

## บทที่ 4

## ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล

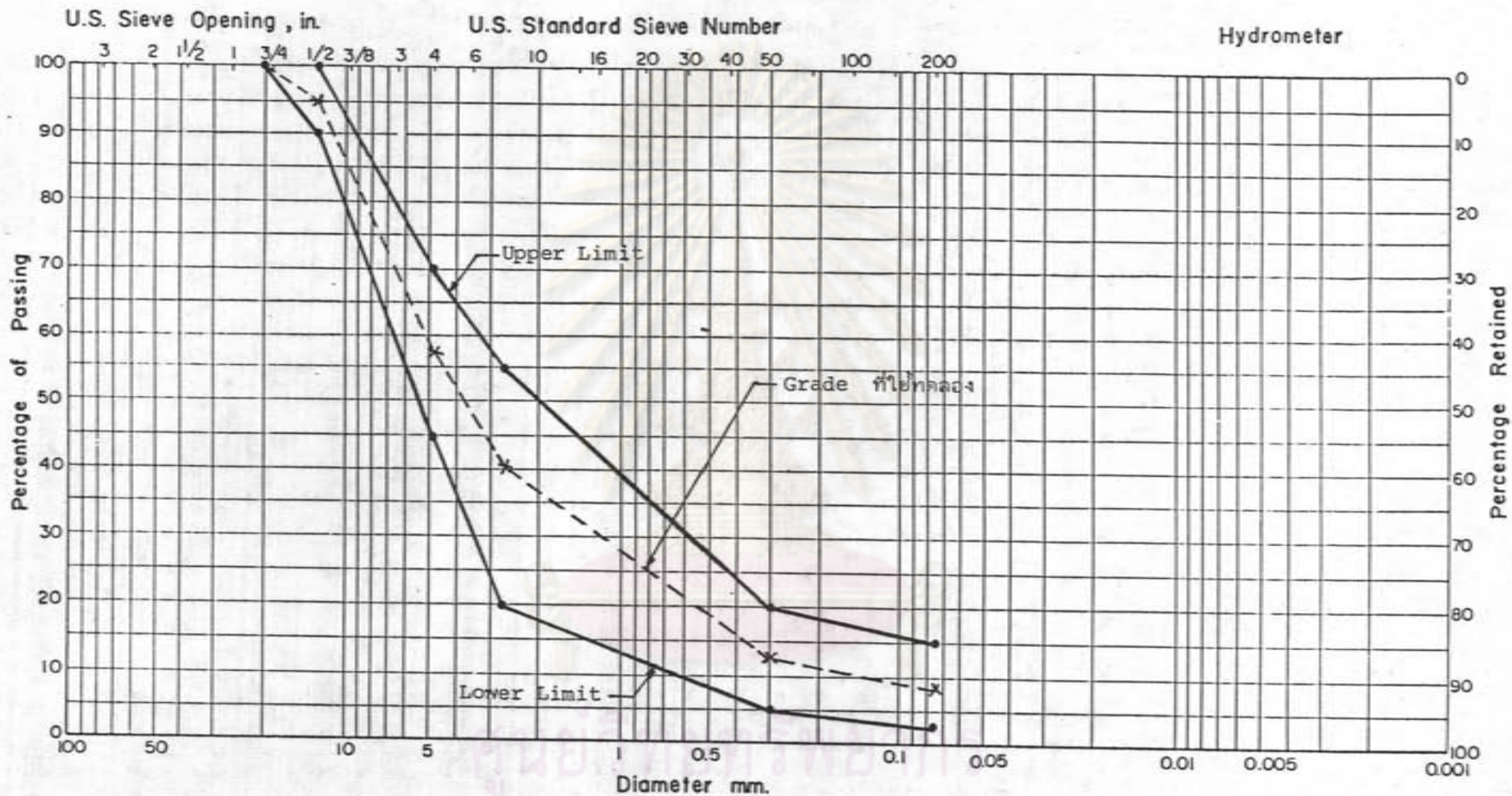
## 4.1 ผลการทดลองวัสดุมวลรวม

## 4.1.1 ผลการทดลองวัสดุมวลรวมในการออกแบบส่วนผสม

วัสดุมวลรวมที่นำมาใช้ในการออกแบบส่วนผสม การเรียงขนาดได้เลือกจากข้อกำหนดของ Gradation ที่ใช้กับยางมะตอยน้ำ ตามตารางที่ 3.1 การเรียงขนาดจะเป็นแบบ Dense Grade ที่ใช้ทำผิวจราจรและทาง สำหรับตารางที่ 4.1 ได้แสดงถึงขนาดของวัสดุมวลรวมที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ และรูปที่ 4.1 แสดงการเรียงขนาดของวัสดุที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ขนาดใหญ่สุดของวัสดุมวลรวมที่ใช้มีขนาด 3/4"

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของวัสดุมวลรวมที่นำมาใช้สำหรับส่วนผสมแบบเย็น (Cold Mix)

ขนาดตะแกรง	ข้อกำหนด	การเรียงขนาด ที่ใช้	% วัสดุมวลรวม ที่ค้างตะแกรง
3/4"	100	100	0
1/2"	90 - 100	95	5
No. 4	45 - 70	57.5	37.5
No. 8	25 - 55	40.0	17.5
No. 50	5 - 20	12.5	27.5
No. 200	2 - 15	8.5	4.0



ASTM	GRAVEL	COARSE SAND	FINE SAND	SILT	CLAY
------	--------	-------------	-----------	------	------

รูปที่ 4.1 แสดงการเรียงขนาดของวัสดุรวมที่ใช้ในการทดลอง



#### 4.1.2 ผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวม

สำหรับวัสดุมวลรวมที่ใช้มีส่วนประกอบอยู่ 3 อย่าง คือ

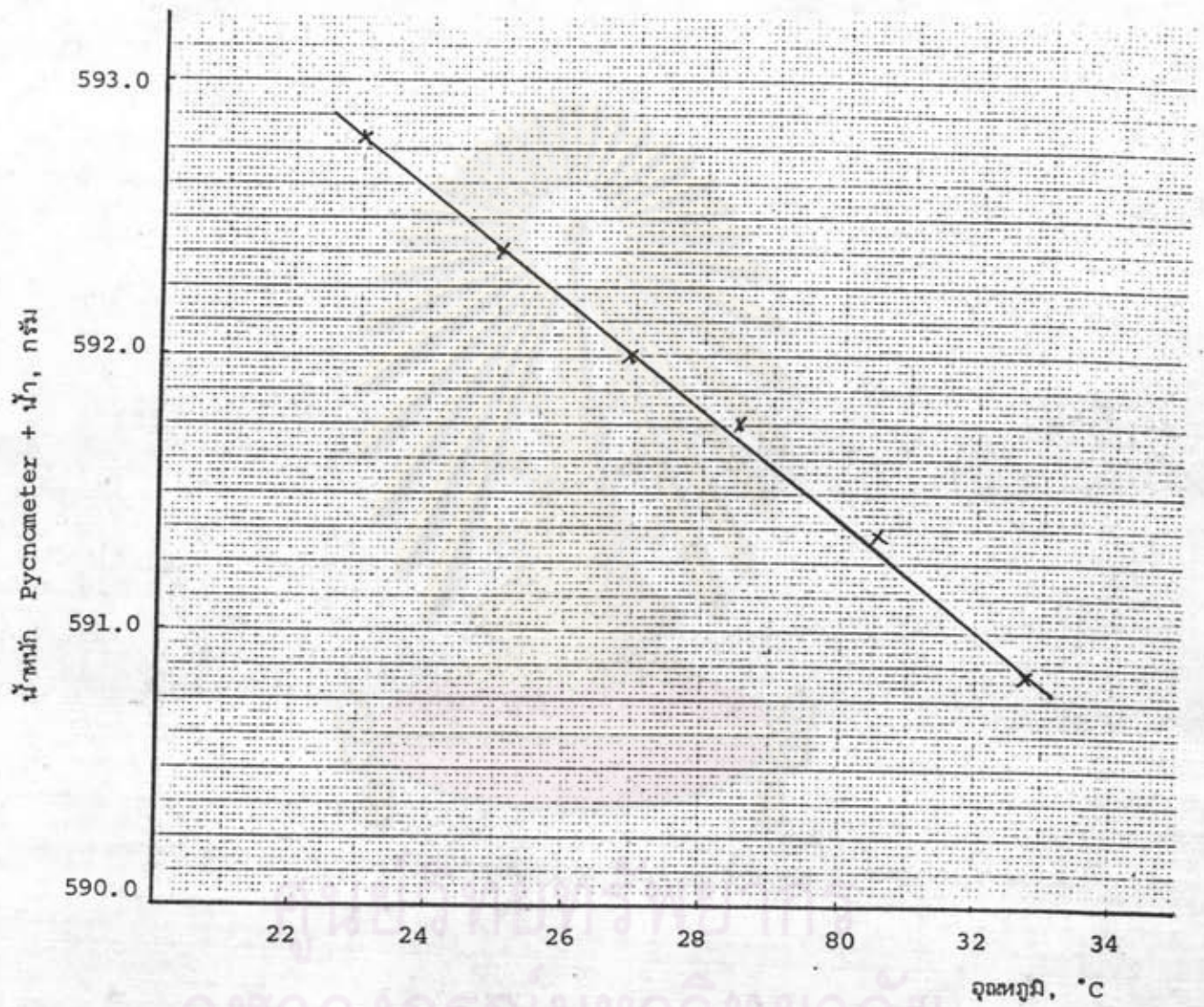
- 1) วัสดุมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)
- 2) วัสดุมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)
- 3) ฝุ่น (Filler)

จากตารางที่ 4.2, 4.3, 4.4 แสดงถึงวิธีการหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมชนิดหยาบ, ละเอียด และฝุ่น ตามลำดับ จะได้ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมหยาบเท่ากับ 2.677, ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมละเอียดเท่ากับ 2.642 และค่าความถ่วงจำเพาะของฝุ่น เท่ากับ 2.631 (ดูภาคผนวก ข.3, ข.4)

#### ตารางที่ 4.2 การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมหยาบ

ตัวอย่าง	น้ำหนักวัสดุแห้ง $W_S$ (กรัม)	น้ำหนักวัสดุสภาพ SSD $W_D$ (กรัม)	น้ำหนักวัสดุในน้ำ $W_W$ (กรัม)	Bulk sp. gr. $= \frac{W_S}{W_D - W_W}$
1	301.50	302.80	190.30	2.68
2	293.70	294.60	184.72	2.673
			ค่าเฉลี่ย	2.677





รูปที่ 4.2 การปรับน้ำหนักขวด Pycnometer ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 การปรับปริมาตรของ Pycnometer ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จำนวนครั้งที่	น้ำหนัก Pycnometer น้ำ (กรัม)	อุณหภูมิ (°C)
1	59.280	23.0
2	592.38	25.0
3	592.00	26.9
4	591.75	28.5
5	591.25	30.5
6	590.82	32.6

เมื่อได้ความถ่วงจำเพาะของวัสดุรวมแต่ละชนิดแล้ว ก็นำค่ามาหาค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของวัสดุรวม (Bulk Specific gravity of blend aggregate) โดยที่

$$\text{น้ำหนักของวัสดุรวมหยาบ} = 5 + 37.5 + 17.5 = 60 \%$$

$$\text{น้ำหนักของวัสดุรวมละเอียด} = 27.5 + 4 = 31.5 \%$$

$$\text{น้ำหนักของวัสดุที่เล็กกว่า 0.074 มม. (ฝุ่น)} = 8.5 \%$$

∴ ค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของวัสดุรวม

$$= \frac{1}{\frac{0.60}{2.677} + \frac{0.315}{2.642} + \frac{0.085}{2.631}}$$

$$= 2.662$$

4.1.3 ผลการทดลองหาความสึกหรอ เป็นการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุรวมหยาบ

โดยใช้เครื่อง Los Angeles (ภาคผนวก ข.5) จากตารางที่ 4.5

แสดงค่าความสึกหรอ มีค่าเท่ากับ 23.61 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์กำหนดไม่เกิน 45 เปอร์เซ็นต์



ตารางที่ 4.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมละเอียด และฝุ่น

ตัวอย่าง	น้ำหนักวัสดุแห้ง $W_s$ (กรัม)	อุณหภูมิ T	Sp.Gr น้ำ Gt ที่ T°c	น้ำหนักขวด + วัสดุ + น้ำ ถึงขีด $W_1$ (กรัม)	น้ำหนักขวด + น้ำ ถึงขีด $W_2$ (กรัม)	Sp. Gr. $= \frac{W_s G_1}{W_s - W_1 + W_2}$	Avg Sp.Gr
วัสดุมวลรวม ละเอียด	1	25.6	0.9969	680.31	592.30	2.671	2.669
		25.1	0.9971	680.31	592.40	2.667	
	2	26.3	0.9969	675.56	592.15	2.593	2.615
		25.8	0.9970	676.52	592.25	2.637	
						ค่าเฉลี่ย	2.642
	ฝุ่น	1	24.8	0.9972	629.79	592.45	2.610
25.3			0.9970	629.98	592.38	2.640	
2		25.7	0.9970	629.05	592.30	2.610	2.637
		26.3	0.9969	629.17	592.15	2.640	
						ค่าเฉลี่ย	2.631

ตารางที่ 4.5 การทดสอบความลึกหรือของวัสดุผสมรวม

ขนาดตะแกรง		น้ำหนักของตัวอย่าง, กรัม	
Passing	Retained on	1	2
3/4"	1/2"	2,500	2,500
1/2"	3/8"	2,500	2,500
เกรตของตัวอย่าง		B	B
จำนวนลูกเหล็กกลม		11	11
จำนวนรอบการหมุน		500	500
น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12, กรัม		3,760	3,879
น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 12, กรัม		1,240	1,121
เปอร์เซ็นต์ความลึกหรือ, %		24.8	22.42
ค่าเฉลี่ยความลึกหรือ, %		23.61	

4.1.4 ผลการทดสอบหาค่า Sand Equivalent เป็นการหาฝุ่นหรือวัสดุประเภทดินเหนียวที่ผสมอยู่ในวัสดุผสมรวม ผลการทดสอบมีดังนี้ (ภาคผนวก ข.6)

$$\text{Clay reading} = 5.10$$

$$\text{Sand reading} = 2.80$$

$$\text{Sand Equivalent (SE.)} = \frac{\text{Sand reading}}{\text{Clay reading}} \times 100$$

$$= 55$$

ดังนั้นค่า Sand Equivalent มีค่าเท่ากับ 55 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์กำหนดคือไม่น้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์

4.1.5 ผลการทดสอบการเคลือบ และการหลุดร่อน (Stripping) สำหรับยางมะตอยน้ำ จะทำการทดสอบด้วยมวลรวมแห้ง (ตามภาคผนวก ย.7) ผลการทดสอบทั้งของยาง HFMS-2 และยาง MS-2 ปรากฏว่ายางทั้ง 2 ชนิดสามารถเคลือบกับวัสดุมวลรวมได้ 100 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ สามารถเคลือบได้ทุกเม็ด และเมื่อนำเอาไปแช่น้ำเป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง จะปรากฏว่า ยาง HFMS-2 จะสามารถเคลือบได้ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ และยาง MS-2 สามารถเคลือบได้ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ายาง HFMS-2 สามารถทนต่อการหลุดร่อนได้ดีกว่ายาง MS-2

#### 4.2 ผลการทดสอบยาง HFMS-2 และยาง MS-2

การทดสอบยางมะตอยน้ำนี้จะทดสอบโดยใช้มาตรฐานของ ASTM D977 สำหรับยาง HFMS-2 และยาง MS-2 สกัดอยู่ในยางมะตอยน้ำประเภทแตกตัวเร็วปานกลาง ผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

4.2.1 การทดสอบหาความหนืด โดยใช้ Saybolt Furol เป็นการวัดความหนืดเป็นวินาที โดยใช้ตัวอย่าง 60 มิลลิลิตร ไหลผ่านรูกลมเล็ก ๆ (Orifice) ที่อุณหภูมิ 25°C สำหรับยาง HFMS-2 ค่าความหนืดเท่ากับ 208 และยาง MS-2 ค่าความหนืดเท่ากับ 169 ซึ่งทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 อยู่ในเกณฑ์กำหนด

ตารางที่ 4.6 การทดสอบหาค่าความหนืด ด้วยวิธี Saybolt Furol ของยาง HFMS-2 และยาง MS-2

ตัวอย่างที่	ข้อกำหนด ASTM D977	ยาง HFMS-2		ยาง MS-2	
		วินาที	ค่าเฉลี่ย	วินาที	ค่าเฉลี่ย
1	ไม่น้อยกว่า 100 วินาที	230	208	162	169
2	ไม่น้อยกว่า 100 วินาที	185		175	



4.2.2 การทดสอบด้วยวิธีการกลั่น (Distillation) เป็นการหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ผสมรวมอยู่ที่เป็นองค์ประกอบของยางมะตอยน้ำ และหาเนื้อยาง (Residue) ส่วนที่เป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ จากผลการทดลอง ยาง HFMS-2 มีน้ำ 20.89 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง 73.0 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เป็นน้ำมัน 3.0 เปอร์เซ็นต์ สำหรับยาง MS-2 มีน้ำ 25.74 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง 65.0 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เป็นน้ำมัน 5.94 เปอร์เซ็นต์ ทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 มีเปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางอยู่ในเกณฑ์กำหนด คือไม่น้อยกว่า 65.0 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐาน ASTM D977

ตารางที่ 4.7 การทดสอบด้วยวิธีการกลั่น (Distillation) ของยาง HFMS-2 และยาง MS-2

การทดลองด้วยวิธีการกลั่น	ยาง HFMS-2	ยาง MS-2
1) หาปริมาณน้ำในยางมะตอยน้ำ, %		
น้ำหนักของหม้อกลั่น, กรัม	747.00	644.50
น้ำหนักของตัวอย่างเดิม, กรัม (A)	67.00	50.50
น้ำหนักของหม้อกลั่น + น้ำหนักตัวอย่าง, กรัม	814.00	695.00
ปริมาตรของน้ำใน trap, ม.ล (B)	14.00	13.00
∴ ปริมาณน้ำ, % = $\frac{B}{A} \times 100$	20.89	25.74
2) หาปริมาณเนื้อยางและน้ำมัน, %		
น้ำหนักของหม้อกลั่น, กรัม (A)	987.00	987.00
น้ำหนักของหม้อกลั่น + น้ำหนักตัวอย่างก่อนที่จะกลั่น, กรัม (B)	1,187.00	1,187.00
น้ำหนักของตัวอย่าง, กรัม (C) = B - A	200	200
น้ำหนักของหม้อกลั่น + น้ำหนักตัวอย่างหลังจากการกลั่น, กรัม (D)	1,133.00	1,117.00
น้ำหนักเนื้อยางที่เหลือ, กรัม (E) = D - A	146.00	130.00
ปริมาตรของน้ำมัน, ม.ล (F)	6.00	11.90
∴ ปริมาณเนื้อยาง, % = $\frac{E}{C} \times 100$	73.00	65.00
∴ ปริมาณน้ำมัน, % = $\frac{F}{C} \times 100$	3.00	5.94

4.2.3 การทดสอบส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Residue) ที่ได้จากการกลั่น ซึ่งจะทำให้การทดสอบหาคุณสมบัติดังต่อไปนี้

