เอกสารอ้างอิง

1. The Asphalt Institute, "A Basic Asphalt Emulsion Manual", The Asphalt Institute Manual series No. 19 (MS-19), Asphalt Institute Building, Maryland, March 1979.

2. Kallas , Bernard, "Elastic and Fatique Behavior of Emulsified Asphalt Paving Mixes," The Asphalt Institute Research Report No. 79-1, The Asphalt Institute RR-79-1, 1979.

3. The Asphalt Institute, "Full Depth Pavements for Air carrier Airports," Appendix C , The Asphalt Institute Manual series No. 11 (MS-11), January 1973.

4. Cogne, L.D., and Ripple, R.M, "Emulsified Asphalt Mix Design and Construction," Asphalt Paving Technology, Vol. 44, PP. 281-301, AAPT Technical, USA, 1975.

5. Martineau, P.R., and Ferguson, J., "Graded Aggregate Seal Coats Utilizing High Float Emulsified Asphalt," Asphalt Paving Technology ,Vol. 44 , PP. 331-365, USA, 1973.

6. Yeager , Larry, and Wood , Leonard, Recommended Procedure for determining the Dynamic Modulus of Asphalt Mixture, PP. 1-60, TRB NO. 549., USA, 1979

7. Croney, David, The Behavior of Road Materials Under Repeated Loading, PP. 366-425, The Design and Performance of road Pavements, 1975

8. Kennedey, T.W., Practical use of the Indirect Tensile Test for The Characterisation of Pavement Materials, Materials Testing., Session No. 14, University of Queensland, 21-25 Aug. 1978.

9. American Society for Testing Materials, "Triaxial Testing of Soils and Bimluminous Mixture," Special Technical No. 106, Atlantic City, N.J. June 28, 1950.

10. American Society for Testing Materials, "1980 Annual Book of ASTM Standard," Part 10, 15, American Society for Testing Materials, USA, 1980.

11. Darter , Michael, Truebe A. Mark and, Abdulla S. Errol., "Factors Affecting the response of Emulsified Asphalt mixtures," Asphalt Paving Technology, Vol. 44, PP. 353-381, AAPT Technical, USA, 1973.

12. Cargg, R., and Pell, P.S., "The Dynamic Stiffness of Bituminous Road Materials," Asphalt Paving Technology, Vol. 40, PP. 126-147, AAPT Technical, USA, 1971.

13. Pell, P.S., and Hanson, J.M., "Behavior of Bituminous Road base Material Under Repeated Loading," Asphalt Paving Technology, Vol. 42, PP. 200-229, AAPT Technical, 1973.

14. Awad , Isam, Rutz , Frederick and, Terrel , Ronald, "Characterizatic of the Stress-Strain Relationship for Asphalt Treated Base Materials," Asphalt Paving Technology, Vol. 42, PP. 230-251, AAPT Technical, USA, 1973.

15. Schmidt, R.J., "A Pratial Method for Measuring the Resilient Modulus of Asphalt Treated Mixes," Highway Research Record No. 404, Highway Research Board, New York, 1972.

16. Yoder, E.J., Principles of Pavement Design, PP. 262-292, John Willey & Sons, Inc. New York, London, Sydney; Fifth Printing, February 1967.

17. Khosla, N.P., and Goetz, W.H., "Tensile Characteristics of Bituminous Mixtures as affected by Modified Binders," Asphalt Paving Technology, Vol. 48, PP. 34-64, AAPT Technical, USA, 1979.

18. Paul Khosla, N., and Ostermeyer, L.F., A comparison of performance Characteristics of Asphalt Emulsion, PP. 184-103, the Twenty-Sixth Annual Conference of Canadian Technical Asphalt Association Volume XXVI, Canada, November 1981.

19. Brown, S.F., and Cooper, K.E., "A Fundamental Study of the Stress-Strain Characteristic of a Bitumionus Materials," Asphalt Paving Technology, Vol. 46, PP. 477-498, AAPT Techmical, 1978.

20. American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Transportation Materials and Method of Sampling and Testing Part II. Methods of Sampling and Testing. Washington, D.C. : The American Association of State Highway and Transportation Officials, 1978.

21. วัชรินทร์ วิทยกุล, แอสฟัลท์เทคโนโลยีและการปฏิบัติงานก่อสร้าง, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เล่ม 1, 2, เมษายน 2528.

22. ศักดา ปุณยนันท์, "การใช้อีมัลซิไฟด์แอสฟัลท์ในงานทาง", วารสารทางหลวง ปี 21 ฉบับที่ 2, กุมภาพันธ์ 2527.

23. กองวิเคราะห์วิจัย, วิธีการทดลองวัสดุก่อสร้าง เล่ม 1, 2, 3, กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, สิงหาคม 2524.

24. สุทธิศักดิ์ วิบูลย์คิริกุล, "การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลท์ติกคอนกรีตในการนำไปใช้งานโดยใช้ยางแอสฟัลท์ซีเมนต์กับยางแอสฟัลท์อิมัลชั่น โดยวิธีมาร์แชล", วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.

25. สมศักดิ์ คมวุฒิชัย, "พฤติกรรมของพื้นถนนคอนกรีตภายใต้การรับน้ำหนักกระทำซ้ำ", วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2528.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

Specification ของยาง HFMS และยาง MS

กับ

Specification ของการจัดเรียงขนาดของวัสดุมวลรวม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.1 แสดงถึงข้อกำหนดของยาง HFMS ตาม ASTM D977[10]

Type	Medium-Setting								Slow-Setting			
	HFMS-1		HFMS-2		HFMS-2h		HFMS-2s		SS-1		SS-1h	
Grade	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Tests on emulsions:												
Viscosity, Saybolt Furol at 77°F (25°C), s	20	100	100	...	100	...	50	...	20	100	20	100
Viscosity, Saybolt Furol at 122°F (50°C), s	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Storage stability test, 24-h, %	...	1	...	1	...	1	...	1	...	1	...	1
Demulsibility,[a] 35 mL 0.02 *N* $CaCl_2$, %	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Coating ability and water resistance:												
Coating, dry aggregate	good		good		good		good		...		...	
Coating, after spraying	fair		fair		fair		fair		...		...	
Coating, wet aggregate	fair		fair		fair		fair		...		...	
Coating, after spraying	fair		fair		fair		fair		...		...	
Cement mixing test, %	...	...	...	...	...	...	...	...	...	2.0	...	2.0
Sieve test, %	...	0.10	...	0.10	...	0.10	...	0.10	...	0.10	...	0.10
Residue by distillation, %	55	...	65	...	65	...	65	...	57	...	57	...
Tests on residue from distillation test:												
Penetration, 77°F (25°C), 100 g, 5 s	100	200	100	200	40	90	200	...	100	200	40	90
Ductility, 77°F, (25°C), 5 cm/min, cm	40	...	40	...	40	...	40	...	40	...	40	...
Solubility in trichloroethylene, %	97.5	...	97.5	...	97.5	...	97.5	...	97.5	...	97.5	...
Float test, 140°F (60°C), s	1200	...	1200	...	1200	...	1200	...	...	...	...	...
Typical applications[b]	cold plant mix, road mix, sand seal coat, crack treatment, tack coat		cold plant mix, coarse aggregate seal coat (single and multiple), crack treatment road mix, tack coat, and seal		cold plant mix, hot plant mix, coarse aggregate seal coat (single and multiple), crack treatment road mix, tack coat		dense-graded cold plant mix and road mix, stockpile mix, crack treatment, patching mix		cold plant mix, road mix, slurry seal coat, tack coat, fog seal, dust layer, mulch			

[a] The demulsibility test shall be made within 30 days from date of shipment.

[b] These typical applications are for use only as a guide for selecting and using the emulsion for pavement construction and maintenance.

ตารางที่ ผ.2 แสดงถึงข้อกำหนดของยาง MS ตาม ASTM D977[10]

Requirements and Typical Applications for Emulsified Asphalt

Type	Rapid-Setting				Medium-Setting					
	RS-1		RS-2		MS-1		MS-2		MS-2h	
Grade	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Tests on emulsions:										
Viscosity, Saybolt Furol at 77°F (25°C), s	20	100	...	...	20	100	100	...	100	...
Viscosity, Saybolt Furol at 122°F (50°C), s	...	...	75	400	...	...	...	...	...	...
Storage stability test, 24-h, %	...	1	...	1	...	1	...	1	...	1
Demulsibility,[a] 35 mL 0.02 *N* $CaCl_2$, %	60	...	60	...	...	...	...	...	...	...
Coating ability and water resistance:										
Coating, dry aggregate		...		...		good		good		good
Coating, after spraying		...		...		fair		fair		fair
Coating, wet aggregate		...		...		fair		fair		fair
Coating, after spraying		...		...		fair		fair		fair
Cement mixing test, %	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Sieve test, %	...	0.10	...	0.10	...	0.10	...	0.10	...	0.10
Residue by distillation, %	55	...	63	...	55	...	65	...	65	...
Tests on residue from distillation test:										
Penetration, 77°F (25°C), 100g, 5 s	100	200	100	200	100	200	100	200	40	90
Ductility, 77°F. (25°C), 5 cm/min, cm	40	...	40	...	40	...	40	...	40	...
Solubility in trichloroethylene, %	97.5	...	97.5	...	97.5	...	97.5	...	97.5	...
Float test, 140°F (60°C), s	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Typical applications[b]	surface treatment, penetration macadam, sand seal coat, tack coat, mulch		surface treatment, penetration macadam, coarse aggregate seal coat (single and multiple)		cold plant mix, road mix, sand seal coat, crack treatment, tack coat		cold plant mix, coarse aggregate seal coat (single and multiple), crack treatment, road mix, tack coat, sand seal coat		cold plant mix, coarse aggregate seal coat (single and multiple), crack treatment, road mix, tack coat	

ตารางที่ ผ.3 แสดงการจัดเรียงขนาดแบบ Dense Grade ที่เหมาะสำหรับยางมะตอยน้ำ[1]

TABLE AGGREGATES AND EMULSIFIED ASPHALT FOR COLD-MIX EMULSIFIED ASPHALT MIXTURES

Type		Processed Dense = Graded Asphalt Mixtures				
Washed Gradation % by Weight	2"	100	-	-	-	-
	1-1/2" 1"	90-100 -	100 90-100	- 100	- -	- -
	3/4" 1/2"	60-80 -	- 60-80	90-100 -	100 90-100	- 100
	3/8" No. 4	- 20-55	- 25-60	60-80 35-65	- 45-70	90-100 60-80
	No. 8 No. 16	10-40 -	15-45 -	20-50 -	25-55 -	35-65 -
	No. 30 No. 50	- 2-16	- 3-18	- 3-20	- 5-20	- 6-25
	No. 100 No. 200	- 0-15	- 1-15	- 2-15	- 2-15	- 2-15
Sand Equivalent, %		25 min.	25 min.	25 min.	25 min.	25 min.
Los Angeles Rattler @ 500 Revolutions		45 max.	45 max.	45 max.	45 max.	45 max.
Soundness, % Loss		25 max.	25 max.	25 max.	25 max.	25 max.
% Crushed Faces		65 min.	65 min.	65 min.	65 min.	65 min.
Asphalt Type		HFE-type* SS-type CSS-type	HFE-type* SS-type CSS-type	HFE-type* SS-type CSS-type	HFE-type* SS-type CSS-type	HFE-type* SS-type CSS-type

Illinois high-float emulsion designation. ASTM designation for high-float is HFMS-type.

ตารางที่ ผ.4 แสดงการจัดเรียงขนาดแบบ Open Grade ที่เหมาะสำหรับยางมะตอยน้ำ[1]

TABLE AGGREGATES FOR OPEN-GRADED EMULSION MIXES

Sieve Size	Base		Surface
	Coarse	Medium	Fine
38.1mm (1-1/2 in.)	100		
25.0mm (1 in.)	95 - 100	100	
19.0mm (3/4 in.)		90 - 100	
12.5mm (1/2 in.)	25 - 60		100
9.5mm (3/8 in.)		20 - 55	85 - 100
4.75mm (No. 4)	0 - 10	0 - 10	
2.36mm (No. 8)	0 - 5	0 - 5	0 - 10
1.18mm (No. 16)			0 - 5
75μm (No. 200)	0 - 2	0 - 2	0 - 2
Los Angeles Abrasion loss @ 500 Rev. (ASTM C 131)	40 max	40 max	40 max
Percent Crushed Faces	65 min	65 min	65 min
Emulsified Asphalt Grades	MS-2, MS-2h, HFMS-2, HFMS-2h, CMS-2 or CMS-2h		

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองหาส่วนผสมของยาง HFMS-2 และ

ยาง MS-2 กับวัสดุมวลรวม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.5 แสดงการหา Optimum Water Content ของยาง HFMS-2

Cold Mix Design Data (1)

Sp.Gr. Residual Asphalt 0.999 Type of Asphalt High Float Emulsified Asphalt (HFMS-2)

Avg. Sp.Gr Blend 2.662 Find Optimum Water Content Date 18/1/29

No.	% Residual Asphalt	% Emulsion Asphalt	% Water Content	Diameter (cm)	Height (cm)	Stability - Lb			Remark
						Reading	Adj.	Avg.	
1	5.19	3.79	1	10.17	7.07	1,170	979		Residual Asphalt Content
2	5.19	3.79	1	10.13	7.03	1,090	916	981	A = % Retained No. 4 = 37.5 %
3	5.19	3.79	1	10.26	6.98	1,220	1,049		B = % Passing No. 4 and
4	5.19	3.79	2	10.20	7.04	1,400	1,176		Retained No. 200 = 49.0 %
5	5.19	3.79	2	10.17	7.03	1,210	1,017	1,077	C = % Passing No. 200 = 8.5 %
6	5.19	3.79	2	10.19	6.45	1,200	1,039		Residual Asphalt Content (R)
7	5.19	3.79	3	10.17	7.13	1,480	1,228		= 0.00138 49 37.5 - 6.358 $\log_{10}(85)$ - 4.655
8	5.19	3.79	3	10.16	7.01	1,300	1,095	1,157	= 3.79 % by wt. dry agg.
9	5.19	3.79	3	10.19	6.83	1,290	1,148		% Emulsion Asphalt
10	5.19	3.79	4	10.16	6.89	1,560	1,333		= $\frac{3.79}{0.73}$ = 5.19 %
11	5.19	3.79	4	10.19	6.79	1,090	946	1,072	
12	5.19	3.79	4	10.14	6.86	1,060	937		
13	5.19	3.79	5	10.17	7.03	1,200	1,009		
14	5.19	3.79	5	10.12	6.94	1,140	968	933	
15	5.19	3.79	5	10.16	6.90	940	823		

ตารางที่ ผ.6 แสดงการหา Optimum Residual Content ของงาน HFMS-2 (Dry)

Cold Mix Design Data (2)

Sp.Gr. Residual Asphalt 0.999 Type of Asphalt High Float Emulsified Asphalt (HFMS-2) Date 21/1/29

Avg. Sp.Gr. Blend 2.662 Design for Surface of Heavy Traffic (Dry) Date Test 24/1/29

