นวิธีการที่ง่าย ที่จัดตัวแปรต่าง ๆ แสดงให้เห็นความอ่อนไหว ต่อคุณสมบัติ การเปลี่ยนแปลงต้องสัมพันธ์กับสภาพในสนาม

Lottman (34) พบว่าการทดลองทุกวิธีที่ใช้หาการทำลายของน้ำ ประสิทธิภาพสารผสมขึ้นอยู่กับวิธีการเกาะยึด วิธีการหาแรงดึงทางอ้อมเพื่อหาอัตราส่วนแรงดึง E-Modulus หรือ Resilient Modulus ให้ความสัมพันธ์กับพฤติกรรมในสนามมากกว่าวิธีอื่น ๆ การเตรียมตัวอย่างสามารถใช้วิธีการบดอัดได้ทุกวิธี โดยการควบคุมปริมาณช่องว่างอากาศ 6 - 8 % จะไม่มีผลกระทบต่อทดลองในมวลรวมแต่ละชนิด และการบ่มตัวอย่างไม่จำเป็นต้องใช้เวลา 16-24 ชั่วโมงสามารถใช้พัดลมช่วยให้เย็นตัวเร็วขึ้นได้ ในตัวอย่างที่ควบคุมสภาพการอิมมัตว ใช้การดูดอากาศให้อิมมัตว 55 - 80 % ของช่องว่างที่ไม่มีผลการทำลายตัวอย่าง แต่ช่วยเร่งให้ตัวอย่างอิมมัตว เมื่อมีการแช่น้ำต่อ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพราะการแช่น้ำอย่างเดียวยังตัวอย่างจะอิมมัตวไม่ถึง 50 % แม้จะมีช่องว่างสูง มวลรวมที่ใช้ทดลองควรมีความสัมพันธ์กับที่ใช้งานจริงในสนามมากที่สุด ปัจจัยที่สำคัญคือขนาดคละและปริมาณที่ใช้ ควรมีการตรวจสอบประสิทธิภาพสารผสมในห้องทดลองในขั้นการออกแบบก่อน และระหว่างการก่อสร้างเพื่อหาเสถียรภาพของสารผสม



รูปที่ 3.32 ผลของความดันในช่องว่างที่อุณหภูมิต่างๆ

การใช้สารผสมที่ปริมาณเล็กน้อยจะให้ผลที่แสดงความแตกต่างชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้น ผลที่เพิ่มมีอัตราการลดลง ปริมาณสูงสุดไม่พบ และเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ผลของปริมาณสารผสมที่แตกต่างมีผลมากกว่าวิธีการทดลอง

Zuejnieks (13) กล่าวว่ามีการใช้สารเคมีหลายประเภทที่มีประสิทธิภาพแตกต่างกัน ตามชนิดมวลรวม โดยเริ่มใช้ครั้งแรกกับคัทแบค และมีลชันในผิวซีลโคท และส่วนผสมเย็นก่อน

Tunncliffe and Root (31) พบว่าปริมาณสารผสมที่ใช้ในการทดลองในส่วนผสม แอสฟัลต์คอนกรีต ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีของสารผสม และสภาพผิวมวลรวมและส่วนประกอบทางเคมีของแอสฟัลต์ สารผสมที่ใช้ถ้าปริมาณมากเกินไปอาจเป็นผลเสียต่อการต้านทานการหลุดลอก เพราะผิวมวลรวมสามารถดูดซึมสารผสมในขอบเขตจำกัด ปริมาณที่เหลือจะอยู่ในแอสฟัลต์ทำให้เป็นส่วนเกินที่จะเป็นจุดอ่อนตัว แต่ไม่ใช่ที่ผิวมวลรวม ในการผสมกับแอสฟัลต์สารผสมที่ทำปฏิกิริยากับแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิสูงอาจไม่มีประสิทธิภาพเป็นสารผสม เพราะขาดเสถียรภาพทางเคมีไปหรือ อาจเกิดปฏิกิริยาขัดขวางไม่ทำให้สารผสมไปอยู่ที่ผิวหน้ามวลรวมช่วยในการเกาะยึด และความหนืดของแอสฟัลต์ต้องต่ำพอ ในช่วงเวลาเพียงพอเพื่อให้สารผสมรวมตัวที่ผิวหน้ามวลรวม สารผสมแต่ละชนิดมักไม่ทราบส่วนประกอบที่แท้จริงให้ผลการทดลองต่างกันในส่วนผสมเดียวกัน