4.2.3.1 การทดสอบหาค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐาน (Penetration) เป็นการหาความชันเหลวของวัสดุพียูนิฟส์ โดยใช้น้ำหนักของเข็มมาตรฐาน 100 กรัม แล้วปล่อยให้เข็มให้จมลงในวัสดุพียูนิฟส์ในเวลา 5 วินาที ที่อุณหภูมิ 25°C ค่า Penetration จะคิดส่วนที่จมของเข็มมาตรฐานลงในเนื้อแอสฟัลท์ โดยที่ 1 Penetration เท่ากับ 1 ใน 10 มิลลิเมตร ผลการทดสอบเนื้อยางของยาง HFMS-2 มีค่า Penetration เท่ากับ 154 และเนื้อยางของยาง MS-2 มีค่า Penetration เท่ากับ 149 ทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 มีค่า Penetration อยู่ในเกณฑ์กำหนด 100-200 Penetration

ตารางที่ 4.8 การทดสอบหาค่า Penetration ของเนื้อยาง (Residue) ของยาง HFMS-2 และยาง MS-2

ชนิดของยาง	เข็มมาตรฐานหนัก 100 กรัม, 5 วินาที ที่ 25°C			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย
HFMS-2	152	149	161	154
MS-2	158	147	143	149

4.2.3.2 การทดสอบหาค่าการดึงยึดเป็นเส้น (Ductility) เป็นการหาความสามารถในการยืดตัวของแอสฟัลท์ โดยการทดสอบแรงดึงตัวอย่างที่อยู่ในแบบมาตรฐานภายใต้อุณหภูมิมาตรฐาน 25°C ด้วยอัตราความเร็ว 5.0 ซม. ต่อวินาที ถึงจนกระทั่งแอสฟัลท์ยืดเหมือนเส้นด้าย (Thread) และแยกขาดออกจากกัน ความยาวที่เริ่มขาดออกจากกันเป็นเซนติเมตร คือความสามารถในการยืดตัว (Ductility) ของแอสฟัลท์ สำหรับเนื้อยาง HFMS-2 มีค่า Ductility เท่ากับ 55 และเนื้อยาง MS-2 มีค่า Ductility เท่ากับ 58 ซึ่งทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 มีค่าการดึงยึดเป็นเส้นอยู่ในเกณฑ์กำหนด



คือไม่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.9 การทดสอบการดึงยืดเป็นเส้น (Ductility) ของเนือยาง HFMS-2 และเนือยาง MS-2

ชนิดของยาง	อัตราความเร็ว 5.0 ซม./นาที ที่ 25°C			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย
HFMS-2	62	50	52	55
MS-2	53	58	63	58

4.2.3.3 การทดสอบการละลาย (Solubility) ในสารทำละลายอินทรีย์ เป็นการวัดความบริสุทธิ์ (purity) ของแอสฟัลท์ โดยนำเอาแอสฟัลท์มาละลายในคาร์บอนเตตระคลอไรด์ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ ในส่วนประกอบของแอสฟัลท์จะมีทั้งที่ละลายและส่วนที่ไม่ละลายในคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ส่วนที่ละลายจะแสดงถึงส่วนประกอบที่พิกทมาที่เป็นตัวเชื่อมประสาน แต่ส่วนที่ไม่ละลายจะแสดงถึงความไม่บริสุทธิ์ของแอสฟัลท์ ได้แก่ พวกเกลือ หรือสิ่งอื่นที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ จากผลการทดลองความสามารถในการละลายของเนือยาง HFMS-2 มีค่าเท่ากับ 99.23 % และเนือยาง MS-2 มีค่าเท่ากับ 99.55 % อยู่ในเกณฑ์กำหนดคือไม่ต่ำกว่า 97.5 เปอร์เซ็นต์

4.2.3.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเนือยาง (Residue) โดยใช้ Pycnometer ค่าความถ่วงจำเพาะ เป็นอัตราส่วนของมวลเนือยางที่อุณหภูมิ 77°F (25°C) ต่อมวลของน้ำที่มีปริมาตรเท่ามวลเนือยาง จากการทดสอบเนือยาง HFMS-2 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.999 และเนือยาง MS-2 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.000

ตารางที่ 4.10 การทดสอบหาค่าการละลาย (Solubility) ในคาร์บอนเตตระคลอไรด์  
ของเนื้อยาง HFMS-2 และเนื้อยาง MS-2

การละลายของแอสฟัลท์ใน คาร์บอนเตตระคลอไรด์	ยาง HFMS-2		ยาง MS-2	
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักของขวด Conical, กรัม	100.17	101.06	100.17	98.97
น้ำหนักของขวด Conical + น้ำหนักตัวอย่าง, กรัม	101.47	102.35	102.56	101.0
น้ำหนักของตัวอย่าง, กรัม	1.30	1.29	2.39	2.03
น้ำหนักของถ้วย + สารใยหิน, กรัม	18.17	17.66	19.01	18.19
น้ำหนักของถ้วย + สารใยหิน + วัสดุ ที่ไม่ละลายใน $CCL_4$ , กรัม	18.18	17.68	19.02	18.20
น้ำหนักของวัสดุที่ไม่ละลายใน $CCL_4$ , กรัม	0.01	0.01	0.01	0.01
น้ำหนักของวัสดุที่ละลายใน $CCL_4$ , กรัม	1.29	1.28	2.38	2.02
เปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลท์ที่ละลายใน $CCL_4$	99.23	99.22	99.58	99.51
ค่าเฉลี่ย % ของแอสฟัลท์ที่ละลายใน $CCL_4$	99.23 %		99.55 %	



ตารางที่ 4.11 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเนื้อยาง (Residue) HFMS-2 และเนื้อยาง MS-2

ค่าความถ่วงจำเพาะ ทดลองที่ อุณหภูมิ 25°C	ยาง HFMS-2		ยาง MS-2	
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักของ Pycnometer เปล่า, กรัม	31.47	34.22	32.63	34.20
น้ำหนักของ Pycnometer + น้ำที่ 25°C, กรัม	56.31	58.93	57.36	58.31
น้ำหนักของน้ำใน Pycnometer เปล่า, กรัม	24.67	24.71	24.73	24.11
น้ำหนักของ Pycnometer + ยาง- มะตอย, กรัม	44.43	45.93	44.05	46.76
น้ำหนักของยางมะตอย, กรัม	12.96	11.71	11.42	12.56
น้ำหนักของ Pycnometer + ยางมะตอย + น้ำที่ 25°C, กรัม	56.16	58.88	57.48	58.17
น้ำหนักของน้ำที่เติมเข้าไป, กรัม	11.73	12.95	13.43	11.41
น้ำหนักของน้ำที่ถูกยางมะตอยแทนที่, กรัม	12.93	11.76	11.30	12.70
ค่าความถ่วงจำเพาะ	1.002	0.996	1.011	0.989
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะ	0.999		1.000	

4.2.3.5 การทดสอบความข้นเหลวของวัสดุปฏิกิริยาลูกปัดหนึ่ง โดยใช้วิธี Float Test ส่วนมากจะใช้กับพวกยางมะตอยเหลว การทดสอบนำเอาตัวอย่างมาใส่ใน Collar แล้วทำให้เป็นที่จุดอุณหภูมิ 5°C ประมาณ 30 นาที แล้วนำเอา Collar ไปชนติดกับ จานลอย และนำไปลอยในน้ำจุดอุณหภูมิ 50°C สับเวลาดังแต่เริ่มลอยจนน้ำเข้าไปในจาน จะเป็นค่า Float Test

ผลการทดลอง ยาง HFMS-2 มีค่า Float Test มากกว่า 1,200 วินาที เกินเกณฑ์กำหนด สำหรับยาง MS-2 มีค่า Float Test เท่ากับ 900 วินาที

4.2.3.6 การทดสอบโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 (Sieve Test) เพื่อเป็นการหาปริมาณของแอสฟัลท์ซีเมนต์ที่ใช้ทำยางมะตอยน้ำ มีการสับตัวกันเป็นก้อน หรือเม็ด ค่อนข้างใหญ่ ซึ่งจะทำให้ไปอุดตันในเครื่องมือ ทำให้การเคลือบกับวัสดุมวลรวมไม่สม่ำเสมอ การทดสอบจะนำเอาตัวอย่างยางมะตอยน้ำ 1,000 กรัม รินผ่านตะแกรงเบอร์ 20 สำหรับ ยางมะตอยน้ำแบบแอนไอออนิก (Anionic) ให้ล้างตะแกรงด้วยสารละลายโซเดียมโอเลต (Mild Sodium Oleate Solution) หลังจากนั้นก็นำเข้าอบให้แห้งในตู้อบ แล้วหาเปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลท์ที่ค้างบนตะแกรง

4.2.3.7 การทดสอบเสถียรภาพการเก็บรักษา (Storage Stability Test) เป็นการหาความคงตัวในการเก็บรักษาของยางมะตอยน้ำ โดยการทดสอบการแยกชั้น (Settlement) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยตั้งตัวอย่างทดสอบในกระบอกแก้ว 500 ม.ล. 2 กระบอก โดยไม่ให้มีการรบกวน หลังจากนั้นก็นำเอาส่วนบนและส่วนล่างอย่างละ 50 กรัม มาอบให้เพื่อให้มีน้ำระเหย แล้วหาเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างระหว่างแอสฟัลท์ที่ส่วนบนและล่าง

ผลการทดลอง ยาง HFMS-2 มีความแตกต่างกัน 0.010 เปอร์เซ็นต์ และยาง MS-2 มีความแตกต่างกัน 0.019 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์กำหนด ไม่เกิน 1.0 เปอร์เซ็นต์



## สรุปผลการทดลองยาง HFMS-2 และยาง MS-2

การทดลอง	ยาง HFMS-2	ยาง MS-2
1. ความหนืดด้วยวิธี Saybolt Furol, 25°C, วินาที	208	169
2. Storage Stability Test 24 hr, %	0.01	0.019
3. เนื้อยางที่ได้จากการกลั่น, %	73.00	65.00
น้ำที่ผสมอยู่, %	20.89	25.74
4. การจมตัวเข็มมาตรฐาน, 25°C 100 กรัม, 5 วินาที	154	149
5. การดึงปิดเป็นเส้น, 25°C 5 ซม./นาที, ซม.	55	58
6. Solubility ในคาร์บอน-เตตระคลอไรด์, %	99.23	99.55
7. ค่าความถ่วงจำเพาะ	0.999	1.000
8. Float Test, 60°C, วินาที	มากกว่า 1,200	900

4.3 ผลการออกแบบส่วนผสมของวัสดุมวลรวมกับยาง HFMS-2 และยาง MS-2 แบบผสม  
เป็น

โดยทำการนำเอาวัสดุมวลรวมตาม Gradation ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 เตรียมตัวอย่างแบบผสมเป็น (ตามภาคผนวก จ) การทดลองจะเตรียมตัวอย่างเป็น 3 ชุด แล้วทิ้งไว้ในแบบ (Mold) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือ 72 ชั่วโมง เมื่อต้องการหาปริมาณ น้ำที่พอเหมาะแก่ส่วนผสมให้ทิ้งไว้ในแบบ 24 ชั่วโมง และเมื่อต้องการหาปริมาณแอสฟัลท์อีมีลขึ้น ที่พอเหมาะแก่ส่วนผสมให้ทิ้งไว้ในแบบ 72 ชั่วโมง สำหรับชุดแรกจะเป็นการหาปริมาณน้ำที่พอเหมาะแก่ส่วนผสม โดยดูที่ค่าเสถียรภาพ เมื่อได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมแล้ว ก็ใช้ปริมาณน้ำไป เตรียมตัวอย่างอีก 2 ชุดที่เหลือ ดังนั้นชุดที่ 2 จะนำไปหาค่าเสถียรภาพ และเข้าสู่อุณหภูมิ ปริมาณ น้ำที่เหลือ ชุดที่ 3 จะนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 4 วัน กลับคืนเมื่อแช่ไว้ 2 วัน จึงนำมาหาค่า เสถียรภาพ และเข้าสู่อุณหภูมิ ปริมาณน้ำที่เหลือเช่นเดียวกัน การพิจารณาจะดูที่ค่าเสถียรภาพสูง ลูต เมื่อทำการแช่ตัวอย่างไว้ในน้ำ (Soaked) เป็นเวลา 4 วัน

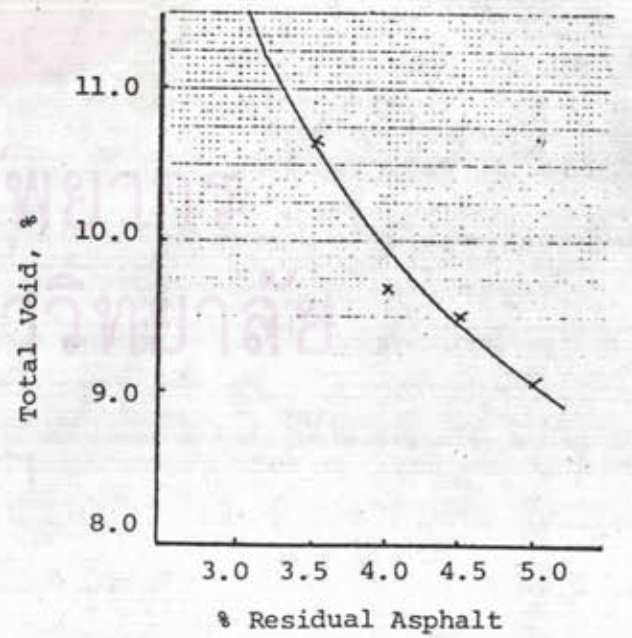
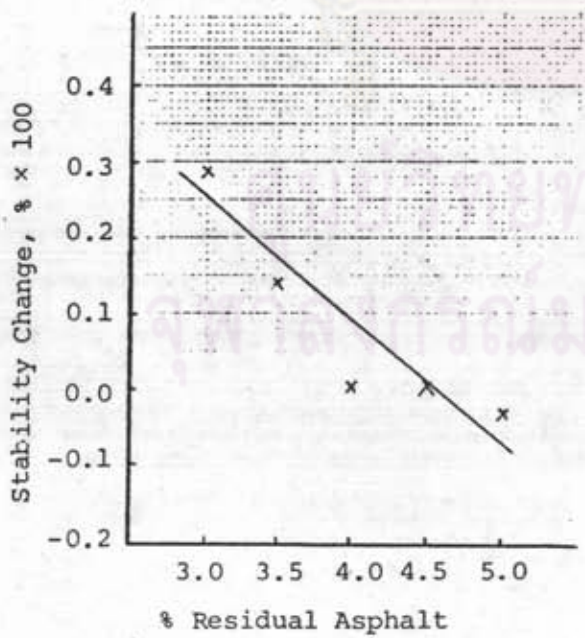
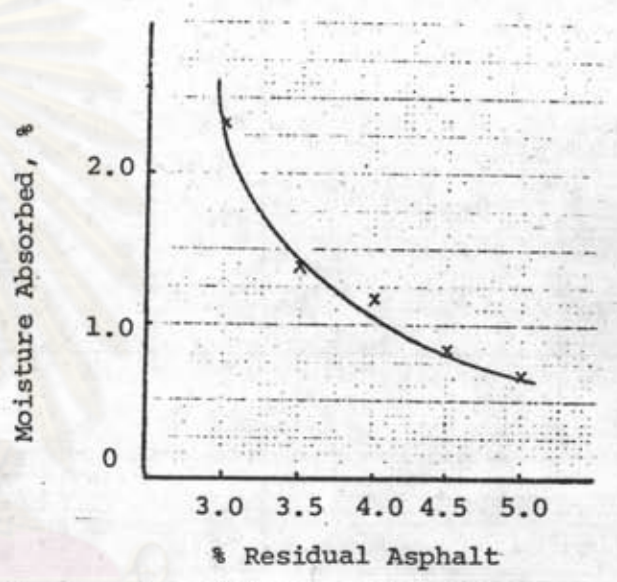
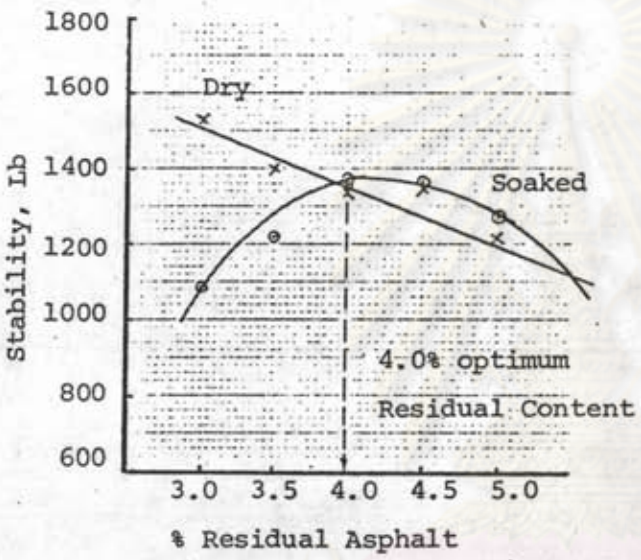
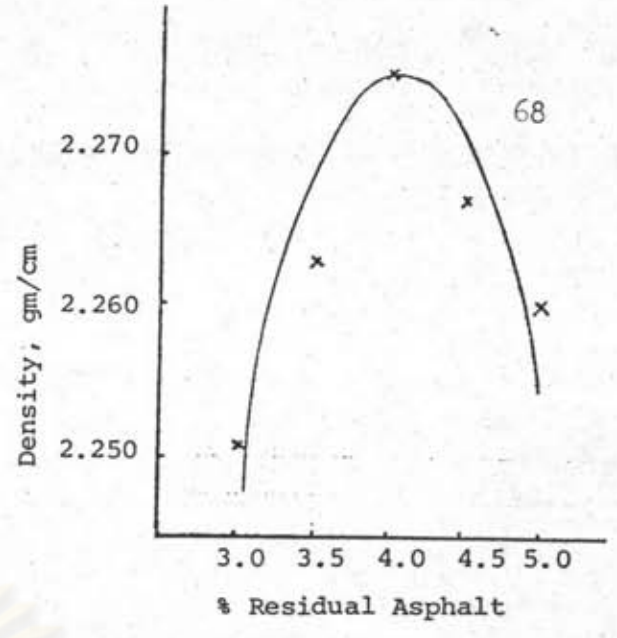
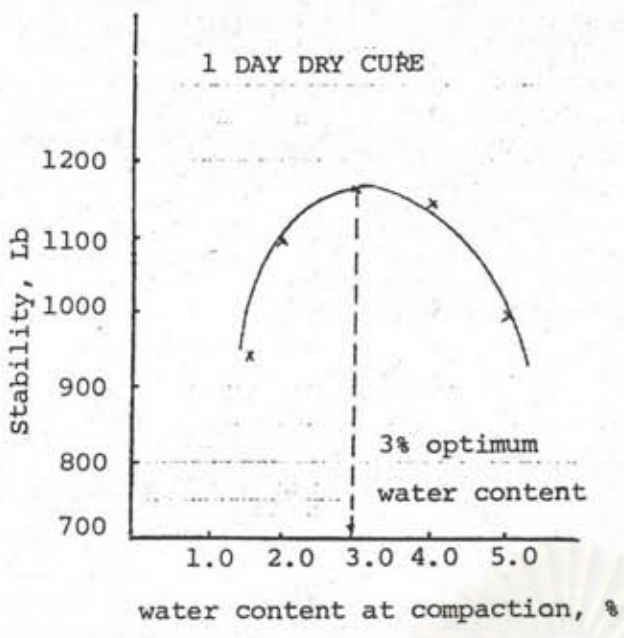
การแสดงผลจะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.3, 4.4 จะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง

- ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพกับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด (ตัวอย่างทิ้ง ไว้ในแบบ 1 วัน)
- ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ปริมาณเนื้อยางล้น ๆ กับหน่วยน้ำหนักของส่วนผสม (Density)
- ค) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ปริมาณเนื้อยางล้น ๆ กับค่าเสถียรภาพ (ทั้งที่ แช่น้ำและไม่แช่น้ำ)
- ง) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ ปริมาณเนื้อยางล้น ๆ กับการดูดซึมความชื้น (Moisture Absorbed)
- จ) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ปริมาณเนื้อยางล้น ๆ กับช่องว่างทั้งหมด (Total Void)

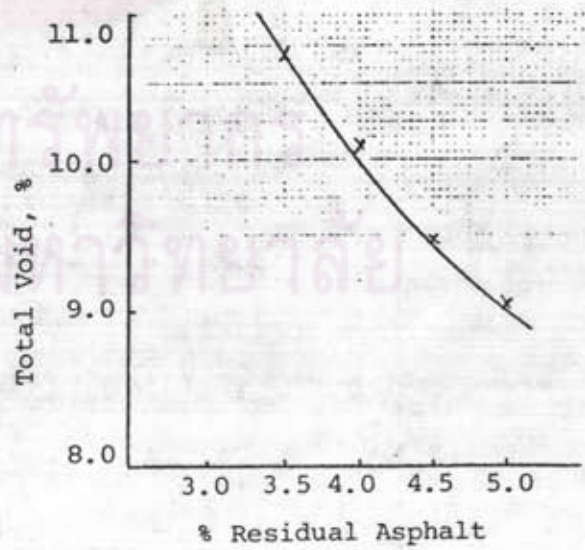
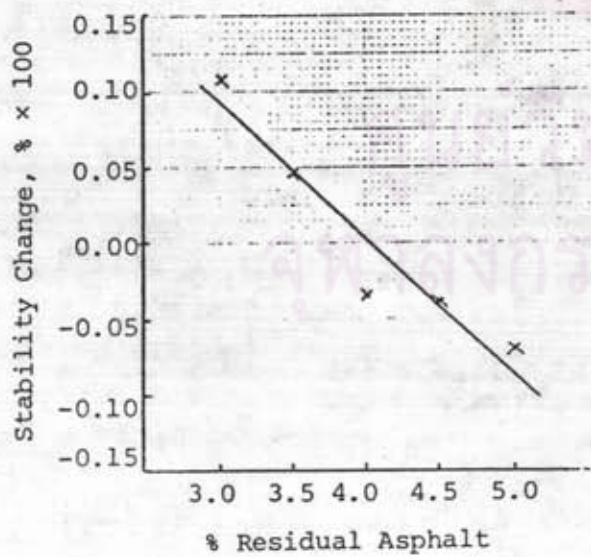
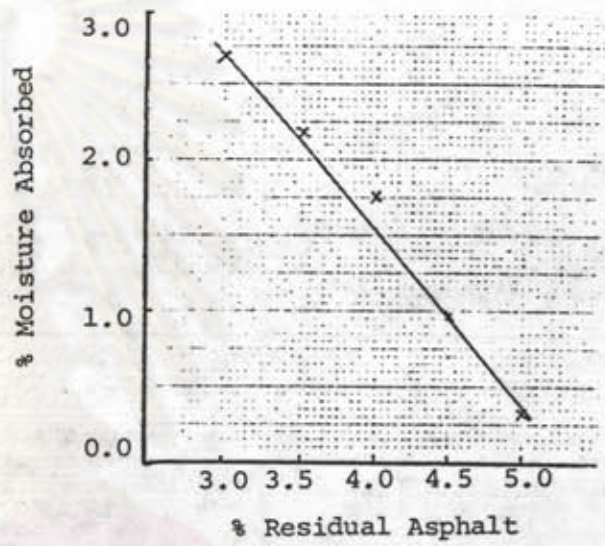
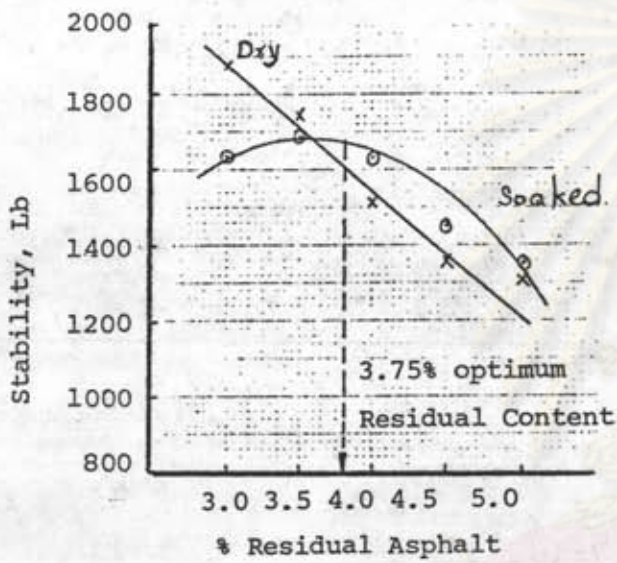
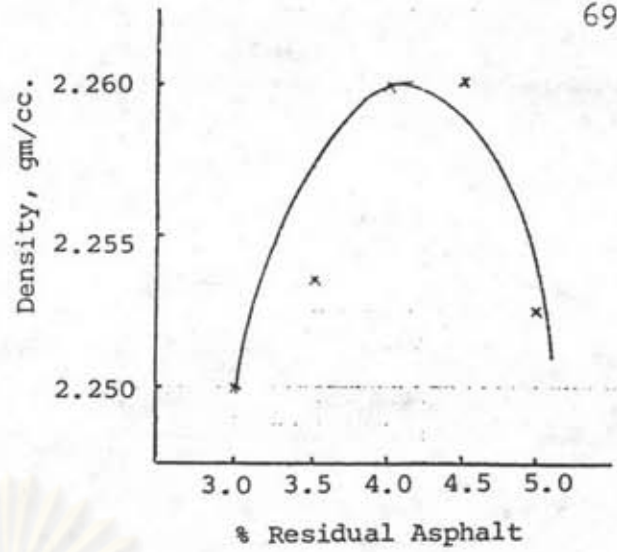
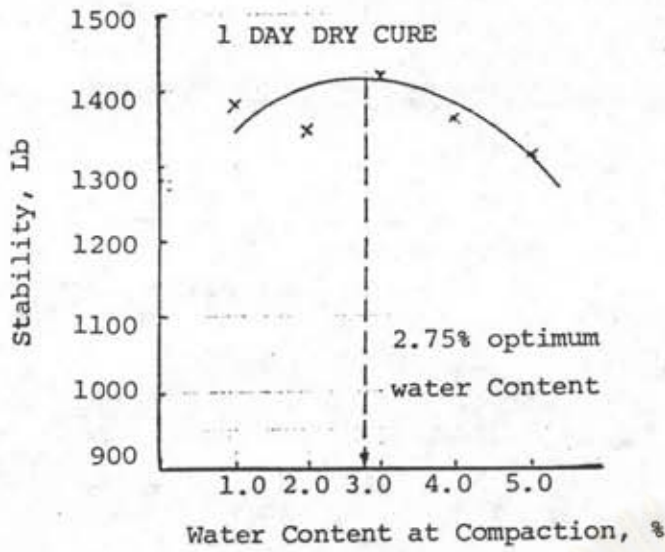
ผลการทดลองหาส่วนผสมของวัสดุมวลรวมกับยางมะตอยน้ำแบบ HFMS-2 และยาง มะตอยน้ำแบบ MS-2 มีดังนี้

ยางมะตอยน้ำแบบ HFMS-2





รูปที่ 4.3 แสดงผลการออกแบบส่วนผสมของวัสดุรวมกับยาง HFMS-2



รูปที่ 4.4 แสดงผลการออกแบบส่วนผสมของวัสดุรวมกับยาง MS-2



- 1) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของส่วนผสมมีค่าเท่ากับ 3.0 เปอร์เซ็นต์
- 2) ความหนาแน่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.276 กรัม/ลบ.ซม. ที่ปริมาณเนื้อยาง 4.0 เปอร์เซ็นต์
- 3) ค่าเสถียรภาพสูงสุดเมื่อทำการแช่น้ำ (Soaked) มีค่าเท่ากับ 1385 ปอนด์ ที่ปริมาณเนื้อยาง 4.0 เปอร์เซ็นต์

จากปริมาณเนื้อยางที่มีค่าเสถียรภาพสูงสุดเมื่อทำการแช่น้ำนี้ นำเอาปริมาณเนื้อยางนี้ไปตรวจสอบกับค่าการดูดซึมความชื้น (Moisture Absorbed) จะมีค่าเท่ากับ 1.1, ค่าการสูญเสียเสถียรภาพ (loss stability) มีค่าเท่ากับ 8.0 % และค่าช่องว่างทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 9.8 %

#### ยางมะตอยน้ำแบบ MS-2

- 1) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของส่วนผสมมีค่าเท่ากับ 2.75 เปอร์เซ็นต์
- 2) ความหนาแน่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.260 กรัม/ลบ.ซม. ที่ปริมาณเนื้อยาง 4.0 เปอร์เซ็นต์
- 3) ค่าเสถียรภาพสูงสุดเมื่อทำการแช่น้ำ (Soaked) มีค่าเท่ากับ 1680 ปอนด์ ที่ปริมาณเนื้อยาง 3.75 เปอร์เซ็นต์

จากปริมาณเนื้อยางที่มีค่าเสถียรภาพสูงสุด เมื่อทำการแช่น้ำนี้ นำเอาปริมาณเนื้อยางนี้ไปตรวจสอบกับค่าการดูดซึมความชื้น (Moisture Absorbed) จะมีค่าเท่ากับ 1.8, ค่าการสูญเสียเสถียรภาพมีค่าเท่ากับ 2.0 % และค่าช่องว่างทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 10.1 %

หมายเหตุ รายละเอียดของข้อมูลตามภาคผนวก ข ตารางที่ ผ.5 - ผ.10

จากผลการทดลองของยาง HFMS-2 และยาง MS-2 จะพบว่า ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมมีค่า 3.0% และ 2.75 % สำหรับยาง HFMS-2 และยาง MS-2 ตามลำดับ ส่วนปริมาณเนื้อยางที่เหมาะสมของยาง HFMS-2 มีค่าเท่ากับ 4.0 % แต่เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของยางมะตอยน้ำ HFMS-2 แล้วจะใช่เท่ากับ  $\frac{4.0}{0.73} = 5.48$  % และปริมาณเนื้อยางที่เหมาะสมของยาง MS-2 มีค่าเท่ากับ 3.75 % ซึ่งเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของยางมะตอยน้ำ MS-2 แล้วจะใช่เท่ากับ  $\frac{3.75}{0.65} = 5.77$  % (0.73 และ 0.65 เป็นเปอร์เซ็นต์ของเนื้อยาง HFMS-2 และยาง MS-2 ที่ได้จากการกลั่น)

จากการตรวจสอบจากค่าปริมาณเนื้อยางที่เหมาะสมกับค่าแฟคเตอร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าการดูดซึมความชื้น สำหรับยาง HFMS-2 และยาง MS-2 มีค่า 1.1 % และ 1.8 % ตามลำดับ อยู่ในเกณฑ์ซึ่งจากข้อกำหนดของยางมะตอยน้ำจะต้องมีค่าไม่เกิน 4 % ความสัมพันธ์ของค่าการดูดซึมความชื้นก็อยู่ในลักษณะตรงตามที่ได้กำหนดไว้ กล่าวคือ เมื่อปริมาณเนื้อยางเพิ่มขึ้นจะไปทำการแทรกช่องว่างภายในส่วนผสมมากขึ้น การดูดซึมความชื้นก็จะลดน้อยลงตามลำดับ และด้วยเหตุนี้เองจะทำให้ช่องว่างภายในมีค่าลดลงด้วย (จากกราฟรูปที่ 4.3 และ 4.4) สำหรับช่องว่างที่เกิดขึ้นของทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 มีค่า 9.8 % และ 10.1 % ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าเกินข้อกำหนด 1-2 % ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากปริมาณของฝุ่นที่อยู่ในส่วนผสมน้อย ซึ่งเรายังสามารถเพิ่มฝุ่นได้อีก แต่จะต้องไม่เกินกำหนด สำหรับค่าเสถียรภาพที่ได้จากยาง HFMS-2 และยาง MS-2 จะอยู่ในช่วงใช้กับการจราจรแบบปานกลาง ซึ่งจะมีค่าเสถียรภาพ 500 ปอนด์ขึ้นไป

#### 4.4 ผลการเตรียมตัวอย่างที่จะทดสอบ

สำหรับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ Repeated Triaxial Load นั้นตามที่ได้กำหนดไว้จะใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว (10.16 ซม.) และสูง 8 นิ้ว (20.32 ซม.) แต่ในทางปฏิบัติจริง ๆ แล้วนั้น ขนาดของตัวอย่างที่ทำการเตรียมขึ้นจะมีขนาดได้ไม่ตรงกับที่กำหนดเท่าใดนัก ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการผสมที่เป็นทั้งวัสดุผสมรวม และยางมะตอยน้ำ รวมทั้งการบดตัวของส่วนผสมเมื่อทำการบดอัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงได้มีการกำหนดอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเอาไว้คือจะต้องอยู่ในช่องระหว่าง 1.75 - 2.00 และอัตราส่วนนี้ก็จะส่งผลต่อความชะลูด (Slenderness) ของตัวอย่างด้วยคือ ถ้าอยู่ในช่วงนี้แล้ว ความชะลูดจะไม่มีผลเสียต่อกำลังของตัวอย่าง

ส่วนวิธีการในการบดอัดจะใช้วิธีที่ได้มาตรฐานคงที่ (Static Load) โดยจะให้น้ำหนักแก่ส่วนผสมทั้งด้านล่างและด้านบนของถ่วงผสมที่อยู่ในแบบ (Mold) การให้น้ำหนักได้กำหนดไว้  $2500 \pm 100$  psi (ปอนด์/ตารางนิ้ว) กดลงที่ส่วนผสมแอสฟัลท์เป็นเวลา 1 นาที (ตามภาคผนวก ฉ) หลังจากนั้นก็นำไปทำการบ่ม (Curing) ที่อุณหภูมิปกติเป็นเวลา 1 วัน แล้วจึงนำเอาออกจากแบบด้วยเครื่องดันตัวอย่าง (Extruders) แล้วทำการบ่มต่ออีกให้ครบ 14 วัน แล้วจึงนำมาวัดขนาดหาความหนาแน่น และอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง



ตารางที่ 4.12 การเตรียมตัวอย่างขนาด  $\phi 4'' \times 8''$  ของยาง HFMS-2 โดยเติมเถ้า 3.00 % และปริมาณเนื้อยาง 4.0 % ตามที่ออกแบบไว้

เบอร์	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)	สูง (ซม.)	สูง/เส้นผ่าศูนย์กลาง	ความหนาแน่น (Bulk Density) กรัม/ลบ.ซม.
HF-S1	10.69	18.51	1.732	2.511
HF-S2	10.73	19.08	1.779	2.655
HF-S3	10.71	19.62	1.832	2.683
HF-S4	10.75	19.65	1.828	2.700
HF-S5	10.70	19.49	1.821	2.678
HF-S6	10.73	20.37	1.898	2.769
HF-S7	10.68	19.43	1.819	2.613
HF-S8	10.75	19.53	1.817	2.627
HF-S9	10.67	19.58	1.835	2.705
HF-S10	10.69	19.35	1.810	2.612
HF-S11	10.74	18.80	1.750	2.411
HF-S12	10.70	20.13	1.881	2.509
HF-S13	10.73	19.16	1.786	2.686
HF-S14	10.74	18.63	1.735	2.617
HF-S15	10.69	18.25	1.707	2.741
HF-S16	10.71	10.09	1.782	2.768
HF-S17	10.73	18.83	1.775	2.731
HF-S18	10.70	18.91	1.767	2.667
HF-S19	10.76	19.76	1.836	2.531
HF-S20	10.71	19.81	1.849	2.536
HF-S21	10.69	19.76	1.848	2.433

ตารางที่ 4.13 การเตรียมตัวอย่างขนาด  $\phi 4'' \times 8''$  ของยาง MS-2 โดยเติมถั่ว  
2.75 % และปริมาณเนื้อยาง 3.75 % ตามที่ได้ออกแบบไว้

เบอร์	เส้นผ่า ศูนย์กลาง (ซม.)	สูง (ซม.)	สูง/เส้นผ่า- ศูนย์กลาง	ความหนาแน่น (Bulk Density) กรัม/ลบ.ซม.
MS-S1	10.73	19.90	1.855	2.521
MS-S2	10.66	20.52	1.925	2.536
MS-S3	10.72	20.21	1.885	2.568
MS-S4	10.68	20.03	1.875	2.521
MS-S5	10.61	20.32	1.945	2.589
MS-S6	10.71	20.03	1.870	2.560
MS-S7	10.63	19.87	1.869	2.562
MS-S8	10.70	19.21	1.795	2.611
MS-S9	10.71	20.25	1.891	2.589
MS-S10	10.71	19.60	1.830	2.579
MS-S11	10.68	19.42	1.818	2.585
MS-S12	10.77	19.76	1.835	2.637
MS-S13	10.68	19.89	1.862	2.397
MS-S14	10.71	19.78	1.847	2.561
MS-S15	10.69	20.21	1.880	2.601
MS-S16	10.70	20.11	1.879	2.588
MS-S17	10.73	20.41	1.902	2.592
MS-S18	10.71	19.76	1.845	2.600
MS-S19	10.66	20.16	1.891	2.572
MS-S20	10.71	19.89	1.857	2.611
MS-S21	10.72	20.11	1.876	2.542



กลาง จากตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.13 ได้แสดงผลของการเตรียมตัวอย่างที่ได้จาก HFMS-2 และยาง MS-2 ซึ่งปรากฏว่าตัวอย่างที่ทำการเตรียมขึ้นมามีขนาดอยู่ในเกณฑ์กำหนด (รายละเอียดดูภาคผนวก ค)

#### 4.5 ผลการทดลอง Repeated Triaxial Test

ในการทดลอง Repeated Triaxial Compression Test จะใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว และสูง 8 นิ้ว โดยนำเอาตัวอย่างที่หุ้มด้วยยาง Rubber membrane ไปยึดต่อกับฐานของ Triaxial Cell เพื่อไม่ให้ตัวอย่างขยับเคลื่อนที่ เมื่อติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเอา Triaxial Cell ไปเข้าเครื่อง Servopulser ที่ติดตั้งโปรแกรมขนาดของคลื่น, ความถี่ และจำนวนรอบเรียบร้อยแล้ว โดยใช้ความถี่ 1 รอบต่อวินาที มี Amplitude 0 ถึง -100 เปอร์เซ็นต์ และใช้จำนวนรอบ 200 ครั้ง ซึ่งได้มีผู้ทดลองแล้วว่าค่าการบิดหดจะค่อนข้างคงที่ หลังจาก 200 ครั้งไปแล้ว ซึ่งการบิดหด (Deformation) สามารถวัดได้โดยการติด LVDT's ที่ฐานของ Triaxial Cell และที่ฐานนี้จะเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ ส่วนบนของเครื่อง Servopulser จะอยู่กับที่ การทดลองนี้จะใช้ Repeated Load ทางด้านฐาน ตามความถี่ที่กำหนดไว้ (ดูรูป 3.17-3.18)

การทดลองเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ นั้น แบ่งออกเป็นดังนี้

4.5.1 กำหนดความถี่ และลักษณะของน้ำหนักที่กระทำคงที่ คือ 1 รอบต่อวินาที โดยแต่ละน้ำหนักที่กด จะจดการบิดหดตัวหลังจากกระทำต่อตัวอย่างทดลอง 200 ครั้งแล้ว การทดลองชุดแรกของยาง HFMS-2 ที่อุณหภูมิ 20°C, 40°C และ 60°C โดยที่ใช้ความตึงด้านข้าง ( $\sigma_3$ ) = 0 psi และยาง MS-2 ชุดแรกก็ทำเช่นเดียวกันกับยาง HFMS-2 (รายละเอียดของข้อมูล ดูภาคผนวก ง ตารางที่ ผ.13 - ผ.15 และตารางที่ ผ.19 - ผ.21) การทดลองชุดที่ 2 ทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 ทดลองแบบชุดแรก แต่ใช้ความตึงด้านข้าง ( $\sigma_3$ ) = 15 psi (รายละเอียดของข้อมูลดูภาคผนวก ง ตารางที่ ผ.16 - ผ.18 และตารางที่ ผ.22 - ผ.24) ผลที่ได้จะเป็นตามสัมพันธ์ระหว่างความตึง (Stress) ต่อความเครียด (Strain) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (20°C, 40°C และ 60°C)

4.5.2 กำหนดความถี่ และลักษณะของน้ำหนักกระทำคงที่คือ 1 รอบต่อวินาที โดยเร่งน้ำหนักที่กด และความตึงรอบข้างไปเรื่อย ๆ และทุกครั้งที่เพิ่มน้ำหนัก และความตึง

ด้านหัว จดค่าการปิดหดตัวของตัวอย่าง หลังจากน้ำหนักที่กระทำ 200 ครั้ง การเข้มน้ำหนัก เป็นไปตามตารางที่ 3.3 สำหรับยาง HFMS-2 และยาง MS-2 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C, 40°C และ 60°C จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Resilient Modulus ( $M_r$ ) กับค่า Bulk Stress (ผลบวกของ  $\sigma_1 + 2\sigma_3$ ) ผลการทดลองอยู่ในภาคผนวก ง, ตารางที่ ผ.31 - ผ.36)

4.5.3 กำหนดความถี่ และลักษณะของน้ำหนักกระทำคงที่คือ 1 รอบต่อวินาที ใช้ Deviator Stress คงที่ สำหรับการทดลองนี้ใช้ 15 psi (Stress ratio = 0.5) ความดันด้านข้าง 0 psi และจดค่าการปิดหดตัวของตัวอย่างตามจำนวนรอบที่กำหนด จนกระทั่งตัวอย่างเกิดความเสียหาย (Failure) ทดลองที่อุณหภูมิ 20°C, 40°C และ 60°C ของทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 จะได้ความสัมพันธ์ของค่าความเครียด Resilient Modulus กับจำนวนรอบในการกระทำซ้ำ ผลการทดลองอยู่ในภาคผนวก ง

การทดสอบหากำลังของตัวอย่าง โดยใช้น้ำหนักคงที่ (Static Load) กดตัวอย่างแบบแรงอัด จากการทดสอบตัวอย่างของทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 ปรากฏว่า น้ำหนักที่ทำให้เกิดความเสียหายเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 171 กิโลกรัม คิดเป็นความดันที่กดต่อตัวอย่าง (เอาพื้นที่หน้าตัดหาร) มีค่าเท่ากับ 30 psi

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



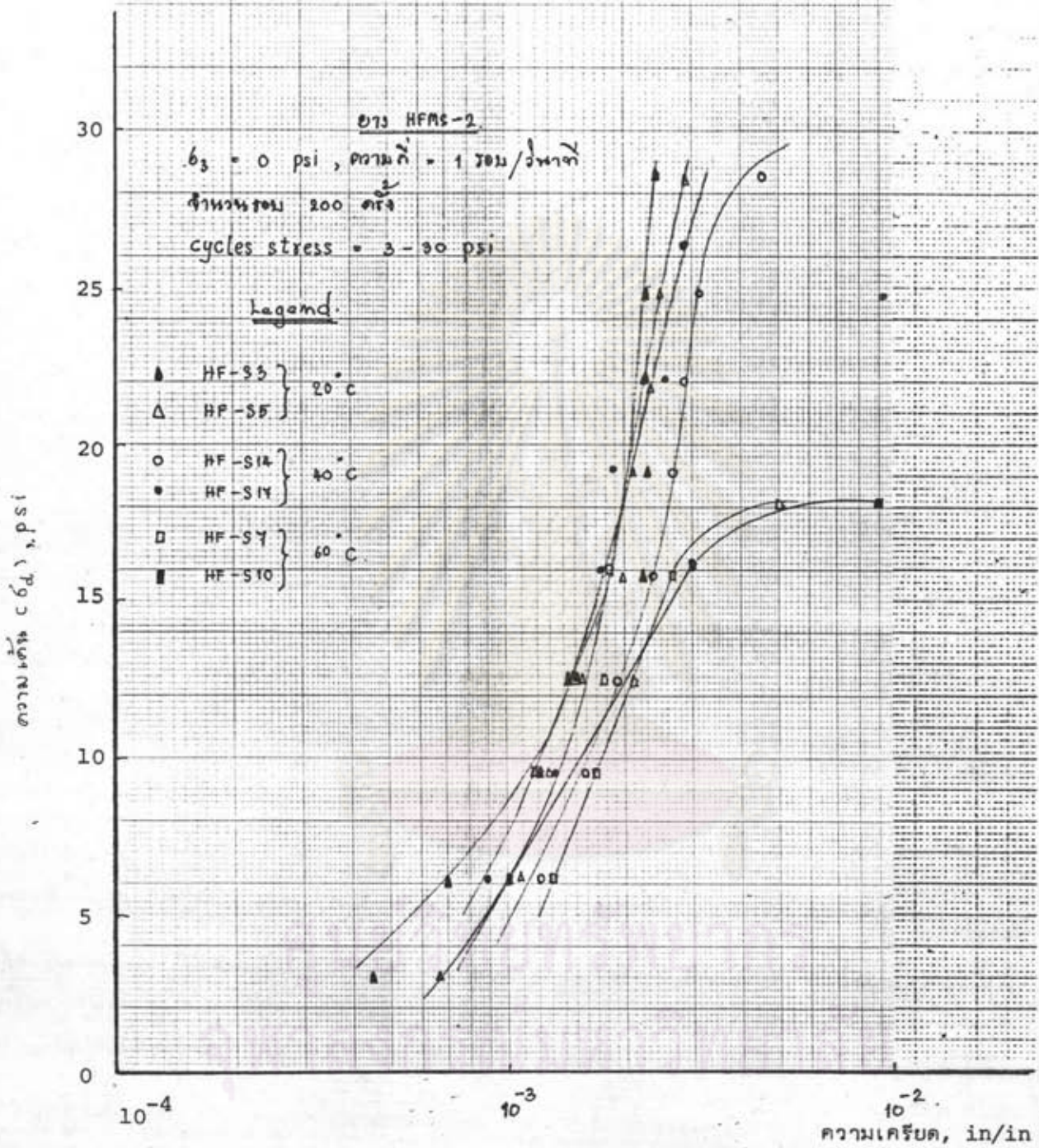
#### 4.6 การวิเคราะห์หัตถการทดลอง

##### 4.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) ต่อความเคียวต (Resilient Strain)

จากการทดลองเมื่อได้ผลตามตารางที่ น.13 - น.24 (ภาคผนวก ข) เมื่อนำมาแสดงใหม่ ในรูปกราฟโดยมี  $\sigma_d$  เป็นแกนตั้ง และ Resilient Strain เป็นแกนนอน จะได้ความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นต่อความเคียวต ซึ่งพบว่าลักษณะของเส้นกราฟเป็นเส้นตรง เว้นไว้เมื่อ  $\sigma_d$  เข้า ใกล้ Static Strength Failure จะเป็นช่วงที่เบี่ยงเบนไปจากเส้นตรงบ้าง เนื่องจากช่วงนี้เป็น Irrecoverble Strain และยังพบว่าค่า Resilient Modulus มีค่าลดลง กับ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สำหรับทั้งยางมะคดยน้ำทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้เนื่องจากธรรมชาติของยางมะคดยที่มี Stability ของมันลดลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

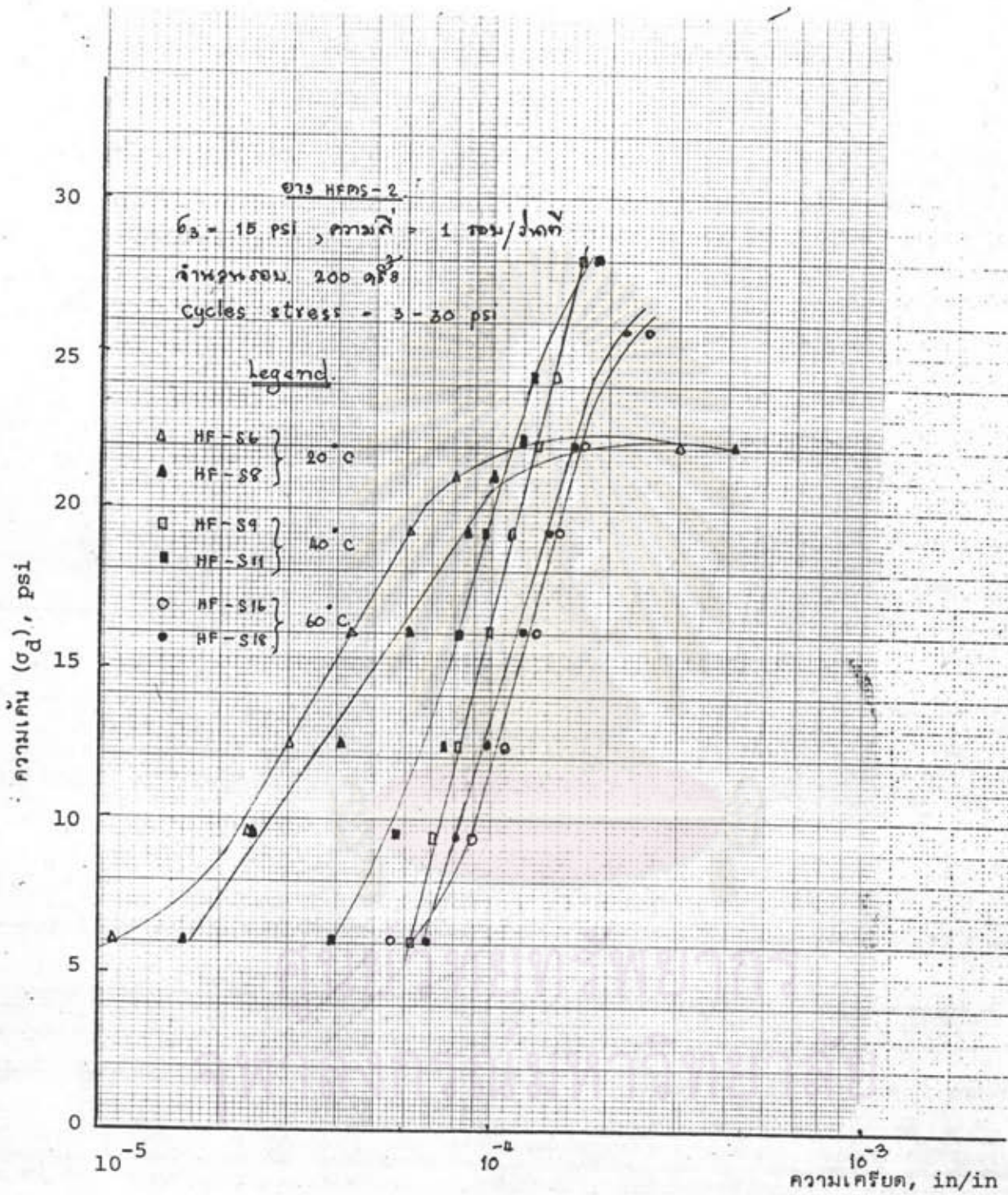
สำหรับยาง HFMS-2 แล้ว เมื่อมีความดันด้านข้าง ( $\sigma_3$ ) = 0 ลักษณะของเส้นกราฟอยู่ในรูป 4.5 และที่อุณหภูมิ 20°C มีค่า  $M_r = 12461$  psi อุณหภูมิ 40°C,  $M_r = 9942$  psi และอุณหภูมิ 60°C,  $M_r = 7607$  psi และเมื่อเพิ่มความดัน ด้านข้างเป็น 15 psi ลักษณะของเส้นกราฟจะอยู่ในรูป 4.6 ที่อุณหภูมิ 20°C มีค่า  $M_r = 25545$  psi, อุณหภูมิ 40°C  $M_r = 20592$  psi และอุณหภูมิ 60°C  $M_r = 15305$  psi ลักษณะของเส้นกราฟของทั้งแบบมีความดันด้านข้าง และไม่มีความดัน ด้านข้าง จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และจะเห็นได้ว่าอิทธิพลของ  $\sigma_3$  ทำให้ค่า Resilient Modulus มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันด้านข้าง และอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า Resilient Modulus เพิ่มขึ้นเมื่อ Confined Pressure เพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



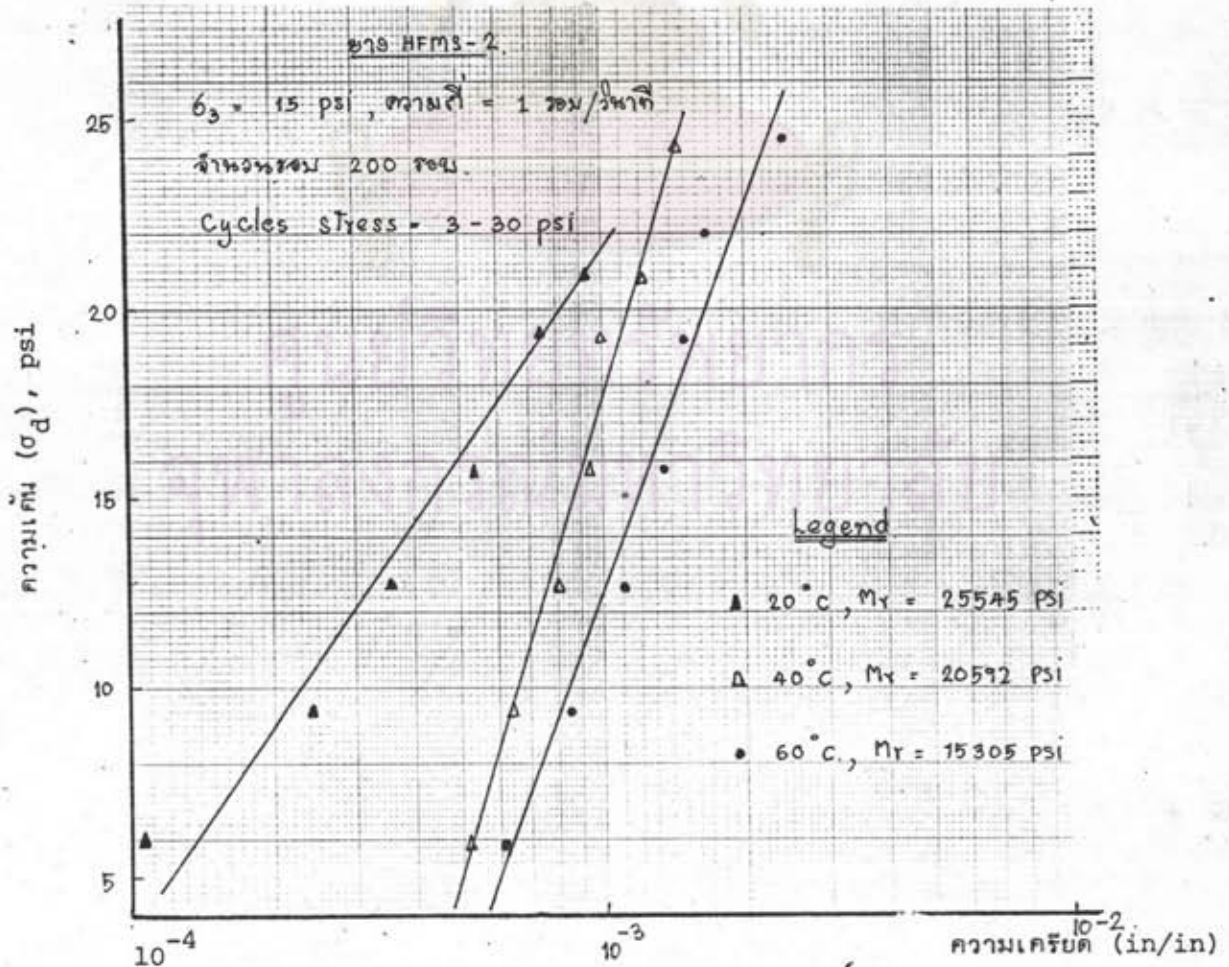
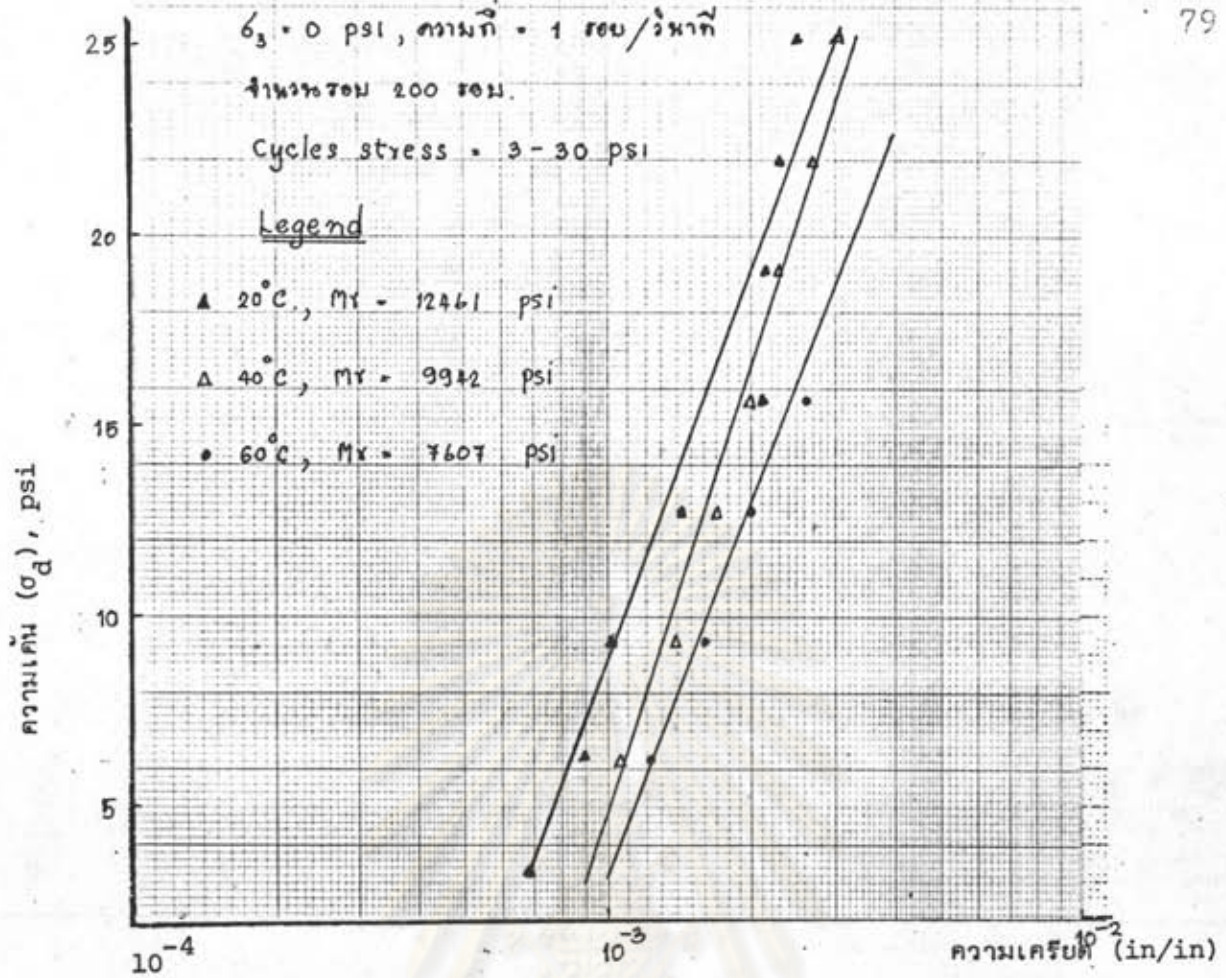
รูปที่ 4.5 แสดงความเค้น-ความเครียดของยาง HFMS-2 (ไม่มีความตึงตันข้าง)