No	% Residual Asphalt	% Emulsion Asphalt	% Water Content	Diameter (cm)	Height (cm)	weight - gm			Bulk Sp. Gr.	Avg Bulk Sp.Gr.	Stability - Lbs			Flow 1/100"	Avg Flow	Wt. Failed Specimen	Wt. Oven Dry Specimen	K	Total Voids	Avg Total Voids	Stability loss	Remark
						in air	sat sur Dry	in water			Reading	adj	adv									
1	3.0	4.11	3.0	10.28	6.72	1234.3	1270.9	726.6	2.268		1610	1478		13		1265.4	1226.4	0.189	10.83			
2	3.0	4.11	3.0	10.18	7.05	1239.0	1271.4	723.2	2.260	2.264	1810	1599	1512	12	11.66	1263.6	1228.6	0.205	11.16	11.05	0.281	
3	3.0	4.11	3.0	10.18	6.81	1247.8	1288.0	736.8	2.264		1630	1459		10		1280.0	1235.0	0.377	11.15			
4	3.5	4.79	3.0	10.14	6.90	1252.2	1277.6	725.0	2.266		1530	1340		15		1268.6	1241.7	0.116	10.19			
5	3.5	4.79	3.0	10.16	6.94	1246.5	1272.6	722.5	2.266	2.269	1560	1354	1404	11	12.00	1262.3	1232.6	0.282	10.33	10.22	0.133	
6	3.5	4.79	3.0	10.16	6.94	1248.1	1266.6	718.0	2.275		1750	1519		10		1261.2	1236.6	0.476	10.14			
7	4.0	5.48	3.0	10.15	6.87	1262.8	1281.2	725.6	2.273		1580	1394		12		1274.1	1249.0	0.516	9.59			
8	4.0	5.48	3.0	10.18	6.95	1258.8	1276.9	724.3	2.278	2.276	1530	1325	1385	12	12.67	1272.0	1249.6	0.331	9.24	9.35	0.000	
9	4.0	5.48	3.0	10.17	6.48	1222.7	1258.2	721.2	2.277		1480	1436		14		1256.3	1217.6	0.253	9.21			
10	4.5	6.16	3.0	10.16	6.70	1227.0	1239.0	695.6	2.258		1500	1394		11		1234.6	1215.8	0.535	9.56			
11	4.5	6.16	3.0	10.17	7.12	1268.6	1283.9	726.3	2.275	2.273	1560	1301	1364	13	12.67	1282.2	1261.5	0.410	8.76	8.91	0.007	
12	4.5	6.16	3.0	10.14	6.91	1264.5	1277.4	724.3	2.286		1610	1407		14		1273.0	1253.4	0.512	8.42			
13	5.0	6.85	3.0	10.16	6.96	1281.7	1293.4	730.3	2.274		1450	1253		12		1289.5	1271.4	0.442	8.19			
14	5.0	6.85	3.0	10.17	7.09	1278.1	1290.3	726.8	2.268	2.270	1480	1242	1227	13		1286.7	1269.1	0.405	8.40	8.29	-0.024	
15	5.0	6.85	3.0	10.29	6.89	1273.3	1285.3	724.0	2.268		1350	1185		13		1281.3	1266.0	0.286	8.30			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.7 แสดงการหา Optimum Residual Content ของยาง HFMS-2 (Soaked)

Cold Mix Design Data (3)

Sp.Gr. Residual Asphalt 0.999 Type of Asphalt High Float Emulsified Asphalt (HFMS-2) Date 21/1/29

Avg. Sp.Gr. Blend 2.662 Design for Surface of Heavy Traffic (Soaked 4 Day) Date Test 28/1/29

No	% Residual Asphalt	% Emulsion Asphalt	% Water Content	Diameter (cm)	Height (cm)	Stability - Lbs			Flow 1/100"	Avg Flow	% Failed Specimen	% Oven Dry Specimen	Wt. Tare	K	Moisture Absorbed	Remarked
						Reading	Adj.	Adv.								
1	3.0	4.11	3.0	10.17	6.60	1190	1122		8		1388.8	1354.4	140.9	2.75		
2	3.0	4.11	3.0	10.15	6.66	1120	1042	1087	15	12.67	1338.2	1304.9	100.6	2.68	2.433	
3	3.0	4.11	3.0	10.16	.679	1220	1098		15		1386.2	13 2.8	123.4	2.64		
4	3.5	4.79	3.0	10.16	6.65	1110	1036		15		1431.2	1401.4	171.4	2.34		
5	3.5	4.79	3.0	10.16	6.61	1300	1224	1217	13	13.33	1376.5	1349.1	121.7	2.16	2.139	
6	3.5	4.79	3.0	10.30	6.78	1540	1390		12		1378.9	1343.6	123.3	2.79		
7	4.0	5.48	3.0	10.19	6.82	1730	1544		12		1383.3	1359.6	122.9	1.84		
8	4.0	5.48	3.0	10.18	6.86	1630	1441	1385	11	13.00	1431.0	1405.4	167.9	1.99	1.573	
9	4.0	5.48	3.0	10.30	6.82	1310	1163		16		1391.6	1365.8	120.4	1.99		
10	4.5	6.16	3.0	10.15	7.07	1530	1290		16		1387.3	1366.5	123.4	1.60		
11	4.5	6.16	3.0	10.22	7.00	1610	1379	1355	13	14.00	1372.8	1349.1	114.3	1.84	1.244	
12	4.5	6.16	3.0	10.19	7.00	1630	1396		11		1402.7	1379.8	130.1	1.75		
13	5.0	6.85	3.0	10.19	6.78	1390	1254		16		1457.9	1438.8	187.4	1.45		
14	5.0	6.85	3.0	10.18	6.87	1340	1250	1257	13		1364.6	1344.3	105.4	1.56	1.232	
15	5.0	6.85	3.0	10.18	6.82	1420	1268		13		1415.1	1391.4	150.4	1.82		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.8 ผลการทดสอบ Optimum Water Content ของยาง MS-2

Cold Mix Design DATA (1)

Sp.Gr. Residual Asphalt 1.000 Type of Asphalt Medium Setting Emulsion Asphalt (MS-2)

Avg Sp.Gr. Blend 2.662 Find Optimum Water Content Date 1/2/29

No	% Residual Asphalt	% Emulsion Asphalt	% Water Content	Diameter (cm)	Height (cm)	Stability - Lb			Remark
						Reading	Adj.	Avg.	
1	3.19	5.19	1	10.14	7.04	1620	1360		Residual Asphalt Content
2	3.79	5.19	1	10.16	6.92	1650	1405	1366	A = % Retained No. 4 = 37.5 %
3	3.79	5.19	1	10.15	7.09	1590	1334		B = % Passing No. 4 and
4	3.79	5.19	2	10.16	6.88	1590	1363		Retained No.200 = 49.0 %
5	3.79	5.19	2	10.17	6.98	1560	1321	1343	C = % Passing No. 200 = 8.5 %
6	3.79	5.19	2	10.18	6.83	1510	1344		Residual Asphalt Content (R)
7	3.79	5.19	3	10.16	6.81	1670	1436		= $0.00138 \times 49 \times 37.5 + 6.358 \log_{10}(8.5) - 4.655$
8	3.79	5.19	3	10.14	6.93	1680	1429	1426	= 3.79 % by Wt. Dry Agg.
9	3.79	5.19	3	10.17	6.95	1630	1412		% Emulsion Asphalt
10	3.79	5.19	4	10.20	6.78	1600	1391		= $\frac{3.79}{0.65}$ = 5.83 %
11	3.79	5.19	4	10.15	6.84	1540	1324	1367	
12	3.79	5.19	4	10,14	6.82	1560	1388		
13	3.79	5.19	5	10.16	6.78	1440	1252		
14	3.79	5.19	5	10.14	6.68	1540	1371	1334	
15	3.79	5.19	5	10.17	6.71	1500	1380		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.9 แสดงการหา Optimun Residual Content ของยาง MS-2 (Dry)

Cold Mix Design DATA (2)

Sp.Gr. Residual Asphalt 1.000 Type of Asphalt Medium Setting Emulsion Asphalt Date 4/2/29

Avg. Sp.Gr. Blend 2.662 Design for Surface of Heavy Traffic (Dry) Date Test 7/2/29

No.	% Residual Asphalt	% Emulsion Asphalt	% Water Content	Diameter (cm.)	height (cm.)	weight-gm.			Bulk Sp. Gr.	Avg. Bulk Sp. Gr.	STABILITY. lbs			Flow 1/100	Avg. Flow	wt. failed Speciman	wt. oven dry Speciman	K	total voids	Avg. total void	stability loss	Remark
						in air	sat sur dry	in water			Reading	Adj.	Avg.									
1.	3.0	4.62	2.75	10.16	6.94	1270.2	1276.3	707.7	2.234		2190	1860		5		1274.4	1266.2	0.161	12.15			
2	3.0	4.62	2.75	10.17	6.70	1260.7	1274.2	720.0	2.275	2.253	2110	1878	1842	8	7.33	1273.5	1254.9	0.395	10.74	11.48	0.108	
3	3.0	4.62	2.75	10.15	6.83	1265.1	1283.5	721.0	2.249		2080	1789		9		1281.4	1260.8	0.169	11.56			
4	3.5	5.38	2.75	10.16	6.99	1269.3	1287.3	721.4	2.243		2050	1731		8		1284.6	1263.5	0.237	11.20			
5	3.5	5.38	2.75	10.14	6.71	1258.0	1260.3	707.3	2.275	2.257	2030	1766	1739	7	7.66	1258.7	1252.9	0.267	9.96	10.65	0.041	
6	3.5	5.38	2.75	10.16	6.84	1262.8	1275.5	715.3	2.254		2000	1720		8		1272.5	1256.3	0.269	10.79			
7	4.0	6.15	2.75	10.15	6.72	1267.6	1275.0	712.8	2.255		1790	1591		8		1273.0	1262.9	0.206	10.04			
8	4.0	6.15	2.75	10.17	6.82	1275.5	1287.1	723.8	2.264	2.260	1850	1591	1559	7	8.33	1286.0	1268.8	0.424	9.87	9.99	-0.045	
9	4.0	6.15	2.75	10.18	6.78	1270.3	1280.7	718.6	2.260		1720	1496		10		1276.7	1260.3	0.458	10.06			
10	4.5	6.92	2.75	10.18	6.93	1290.0	1293.7	725.4	2.269		1680	1429		10		1291.8	1283.4	0.350	8.95			
11	4.5	6.92	2.75	10.14	6.97	1289.5	1294.5	7215	2.250	2.261	1530	1295	1361	10	10.67	1294.5	1285.4	0.305	9.68	9.29	-0.048	
12	4.5	6.92	2.75	10.17	6.85	1288.9	1292.0	722.7	2.264		1570	1358		12		1290.1	1281.2	0.433	9.23			
13	5.0	7.69	2.75	10.16	6.89	1287.3	1288.9	721.4	2.268		1470	1256		13		1287.4	1280.3	0.409	8.40			
14	5.0	7.69	2.75	10.20	7.02	1282.9	1287.9	715.9	2.243	2.254	1640	1380	1310	10	11.33	1285.5	1277.3	0.239	9.26	8.83	-0.067	
15	5.0	7.69	2.75	10.15	6.92	1283.1	1287.3	717.5	2.252		1520	1294		11		1284.6	1278.3	0.156	8.83			

ตารางที่ ผ.10 แสดงการหา Optimum Residual Content ของยาง MS-2 (Soaked)

Cold Mix Design DATA (3)

Sp.Gr. Residual Asphalt 1.000 Type of Asphalt Medium Setting Emulsion Asphalt Date 4/2/29

Avg. Sp.Gr. Blend 2.662 Design for surface of Heavy Traffic (Soaked 4 Day) Date Test 11/2/29

No.	% Residual Asphalt	% Emulsion Asphalt	% Water Content	Diameter (cm.)	Height (cm.)	Stability-Lbs			Flow 1/100"	Avg. Flow	wt. falied specimen	wt. oven dry specimen	wt. Tare	K	Moisture Absorbed	Remark
						Reading	Adj.	Avg.								
1	3.0	4.62	2.75	10.16	6.82	1890	1625		6		1397.6	1359.8	120.4	2.96		
2	3.0	4.62	2.75	10.14	6.76	1900	1687	1642	12	9.39	1445.8	1407.2	181.0	3.06	2.811	
3	3.0	4.62	2.75	10.17	6.77	1820	1615		10		1420.4	1381.4	140.2	3.14		
4	3.5	5.38	2.75	10.16	6.68	1890	1682		11		1414.6	1377.1	153.1	3.06		
5	3.5	5.38	2.75	10.18	6.62	1840	1647	1667	11	10.00	1589.3	1359.4	112.9	2.32	2.389	
6	3.5	5.38	2.75	10.17	6.83	1910	1643		8		1401.4	1369.4	123.4	2.56		
7	4.0	6.15	2.75	10.15	6.89	1920	1640		8		1415.3	1386.6	130.1	2.28		
8	4.0	6.15	2.75	10.16	6.94	1870	1588	16.29	10	10.33	1397.9	1369.4	105.4	2.63	1.914	
9	4.0	6.15	2.75	10.16	6.88	1930	1660		13		1423.6	1399.6	150.4	1.92		
10	4.5	6.92	2.75	10.14	6.83	1590	1367		10		1413.4	1395.3	121.7	1.36		
11	4.5	6.92	2.75	10.15	6.82	1730	1488	1425	10	10.66	1395.8	1371.6	100.6	1.82	1.117	
12	4.5	6.92	2.75	10.18	6.81	1640	1419		12		1399.3	1383.3	114.3	1.26		
13	5.0	7.69	2.75	10.19	6.73	1560	1386		13		1425.9	1417.7	140.9	0.61		
14	5.0	7.69	2.75	10.20	6.68	1620	1442	1398	17	15.00	1470.2	1457.3	171.4	0.91	0.559	
15	5.0	7.69	2.75	10.18	6.79	1540	1366		15		1412.1	1403.2	115.2	0.96		

ภาคผนวก ค

ผลการเตรียมตัวอย่างในการทดลองน้ำหนักกระทำซ้ำ

ของยาง HFMS-2 และยาง MS-2 (ขนาด ϕ4" × 8")

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองความหนาแน่น (Bulk Density) ของตัวอย่างขนาด ϕ4" × 8" ของยาง HFMS-2 และยาง MS-2

ตารางที่ ผ.11 ยาง HFMS-2 เติมน้ำ 3.0 % และปริมาณเนื้อยาง 4.0 % หาความหนาแน่น (Bulk Density)