Dalter and Gilmer (54) พบว่าสารผสม Primary Amine $R-NH_2$ ที่มีกลุ่ม Amino (NH_2) ทำให้ขี้วัวประจุแอสฟัลต์เป็นบวกที่ผิวเหมาะกับมวลรวมประจุลบ ประเภท Siliceous

Divito and Morris (12) พบว่าสาร Amino Alkyl Functional Silane สูตรโมเลกุล $(CH_3O)_3 SiCH_2NHCH_2CH_2NH_2$ เมื่อใช้เคลือบมวลรวมให้ผลการทดลองดีกว่า สารผสม Amidoamine และ Imidazoline ที่ผสมในแอสฟัลต์ให้ความหนาแน่นสูง และปริมาณช่องว่างต่ำ

Sanderson (55) ทดลองใช้ Methylchlorosilanes ผสมกับน้ำเคลือบผิว มวลรวม Hydrophilic ให้เป็น Hydrophobic ลดอัตราการการหลุดลอกได้ เป็นสารผสมที่มีเสถียรภาพทางความร้อนและทนทานต่อการเกิด Oxidation

Gallaway and Vavra (56) ทดลองใช้ Silicone ที่เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ผลิตจากไม้ ฝ้าย น้ำตาล มีโมเลกุลซิลิคอน ออกซิเจน มีกลุ่มเมทิล (CH_3) เป็นอะตอมล้อมรอบเป็นสารผสม พบว่ามีการหลุดลอกน้อยลงเมื่อปริมาณช่องว่างส่วนผสมน้อยกว่า 10 %

Welch and Wiley (52) พบว่าการใช้น้ำปูนขาวช่วยเพิ่มค่าดัชนีความแข็งแรง ที่เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างสภาพอัดตัวกับตัวอย่างสภาพแห้ง เมื่อทดลองโดย Immersion Compression Test และเพิ่มค่าเสถียรภาพ ลดค่าการไหลตัว แม้จะมีปริมาณช่องว่างสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ใส่สารผสมขึ้นอยู่กับชนิดของแอสฟัลต์มวลรวม โดยเฉพาะมวลรวมที่มี Fe_2O_3 ให้ผลดีมากในการเกาะยึด ด้านการหลุดลอก

Guirguis et al (57) พบว่าการใช้น้ำปูนซีเมนต์เคลือบผิวมวลรวมหรือใช้น้ำปูนขาวเป็นส่วนละเอียดทำให้เพิ่มค่าเสถียรภาพสูงขึ้น แม้จะมีปริมาณช่องว่างอากาศสูง ลดการซึมของผิวทาง ด้านการทำลายของน้ำโดยเพิ่มค่าดัชนีความแข็งแรง ที่ทดลองโดย Immersion Compression Test เพิ่มค่าความแกร่งที่อุณหภูมิสูงที่หน้าหนักกระทำด้วยความถี่ต่างๆ และปรับปรุงความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิต่ำ Dalter and Gilmore (54) พบว่าปูนขาวมีส่วนละเอียด ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 85 % มีขนาด 1 - 2 μ ทำให้ส่วนผสมยึดหยุ่นตัวสูง ขณะที่ปูนซีเมนต์จะกระด้างกว่าและมี Honey Combing มาก

Lottman (34) พบว่าการใช้น้ำปูนขาวในลักษณะผสมน้ำเคลือบผิวมวลรวมจะดีกว่าใช้น้ำปูนขาวผสมเป็นส่วนละเอียดโดยตรง ทดลองหาอัตราส่วนแรงดึง พิจารณาในการปรับปรุงความต้านทานการหลุดลอก ปริมาณปูนขาวที่ใช้สูงสุด ประมาณ 1.4 % และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวสูงขึ้น

Gilmore et al (36) พบว่าปูนซีเมนต์เมื่อใช้ร่วมกับสารผสมยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพ โดยเพิ่มค่าแรงดึงในตัวอย่างสภาพอัดตัว และเพิ่มค่าอัตราส่วนแรงดึงซึ่ง ไม่สามารถใช้สารผสมชนิดใดชนิดหนึ่งในปริมาณนี้ได้ และพบว่าสารผสมกับปูนซีเมนต์ที่ทดลองให้แนวโน้มในการเพิ่มค่า TSR เหมือนกัน สารผสมทำให้อายุความล้าของตัวอย่างสภาพอัดตัวมากกว่าตัวอย่างสภาพแห้งที่ไม่ใส่สารผสม