รูปที่ 4.6 แสดงความเค้น-ความเครียดของขาง HFMS-2 (ความตึงตันข้าง 15 psi)





รูปที่ 4.7 แสดงความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยของขาง HFMS-2 แบบมีความตันทันข้าง และไม่มี ความตันทันข้าง

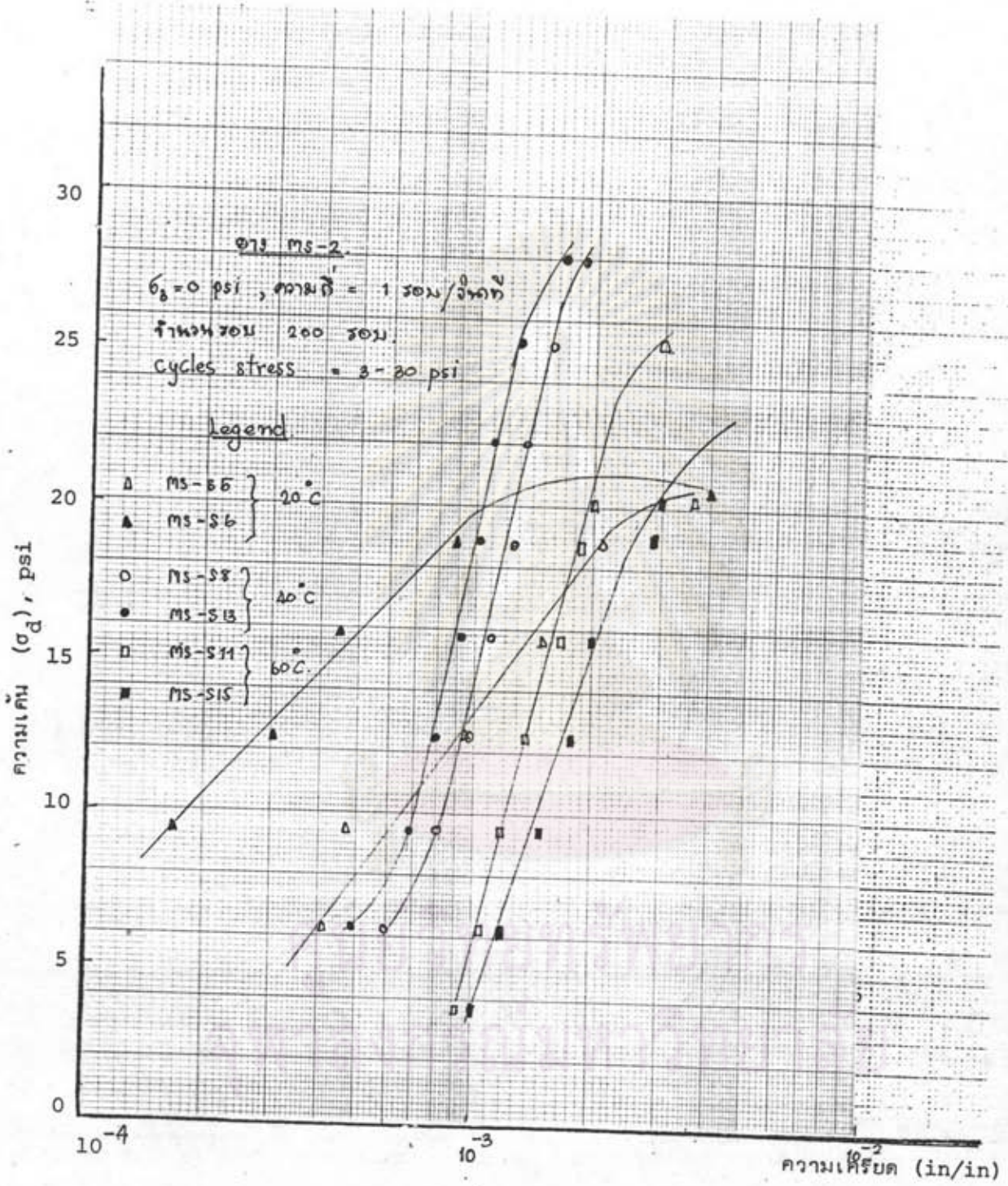


ตารางที่ 4.14 แสดงค่า Resilient Modulus ของยาง HFMS-2 ที่อุณหภูมิ 20°C, 40°C และ 60°C

การทดลอง	อุณหภูมิ, °C	ความตันทันข้าง psi	Mr, psi	ตัวอย่างทดลองที่
1	20	0	12461	HF-S3 , HF-S5
2	40	0	9942	HF-S14, HF-17
3	60	0	7607	HF-S7 , HF-S10
4	20	15	25545	HF-S6 , HF-S8
5	40	15	20592	HF-S11, HF-S9
6	60	15	15305	HF-S16, HF-S18

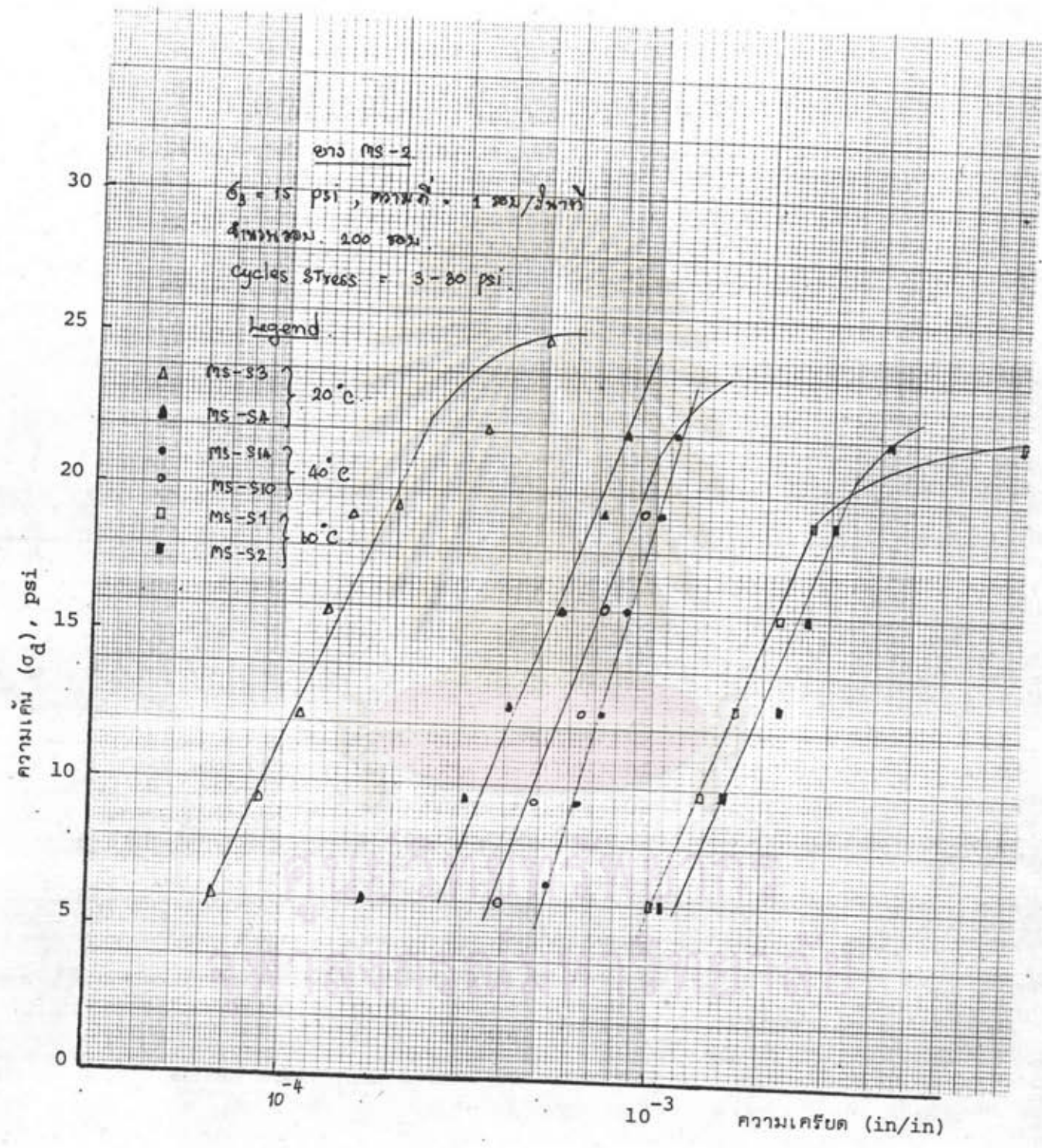
เมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างแบบมีความตันทันข้างและไม่มี ความตันทันข้าง จะเห็นว่าตัวอย่างที่มีความตันทันข้างจะมีความแข็งแรงกว่า โดยจะให้ค่า Resilient Modulus สูงขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากว่าความตันทันข้างจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวอย่างทดลอง ลดการบิดทนต์ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดการ failure ช้าลงกว่าแบบที่ไม่มี ความตันทันข้าง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอย่างมาดจะเป็นส่วนประกอบก็จะมี ความไวต่ออุณหภูมิ จะเกิดการอ่อนตัวลง Deformation จะเกิดขึ้นมากเมื่อมีน้ำหนักมากตไม่ว่าจะเป็นแบบคงที่ (Static) หรือน้ำหนักกระทำซ้ำ (Repeated Load) มากกระทำต่อตัวอย่างซึ่งการเกาะกันของยางมาดกับวัสดุรวมที่ทำให้เกิดความแข็งแรง เมื่ออย่างมาดเกิดการอ่อนตัว การเกาะกันก็จะลดความแข็งแรงลงด้วย

สำหรับยาง MS-2 ก็ทำการทดลองเช่นเดียวกับยาง HFMS-2. โดยทดลองที่อุณหภูมิ 20°C, 40°C และ 60°C ทั้งทั้งแบบมีความตันทันข้าง และไม่มี ความตันทันข้าง ลักษณะของเส้นกราฟอยู่ในรูปที่ 4.8 - 4.10 ผลการทดลองอยู่ในตารางที่ 4.15 จากกราฟก็พบว่าลักษณะเช่นเดียวกับลักษณะเส้นกราฟของยาง HFMS-2 แต่จะต่างกันที่ค่า Resilient Modulus



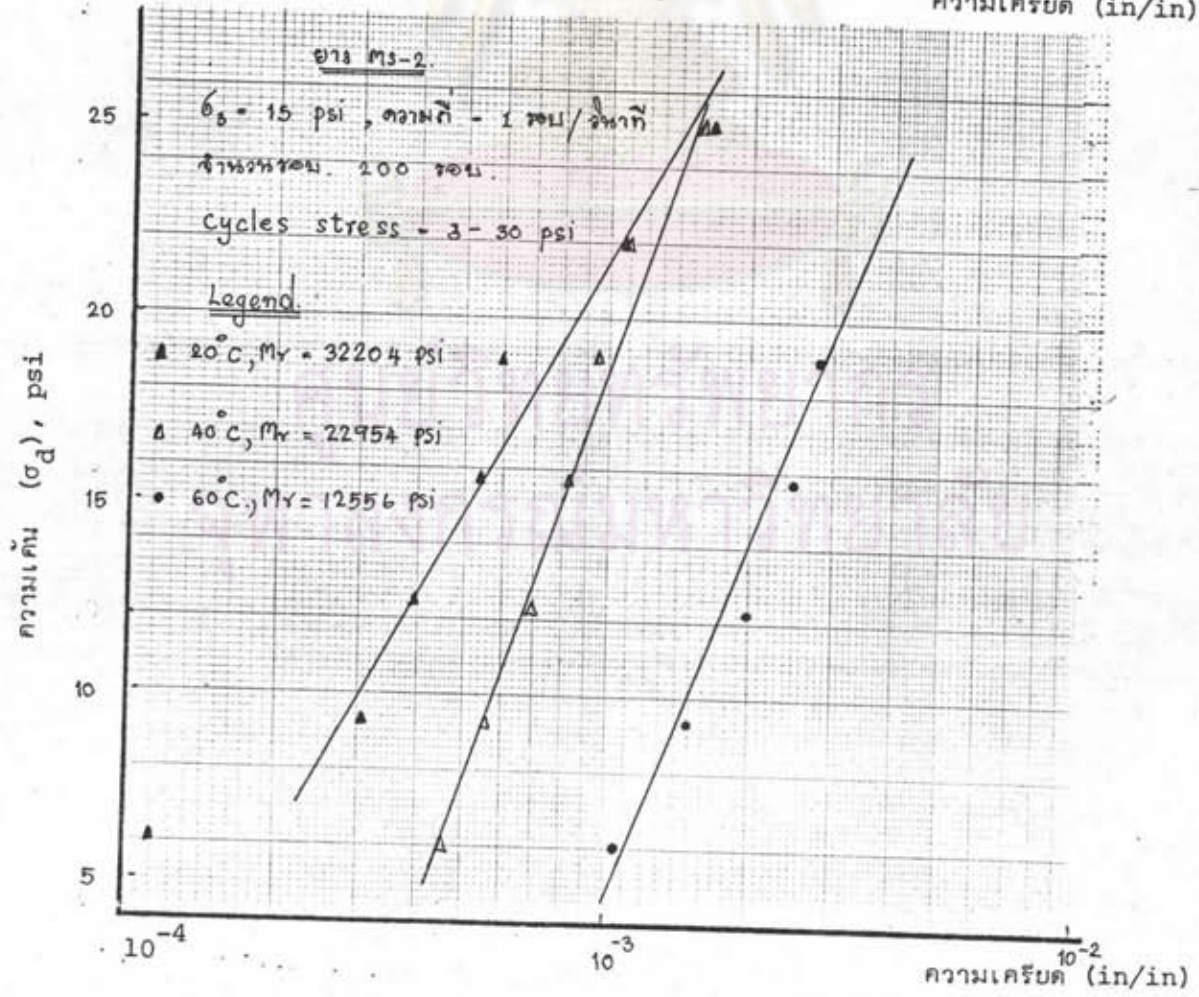
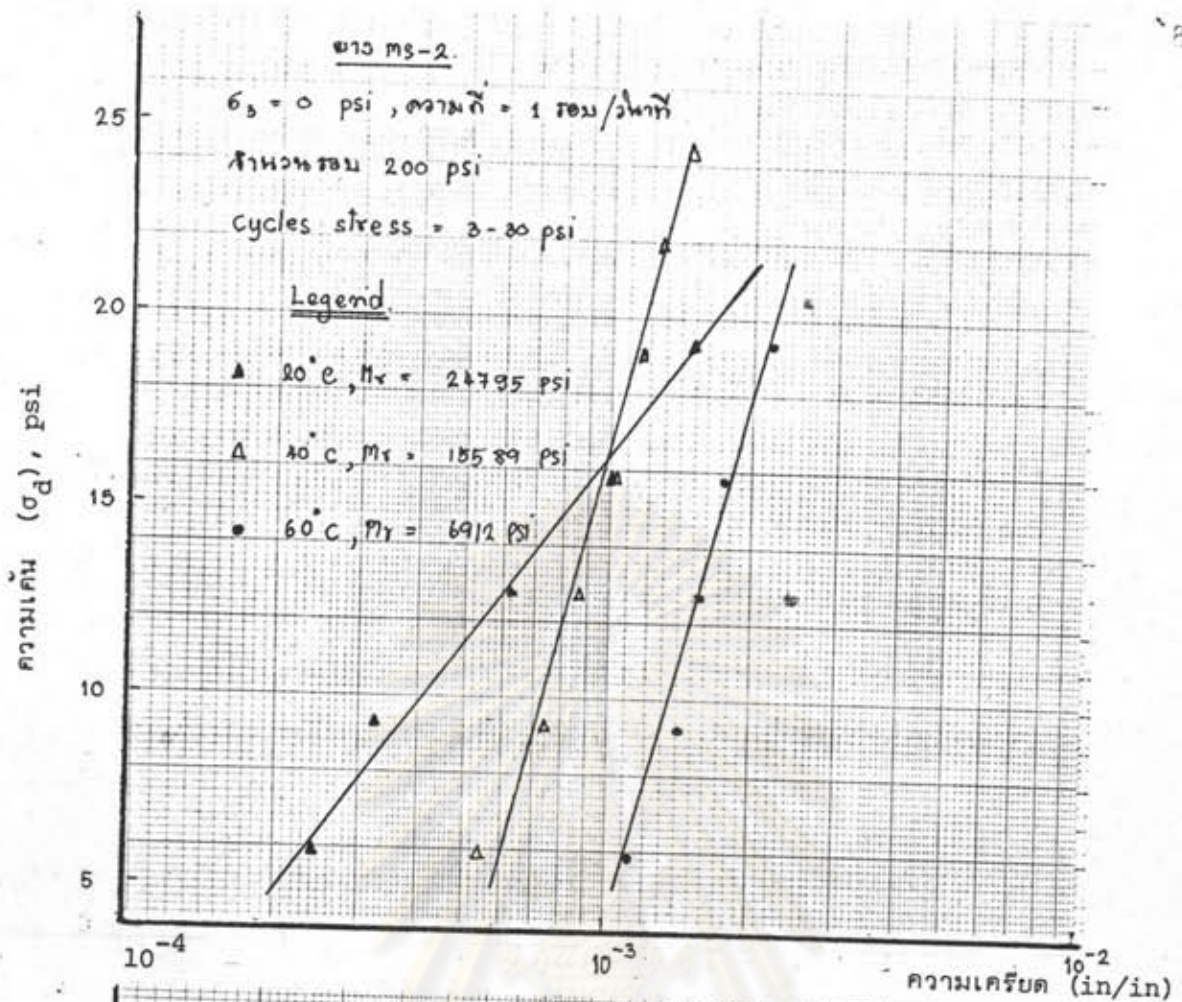
รูปที่ 4.8 แสดงความเค้น-ความเครียดของยาง MS-2 (ไม่มีความตึงตันข้าง)