เบอร์	ϕ (ซม.)	สูง (ซม.)	น้ำหนักในอากาศ (กรัม)	น้ำหนัก Surf. Dry (กรัม)	น้ำหนักในน้ำ (กรัม)	Bulk Density (กรัม/ลบ.ซม.)	สูง/ϕ
HF-S1	10.69	18.51	3750.5	3791.2	2297.6	2.511	1.732
HF-S2	10.73	19.08	3993.5	4023.1	2519.1	2.655	1.778
HF-S3	10.71	19.62	4078.5	4116.6	2596.2	2.683	1.832
HF-S4	10.75	19.65	4151.3	4181.5	2644.2	2.700	1.828
HF-S5	10.70	19.49	4045.5	4061.2	2550.7	2.678	1.821
HF-S6	10.73	20.37	4156.5	4174.8	2674.2	2.769	1.898
HF-S7	10.68	19.43	4000.5	4025.0	2494.2	2.613	1.819
HF-S8	10.75	19.53	4155.4	4171.5	2589.9	2.627	1.817
HF-S9	10.67	19.58	4163.9	4110.0	2570.6	2.705	1.835
HF-S10	10.69	19.35	4096.6	4113.1	2544.6	2.612	1.810
HF-S11	10.74	18.80	4136.5	4160.0	2444.6	2.411	1.750
HF-S12	10.70	20.13	4098.3	4125.8	2492.1	2.509	1.881
HF-S13	10.73	19.16	4041.4	4064.8	2560.2	2.686	1.786
HF-S14	10.74	18.63	3953.6	3979.0	2468.3	2.6 7	1.735
HF-S15	10.69	18.25	4116.3	4135.0	2633.2	2.741	1.707
HF-S16	10.71	19.09	4092.5	4105.0	2626.5	2.768	1.782
HF-S17	10.73	18.83	4098.3	4110.6	2609.9	2.731	1.755
HF-S18	10.70	18.91	4033.6	4071.1	2558.7	2.667	1.767
HF-S19	10.76	19.76	4054.3	4066.1	2464.2	2.531	1.836
HF-S20	10.71	19.81	4066.9	4072.3	2462.3	2.526	1.849
HF-S21	10.69	19.76	4032.1	4050.6	2393.3	2.433	1.848

ตารางที่ ผ.12 ยาง MS-2 เติมน้ำ 2.75 % และปริมาณเนื้อยาง 3.75 % หาความหนาแน่น (Bulk Density)

เบอร์	ϕ (ซม.)	สูง (ซม.)	น้ำหนักในอากาศ (กรัม)	น้ำหนัก Surf. Dry (กรัม)	น้ำหนักในน้ำ (กรัม)	Bulk Density (กรัม/ลบ.ซม.)	สูง/ϕ
MS-S1	10.73	19.90	4115.6	4146.2	2513.8	2.521	1.855
MS-S2	10.66	20.52	4154.5	4188.3	2550.3	2.536	1.925
MS-S3	10.72	20.21	4139.0	4171.4	2553.3	2.568	1.885
MS-S4	10.68	20.03	4055.8	4090.5	2481.8	2.521	1.875
MS-S5	10.61	20.32	4143.5	4191.2	2591.3	2.589	1.945
MS-S6	10.71	20.03	4170.5	4198.5	2563.5	2.560	1.870
MS-S7	10.63	19.87	4130.3	4172.5	2554.0	2.562	1.869
MS-S8	10.70	19.21	4138.3	4183.0	2598.3	1.611	1.795
MS-S9	10.71	20.25	4157.4	4218.5	2619.3	2.589	1.891
MS-S10	10.71	19.60	4158.8	4178.6	2566.2	2.579	1.830
MS-S11	10.68	19.42	4130.0	4179.0	2587.3	2.585	1.818
MS-S12	10.77	19.76	4187.8	4226.1	2638.3	2.637	1.835
MS-S13	10.68	19.89	4132.1	4168.7	2577.6	2.597	1.862
MS-S14	10.71	19.78	4129.3	4156.6	2544.2	2.561	1.847
MS-S15	10.69	20.10	4172.3	4200.1	2596.0	2.601	1.880
MS-S16	10.70	20.11	4174.6	4201.4	2588.3	2.588	1.879
MS-S17	10.73	20.41	4175.0	4198.3	2587.6	2.592	1.902
MS-S18	10.71	19.76	4132.7	4175.3	2585.8	2.600	1.845
MS-S19	10.66	20.16	4149.8	4164.1	2550.6	2.572	1.891
MS-S20	10.71	19.89	4126.4	4139.7	2559.3	2.611	1.857
MS-S21	10.72	20.11	4172.3	4190.1	2548.8	2.542	1.876

ภาคผนวก ง

ผลการทดลอง Dynamic Load ของตัวอย่าง ϕ4" × 8"

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.13 ผลการทดลองตัวอย่าง HF-S3, HS-S5 โดย $\sigma_3 = 0$ ที่อุณหภูมิ 20°C

Stress psi (σ_d)	Deformation $\times 10^{-2}$ in			σ ($\times 10^{-2}$)	in/in Strain ($\times 10^{-4}$)	Mr psi	Remark
	HF-S3	HF-S5	ΔL				
3.157	0.69	0.36	0.53	0.165	6.88	4589	$\sigma_3 = 0$
6.313	0.84	0.54	0.69	0.150	8.96	7046	Avg h =
9.470	1.00	1.04	1.02	0.202	10.32	7174	19.56 cm
12.627	1.22	1.15	1.19	0.035	15.50	8147	
15.783	1.50	1.74	1.62	0.120	21.00	7516	
18.94	1.58	1.70	1.64	0.060	21.30	8892	
22.097	1.82	1.74	1.78	0.040	23.10	9566	
25.25	1.82	1.80	1.94	0.140	25.20	10020	
28.41	2.08	1.87	3.90	2.04	50.60		

ตารางที่ ผ.14 ผลการทดลองตัวอย่าง HF-S14, HF-S17 โดย $\sigma_3 = 0$ ที่อุณหภูมิ 40°C

Stress psi (σ_d)	Deformation $\times 10^{-2}$ in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
	HF-S14	HF-S17	ΔL				
3.157	0.27	0.31	0.29	0.02	3.93	8033	$\sigma_3 = 0$
6.313	0.92	0.65	0.785	0.135	10.60	5956	Avg h =
9.470	1.19	0.96	1.075	0.115	14.60	6486	18.73 cm
12.627	1.45	1.10	1.275	0.175	17.30	7299	
15.783	1.70	1.32	1.51	0.190	20.50	7699	
18.940	1.92	1.34	1.73	0.190	23.50	8060	
22.097	2.12	1.89	2.01	0.115	27.30	8094	
25.25	2.35	2.02	2.185	0.165	29.60	8530	
26.83	3.46	2.56	3.01	0.45	40.80	6576	

ตารางที่ ผ.15 ผลการทดลองตัวอย่าง HF-S7, HF-S10 โดย σ_3 = psi ที่อุณหภูมิ 60°C

Stess psi (σ_d)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
	HF-S7	HF-S10	ΔL				
3.157	0.27	0.25	0.26	0.01	3.41	9258	σ_3 = 0
6.313	1.04	0.83	0.935	0.105	12.20	5175	Avg h =
7.892	1.16	0.98	1.07	0.09	14.00	5637	19.39 cm
9.47	1.31	1.16	1.235	0.075	16.20	5846	
11.048	1.45	1.30	1.375	0.075	18.00	6138	
12.627	1.61	1.52	1.565	0.045	20.50	6160	
15.783	2.00	2.21	2.105	0.105	27.60	5718	
17.362	3.93	7.19	5.56	1.63	72.80	2385	

ตารางที่ ผ.16 ผลการทดลองตัวอย่าง HF-S6, HF-S8 โดย σ_3 = 15 psi ที่อุณหภูมิ 20°C

Stress psi (σ_d)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
	HF-S6	HF-S8	ΔL				
6.313	0.08	0.08	0.08	0.00	1.02	61892	σ_3 = 15 psi
7.892	0.16	0.13	0.145	0.015	1.85	42659	Avg h =
9.470	0.19	0.19	0.19	0.00	2.42	39132	19.95 cm
11.048	0.22	0.26	0.24	0.02	3.06	36105	
12.627	0.25	0.34	0.295	0.045	3.76	33582	
14.205	0.30	0.42	0.36	0.06	4.58	31015	
15.783	0.36	0.50	0.43	0.07	5.47	28854	
17.362	0.40	0.58	0.49	0.09	6.24	27824	
18.940	0.48	0.69	0.585	0.105	7.45	25423	
20.518	0.61	0.83	0.72	0.11	9.17	22375	
22.096	2.51	3.41	2.96	0.45	37.68	5864	

ตารางที่ ผ.17 ผลการทดลองตัวอย่าง HF-S9, HF-S11 โดย σ_3 = 15 psi ที่อุณหภูมิ 40°C

Stress psi (σ_d)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
	HF-S9	HF-S11	ΔL				
3.157	0.43	0.27	0.35	0.08	4.63	6819	σ_3 = 15 psi
6.313	0.49	0.30	0.395	0.095	5.23	12071	Avg h =
9.470	0.53	0.44	0.485	0.045	6.42	14751	19.19 cm
12.627	0.63	0.59	0.02	0.02	8.07	15647	
15.783	0.77	0.62	0.75	0.075	9.20	17155	
18.940	0.89	0.72	0.085	0.085	10.70	17701	
22.097	1.00	0.95	0.025	0.025	12.90	17129	
25.25	1.11	1.03	0.04	0.04	14.20	17782	
28.41	1.21	1.48	0.135	0.135	17.80	15961	
31.57	1.62	3.83	1.105	1.105	36.10	8745	

ตารางที่ ผ.18 ผลการทดลองตัวอย่าง HF-S18, HF-S16 โดย σ_3 = 15 psi ที่อุณหภูมิ 60°C

Stress psi (σ_d)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
	HF-S16	HF-S18	ΔL				
3.157	0.87	0.29	0.28	0.01	3.74	8441	σ_3 = 15 psi
6.313	0.42	0.51	0.465	0.45	6.22	10151	Avg h =
9.47	0.68	0.60	0.64	0.04	8.55	11076	19.00 cm
12.627	0.88	0.78	0.83	0.05	11.10	11376	
15.78	1.03	0.98	1.01	0.025	13.50	11689	
18.94	1.16	1.00	1.08	0.08	14.40	13153	
22.097	1.32	1.20	1.26	0.06	16.80	13153	
25.25	2.10	1.80	1.95	0.15	26.10	9674	

ตารางที่ ผ.19 ผลการทดลองตัวอย่าง MS-S5, MS-S6 โดย σ_3 = 0 psi ที่อุณหภูมิ 20°C

Stress psi (σ_d)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
	MS-S5	MS-S6	ΔL				
3.157	0.14	0.03	0.085	0.055	1.07	29505	σ_3 = 0 psi
6.313	0.34	0.06	0.200	0.14	2.52	25052	Avg h =
7.892	0.35	0.10	0.225	0.125	2.83	27887	20.175 cm
9.470	0.38	0.14	0.260	0.12	3.27	28960	
11.048	0.47	0.19	0.330	0.14	4.15	26622	
12.627	0.76	0.25	0.505	0.255	6.36	19854	
14.205	0.93	0.31	0.620	0.31	7.81	18188	
15.783	1.21	0.38	0.795	0.415	10.00	15783	
17.362	1.33	0.47	0.900	0.43	11.30	15365	
18.940	1.61	0.73	1.170	0.44	14.70	12884	
20.518	2.95	3.89	3.42	0.47	43.10	4761	

ตารางที่ ผ.20 ผลการทดลองตัวอย่าง MS-S8, MS-S13 โดย σ_3 = 0 psi ที่อุณหภูมิ 40°C

Stress psi (σ_d)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
	MS-S8	MS-S13	ΔL				
3.157	0.37	0.30	0.335	0.035	4.35	7257	σ_3 = 0 psi
6.313	0.46	0.38	0.42	0.04	5.46	11562	Avg h =
9.47	0.63	0.54	0.585	0.045	7.60	12461	19.55 cm
12.627	0.74	0.61	0.675	0.065	8.77	14398	
15.783	0.85	0.72	0.785	0.065	10.20	15474	
18.94	0.95	0.80	0.875	0.075	11.37	16658	
22.097	1.04	0.90	0.970	0.070	12.60	17537	
25.25	1.18	1.01	1.095	0.085	14.20	17792	
28.41	1.43	1.39	1.41	0.02	18.30	15525	
31.57	1.89	2.40	2.145	0.255	27.80	11356	

ตารางที่ ผ.21 ผลการทดลองตัวอย่าง MS-S11, MS-S15 โดย σ_3 = 0 psi ที่อุณหภูมิ 60°C

Stress psi (σ_d)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
	MS-S11	MS-S15	ΔL				
3.157	0.71	0.83	0.77	0.06	9.90	3189	σ_3 = 0 psi
6.313	0.82	0.96	0.89	0.07	11.40	5538	Avg h =
9.47	0.98	1.21	1.095	0.115	14.10	6716	19.76 cm
12.627	1.10	1.40	1.25	0.15	16.10	7843	
15.783	1.31	1.56	1.435	0.125	18.40	8578	
18.940	1.47	2.10	1.785	0.315	22.90	8271	
20.097	1.56	2.33	1.945	0.385	25.00	8039	
25.25	2.48	5.60	4.04	1.56	51.93	4862	

ตารางที่ ผ.22 ผลการทดลองตัวอย่าง MS-S3, MS-S4 โดย σ_3 = 15 psi ที่อุณหภูมิ 20°C

Stress psi (σ_d)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
	MS-S3	MS-S4	ΔL				
3.157	0.03	0.07	0.05	0.02	0.63	50032	σ_3 = 15 psi
6.313	0.05	0.14	0.095	0.045	1.08	58454	Avg h =
9.470	0.07	0.42	0.245	0.175	3.10	30548	20.12 cm
12.627	0.09	0.542	0.316	0.226	3.99	31647	
15.783	0.10	0.756	0.428	0.328	5.40	29228	
18.940	0.12	0.800	0.460	0.340	5.80	32655	
20.518	0.28	1.12	0.700	0.420	8.84	23210	
22.097	0.39	1.35	0.870	0.480	10.98	20125	
25.25	0.53	2.09	1.31	0.78	16.54	15266	

ตารางที่ ผ.23 ผลการทดลองตัวอย่าง MS-S10, MS-S4 โดย σ_3 = 15 psi ที่อุณหภูมิ 40°C

Stress psi (σ_d)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
	MS-S10	MS-S14	ΔL				
3.157	0.21	0.32	0.265	0.055	3.42	9231	σ_3 = 15 psi
6.313	0.31	0.43	0.37	0.06	4.77	13235	Avg h =
9.47	0.37	0.51	0.44	0.07	5.68	16673	19.69 cm
12.627	0.49	0.60	0.55	0.055	7.09	17809	
15.783	0.60	0.68	0.64	0.04	8.26	19108	
18.94	0.71	0.79	0.75	0.04	9.67	19586	
22.097	0.83	0.85	0.84	0.01	10.80	18608	
25.25	1.15	1.30	1.225	0.075	15.80	15981	
28.41	5.15	2.80	3.975	1.175	51.30	5538	

ตารางที่ ผ.24 ผลการทดลองตัวอย่าง MS-S1, MS-S2 โดย σ_3 = 15 psi ที่อุณหภูมิ 60°C

Stress psi (σ_d)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
	MS-S1	MS-S2	ΔL				
3.157	0.73	0.70	0.715	0.015	8.99	3512	σ_3 = 15 psi
6.313	0.81	0.91	0.86	0.05	10.80	5845	Avg h =
9.470	1.10	1.29	1.195	0.095	15.00	6313	20.21 cm
12.627	1.41	1.88	1.645	0.235	20.70	6100	
15.783	1.77	2.13	1.95	0.18	24.50	6442	
18.94	2.11	2.46	2.285	0.175	28.70	6599	
22.097	8.56	3.55	6.055	2.51	76.10	2904	

ตารางที่ ผ.25 ผลการทดลองตัวอย่าง HF-S1, HF-S2 โดยเพิ่มน้ำหนักที่กดและความดันรอบข้างที่

อุณหภูมิ 20°C

Stress psi (σ_d)	Confined psi (σ_3)	Deformation $\times 10^{-2}$ in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
		HF-S1	HF-S12	ΔL				
6.313	5	0.16	0.14	0.15	0.01	1.97	32046	Avg h =
6.313	10	0.13	0.10	0.115	0.015	1.51	41808	19.32 cm
9.470	10	0.14	0.12	0.13	0.01	1.71	55380	
9.470	15	0.13	0.11	0.12	0.01	1.58	59937	
12.63	15	0.15	0.16	0.155	0.005	2.04	61918	
12.63	20	0.13	0.14	0.135	0.005	1.77	71356	
15.78	20	0.16	0.18	0.17	0.01	2.23	79762	
18.94	25	0.13	0.18	0.155	0.025	2.04	92843	
22.09	25	0.16	0.17	0.165	0.005	2.17	101797	
25.25	25	0.16	0.15	0.155	0.005	2.04	123775	

ตารางที่ ผ.26 ผลการทดลองตัวอย่าง HF-S2, HF-S13 โดยเพิ่มน้ำหนักที่กด และความดันรอบข้างที่อุณหภูมิ 40°C

Stress psi (σ_d)	Confined psi (σ_d)	Deformation $\times 10^{-2}$ in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
		HF-S2	HF-S13	ΔL				
3.157	0	0.24	0.28	0.26	0.02	3.45	9151	Avg h =
3.157	5	0.19	0.21	0.20	0.01	2.66	11868	19.12 cm
6.313	5	0.26	0.27	0.265	0.005	3.52	17935	
6.313	10	0.31	0.29	0.30	0.01	3.99	15786	
9.47	10	0.24	0.20	0.24	0.02	3.19	29687	
9.47	15	0.14	0.10	0.12	0.02	1.59	59559	
12.63	15	0.17	0.14	0.155	0.015	2.06	61311	
12.63	20	0.15	0.12	0.135	0.015	1.79	70559	
18.94	25	0.21	0.18	0.195	0.015	2.59	73127	
22.09	25	0.23	0.18	0.205	0.025	2.72	81213	
25.25	25	0.26	0.23	0.245	0.015	3.25	77692	

ตารางที่ ผ.27 ผลการทดลองตัวอย่าง HF-S4, HS-S15 โดยเพิ่มน้ำหนักที่กดและความดันรอบข้างที่อุณหภูมิ 60°C

Stress psi (σ_d)	Confined psi (σ_3)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
		HF-S4	HF-S15	ΔL				
3.157	0	0.42	0.36	0.39	0.03	5.23	6042	Avg h =
3.157	5	0.33	0.25	0.29	0.04	3.88	8122	18.95 cm
6.313	5	0.77	0.57	0.67	0.10	8.99	7015	
6.313	10	0.56	0.52	0.54	0.02	7.27	8688	
9.47	10	0.79	0.63	0.71	0.08	9.52	9943	
9.47	15	0.61	0.79	0.70	0.09	9.42	10051	
12.627	15	0.85	0.81	0.83	0.02	11.10	11424	
12.627	20	0.73	0.69	0.71	0.02	9.58	13176	
15.78	20	0.79	1.11	0.95	0.16	12.80	12253	

ตารางที่ ผ.28 ผลการทดลองตัวอย่าง MS-S9, MS-S17 โดยเพิ่มน้ำหนักที่กดและความดันรอบข้างที่อุณหภูมิ 20°C

Stress psi (σ_d)	Confined psi (σ_3)	Deformation × 10^{-2} in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
		MS-S9	MS-S17	AL				
3.157	0	0.15	0.18	0.165	0.015	2.06	15325	Avg h =
3.157	5	0.12	0.13	0.125	0.005	1.56	20237	20.33 cm
6.313	5	0.09	0.16	0.125	0.035	1.56	40468	
6.313	10	0.08	0.12	0.100	0.02	1.25	50504	
9.470	10	0.13	0.16	0.145	0.015	1.81	52320	
9.470	15	0.12	0.14	0.130	0.01	1.62	58457	
10.627	15	0.13	0.12	0.125	0.005	1.56	80942	
12.627	20	0.11	0.10	0.105	0.005	1.31	96389	

ตารางที่ ผ.29 ผลการทดลองตัวอย่าง MS-S7, MS-S16 โดยเพิ่มน้ำหนักที่กดและความดันรอบข้าง ที่อุณหภูมิ 40°C

Stress psi (σ_d)	Confined psi (σ_3)	Deformation $\times 10^{-2}$ in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
		MS-S7	MS-S16	ΔL				
3.157	0	0.25	0.30	0.275	0.025	3.49	9046	Avg h =
3.157	5	0.23	0.20	0.215	0.015	2.73	11612	19.99 cm
6.313	5	0.35	0.38	0.365	0.015	4.64	13606	
6.313	10	0.20	0.23	0.215	0.015	2.73	23125	
9.470	10	0.29	0.29	0.290	0.00	3.68	25734	
9.470	15	0.15	0.17	0.160	0.01	2.03	46650	
12.627	15	0.16	0.14	0.150	0.01	1.91	66110	
12.627	20	0.15	0.11	0.130	0.02	1.65	76527	
15.783	20	0.15	0.17	0.160	0.01	2.03	77749	
18.94	20	0.15	0.20	0.175	0.025	2.23	85315	

ตารางที่ ผ.30 ผลการทดลองตัวอย่าง MS-S12, MS-S18 โดยเพิ่มน้ำหนักที่กดและความดันรอบข้างที่

อุณหภูมิ 60°C

Stress psi (σ_d)	Confined psi (σ_3)	Deformation $\times 10^{-2}$ in			σ ($\times 10^{-2}$)	Strain ($\times 10^{-4}$) in/in	Mr psi	Remark
		MS-S12	MS-S18	ΔL				
3.157	0	0.44	0.40	0.47	0.07	6.00	5261	Avg h =
3.157	5	0.36	0.44	0.40	0.04	5.15	6133	19.82 cm
6.313	5	0.83	0.71	0.77	0.06	9.82	6427	
6.313	10	0.61	0.69	0.65	0.04	8.38	7532	
9.47	10	1.13	0.77	0.95	0.18	1.21	7856	
9.47	15	0.96	1.01	0.91	0.025	1.17	8093	
12.627	15	1.18	1.36	1.27	0.09	1.63	7748	
12.627	20	1.23	1.19	1.21	0.02	1.55	8172	
15.783	20	1.57	1.35	1.46	0.11	1.87	8433	
18.940	25	1.73	1.53	1.63	0.10	2.09	9066	

ตารางที่ ผ.31 แสดงการหาสมการ Linear Regression ของตัวอย่าง HF-S1 และ HF-S12 ที่อุณหภูมิ 20°C

$\theta = \sigma_1+2\sigma_3$	Mr, psi	X' = log θ	Y' = log Mr	X'Y'	X'^2	Y'^2	Y"=α+BX'	$(Y'-Y")^2$
21.313	32046	1.33	4.51	5.99	1.77	20.34	4.47	0.0016
36.313	41808	1.56	4.62	7.21	2.43	21.34	4.66	0.0016
39.470	55380	1.59	4.74	7.54	2.53	22.46	4.68	0.0036
54.47	59937	1.74	4.78	8.32	3.03	22.85	4.79	0.0001
57.63	61912	1.76	4.79	8.43	3.09	22.94	4.81	0.0004
78.63	71356	1.86	4.85	9.02	3.46	23.52	4.89	0.0016
75.78	70762	1.88	4.85	9.12	3.53	23.52	4.91	0.0036
93.94	92843	1.97	4.77	9.79	3.88	24.70	4.98	0.0001
97.09	101797	1.98	5.00	9.90	3.92	25.00	4.99	0.0001
100.25	123775	2.00	5.09	10.18	4.00	25.91	5.01	0.0064
		Σ=17.67	Σ=48.2	Σ=85.5	Σ=31.64	Σ=232.58		Δ^2=0.0191

$$\bar{X} = \frac{17.67}{10} = 1.767 \quad , \quad \bar{Y} = \frac{48.2}{10} = 4.82$$

$$\bar{B} = \frac{85.5 - 10 \times 1.767 \times 4.820}{31.64 - 10(1.767)^2} = 0.793$$

$$= 4.82 - 1.767 \times 0.793 = 3.419 \quad , \quad K = 2613$$

$$S_y^2 = \frac{1}{10 - 1}\left[232.58 - 10(4.82)^2\right] = 0.0284$$

$$S_{y/x}^2 = 0.0489$$

$$\gamma^2 = 1 - \frac{2388 \times 10^{-3}}{0.0284} = 0.916 \quad , \gamma = 0.957$$

ดังนั้น $Mr = 2613\ \theta^{0.793}$, $\gamma = 0.957$

ตารางที่ ผ.32 แสดงการหาสมการ Linear Regression ของตัวอย่าง HF-S2 และ HF-S3 ที่อุณหภูมิ 40 °C

$\theta = \sigma_1+2\sigma_3$	Mr psi	X' = log θ	Y' = log Mr	X'Y'	X'^2	Y'^2	Y"=α+βX'	$(Y'-Y")^2$
3.157	9151	0.50	3.96	1.98	0.25	15.68	3.732	0.052
3.157	11868	1.26	4.07	5.13	1.59	16.56	4.29	0.048
6.313	17935	1.33	4.25	5.65	1.77	18.06	4.35	0.01
6.313	15786	1.56	4.20	6.55	2.43	17.64	4.52	0.102
9.47	29687	1.59	4.47	7.11	2.53	19.98	4.54	0.005
9.47	59559	1.74	4.77	8.30	3.03	22.75	4.65	0.014
12.63	61311	1.76	4.79	8.43	3.09	22.94	4.67	0.014
12.63	70559	1.86	4.85	9.02	3.46	23.53	4.74	0.012
18.94	73127	1.97	4.86	9.57	3.88	23.62	4.83	0.0009
22.09	81213	1.98	4.91	9.72	3.92	24.11	4.83	0.0064
25.25	77692	2.00	4.89	9.78	4.00	23.91	4.83	0.0016
		Σ=17.55	Σ=50.02	Σ=81.24	Σ=29.95	Σ=228.77		Δ^2=0.2659

$$\bar{X} = \frac{17.55}{11} = 1.595 \quad , \quad \bar{Y} = \frac{50.02}{11} = 4.547$$

$$\bar{\beta} = \frac{81.24 - 11 \times 1.595 \times 4.547}{29.95 - 11(1.595)^2} = 0.744$$

$$= 4.547 - 1.595 \times 0.744 = 3.36 \quad , \quad k = 2293$$

$$s_y^2 = \frac{1}{11 - 1}\left[228.77 - 11(4.547)^2\right] = 0.134$$

$$s_{y/x}^2 = \frac{0.2659}{11 - 2} = 0.0295$$

$$s_{y/x} = 0.172$$

$$\gamma^2 = 1 - \frac{0.0295}{0.134} = 0.779 \quad , \quad \gamma = 0.883$$

ดังนั้น $Mr = 2293\ \theta^{0.744}$, $\gamma = 0.883$

ตารางที่ ผ.33 แสดงการหาสมการ Linear Regression ของตัวอย่าง MS-S9, MS-S17 ที่อุณหภูมิ 20°C

$\theta = \sigma_1+2\sigma_3$	Mr psi	X' = log θ	Y' = log Mr	X'Y'	X'^2	Y'^2	$Y''=\alpha+\beta X'$	$(Y-Y'')^2$
3.157	15325	0.50	4.19	2.095	0.25	17.56	4.10	0.0081
18.157	20237	1.26	4.31	5.43	1.59	18.58	4.54	0.053
21.313	40468	1.33	4.61	6.13	1.77	21.25	4.58	0.0009
36.313	50504	1.56	4.70	7.33	2.43	22.09	4.71	0.0001
39.47	52320	1.60	4.72	7.55	2.56	22.28	4.73	0.0001
54.47	58457	1.74	4.77	8.30	3.03	22.75	4.82	0.0025
57.63	80942	1.76	4.91	8.64	3.09	24.11	4.83	0.0064
72.63	96389	1.86	4.98	9.26	3.41	24.80	4.88	0.01
		Σ=11.61	Σ=37.19	Σ=54.74	Σ=18.18	Σ=173.42		Δ^2=0.0811

$$\bar{X} = \frac{11.61}{8} = 1.451 \quad , \quad \bar{Y} = \frac{37.19}{8} = 4.649$$

$$\bar{\beta} = \frac{54.74 - 8 \times 1.451 \times 4.649}{18.18 - 8(1.451)^2} = 0.579$$

$$\alpha = 4.649 - 1.451 \times 0.579 = 3.808 \quad , \quad k = 6433$$

$$S_y^2 = \frac{1}{8-1}\left[173.42 - 8(4.649)^2\right] = 0.086$$

$$S_{y/x}^2 = \frac{0.0811}{8-2} = 0.014$$

$$S_{y/x} = 0.116$$

$$\gamma^2 = 1 - \frac{0.014}{0.086} = 0.837 \quad , \quad \gamma = 0.915$$

ดังนั้น $Mr = 6433\ \theta^{0.579}$

ตารางที่ ผ.34 แสดงการหาสมการ Linear Regression ของตัวอย่าง MS-S7 และ MS-S16 ที่อุณหภูมิ 40°C

$\theta = \sigma_1+2\sigma_3$	Mr psi	X' = log θ	Y' = log Mr	X'Y'	X'^2	Y'^2	Y"=α+βX'	$(Y'-Y")^2$
3.157	9046	0.50	3.96	1.98	0.25	15.68	3.71	0.0625
18.157	11612	1.26	4.06	5.12	1.59	16.48	4.30	0.0576
21.313	13602	1.33	4.13	5.49	1.77	17.06	4.36	0.0529
36.313	23125	1.56	4.36	6.80	2.43	19.01	4.54	0.0324
39.47	25734	1.60	4.41	7.06	2.56	19.45	4.57	0.0256
54.47	46650	1.74	4.67	8.13	3.03	21.81	4.68	0.0001
57.63	66110	1.76	4.82	8.48	3.10	23.23	4.69	0.0169
72.63	76527	1.86	4.88	9.08	3.46	23.81	4.77	0.0121
75.78	77749	1.88	4.89	9.19	3.53	23.91	4.78	0.0121
78.94	85315	1.90	4.93	9.37	3.61	24.30	4.80	0.0169
80.097	72032	1.91	4.86	9.28	3.65	23.62	4.81	0.0025
		Σ=17.3	Σ=49.97	Σ=79.98	Σ=28.98	Σ=228.36		Δ^2=0.2916

$$\bar{X} = \frac{17.3}{11} = 1.573 \quad , \quad \bar{Y} = \frac{49.97}{11} = 4.543$$

$$\bar{\beta} = \frac{79.98 - 11 \times 1.573 \times 4.543}{28.98 - 11(1.573)^2} = 0.779$$

$$\alpha = 4.543 - 0.779 \times 1.573 = 3.32 \quad , \quad k = 2078$$

$$s_y^2 = \frac{1}{11-1}\left[228.36 - 11(4.543)^2\right] = 0.133$$

$$\gamma^2 = 1 - \frac{3.24 \times 10^{-3}}{0.133} = 0.976 \quad , \quad \gamma = 0.988$$