รูปที่ 4.9 แสดงความเค้น-ความเครียดของยาง MS-2 (ความตึงตันข้าง 15 psi)





รูปที่ 4.10 แสดงความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยของขาง MS-2 แบบมีความตึงตัน ย่าง และไม่มี ความตึงตัน ย่าง



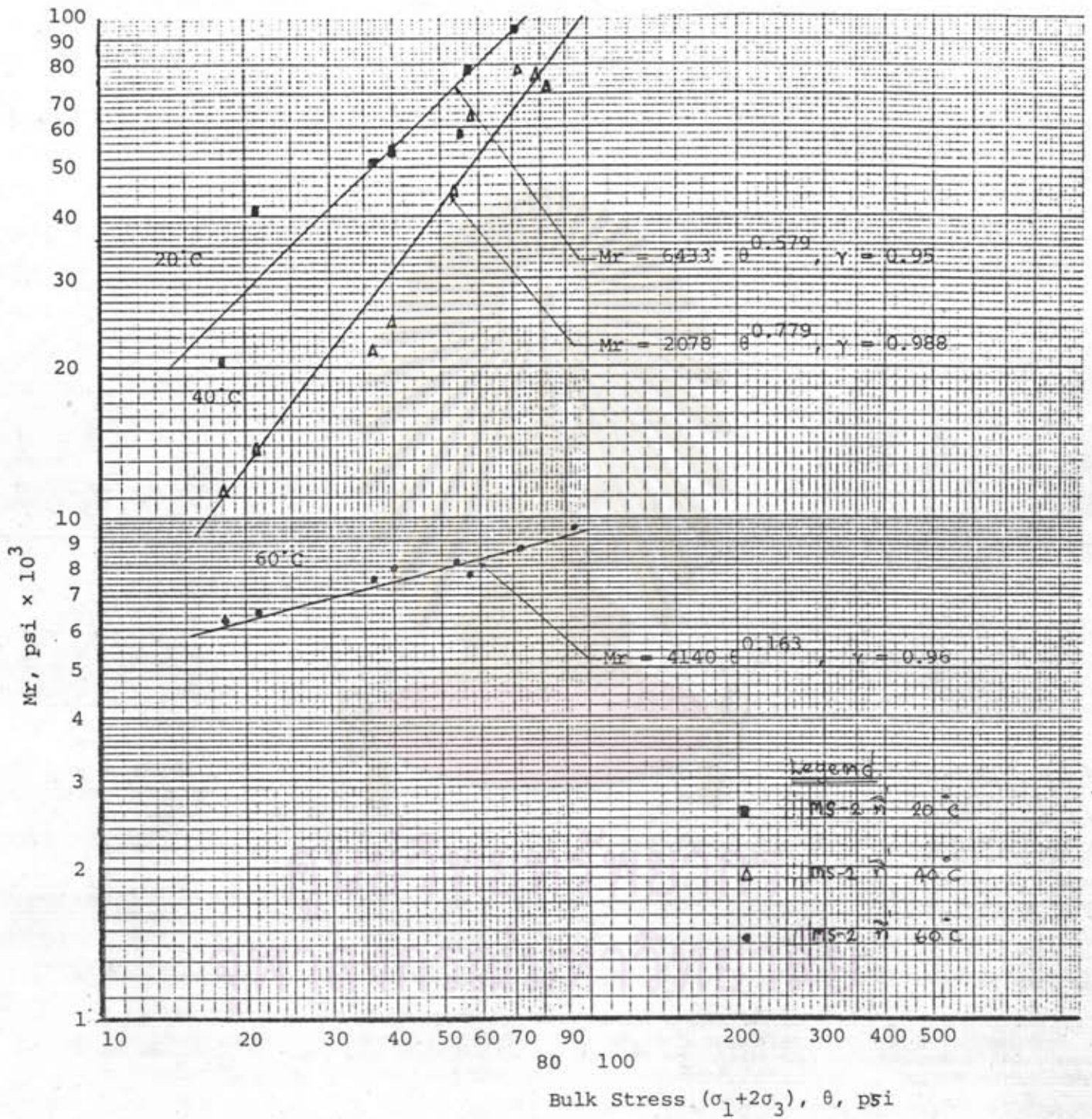
ตารางที่ 4.15 แสดงค่า Resilient Modulus ของยาง MS-2 ที่อุณหภูมิ 20°C, 40°C และ 60°C

การทดลอง	อุณหภูมิ, °C	ความต้านทานข้าง psi	Mr, psi	ตัวอย่างการทดลองที่
1	20	0	24795	MS-S5 , MS-S6
2	40	0	15589	MS-S8 , MS-S13
3	60	0	6912	MS-S11, MS-S15
4	20	15	32204	MS-S3 , MS-S4
5	40	15	22954	MS-S10, MS-S14
6	60	15	12556	MS-S1 , MS-S2

โดยที่จะดูความชันของเส้นกราฟในช่วงที่เป็นเส้นตรง สำหรับผลการทดลองในตารางที่ 4.14 - 4.15 ได้จากการเฉลี่ยค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่น้ำหนักกดเดียวกัน แล้วนำมาพลอต หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นต่อความเครียด ซึ่งลักษณะเส้นกราฟที่ได้แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรก ๆ ที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง

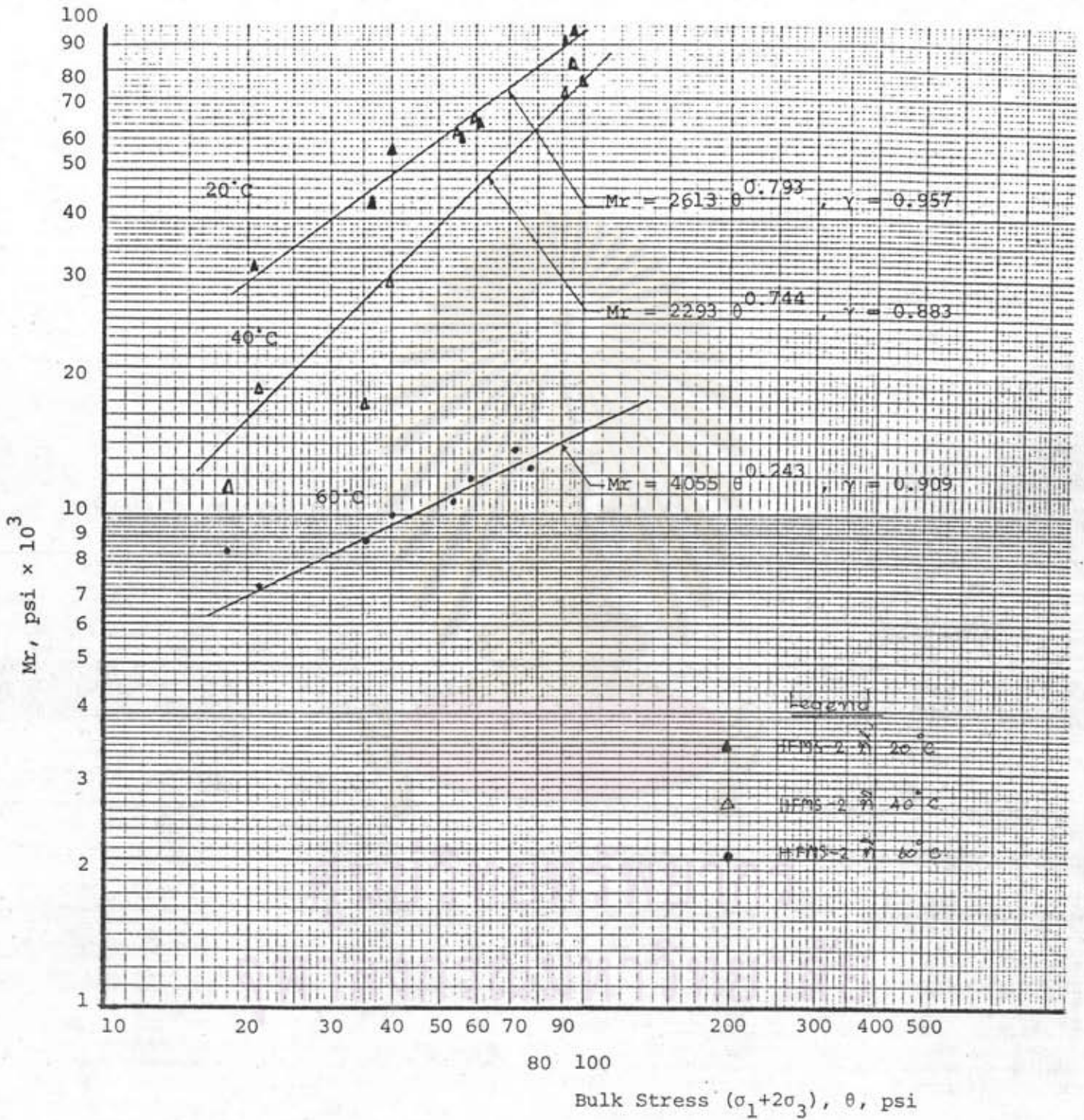
#### 4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Resilient Modulus กับ bulk Stress

จากการทดลอง จะมีการแปรค่า Deviator Stress และความต้านทานข้างไปเรื่อย ๆ จุดค่าการปิดหัดตัวของตัวอย่างทุก 200 ครั้ง ผลที่ได้จากการทดลอง ยาง HFMS-2 และยาง MS-2 (ตามภาคผนวก ง ตารางที่ ผ.31 - ผ.36) เมื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Resilient Modulus และ Bulk Stress (ผลรวมของ  $\sigma_1 + 2\sigma_3$ ) แล้วจะได้ผลตามรูปที่ 4.11 - 4.12 จะเห็นได้ว่าทั้งยาง HFMS-2 และยาง



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของ Mr กับ Bulk Stress ของยาง MS-2





รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของ Mr กับ Bulk Stress ของบาง HFMS-2

MS-2 เส้นกราฟจะอยู่ในรูปของ  $Mr = k\theta^n$  เมื่อนำไปพลอตบน log-log สเกลแล้ว รูปที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยเมื่อหาสมการแบบ Regression แล้ว ค่า Correlation มีค่าใกล้เคียงกับ 1

ตารางที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $Mr$  และ  $\theta$  ของยาง HFMS-2 และ ยาง MS-2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

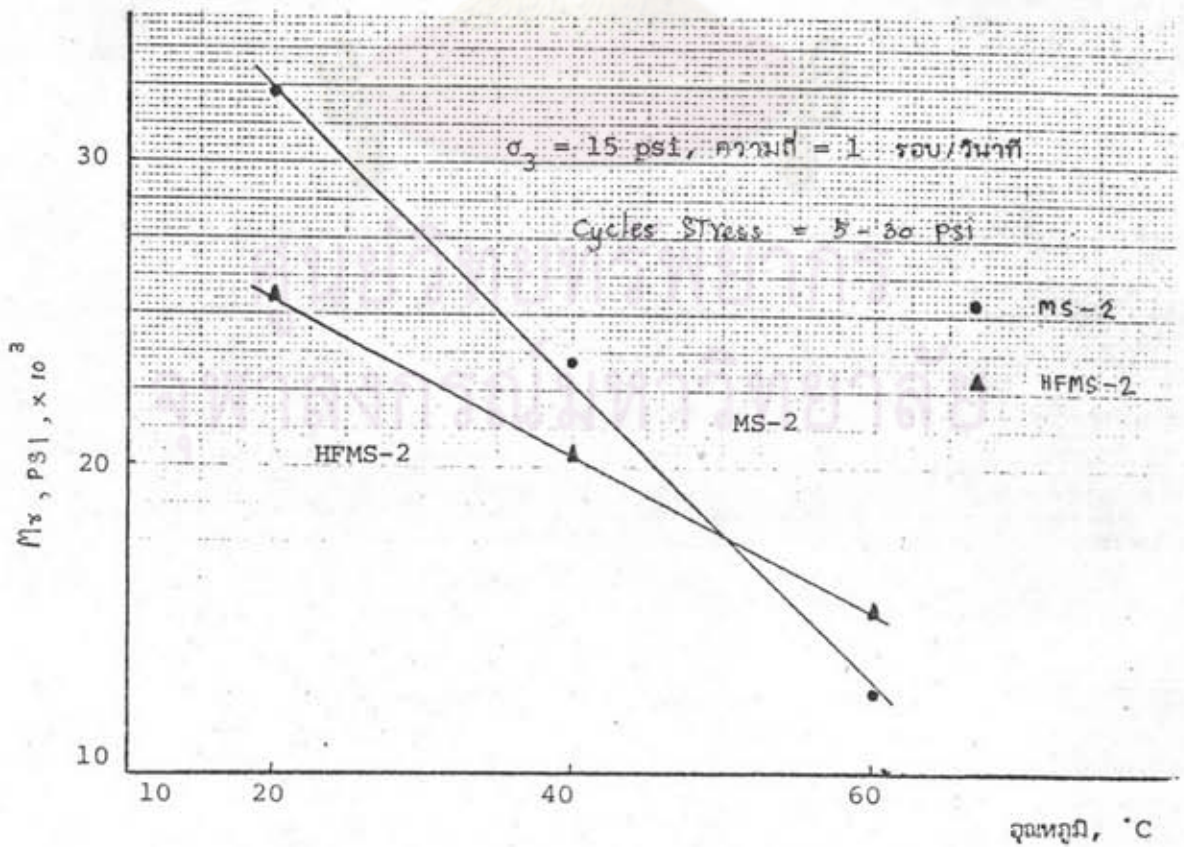
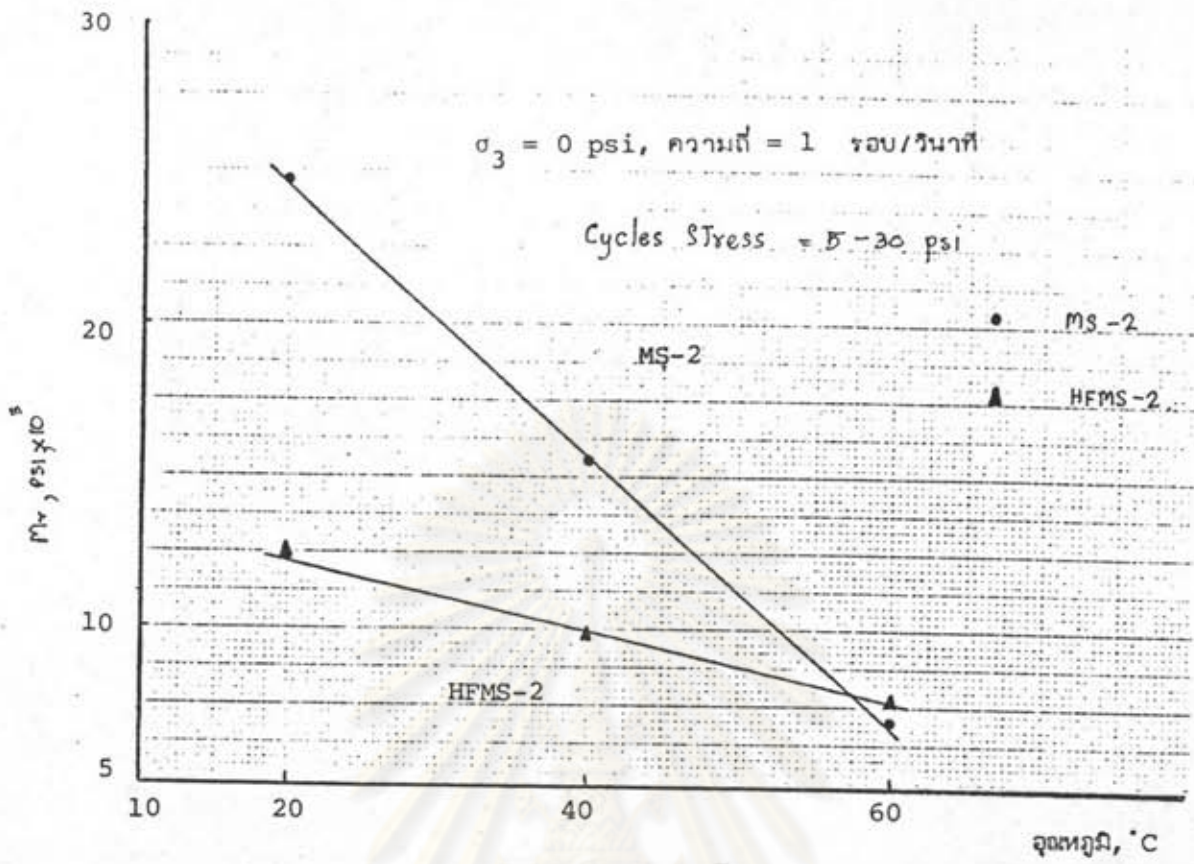
ชนิดยาง	อุณหภูมิ, °C	ความสัมพันธ์	Correlation
HFMS-2	20	$Mr = 2613 \theta^{0.793}$	$\gamma = 0.957$
	40	$Mr = 2293 \theta^{0.744}$	$\gamma = 0.883$
	60	$Mr = 4055 \theta^{0.243}$	$\gamma = 0.909$
MS-2	20	$Mr = 6433 \theta^{0.579}$	$\gamma = 0.950$
	40	$Mr = 2078 \theta^{0.779}$	$\gamma = 0.988$
	60	$Mr = 4140 \theta^{0.163}$	$\gamma = 0.961$

ความสัมพันธ์นี้ค่า Deviator Stress และความตึงต้านข้างจะมีผลต่อ ตัวอย่าง ยิ่งเพิ่มค่าทั้ง 2 จะทำให้ค่า Resilient Modulus เพิ่มขึ้นด้วย จะแสดงให้เห็นว่า ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจะมีน้อย ขณะที่เพิ่มความตึงต้านข้าง เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ตัวอย่าง ซึ่งในสภาพการทำงานจริง ๆ แล้ว ความตึงต้านข้างที่โยกก็จะช่วยให้หินทางหรือผิวทางมีความแข็งแรงมากขึ้น

#### 4.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Resilient Modulus กับอุณหภูมิ

เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น (Stress) ต่อความเครียด (Strain) แล้ว ผลที่ได้ตามมาจากความสัมพันธ์นี้ได้แก่ค่า Resilient Modulus ซึ่งเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักที่โยกต่อการยึดหดตามแนวแกน ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.14 - 4.15