ดังนั้น $Mr = 2078\ \theta^{0.779}$, $\gamma = 0.988$

ตารางที่ ผ.35 แสดงการหาสมการ Linear Regression ของตัวอย่าง MS-S12 และ MS-S18 ที่อุณหภูมิ 40°C

$\theta = \sigma_1+2\sigma_3$	Mr psi	X' = log θ	Y' = log Mr	X'Y'	X'^2	Y'^2	$Y'=\alpha+\beta X'$	$(Y'-Y'')^2$
3.157	5261	0.50	3.72	1.86	0.25	13.84	3.70	0.0004
18.157	6133	1.26	3.79	4.78	1.59	14.36	3.82	0.0009
21.313	6427	1.33	3.81	5.07	1.77	14.52	3.83	0.0004
36.313	7532	1.56	3.88	6.05	2.43	15.05	3.87	0.0001
39.47	7856	1.60	3.89	6.22	2.56	15.13	3.88	0.0001
54.47	8093	1.74	3.91	6.80	3.03	15.29	3.90	0.0001
57.627	7748	1.76	3.89	6.85	3.09	15.13	3.90	0.0001
72.627	8172	1.86	3.91	7.27	3.46	15.29	3.92	0.0001
75.783	8433	1.88	3.93	7.39	3.53	15.44	3.923	0.0005
93.94	9066	1.97	3.96	7.80	3.88	15.68	3.94	0.0004
		Σ=15.46	Σ=38.69	Σ=60.09	Σ=25.59	Σ=149.73		$\Delta^2=2.65\times10^{-3}$

$$\bar{X} = \frac{15.46}{10} = 1.546 \quad , \quad \bar{Y} = \frac{38.69}{10} = 3.869$$

$$\bar{\beta} = \frac{60.09 - 10 \times 1.546 \times 3.869}{25.59 - 10(1.546)^2} = 0.163$$

$$\alpha = 3.869 - 0.163 \times 1.546 = 3.617 \quad , \quad k = 4140$$

$$S_y^2 = \frac{1}{10 - 1}\left[149.73 - 10(3.869)^2\right] = 4.27 \times 10^{-3}$$

$$S_{y/x}^2 = \frac{2.65 \times 10^{-3}}{10 - 2} = 3.31 \times 10^{-4} \quad , \quad S_{y/x} = 0.018$$

$$\gamma^2 = 1 - \frac{3.31 \times 10^{-4}}{4.27 \times 10^{-3}} = 0.922 \quad , \quad \gamma = 0.961$$

ตารางที่ ผ.36 แสดงการหาสมการ Linear Regression ของตัวอย่าง HF-S4 และ HF-S15 ที่อุณหภูมิ 60°C

$\theta = \sigma_1+2\sigma_3$	Mr psi	X' = log θ	Y' = log Mr	X'Y'	X'^2	Y'^2	Y"=α+βX'	$(Y'-Y")^2$
3.157	6042	0.50	3.78	1.89	0.25	14.29	3.73	0.0025
18.157	8122	1.26	3.91	4.93	1.59	15.29	3.91	0.0000
21.313	7015	1.33	3.85	5.12	1.77	14.82	3.93	0.0064
36.313	8688	1.56	3.94	6.15	2.43	15.52	3.99	0.0025
39.47	9943	1.60	4.00	6.40	2.56	16.00	4.00	0.0000
54.47	10051	1.74	4.00	6.96	3.03	16.00	4.03	0.0009
57.63	11424	1.76	4.06	7.15	3.10	16.48	4.04	0.0004
72.63	13176	1.86	4.12	7.66	3.46	16.97	4.06	0.0036
75.78	12253	1.88	4.09	7.69	3.53	16.73	4.064	0.0068
—		Σ=13.49	Σ=35.75	Σ=53.95	Σ=21.72	Σ=142.10		Δ^2=0.017

$$\bar{X} = \frac{13.49}{9} = 1.499 \quad , \quad \bar{Y} = \frac{35.75}{9} = 3.972$$

$$\bar{\beta} = \frac{53.95 - 9 \times 1.499 \times 3.972}{21.72 - 9(1.499)^2} = 0.243$$

$$\alpha = 3.972 - 0.243 \times 1.498 = 3.608 \quad , \quad k = 4055$$

$$s_y^2 = \frac{1}{9-1}\left[142.10 - 9(3.972)^2\right] = 0.0.49$$

$$s_{y/x}^2 = \frac{0.017}{9-2} = 2.43 \times 10^{-3} \quad , \quad S_{y/x} = 0.909$$

$$\gamma^2 = 1 - \frac{2.43 \times 10^{-3}}{0.014} = 0.826 \quad , \quad \gamma = 0.909$$

ดังนั้น $Mr = 4055\ \theta^{0.243}$, $\gamma = 0.909$

ภาคผนวก ง.1

ข้อมูลการทดลองหาความสัมพันธ์ของความเครียด,

Resilient Modulus กับจำนวนรอบในการกระทำซ้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดยาง HFMS-2 อุณหภูมิ 20°C ความถี่ 1 Hz

Deviator Stress 15 psi ความดันรอบข้าง 0 psi

Strain in/in, 10^{-4}	Cycles N	Mr, psi	Strain in/in, 10^{-4}	Cycles, N	Mr, psi
0	0	0	9.46	800	15856
0.129	20	1162790	10.108	850	14839
0.194	40	773196	10.238	900	14651
0.259	60	579150	10.367	950	14469
0.259	80	579150	10.756	1000	13946
0.324	100	462963	11.144	1100	13460
0.389	120	385604	12.829	1200	11692
0.289	140	385604	13.995	1300	10718
0.454	160	330396	15.03	1400	9980
0.518	180	289575	16.07	1500	9334
0.648	200	231481	16.85	1600	8902
0.712	220	210674	18.01	1700	8328
0.612	240	210674	20.86	1800	7191
0.776	260	190329	23.07	1900	6502
0.907	280	165380	24.62	2000	6093
1.04	300	144231	26.96	2100	5564
1.205	350	124481	29.28	2200	5123
2.332	400	64322	31.23	2300	4803
4.276	450	35079	34.21	2400	4385
5.572	500	26920	37.32	2500	4019
6.868	550	21840	41.47	2600	3617
7.386	600	20309	58.32	2700	2572
7.905	650	18975	80.34	2785	1876
8.423	700	17808		Failure	
8.881	750	16889			

ชนิดยาง HFMS-2 อุณหภูมิ 40°C ความถี่ 1 Hz

Deviator Stress 15 psi ความดันรอบข้าง 0 psi

Strain in/in, $\times 10^{-4}$	Cycles, N	Mr, psi	Strain in/in, $\times 10^{-4}$	Cycles, N	Mr, psi
0	0	0	10.06	750	14910
0.276	20	543478	10.13	800	14808
0.468	40	320513	10.66	850	14071
0.893	60	167973	11.28	900	15298
1.531	80	97975	11.95	950	12552
2.294	100	65388	12.30	1000	12195
2.468	120	60778	15.15	1100	99 1
2.531	140	59265	16.00	1200	9375
3.042	160	49309	16.50	1300	9091
3.133	180	47877	17.80	1400	8427
3.241	200	46282	20.00	1500	7500
3.472	220	43203	21.30	1600	7042
3.567	240	42052	23.40	1700	6410
3.897	260	39491	24.76	1789	6058
4.152	280	36127		Failure	
4.326	300	34674			
4.633	350	32376			
4.932	400	30414			
5.721	450	26219			
6.501	500	23073			
6.974	550	21508			
7.347	600	20416			
8.938	650	16782			
10.05	700	14925			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดยาง HFMS-2 อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 1 Hz

Deviator Stress 15 psi ความดันรอบข้าง 0 psi

Strain in/in, $\times 10^{-4}$	Cycles, N	Mr, psi	Strain in/in, $\times 10^{-4}$	Cycles N	Mr, psi
0	0	0	13.26	750	11312
0.276	20	543478	14.06	800	10669
0.531	40	282486	14.59	850	10281
0.966	60	155280	14.83	900	10115
1.205	80	124481	15.74	950	9529
1.50	100	100000	16.31	1000	9197
1.841	120	81477	17.11	110	8767
2.572	140	58320	19.82	1200	7568
3.166	160	47378	20.06	1300	7478
3.9	180	38462	20.16	1400	7440
4.106	200	36532	20.27	1473	7400
4.277	220	35071		Failure	
4.64	240	32328			
4.90	260	30612			
5.16	280	29069			
5.36	300	27985			
5.88	350	25510			
6.03	400	24876			
8.39	450	17878			
9.16	500	16376			
9.93	550	15106			
10.61	600	14138			
11.76	650	12755			
12.34	700	12156			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดยาง MS-2 อุณหภูมิ 20°C ความถี่ 1 Hz

Deviator Stress 15 psi ความดันรอบข้าง 0 psi

Strain in/in, $\times 10^{-4}$	Cycles, N	Mr, psi	Strain in/in, $\times 10^{-4}$	Cycles N	Mr, psi
0.11	20	1363636	3.78	800	39683
0.181	40	828729	4.30	850	34884
0.246	60	609756	4.50	900	33333
0.315	80	476190	5.15	950	29126
0.346	100	433526	5.95	1000	25210
0.389	120	385604	6.66	1100	22523
0.443	140	338600	7.50	1200	20000
0.492	160	304878	8.03	1300	18679
0.521	180	287908	8.36	1400	17943
0.58	200	258621	8.73	1500	17182
0.61	220	245901	9.15	1600	16393
0.77	240	194805	9.54	1800	15723
0.84	260	178571	10.16	1900	14764
0.93	280	161290	11.46	2000	13089
1.04	300	144231	11.94	2200	12563
1.93	350	77720	12.43	2400	12067
2.50	400	60000	13.67	2600	10973
2.87	450	52265	14.33	2800	10468
3.00	500	50000	15.61	3000	9609
3.16	550	47468	17.83	3200	8413
3.25	600	46154	23.46	3400	6394
3.54	650	42373	25.38	3600	5910
3.71	700	40431	30.01	3894	4998
3.76	750	39894		Failure	

ชนิดยาง MS-2 อุณหภูมิ 40°C ความถี่ 1 Hz

Deviator Stress 15 psi ความดันรอบข้าง 0 psi

Strain in/in, × 10^{-4}	Cycles N	Mr, psi	Strain in/in, × 10^{-4}	Cycles N	Mr, psi
0.10	20	1500000	7.38	850	20325
0.10	40	1500000	7.95	900	18868
0.15	60	1000000	8.20	950	18293
0.23	80	652174	8.96	1000	16741
0.30	100	500000	9.46	1100	15856
0.45	120	333333	10.75	1200	13953
0.56	140	267857	11.14	1300	13465
0.66	160	227273	12.74	1400	11774
0.74	180	202703	13.95	1500	10753
0.79	200	189873	14.67	1600	10225
0.88	220	170455	15.73	1700	9536
1.01	240	148515	17.06	1800	8792
1.12	260	133929	18.21	1900	8237
1.21	280	123967	18.66	2000	8038
1.21	300	123967	19.00	2200	7894
1.91	350	78534	21.86	2400	6862
2.62	400	57252	23.07	2600	6502
3.03	450	49505	24.89	2678	6026
3.96	500	37879		Failure	
4.26	550	35211			
4.53	600	33113			
4.84	650	30992			
5.00	700	30000			
5.34	750	28089			
6.21	800	24155			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดยาง MS-2 อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 1 Hz

Deviator Stress 15 psi ความดันด้านข้าง 0 psi

Strain in/in, $\times 10^{-4}$	Cycles N	Mr, psi	Strain in/in, $\times 10^{-4}$	Cycles N	Mr, psi
0.13	20	1153846	8.11	800	18496
0.27	40	555555	9.72	850	15432
0.33	60	454545	10.66	900	14071
0.48	80	312500	12.06	950	12438
0.51	100	294137	16.49	1000	11119
0.66	120	227272	14.89	1100	10074
0.77	140	208333	15.05	1200	9966
0.89	160	168539	16.71	1300	8976
1.12	180	133928	18.34	1400	8178
1.57	200	95541	20.57	1426	7292
1.69	220	88757		Failure	
1.93	240	77720			
2.11	260	71090			
2.57	280	58365			
3.14	300	47770			
3.66	350	40984			
3.95	400	37975			
4.33	450	34642			
4.88	500	30737			
5.34	550	28089			
6.72	600	22321			
7.11	650	21097			
7.48	700	20053			
7.95	750	18867			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

วิธีการออกแบบส่วนผสมวัสดุมวลรวมกับยางมะตอยน้ำตาม Marshall Method

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการออกแบบส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมและยาง แอสฟัลท์อิมัลชั่น ตาม Marshall Method (1)

1) ขอบเขต

วิธีของ Marshall จะสามารถนำเอาผลทดลองไปใช้งานได้ดี แต่จะมีความยุ่งยากเกี่ยวกับเวลาในการทดลอง และออกไปทำนอกห้องทดลองได้น้อยมาก ในการหาส่วนผสมจะมีจุดประสงค์อยู่ 2 ประการ

ก) เพื่อที่จะนำส่วนผสมที่ได้ไปทดลองหากำลังหรือเสถียรภาพในการรับน้ำหนักแบบกระทำซ้ำ ๆ (repeated load) โดยไม่เกินการหดตัวถาวร หรือเกิดความล้า

ข) เพื่อแสดงถึงส่วนผสมที่มีความสัมพันธ์กับความยืน

2) การคำนวณประมาณเนื้อยางล้วน ๆ (Trial Residual Asphalt Content)

สิ่งแรกที่จะต้องหาคือประมาณเนื้อยางล้วน ๆ สำหรับยางอิมัลชั่นจะขึ้นอยู่กับ gradation ของวัสดุมวลรวมคละที่นำมาใช้ผสม

สูตรที่ใช้ในการประมาณเนื้อยางล้วน ๆ ดังนี้

$$R = 0.00138\,AB + 6.358 \log_{10} C - 4.655$$

โดยที่ R = เปอร์เซนต์เนื้อยางล้วน ๆ โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวมแห้ง

A = เปอร์เซนต์ของหินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4

B = เปอร์เซนต์ของหินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 200

C = เปอร์เซนต์ของหินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200

ตัวอย่างเช่น ใช้ยาง HFMS-2 ใช้ gradation ที่มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

หินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 (A) = 37.5 %

หินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างตะแกรงเบอร์ 200 (B) = 49.0 %

หินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (C) = 8.5 %

$$R = 0.00138 \times 49 \times 37.5 + 6.358 \log_{10}(8.5) - 4.655$$

$$= 3.79\ \%$$ โดยน้ำหนักมวลรวมคละแห้ง

จากการทดลอบยางมะตอยน้ำ HFMS-2 มีเนื้อยาง = 73 %

ดังนั้นใช้ยางมะตอยน้ำ HFMS-2 ในการทดลองหาเปอร์เซนต์น้ำ

$$= \frac{3.79}{0.73} = 5.19\ \%$$ โดยน้ำหนักมวลรวมคละแห้ง

3) การเคลือบหิน

การทดลอบนี้จะดูความสามารถของยางอีมัลชั่นในการเคลือบผิวหิน ซึ่งจะทำให้ทราบว่ายางอีมัลชั่นชนิดใดสามารถนำมาใช้งานได้กับวัสดุมวลรวมที่จะต้องใช้ การทดลอบจะดูเปอร์เซนต์พื้นที่ยางอีมัลชั่นเคลือบผิวหินด้วยสายตา ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในวัสดุมวลรวมไปเรื่อย ๆ

3.1) อุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1) ตาชั่งสามารถชั่งได้ 5000 ± 0.5 กรัม

3.1.2) เครื่องผสม ใช้สำหรับผสมวัสดุมวลรวม น้ำ และแอสฟัลท์อีมัลชั่น

3.1.3) แผ่นความร้อน (Hot plate)

3.1.4) กะละมังใช้ผสมมีความจุ 4.7 ลิตร

3.1.5) กระบอกตวงขนาด 100 ม.ล.