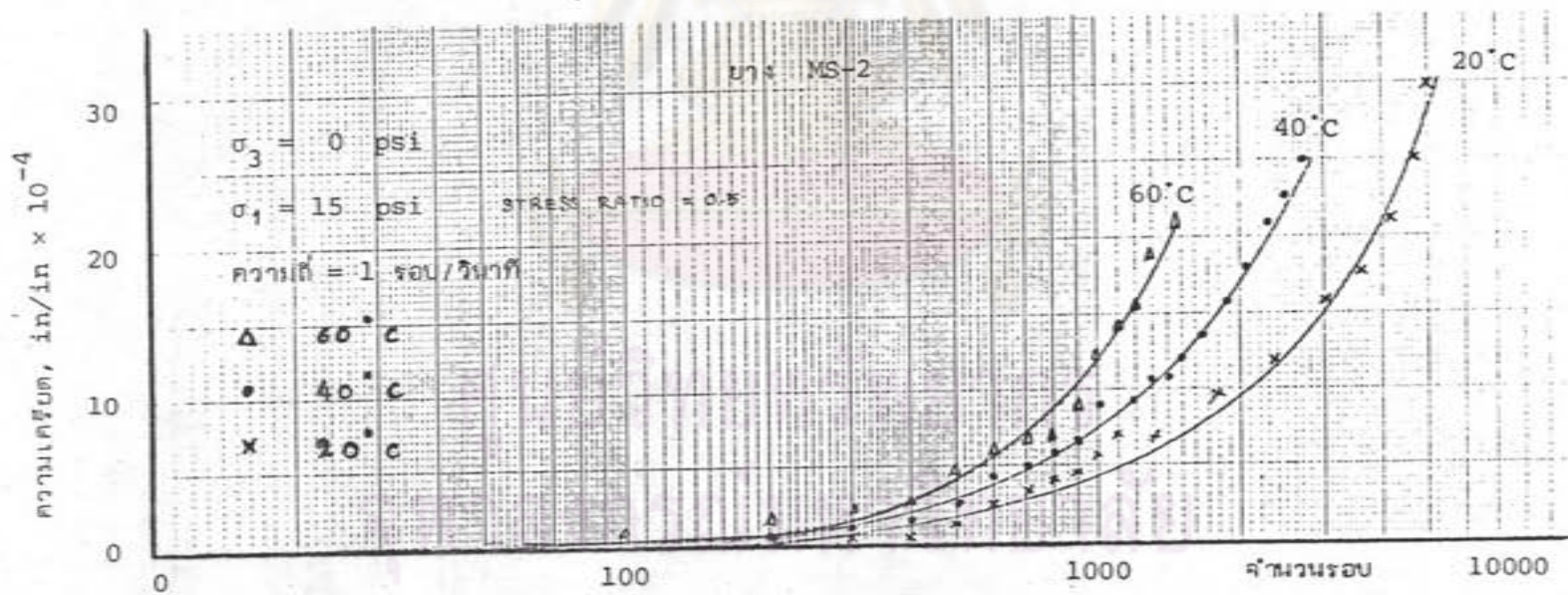
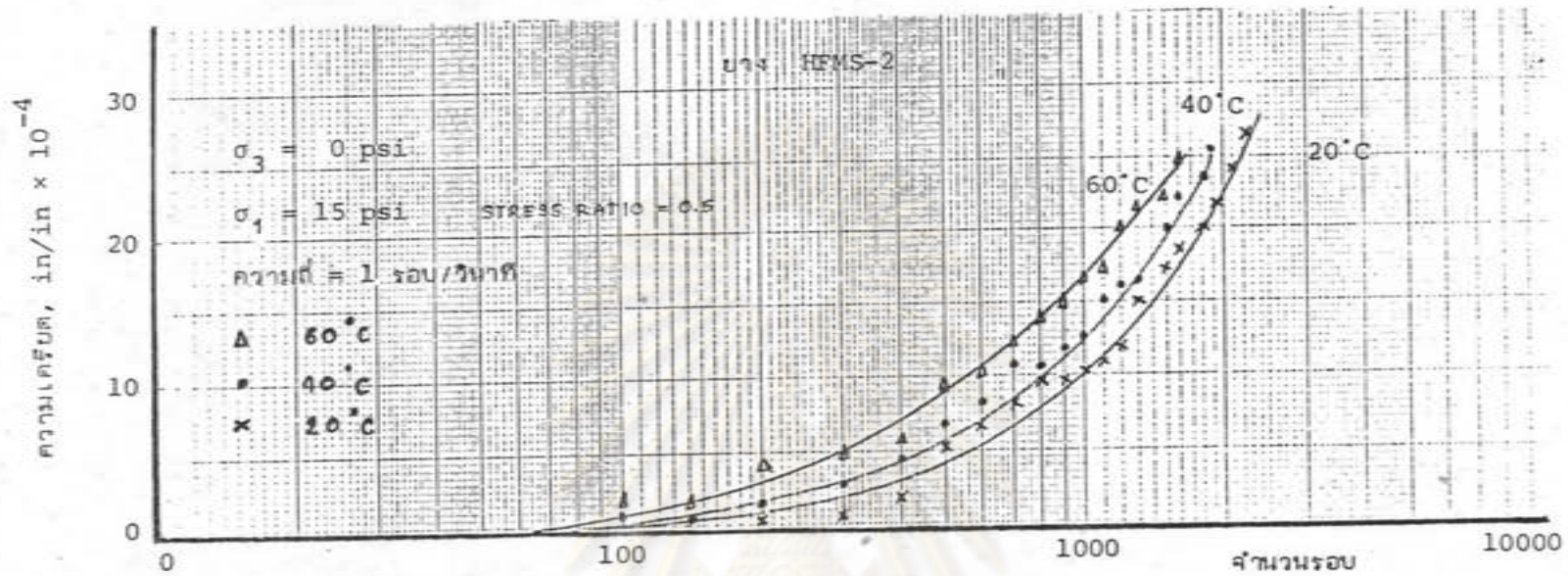
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของ  $M_r$  กับอุณหภูมิของยาง HFMS-2 และยาง MS-2

จากค่าเหล่านี้เมื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Resilient Modulus ( $M_r$ ) กับจุดอุณหภูมิที่ทำการทดลองแล้ว จะได้ดังรูปที่ 4.13 จากรูปจะเห็นว่าทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กล่าวคือ ยิ่งจุดอุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิด Deformation มากกว่าที่จุดอุณหภูมิต่ำ ก็จะมีผลทำให้ค่า Resilient Modulus ( $M_r$ ) มีค่าต่ำลงไปด้วย ซึ่งจะมีผลส่งต่อไปถึงความแข็งแรงของส่วนผสมที่จะนำไปใช้งานจริงในสนาม ซึ่งตามปกติแล้วยางมะตอยจะมีความไวต่ออุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีนำเข้าไปใช้งาน ยิ่งในบริเวณที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอยู่เลมอ ก็ควรที่จะใช้ยางมะตอยที่มีความไวต่ออุณหภูมิต่ำ มีการเปลี่ยนแปลงน้อย จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างมาก โดยเฉพาะในเวลาที่มีอุณหภูมิสูง การอ่อนตัวของยางมะตอยไม่ควรที่จะมีมาก เพราะจะทำให้เกิดความเสียหายได้ง่าย ซึ่งจะมีการบอบตัวเป็นร่องล้อของขบดขาน และในเวลาอุณหภูมิต่ำ การแข็งตัวของยางมะตอยก็ควรจะน้อย มิฉะนั้นแล้วจะทำให้เกิดการแตกแยกของชั้นพื้นทางหรือผิวทางได้ สำหรับยาง HFMS-2 แล้ว จะเห็นได้ว่าเมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ค่า  $M_r$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ายาง MS-2 ซึ่งดูจากความชันของเส้นกราฟ

#### 4.6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียด, Resilient Modulus กับจำนวนรอบในการกระทำซ้ำ

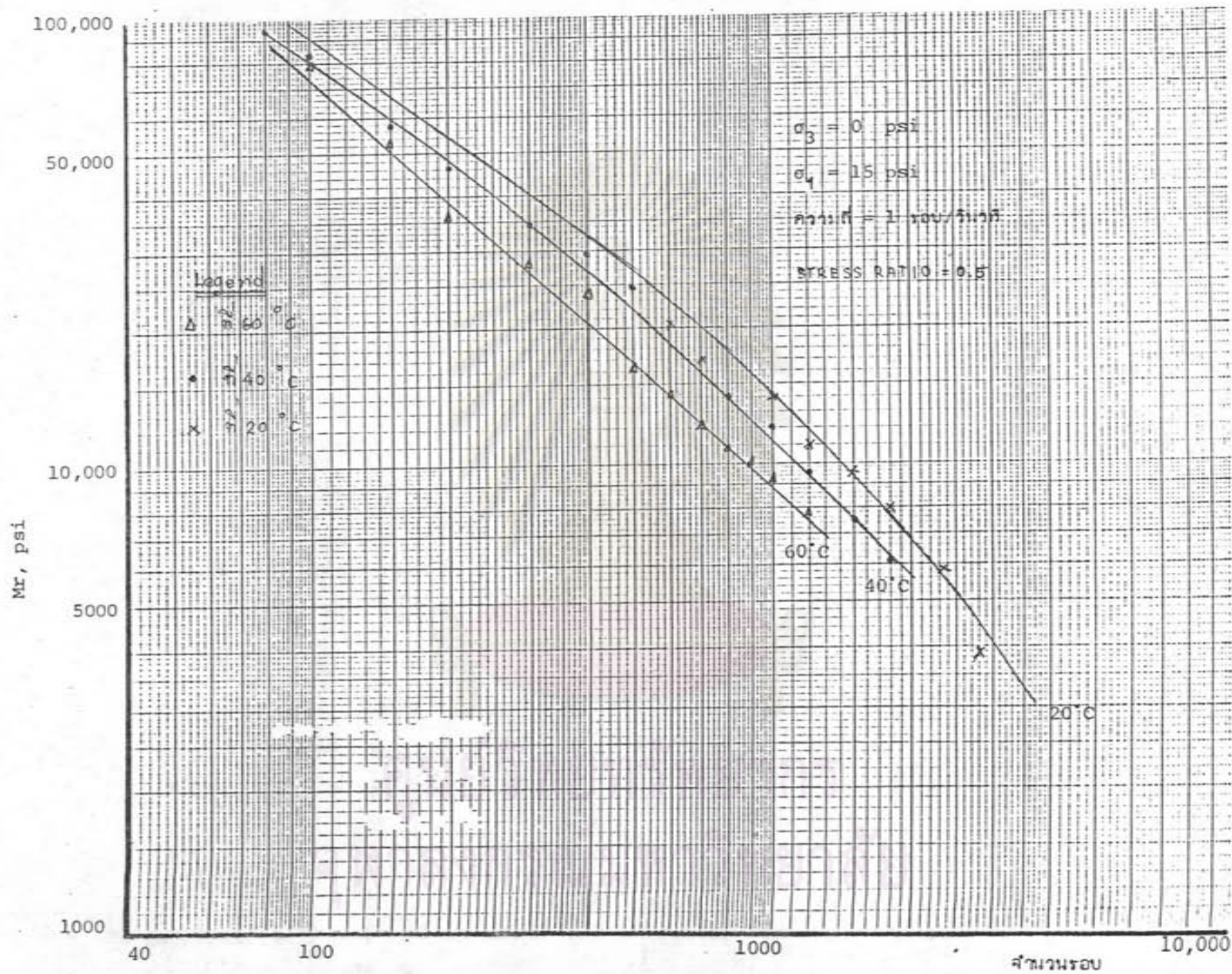
เมื่อนำเอาตัวอย่างไปทดลองเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์นี้ จะต้องใช้ Deviator Stress คงที่และกวดด้วยความถี่คงที่ ค่า Deformation จะหาได้เมื่อกดตัวอย่างไปที่จำนวนรอบตามต้องการ จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการเสียหาย (failure) ผลการทดลองอยู่ในภาคผนวก ง.1 เมื่อนำเอาผลที่ได้ไปพลอตหาความสัมพันธ์ของความเครียด, Resilient Modulus กับจำนวนรอบในการกระทำซ้ำจะอยู่ในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 - 4.16 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของความเครียดกับจำนวนรอบในการกระทำซ้ำจะมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ แต่ในช่วงแรก ๆ ค่าความเครียดจะน้อย เมื่อมีจำนวนรอบมากขึ้นค่าความเครียดจะเพิ่มขึ้นมากในช่วงหลังจาก 1,000 รอบขึ้นไปแล้ว ซึ่งตัวอย่างเริ่มเสียหาย และค่าความเครียดจะสูงที่สุดเมื่อตัวอย่างเกิด Failure จำนวนรอบที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวอย่างที่อุณหภูมิ 20°C, 40°C และ 60°C อยู่ในตารางที่ 4.17





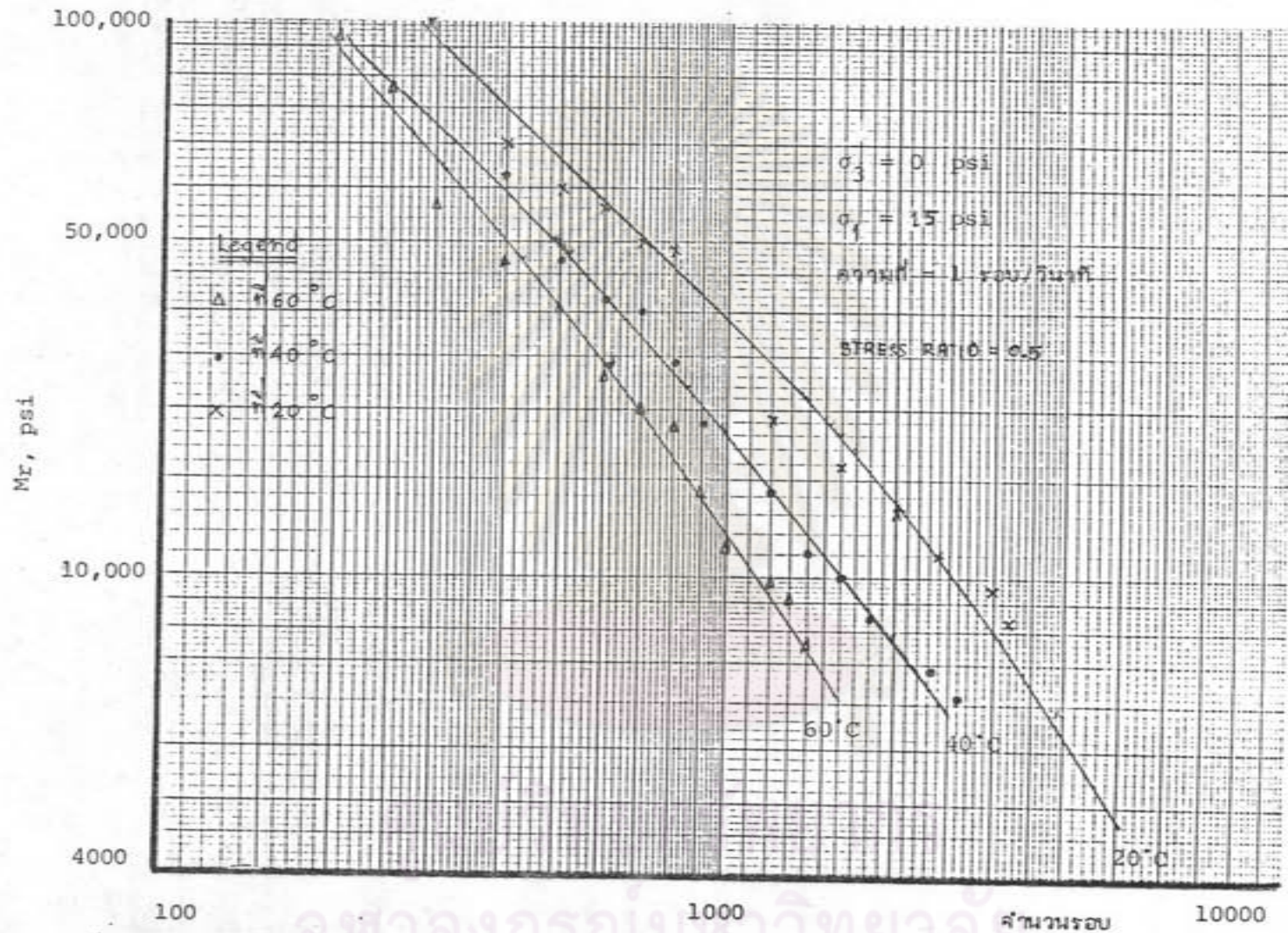
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของความเครียดกับจำนวนรอบของभाग HFMS-2 และभाग MS-2





รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของ Mr กับจำนวนรอบของยาง HFMS-2





รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของ Mr กับจำนวนรอบของยาง MS-2

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าความเครียด และจำนวนรอบลู่สุดท้ายที่ทำให้เกิดการเสียหายของยาง HFMS-2 และยาง MS-2 ( $\sigma_d = 15$  psi,  $\sigma_3 = 0$  psi, ความถี่ = 1 Hz)

ชนิดยาง	อุณหภูมิ °C	ความเครียด in/in, $\times 10^{-4}$	จำนวนรอบลู่สุดท้าย
HFMS-2	20	80.34	2785
	40	24.76	1789
	60	20.27	1473
MS-2	20	30.01	3894
	40	24.89	2678
	60	20.57	1426

สำหรับความสัมพันธ์ของค่า Resilient Modulus กับจำนวนรอบในการกระทำซ้ำจะอยู่ในลักษณะกลับกับความสัมพันธ์ของความเครียดกับจำนวนรอบ กล่าวคือ ค่า Resilient Modulus จะมีค่าสูงในขณะที่จำนวนรอบต่ำ ๆ ยิ่งจำนวนรอบสูงขึ้น ค่าการปิดหนืดตัวจะเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่า Resilient Modulus ต่ำลง ดังรูปที่ 4.15 - 4.16 ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นอีก ค่าการปิดหนืดก็จะเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม ค่า Resilient Modulus ก็จะมีค่าต่ำ จำนวนรอบที่ทำให้เกิดความเสียหายก็จะมีค่าไม่สูงมาก ซึ่งจากตารางที่ 4.17 จำนวนรอบที่ใช้มีค่าสูงสุดไม่เกิน 4,000 รอบ (สำหรับ  $\sigma_d = 15$  psi,  $\sigma_3 = 0$  psi และความถี่ = 1 รอบต่อวินาที)

#### 4.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองของยาง HFMS-2 และยาง MS-2

จากการทดลองที่ผ่านมาของยาง HFMS-2 และยาง MS-2 ซึ่งเริ่มแรกจากการออกแบบส่วนผสม การเตรียมตัวอย่าง และการทดลองน้ำหนักกระทำซ้ำ วิธีการของการทดลองจะใช้วิธีการแบบเดียวกัน และเงื่อนไขต่าง ๆ ก็อย่างเดียวกัน เมื่อนำเอาผลของยางทั้ง 2 ชนิด



มาเปรียบเทียบกัน จะมีความแตกต่างกันทั้งทางด้านความแข็งแรง, ความไวต่ออุณหภูมิ ซึ่งบาง-  
 มะตอยที่สามารถใช้งานได้ดีก็มักจะต้องมีความแข็งแรงดี, คงทนต่อสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงได้ดี  
 สามารถทำงานได้ง่าย ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก การผสมบางมะตอยแบบผสมเย็น (Cold  
 Mix) ก็จะสามารถใช้งานได้ดี จะใช้ได้กับยางมะตอยเหลวเท่านั้น ความแตกต่างกันนี้ เป็น  
 ผลเนื่องมาจากชนิดของยาง และวิธีการผลิตซึ่งได้มีการปรับปรุงส่วนผสมให้มีคุณสมบัติแตกต่าง  
 กันออกไป สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลองของยาง HFMS-2 และยาง MS-2 มีดังนี้