3.2) วิธีทดลอง

3.2.1) เตรียมยางอีมัลชั่นและวัสดุมวลรวมที่จะนำไปใช้งาน

3.2.2) หาความชื้นในวัสดุมวลรวม

3.2.3) นำวัสดุมวลรวมผึ่งแห้งมาประมาณ 2,000 กรัม ร่อนผ่านตะแกรง 1", 3/4", 1/2", 3/8", No. 4 ชั่งน้ำหนักที่ค้างแต่ละตะแกรง และส่วนที่ผ่านตะแกรง No. 4 แล้วนำมาผสมตาม Gradation ที่ต้องการ

3.2.4) นำวัสดุมวลรวมเข้าเครื่องผสม แล้วเติมน้ำตามปริมาณดังนี้

ก) อีมัลชั่นที่มีประจุลบ การทดลองครั้งแรกไม่ต้องเพิ่มน้ำในส่วนผสมจากนั้นก็ทำการเพิ่มทีละ 1 เปอร์เซนต์

ข) อีมัลชั่นที่มีประจุบวก การทดลองครั้งแรกเพิ่มน้ำในส่วนผสม 3 เปอร์เซนต์ และเพิ่มครั้งต่อไปอีกทีละ 1 เปอร์เซนต์

3.2.4) นำปริมาณเนื้อยางล้วนจากข้อ 2 เติมลงในวัสดุมวลรวม แล้วทำการคลุกเคล้าให้แอสฟัลท์กระจายไปทั่วัสดุมวลรวม

3.2.5) หาปริมาณน้ำในวัสดุมวลรวมทั้งหมด โดยรวมความชื้นในวัสดุมวลรวมที่มีอยู่เดิมด้วย

3.2.6) ในแต่ละเปอร์เซ็นต์น้ำดูพื้นที่ที่แอสฟัลท์เคลือบผิววัสดุมวลรวมด้วยสายตา และประมาณเปอร์เซ็นต์ที่เคลือบผิวถ้าเกิน 50 เปอร์เซ็นต์ ก็สามารถนำเอาอีมัลชั่นนั้นมาใช้ได้

4) วิธีเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างนี้จะนำไปทดสอบด้วยวิธีมาร์แชล ซึ่งจะหาเสถียรภาพและการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง

4.1) เครื่องมือและอุปกรณ์

จะมีอุปกรณ์คล้ายกับการทดลองแบบร้อน (Hot Mix) ซึ่งจะต่างกันที่ยาง-อีมัลชั่นจะใช้วิธีผสมแบบเย็น อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมจะอยู่ที่ 72 ± 3°F (22.2 ± 1.7°C) จึงไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวกับความร้อน ส่วนที่เพิ่มก็คือ เตาอบ ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 110 ± 5°C เพื่อสำหรับหาปริมาณน้ำที่เหลือในส่วนผสม เมื่อทำการทดสอบค่าเสถียรภาพแล้วเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ มีดังนี้

4.1.1) แท่นรอง (Compaction Pedestal) ประกอบด้วย ฐานไม้ขนาดประมาณ 20 × 20 × 45 ซม. (8 × 8 × 18 นิ้ว) มีแผ่นโลหะขนาดประมาณ 30 × 30 × 2.5 ซม. (12 × 12 × 1 นิ้ว) ติดอยู่ที่ขอบบนของฐานไม้ ฐานไม้ควรเป็นไม้ที่มีความแน่นแห้ง 0.65 - 0.80 กรัม/ลบ.ซม. (ประมาณ 42-48 ปอนด์/ลบ.ฟุต) แผ่นเหล็กจะต้องยึดแน่นกับฐานไม้

4.1.2) แบบสำหรับบดอัด (Compaction Mold) ประกอบด้วย แผ่นฐาน (Base plate) แบบ (Mold) และปลอก (Collar extension mold) เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10.16 ซม. (4 นิ้ว) สูง 7.62 ซม. (3 นิ้ว)

4.1.3) ฆ้อนบดอัด (Compaction hammer) ประกอบด้วยแผ่นเหล็กกลมหนา 1.27 ซม. (0.5 นิ้ว) มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.842 ซม. (3.875 นิ้ว) ติดกับก้านเหล็ก ซึ่งมีแท่งเหล็กหนัก 4.45 กก. (10 ปอนด์) สำหรับทิ้งน้ำหนักลงบนแผ่นเหล็กกลม ในขณะทำการบดทับให้มีระยะตกของแท่งเหล็กเท่ากับ 45.72 ซม. (18 นิ้ว)

4.1.4) ที่จับแบบ (Mold holder) ใช้บังคับให้แบบสำหรับตทับอยู่กับที่ในขณะทำการบดทับ

4.1.5) เครื่องดันตัวอย่าง (Sample extruder) ใช้สำหรับดันตัวอย่างที่บดอัดแล้วออกจากแบบ

4.1.6) เตาอบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ถึง 200°C

4.1.7) เครื่องทดลอง Marshall ใช้สำหรับทดลอบหาค่า Stability เป็นเครื่องกดที่สามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่า 3,000 กก. (6,000 ปอนด์) เป็นแบบจุดด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า อัตราเร็วของมอเตอร์ทำให้ฐานหรือท่อนกดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 ซม.ต่อนาที (ประมาณ 2 นิ้วต่อนาที) จะติดกับ Proving Ring และ Dial Gauge สำหรับอ่านค่า Max. Stability และหัวทดลอบสำหรับใส่ตัวอย่างที่จะทำการทดลอบ

4.1.8) แบบทดลอง Stability สำหรับใส่ตัวอย่างทดลองที่จะหา Stability

4.1.9) เครื่องวัด Flow ใช้หาค่า Flow values ของตัวอย่าง อ่านค่าเป็น 1/10 มม. หรือ 1/100"

4.1.10) ภาชนะโลหะเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 ซม. มีขอบสูง 15 ซม. ใช้สำหรับผสมวัสดุมวลรวมกับยางมะตอย

4.1.11) เกรียงผสมวัสดุมวลรวมกับยางมะตอย

4.1.12) เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ 5 กก. อ่านได้ละเอียดถึง 1 กรัม ใช้ชั่งวัสดุมวลรวมกับยางมะตอย

4.1.13) เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ 2 กก. อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม ใช้ชั่งตัวอย่างที่ทำการบดอัดแล้ว

4.2) การทดลอง

4.2.1) นำเอาวัสดุมวลรวมไปหาขนาดวัสดุทั้งชนิดเม็ดหยาบและละเอียด รวมทั้งความถ่วงจำเพาะ โดยใช้วิธีมาตรฐานตาม ASTM

4.2.2) หาอัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวม เมื่อนำมารวมกันแล้วตาม Gradation ที่กำหนดไว้

4.2.3) นำเอาวัสดุมวลรวมที่ผสมแล้วมาประมาณ 1,200 กรัม ปรับอุณหภูมิของวัสดุมวลรวมให้มีอุณหภูมิที่ 72 ± 3°F (22.2 ± 1.7°C)

4.2.4) หาปริมาณยางอีมัลชั่นและปริมาณน้ำที่ใช้ผสมตามเปอร์เซ็นต์ของน้ำ ตัวอย่างเช่น ใช้ยางอีมัลชั่นแบบ HFMS-2

มีปริมาณน้ำในยาง = 20.8 %

ปริมาณวัสดุมวลรวม = 1,200 กรัม

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด = 3 %

ปริมาณเนื้อยางล้วน = 3.79 % (ตามข้อ 2)

∴ น้ำหนักของยางอีมัลชั่นที่ต้องผสม $= \frac{1,200 \times 3.79}{(100 - 20.8)}$

$= 57.42$ กรัม

∴ น้ำหนักของน้ำที่ต้องเติมจริง ๆ $= \frac{1,200}{100}\left(3 - \frac{3.79 \times 20.8}{73}\right)$

$= 23.04$ กรัม

หมายเหตุ น้ำที่ใช้ในการบดอัด 3 % จะต้องหักปริมาณน้ำที่มีอยู่ในยางอีมัลชั่นแบบ HFMS-2 ก่อน โดยที่ถือว่าไม่มีความชื้นในวัสดุมวลรวม ดังนั้นปริมาณน้ำที่เติมจริง ๆ จะไม่เท่ากับ 36 กรัม (3 % ของวัสดุมวลรวม)

4.2.5) นำเอาปริมาณน้ำที่จะต้องเติมจริง ๆ (จากข้อ 4.2.4) มาเติมลงบนวัสดุมวลรวม (อุณหภูมิน้ำ 72 ± 3°F) คลุกเคล้ากันให้ทั่ว แล้วใช้เกรียงแหวกตรงกลางให้เป็นแอ่ง เทยางอีมัลชั่นที่เตรียมไว้ลงในแอ่งดังกล่าว

4.2.6) นำเอาวัสดุมวลรวมที่ผสมยางอีมัลชั่นแล้วเข้าเครื่องผสมจนเข้ากันทั่ว โดยที่พยายามให้แอสฟัลท์เคลือบวัสดุมวลรวมทุกเม็ด

4.2.7) นำแบบสำหรับบดอัดมาประกอบเข้าที่ ใช้กระดาษรองไว้ในแบบ เทวัสดุมวลรวมที่ผสมแล้วลงในแบบ ใช้เกรียงแซะรอบ ๆ ประมาณ 15 ครั้ง และแซะเข้าในตัวอย่างอีก 10 ครั้ง

4.2.8) วางฝาปิดบดอัดลงบนตัวอย่างในแบบบดอัด โดยทำการยกน้ำหนักและปล่อยให้น้ำหนักตกลงบนแผ่นเหล็ก จำนวนครั้งขึ้นอยู่กับการออกแบบ ซึ่งแบ่งออกเป็น

ก) แอสฟัลท์ติกคอนกรีต สำหรับถนนที่มีการจราจรแบบ Light และ Medium traffic จำนวนครั้งใช้ 50 ครั้ง

ข) แอสฟัลท์ติกคอนกรีต สำหรับถนนที่มีการจราจรแบบ Heavy และ Very Heavy traffic จำนวนครั้งใช้ 75 ครั้ง

4.2.9) เมื่อครบจำนวนการบดอัดแล้ว ทำการกลับตัวอย่างโดยกลับข้างล่างขึ้นข้างบน แล้วบดอัดเช่นเดียวกับข้อ 4.2.8

4.2.10) ทิ้งตัวอย่างที่ทำการบดอัดแล้วไว้ในแบบ (Mold) ที่อุณหภูมิ 72 ± 3.0°F (22.2 ± 1.7°C) เป็นเวลา 24 หรือ 72 ชั่วโมง เพื่อที่จะให้มีการระเหยของน้ำออกทั้ง 2 ด้าน เมื่อครบเวลาแล้วให้เอาตัวอย่างออกทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้ผิวแห้งก่อนที่จะทำการทดลองขั้นต่อไป

5) ปริมาณน้ำเหมาะสมที่สุดในการบดอัด

การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุดจะทำการเตรียมตัวอย่างตามข้อ 4 โดยที่ใช้ปริมาณแอสฟัลท์อีมัลชั่นตามข้อ 2 การทดลองจะทำการแปรค่าปริมาณน้ำไปเรื่อย ๆ โดยเริ่มตั้งแต่ 1 % จนถึง 6 % เมื่อทำการบดอัดตามแบบข้อ 4 แล้ว ให้ทิ้งไว้ในแบบ (Mold) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 72 ± 3°F (22.2 ± 1.7°C) จากนั้นนำไปทดสอบด้วยวิธีมาร์แชล หาค่าเสถียรภาพสูงสุดของแต่ละเปอร์เซ็นต์ของน้ำ plot ค่าเสถียรภาพกับเปอร์เซ็นต์ของน้ำในการบดอัด ที่จุดเสถียรภาพสูงสุดจะได้เปอร์เซ็นต์น้ำที่เหมาะสมที่สุด

<u>หมายเหตุ</u> ทำการบดอัด 3 ก้อนที่แต่ละเปอร์เซ็นต์น้ำโดยน้ำหนักหินแห้ง

6) หาเปอร์เซ็นต์ปริมาณยางล้วน ๆ ที่เสถียรภาพดีที่สุด

การหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณยางล้วน ๆ จะหาได้โดยเตรียมตัวอย่างตามข้อ 4 ซึ่งจะต้องใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด ที่หาได้ตามข้อ 5 การเตรียมตัวอย่างนี้จะเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของยางไปทีละ 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เปอร์เซ็นต์น้ำเท่าเดิม (การเติมน้ำและยางอีมัลชั่นคำนวณตามแบบข้อ 4.2.4) ทำการเตรียมตัวอย่างแต่ละเปอร์เซ็นต์ยางเป็น 2 ชุด (ชุดละ 3 ก้อน) เมื่อทำการบดอัดครบตามจำนวนหลัว ให้ทิ้งไว้ในแบบเป็นเวลา 72 ชั่วโมง หรือ 3 วัน จากนั้นเอาออกจากแบบ ชุดแรกจะนำมาหาค่าเสถียรภาพ และค่าการยุบตัว ชุดที่ 2 นำไปแช่น้ำเป็นเวลา 4 วัน กลับด้านเมื่อแช่ไว้ 2 วัน จึงนำมาหาค่าเสถียรภาพ และค่าการยุบตัว เสร็จแล้วเอาเข้าตู้อบหาปริมาณน้ำที่เหลือในส่วนผสม (ชุดแรกก็เอาเข้าตู้อบหาปริมาณน้ำเช่นกัน)

<u>หมายเหตุ</u> การทดลองหาค่าเสถียรภาพ ทดลองที่อุณหภูมิ 72 ± 3°F (22.2 ± 1.7°C) ของตัวอย่างที่แช่น้ำและไม่แช่น้ำ

7) การคำนวณ

คำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งของส่วนผสม, ช่องอากาศทั้งหมด (Total voids), การดูดซึมความชื้น (Moisture Absorbed), การเปลี่ยนแปลงค่าเสถียรภาพ (Stability change)

โดย A = เปอร์เซ็นต์เนื้อยางล้วน ๆ ในส่วนผสม

B = ความถ่วงจำเพาะของเนื้อยางล้วน ๆ

C = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวม (ค่าเฉลี่ย)

D = น้ำหนักตัวอย่างชั่งในอากาศ, กรัม

E = น้ำหนักตัวอย่างชั่งในน้ำ, กรัม

F = น้ำหนักของตัวอย่างอิ่มตัวผิวแห้งในอากาศ, กรัม

G = Bulk sp. gr.