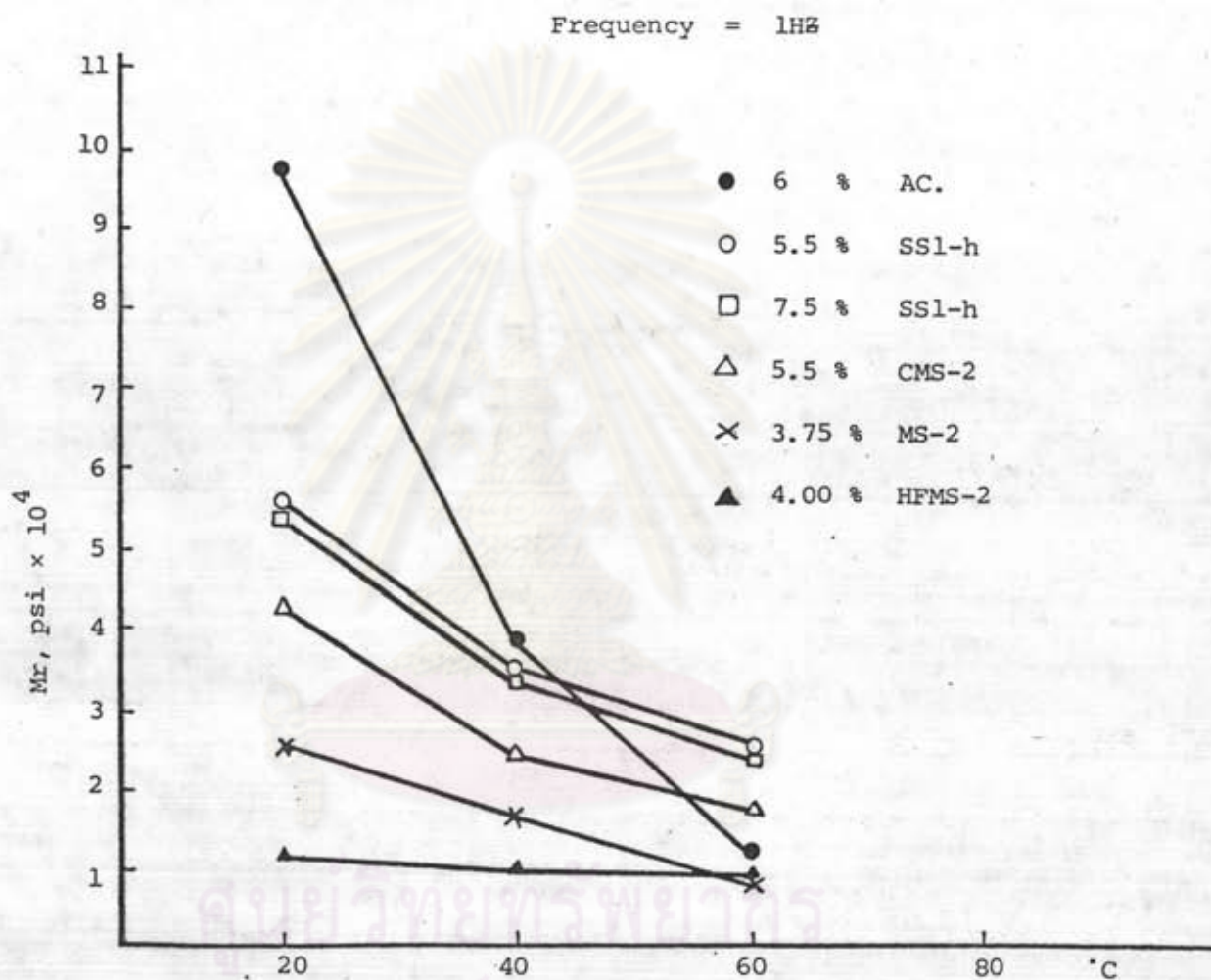
4.7.1 การออกแบบส่วนผสม สำหรับยาง HFMS-2 ได้เปอร์เซ็นต์ของเนื้อยาง  
 (Residue) เท่ากับ 4.0 เปอร์เซ็นต์ และยาง MS-2 ได้ 3.75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งนับว่า  
 ใกล้เคียงกัน แต่เปอร์เซ็นต์ที่ใช้ยางมะตอยน้ำจริง ๆ จะมากกว่านี้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์  
 ของเนื้อยาง (Residue) ของแต่ละชนิดที่หาได้จากกรกลั่น นอกจากนี้การดูดซึมความชื้น,  
 ความหนาแน่น และช่องว่างทั้งหมดอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน (ดูรูปที่ 4.3 และ 4.4) แต่  
 ช่องว่างทั้งหมดของยางทั้ง 2 ชนิดจะเกินกำหนด 1-2 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าวัสดุมวลรวมประเภท  
 เม็ดละเอียดและฝุ่นมีน้อยไปไม่สามารถอุดช่องว่างได้หมด และส่วนที่แตกต่างกันมากคือ ค่า  
 เสถียรภาพ (Stability) จะเห็นได้ว่ายาง HFMS-2 ทั้งแบบไม่แช่น้ำ (Dry) และ  
 แบบแช่น้ำ (Soaked) จะมีค่าต่ำกว่ายาง MS-2 สำหรับการทดลองแบบแช่น้ำ (Soaked)  
 ที่ใช้ในการออกแบบของยาง HFMS-2 จะมีค่าต่ำกว่ายาง MS-2 อยู่ 21.30 เปอร์เซ็นต์  
 แต่อย่างไรก็ตาม ค่าเสถียรภาพของยางทั้ง 2 ชนิดจะอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้ได้กับการจราจร  
 แบบปานกลาง

4.7.2 จากความสัมพันธ์ของค่าความเค้นต่อความเครียด ปรากฏว่า จากการทดลอง  
 ที่ได้จะมีลักษณะเป็นไปตามที่ศึกษากันมาแล้ว กล่าวคือ ในช่วงแรกจะมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้น  
 ตรง และช่วงหลังจะมีลักษณะโค้งตัวอย่างเริ่มที่จะเกิดความเสียหาย สำหรับยาง HFMS-2

และยาง MS-2 ที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C, 40°C และ 60°C รวมทั้งมีการเพิ่ม ความต้านทานข้างไปด้วย จากเงื่อนไขต่าง ๆ นี้ ความสัมพันธ์ของความเค้นต่อความเครียดจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่ค่าความเครียดจะแตกต่างกันออกไป ยาง MS-2 จะมีค่าความเครียดน้อยกว่ายาง HFMS-2 ขณะที่ความเค้นต่าง ๆ กัน ผลที่ได้จากความสัมพันธ์นี้คือ ค่า Resilient Modulus เป็นอัตราส่วนของค่าความเค้นต่อความเครียด จากการเปรียบเทียบ ที่อุณหภูมิเดียวกัน ปรากฏว่าที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่า Resilient Modulus แตกต่างกันมาก เช่น ที่อุณหภูมิ 20°C ยาง HFMS-2 จะมีค่า Resilient Modulus ต่ำกว่ายาง MS-2 อยู่ 49.74 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่แตกต่างกันมาก ส่วนที่อุณหภูมิ 40°C จะแตกต่างกัน 36.22 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 60°C จะแตกต่างกัน 9.14 เปอร์เซ็นต์ (เป็นแบบไม่มี ความต้านทานข้าง) ซึ่งที่อุณหภูมิสูงนี้จะมีผลต่อค่า Resilient Modulus น้อยคือมีค่าใกล้เคียง กัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความแตกต่างของค่า Resilient Modulus จะยิ่ง น้อย ในลักษณะของแบบมีความต้านทานข้างก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่ายางทั้ง 2 ชนิดจะมีความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เมื่อนำเอาค่า Resilient Modulus ของทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 ไปหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิจะปรากฏในรูปที่ 4.13 จะพบว่าความแตกต่างกันของค่า Resilient Modulus ของยางชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิต่างกัน จะมีค่าไม่เหมือนกัน สำหรับยาง HFMS-2 จะมีค่าต่างกัน 38.95 เปอร์เซ็นต์ และยาง MS-2 จะมีค่าเท่ากัน 72.12 เปอร์เซ็นต์ (ที่อุณหภูมิ 20°C กับ 60°C แบบไม่มี ความต้านทานข้าง) จะเห็นได้ว่ายาง HFMS-2 จะมีการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิต่ำกว่ายาง MS-2

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $M_r$  ของยาง HFMS-2 และยาง MS-2 กับ ยางมะตอยชนิดอื่นในที่อุณหภูมิเดียวกัน และความถี่เดียวกัน ปรากฏว่าจะมีลักษณะเหมือนกับ ได้ศึกษากันมาแล้ว ตามรูปที่ 4.17 จะเห็นว่ายางมะตอยแต่ละชนิดจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่างกัน ยางแอสฟัลท์ซีเมนต์จะแตกต่างมากที่สุด ส่วนพวกยางมะตอยน้ำจะมีค่า ที่แตกต่างกันน้อยกว่า โดยเฉพาะยาง HFMS-2 จะมีการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิน้อยที่สุด ซึ่งดูได้จากความชันของเส้นกราฟ ซึ่งเมื่อเทียบค่า  $M_r$  ที่อุณหภูมิต่ำ (20°C) และที่อุณหภูมิ





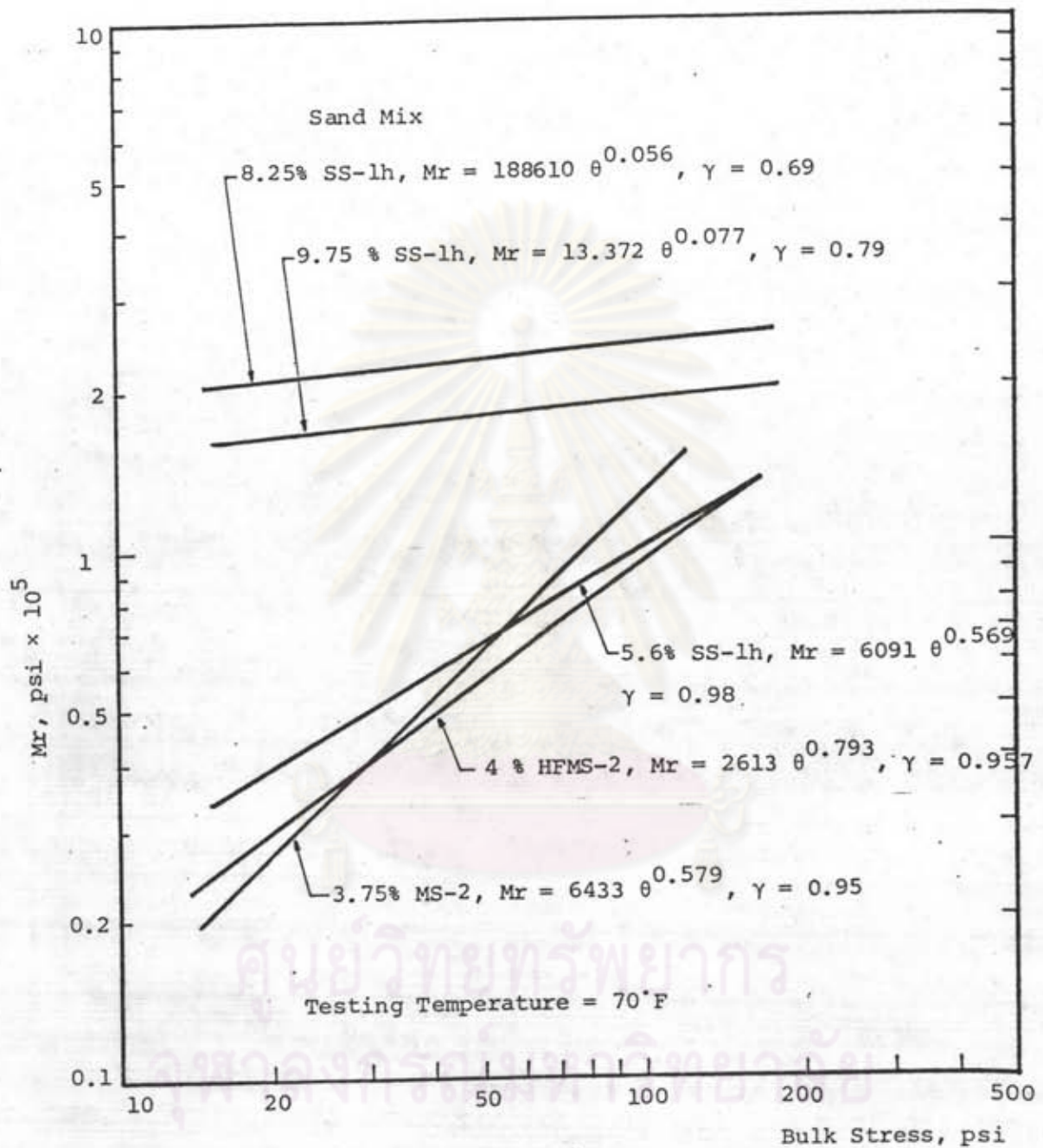
รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบค่า Mr ที่จุดอุณหภูมิ 20°C, 40°C และ 60°C ของยางมะตอย ชนิดต่าง ๆ.

สูง (60°C) ดูแล้วจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับบางมะตอยชนิดอื่น ๆ แต่ค่า Mr ของบาง HFMS-2 ที่ได้จากการทดลองนี้เมื่อเทียบกับบาง MS-2 และบางมะตอยชนิดอื่น ๆ จะมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าบาง HFMS-2 จะมีค่าไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่ำที่สุด แต่เมื่อดูถึงค่า Resilient Modulus มีค่าต่ำสุด และต่ำกว่าบางมะตอยน้ำชนิดอื่น ๆ ด้วย

4.7.4 ความสัมพันธ์ของค่า Resilient Modulus กับค่า Bulk Stress ซึ่งเป็นการอุผลกระทบเนื่องจากความดันด้านข้างและน้ำหนักที่ไ้กด ความสัมพันธ์จะอยู่ในรูปที่ 4.11 - 4.12 จะพบว่าทั้งความดันด้านข้างและน้ำหนักที่กดจะมีผลต่อค่า Resilient Modulus กล่าวคือ เมื่อค่าทั้ง 2 เพิ่มขึ้น ค่า Resilient Modulus ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นหาได้จากการทำ Regression แสดงความสัมพันธ์อยู่ในตารางที่ 4.16 จะอยู่ในรูป  $Mr = K\theta^n$  และลักษณะของเส้นกราฟจะเป็นเส้นตรง เนื่องจากว่าค่า Correlation มีค่าใกล้เคียง 1 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C, 40°C และ 60°C เช่นกัน การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิจะพบว่าจะมีลักษณะอย่างเดียวกัน บาง HFMS-2 ก็จะมีค่า Resilient Modulus ต่ำกว่าบาง MS-2 โดยเมื่อเทียบกับความสัมพันธ์ที่ได้ เช่นที่อุณหภูมิ 20°C ความดันด้านข้างกับน้ำหนักที่กดเป็น 50 psi ดังนั้นค่า Mr ของบาง HFMS-2 มีค่า 58133 psi และค่า Mr ของบาง MS-2 มีค่า 61961 psi จะพบว่าค่า Mr ของบาง HFMS-2 ก็ต่ำกว่าบาง MS-2 อยู่ 6.58 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

สำหรับบาง HFMS-2 และบาง MS-2 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับบางชนิดอื่น และใช้วัสดุที่ต่าง ๆ กัน จากรูปที่ 4.18 ได้ทำการเทียบกับบางมะตอยผสมที่ใช้บาง SS-1h ที่ใช้เป็น Sand Mix และวัสดุรวมรวมย่อย จะเห็นว่าในล่วนที่วัสดุรวมรวมย่อยจะมีค่า Mr ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับที่ทดลองของบาง HFMS-2 และบาง MS-2 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากความดันด้านข้าง ส่วนพวกที่เป็น Sand Mix จะมีค่า Mr สูงกว่าพวกวัสดุรวมรวมย่อย ทั้งนี้เนื่องจากว่าบาง SS-1h เป็นประเภทแตกตัวช้าเมื่อไปสัมผัสกับพวก Sand แล้วจะทำให้การเคลือบได้มีเวลาที่จะเคลือบได้นาน และจะมีความแน่นมากกว่ามีการอุดช่องว่างในล่วนผสมได้ดีกว่า ส่วนพวกวัสดุรวมรวมย่อยและวัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ ก็จะมีช่องว่างอยู่จำนวนหนึ่ง เมื่อได้รับความดันด้านข้างกระทำพร้อมทั้งน้ำหนักที่กด จะมีการอัดตัวกันแน่นกว่าเดิมทำให้ค่า Mr ที่ได้ช่วงแรกจะมีค่าต่ำ และจะสูงขึ้น ดังนั้นความดันด้านข้างจะมีผลต่อวัสดุรวมรวม





รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ Mr กับ Bulk Stress ของยางมะตอยน้ำชนิดต่าง ๆ

บ่อมากกว่าหาก Sand Mix สำหรับค่า Mr ที่ได้จากยาง HFMS-2 , ยาง MS-2 จะมีค่าต่างกันไม่มาก ในการทำงานจึงควรที่จะนำไปทำเป็นพื้นทางมากกว่าผิวทาง ซึ่งจะได้รับความแข็งแรงเพิ่มจากความต็มตันข้างที่เกิดจากมีชั้นอื่นอยู่ด้านบน ซึ่งจะช่วยลดทั้งกันทางอีกที

4.7.5 ความสัมพันธ์ของค่าความเครียด Resilient Modulus และจำนวนรอบ ในการกระทำซ้ำ ซึ่งทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 ค่าความเครียด และ Resilient Modulus จะมีค่าเปลี่ยนไปตามจำนวนรอบของการกระทำซ้ำ สำหรับความเครียด เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ค่าความเครียดจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนค่า Resilient Modulus จะมีค่าลดลงตามจำนวนรอบ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะพบว่าทั้งยาง HFMS-2 และยาง MS-2 ในช่วง 1,000 รอบแรก จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดและค่า Resilient Modulus น้อย แต่หลังจาก 1,000 รอบไปแล้ว ค่าความเครียดจะมีเพิ่มมากขึ้น ยาง HFMS-2 จะพบว่าในเมื่อจำนวนรอบที่เท่า ๆ กัน ค่าความเครียดจะมีมากกว่ายาง MS-2 และนอกจากนี้ จำนวนรอบที่ทำให้เกิดความเสียหายของยาง HFMS-2 ก็จะมีน้อยกว่ายาง MS-2 ยิ่งอุณหภูมิสูงยิ่งจำนวนรอบก็ยิ่งน้อยลงไปอีก ดูตามตารางที่ 4.14 สำหรับจำนวนรอบที่อุณหภูมิสูงที่ทำให้เกิดความเสียหายจะไม่เกิน 4,000 รอบ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับการทดลองของยางแอสฟัลท์ซีเมนต์ที่ทำแบบผสมร้อน<sup>(2)</sup> จะสามารถทนได้เป็น 100,000 รอบขึ้นไป แต่สำหรับที่อุณหภูมิสูง ยาง HFMS-2 จะมีจำนวนรอบในการทำให้เกิดความเสียหายใกล้เคียงกับยาง MS-2 ซึ่งจากการทดลองเช่นนี้จะแสดงให้เห็นว่ายาง HFMS-2 ที่อุณหภูมิสูงสามารถใช้งานได้พอ ๆ กับยาง MS-2 แต่ที่อุณหภูมิต่ำ ยาง MS-2 จะสามารถใช้งานได้ดีกว่า เนื่องจากจำนวนรอบในการทำให้เกิดความเสียหายมากกว่ายาง HFMS-2 และค่าเสถียรภาพจากการออกแบบส่วนผสมก็มีค่ามากกว่าเช่นกัน แต่ก็สามารถใช้งานได้ในการจราจรแบบปานกลาง