H = น้ำหนักของตัวอย่างเมื่อทำการทดสอบค่าเสถียรภาพแล้ว, กรัม

I = น้ำหนักของตัวอย่างอบแห้งที่ทดสอบค่าเสถียรภาพแล้ว, กรัม

K = ความชื้นที่มีอยู่ในตัวอย่าง

L = ค่าเสถียรภาพที่ปรับค่าแล้ว, ปอนด์

7.1) คำนวณหาความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งของส่วนผสม (Bulk specific gravity of specimen), G

สูตร $G = \frac{D}{F - E}$

7.2) คำนวณหาความชื้นที่มีอยู่ในตัวอย่าง (Moisture Content), K

สูตร $K = \frac{(H - I)-(F - d)}{I} \times \frac{1}{1 + A/100}$

7.3) คำนวณหาการดูดซึมความชื้น (Moisture Absorbed)

สูตร $\text{Moisture Absorbed} = \frac{K1 + K2 + K3}{3} - \frac{K4 + K5 + K6}{3}$

7.4) คำนวณหาช่องอากาศทั้งหมด (Max. total voids)

สูตร $\text{Max. total voids} = \frac{\frac{A/100 + 1 + K/100}{G} - \frac{1}{C} - \frac{A/100}{B}}{\frac{A/100 + 1 + K/100}{G}} \times 100$

7.5) คำนวณหาเปอร์เซ็นต์สูญเสียค่าเสถียรภาพ (Percent stability loss)

สูตร $\text{Percent stability loss} = \frac{\frac{L1 + L2 + L3}{3} - \frac{L4 + L5 + L6}{3}}{\frac{L1 + L2 + L3}{3}}$

7.6) นำค่าที่คำนวณได้ไปเขียนโค้ง (curve) แสดงความสัมพันธ์ ดังนี้

ก) เปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางล้วน ๆ กับ หน่วยน้ำหนักของส่วนผสม

ข) เปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางล้วน ๆ กับ เสถียรภาพ

ค) เปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางล้วน ๆ กับ Moisture absorbed

ง) เปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางล้วน ๆ กับ Stability loss

จ) เปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางล้วน ๆ กับ ช่องอากาศทั้งหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.7) ค่าของปริมาณยางอีมัลชั่นที่เหมาะสมที่สุด หาได้จาก

ก) ค่าเสถียรภาพสูงสุดเมื่อนำไปแช่น้ำ (Soaked)

ข) เปอร์เซ็นต์ของค่า (Stability loss ต้องไม่เกินตามข้อกำหนด

ค) ค่า Moisture absorbed จะต้องไม่เกินตามข้อกำหนด

ง) ค่า (Total voids จะต้องไม่เกินตามข้อกำหนด

ตารางที่ ผ.37 ข้อกำหนดของการออกแบบส่วนผสมของ Emulsified Asphalt-Aggregate

คุณสมบัติ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
ค่าเสถียรภาพที่ 72°F, ปอนด์	500	-
เปอร์เซ็นต์ช่องอากาศทั้งหมด, %	2	8
เปอร์เซ็นต์ stability loss หลังจาก soaked 4 วัน, %	-	50
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้น หลังจาก soaked 4 วัน, %	-	4
เปอร์เซ็นต์การเคลือบผิวหิน, %	50	-

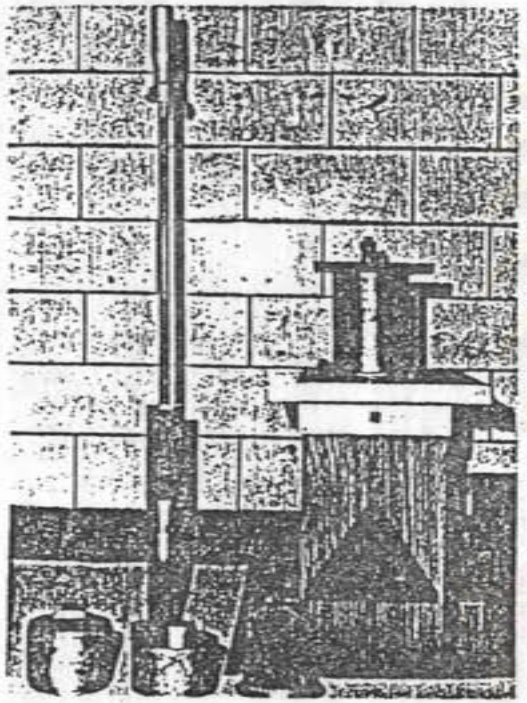
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.38 Stability Correlation Ratios

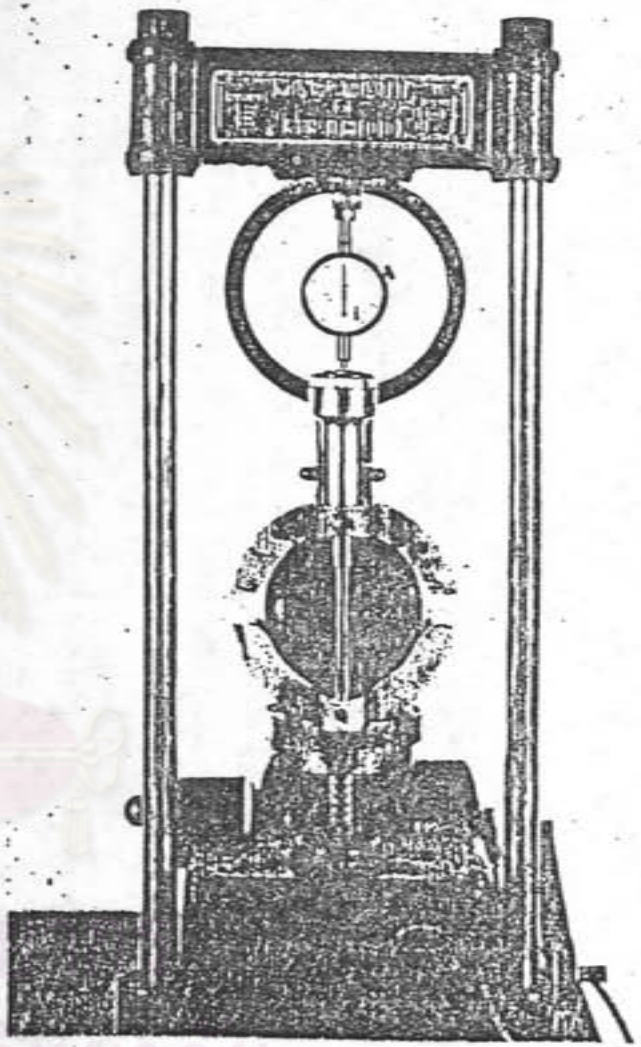
Volume of Specimen, cm^3	Approximate Thickness of Specimen, in.	mm	Correlation Ratio
200 to 213	1	25.4	5.56
214 to 225	1.1/16	27.0	5.00
226 to 237	1.1/8	28.6	4.55
238 to 250	1.3/16	30.2	4.17
251 to 264	1.1/4	31.8	3.85
265 to 276	1.5/16	33.3	3.57
277 to 289	1.3/8	34.9	3.33
290 to 301	1.7/16	36.5	3.03
302 to 316	1.1/2	38.1	2.78
317 to 328	1.9/16	39.7	2.50
329 to 340	1.5/8	41.3	2.27
341 to 353	1.11/16	42.9	2.08
354 to 367	1.3/4	44.4	1.92
368 to 379	1.13/16	46.0	1.79
380 to 392	1.7/8	47.6	1.67
393 to 405	1.15/16	49.2	1.56
406 to 420	2	50.8	1.47
421 to 431	2.1/16	52.4	1.39
432 to 443	2.1/8	54.0	1.32
444 to 456	2.3/16	55.6	1.25
457 to 470	2.1/4	57.2	1.19
471 to 482	2.5/16	58.7	1.14
483 to 495	2.3/8	60.3	1.09
496 to 508	2.7/16	61.9	1.04
509 to 522	2.1/2	63.5	1.00
523 to 535	2.9/16	64.0	0.96
536 to 546	2.5/8	65.1	0.93
547 to 559	2.11/16	66.7	0.89
560 to 573	2.3/4	68.3	0.86
574 to 585	2.13/16	71.4	0.83
586 to 598	2.7/8	73.0	0.81
599 to 610	2.15/16	74.6	0.78
611 to 625	3	76.2	0.76

NOTES : 1. The measured stability of a specimen multiplied by the ratio for the thickness of the specimen equals the corrected stability for a 2-1/2 in. (63.5 mm) specimen.

2. Volume-thickness relationship is beased on a specimen diameter of 4 in. (101.6 mm).



รูปที่ ผ.1 แท่นรองแบบสำหรับบดทับและค้อนใช้ในการเตรียมตัวอย่างมาร์แฮลล์



รูปที่ ผ.2 เครื่องทดสอบมาร์แฮลล์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การเตรียมตัวอย่างของส่วนผสมปิโตรเลียมสำหรับทดลอง Triaxial Test ของ Smith Triaxial Method

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเตรียมตัวอย่างของส่วนผสมบิทูมินัสสำหรับการทดลอง

Triaxial Test ของ Smith Triaxial Method[9]

1) ขอบเขต

วิธีนี้เป็นการเตรียมตัวอย่างของวัสดุบิทูมินัสรูปทรงกระบอก ซึ่งจะใช้วัสดุมวลรวมที่เป็น Dense-graded มีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 1.0 นิ้ว (25.4 มม.) การเตรียมจะใช้วิธี Double plunger กดส่วนผสมในแบบ (Mold) ทั้งสองด้าน

2) เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

2.1) เตาอบปรับอุณหภูมิได้สูงถึง 250°ซ. สำหรับอบวัสดุมวลรวม

2.2) Hot Plate ที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ถึง 200°ซ. สำหรับให้ความร้อนกับเครื่องมือที่ใช้ในการบดอัด

2.3) กระป๋องสำหรับใส่แอสฟัลท์เพื่อให้ความร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม.

2.4) ภาชนะโลหะเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 ซม. มีขอบสูง 15 ซม. ใช้สำหรับผสมวัสดุมวลรวมกับยางมะตอย

2.5) เกรียงผสมวัสดุมวลรวมกับยางมะตอย

2.6) เทอร์โมมิเตอร์โลหะ วัดอุณหภูมิได้สูง 250°ซ.

2.7) เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ 5 กก. อ่านได้ละเอียดถึง 1 กรัม ใช้ชั่งวัสดุมวลรวมกับยางมะตอย

2.8) แบบที่ใช้อัดตัวอย่างประกอบด้วย ลูกสูบด้านบน และด้านล่าง แบบที่ใช้มีขนาดประมาณเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว (10.16 ซม.) มีความสูงประมาณ 9-12 นิ้ว (23-30 ซม.) ขนาดของตัวอย่างที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 8 นิ้ว (ดูตามรูป ผ.3)

2.9) เครื่องที่ให้แรงอัด (Compression Machine) สามารถให้แรงอัดได้ไม่ต่ำกว่า 20 ตัน (48,000 ปอนด์) เดินเครื่องด้วยอัตราความเร็ว 0.05 นิ้ว (1.27 มม.)/นาที

2.10) เครื่องดันตัวอย่าง (Sample extruder) ใช้สำหรับดันตัวอย่างที่บดอัดแล้วออกจากแบบ

2.11) นาฬิกาจับเวลา

2.12) ถุงมือกันความร้อนชนิดใยหิน (Asbestos)

2.13) Kneading mechamical compactor เป็นเครื่องมือที่ใช้บดอัดตัวอย่างแบบนวด โดยมี tamper foot รูปร่างพิเศษ มีพื้นที่ประมาณ 20.059 ซม.^{2} (3.1 นิ้ว^2) สามารถออกแรงให้ความดันได้ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

3) การเตรียมส่วนผสม

3.1) เตรียมวัสดุมวลรวมในแต่ละตัวอย่างประมาณ 4,000 กรัม

3.2) วัสดุบิทูมินัสที่ใช้สามารถใช้ได้ทั้งยาง Cutfack asphalt, Emulsified Asphalt หรือ tar

3.3) การผสมระหว่างวัสดุมวลรวมกับวัสดุบิทูมินัส ให้ผสมตามอัตราส่วน ซึ่งได้ออกแบบไว้ ตามภาคผนวก จ สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมจะแบ่งเป็นดังนี้

ก) สำหรับยางที่เป็น Asphalt Cement โดยนำเอาวัสดุมวลรวมที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 275 - 300°F แล้วนำเอายาง A.C. มาผสมกัน และทำให้ร้อนถึง 300 - 350°F รอดูจนกระทั่ง ยาง A.C. เคลือบกับวัสดุมวลรวมทุกเม็ด หลังจากที่ผสมเสร็จแล้วควรที่จะนำไปทำการบดอัดทันที

ข) สำหรับยางที่เป็น Cut back Asphalt, Emulsified Asphalt หรือ tar ก็นำเอาวัสดุมวลรวมอบแห้งที่อุณหภูมิ 140°F และนำมาผสมกับยางที่จะใช้ที่อุณหภูมิ 140°F เช่นกัน แล้วนำไปทำการบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 140°F เป็นเวลา 20 ± 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทำการบดอัด

4) การเตรียมตัวอย่าง

4.1) นำเอาวัสดุมวลรวมที่อบแห้งจากเตาอบ เทลงในภาชนะโลหะที่ใช้สำหรับผสม แหวกตรงกลางให้เป็นแอ่งแล้วเทยางที่จะใช้ลงไปตามอัตราส่วน และอุณหภูมิที่ใช้ผสมตามแต่ละชนิดของยาง ตามข้อ 3.3 และภาคผนวก จ

4.2) เมื่อทำการผสมวัสดุมวลรวมกับยางที่ใช้แล้ว รอจนกว่ายางจะเคลือบกับวัสดุมวลรวมเกือบทุกเม็ด

4.3) นำเอาแบบ (Mold) ที่ใช้มาเตรียมให้พร้อม วางแผ่นกระดาษกรองที่ตัดไว้เป็นรูปวงกลมวางไว้ด้านล่างของแบบ เพื่อกันวัสดุที่ผสมแล้วติดกับลูกสูบ

4.4) เทวัสดุผสมลงในแบบที่เตรียมไว้เป็นชั้น ๆ โดยใส่เป็น 4 ชั้น ในแต่ละชั้นให้ใช้เหล็กขนาด $\frac{1}{4}$ " $\pm \frac{1}{4}$ " กระทุ้งรอบ ๆ ตัวอย่าง 20 ครั้ง และกระทุ้งตรงกลางอีก 20 ครั้ง

4.5) เมื่อเทวัสดุผสมลงในแบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็นำเข้าเครื่อง Compression โดยจะมีลูกสูบวางไว้ทางด้านปลายทั้ง 2 ข้างของแบบ

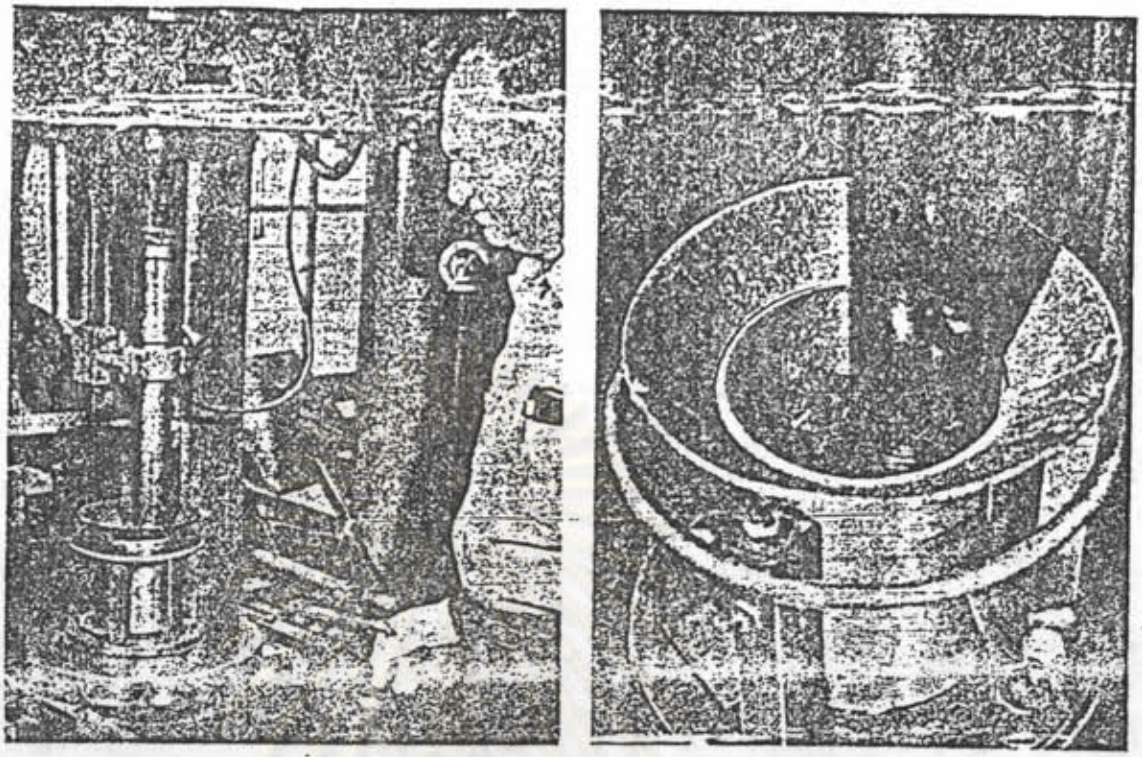
4.6) เดินเครื่อง Compression ด้วยอัตรา 0.05 นิ้ว (1.27 มม.)/นาที จนกระทั่งได้ความดัน 2,500 ปอนด์/ตารางนิ้ว (ประมาณ 31,000 ปอนด์/ϕ 4 นิ้ว) เป็นเวลา 60 ± 5 วินาที แล้วจึงเดินเครื่องออก

4.7) นำเอาตัวอย่างที่ทำการอัดแล้วมาทำให้เย็น โดยทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง ถึง 1 วัน ทั้งนี้ก็แล้วแต่ชนิดของยางที่นำมาใช้ทำ เมื่อนำตัวอย่างออกจากแบบแล้วก็นำมาบ่มในอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 75° ± 5° F) เวลาในการบ่มขึ้นอยู่กับวิธีการทดลอง ซึ่งอาจจะเป็น 1, 3, 7, 14 หรือ 1 เดือน เป็นต้น แล้วจึงนำไปทดลองขั้นต่อไป

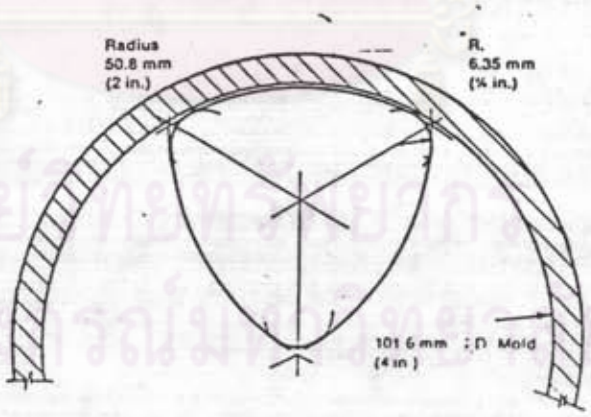
4.8) สำหรับการเตรียม โดยใช้ kneading mechamical compactor จะทำการใส่ส่วนผสมลงในแบบประมาณครึ่งหนึ่งแล้วทำการบออัดโดยใช้ความดัน 250 ปอนด์ต่อตาราง-นิ้ว เป็นจำนวน 30 ครั้ง หลังจากนั้นก็เติมส่วนผสมที่เหลือลงไปในแบบแล้วก็บดอัดอีกครั้งหนึ่งด้วยความดัน 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นจำนวน 30 ครั้งเช่นเดียวกัน เมื่อบดอัดเรียบร้อยแล้ว นำเอาตัวอย่างที่อยู่ในแบบไปให้น้ำหนักคงที่ (Static load) โดยใช้วิธี Double plunger ให้มีความเร็วของการให้น้ำหนัก 0.05 นิ้ว (1.27 มม.) ต่อนาที จนกระทั่งได้ความดัน 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วก็นำเอาน้ำหนักออก ในการบ่มและการทดลองต่อไปให้ทำเช่นเดียวกับข้อ 4.7 หรือวิธี Kneading mechamical compactor

5) การรายงาน

เมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว และบ่มได้ตามกำหนดเวลาแล้ว ก็ทำการหาความหนาแน่น (Bulk Density) โดยทำการชั่งน้ำหนักในน้ำ, ชั่งน้ำหนักในอากาศ และชั่งน้ำหนักเมื่อ Saturated Surface Dry แล้วรายงานค่าความหนาแน่นของแต่ละตัวอย่าง



เครื่องจักรบดอัดแบบนวดสำหรับการเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบ (Mechanical kneading compactor for the preparation of test specimens)



ไดอะแกรมของตีนกระทุ้งสำหรับเครื่องจักรบดอัดแบบนวด (Diagram of tamping foot for mechanical kneading compactor)

แบบอย่างอุณหภูมิสำหรับการใช้แอสฟัลท์-องศา C

(Typical Temperatures for Uses of Asphalt-Degrees C)

Type and Grade of Asphalt	Pugmill Mixture Temperatures[1]		Spraying Temperatures[5]	
	Dense-Graded Mixes	Open-Graded Mixes	Road Mixes	Surface Treatments
Asphalt Cements				
AC-2.5	115-140	80-120	-	130+
AC-5	120-145	80-120	-	140+
AC-10	120-155	80-120	-	140+
AC-20	130-165	80-120	-	145+
AC-40	130-170	80-120	-	150+
AR-1000	105-135	80-120	-	135+
AR-2000	135-165	80-120	-	140+
AR-4000	135-165	80-120	-	145+
AR-8000	135-165	80-120	-	145+
AR-16000	150-175	80-120	-	-
200-300 pen.	115-150	80-120	-	130+
120-150 pen.	120-155	80-120	-	130+
85-100 pen.	120-165	80-120	-	140+
60-70 pen.	130-170	80-120	-	145+
40-50 pen.	130-175	80-120	-	150+
Emulsified Asphalts				
RS-1	-		-	20-60
RS-2	-		-	50-80
MS-1	10-70[4]		20-70	20-70
MS-2	10-70[4]		20-70	-
MS-2h	10-70[4]		20-70	-
HFMS-1	10-70[4]		20-70	20-70
HFMS-1h	10-70[4]		20-70	-
HFMS-2h	10-70[4]		20-70	-
HFMS-2s	10-70[4]		20-70	-
SS-1	10-70[4]		20-70	-
SS-1h	10-70[4]		20-70	-
CRS-1	-		-	20-60
CRS-2	-		-	50-80
CMS-2	10-70[4]		20-70	-
CMS-2h	10-70[4]		20-70	-
CSS-1	10-70[4]		20-70	-
CSS-1	10-70[4]		20-70	-
Cutback Asphalts (RC, MC, SC)[2]				
30 (MC only)	-	-	-	30+
70	-	-	20+	50+
250	55-80[3]	-	40+	75+
800	75-100[3]	-	55+	95+
3000	80-115[3]	-	-	100+

NOTES: Exact conversions from °F rounded to nearest 5°C.

Temperatures for asphalt cements and cutback asphalts are guides only.

[1] Temperature of mixture, immediately after discharge from the pugmill rather than temperature of asphalt cement or cutback asphalt.

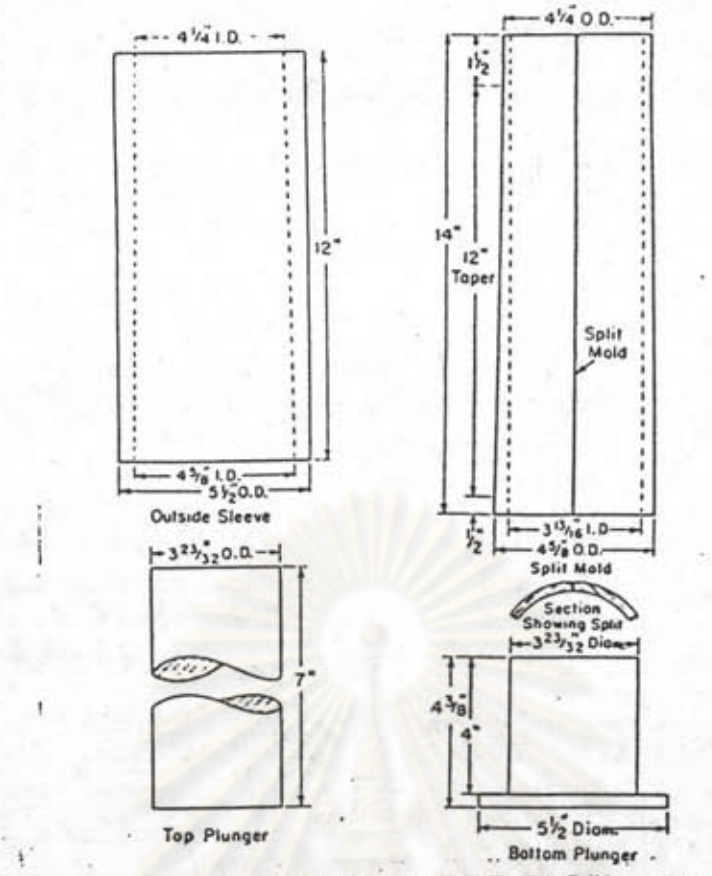
[2] Application temperature may, in some cases, be above the flash point of the material. Caution must therfore be exercised to prevent fire or an explosion.

[3] Rapid-Curing (RC) grades are not recommended for hot pugmill mixing.

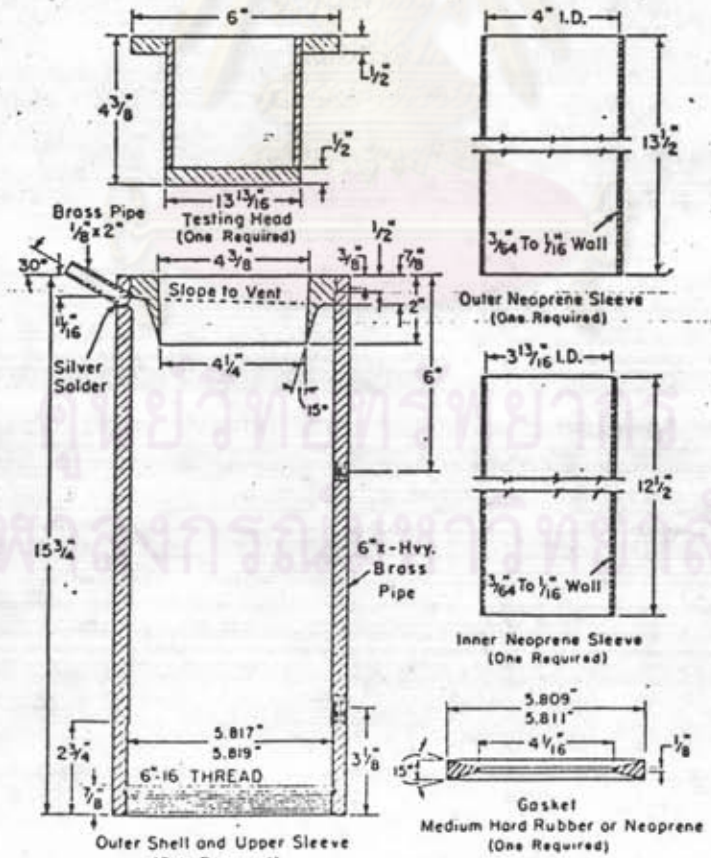
[4] Temperature of the emulsified asphalt in the pugmill mixture.

[5] The maximum temperature (asphalt cement and cutback asphalt) shall be below that at which fugging occurs.

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



.—Parts for Triaxial Shear Testing Cell.
(4 inch)
(Material Steel)



.—Parts for Triaxial Shear Testing Cell.
(4 inch)

รูปที่ ผ.3 แสดงส่วนประกอบของการเตรียมตัวอย่างขนาด ϕ4" × 8"

ภาคผนวก ช

การทดสอบวัสดุมวลรวม (Aggregate)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบวัสดุมวลรวม (Aggregate)

ภาคผนวก ช.1) วิธีการทดสอบหาขนาดวัสดุเล็กกว่า 0.075 มม. โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง[10, 20] (ASTM C 117-80, AASHTO T 11-78)

ความมุ่งหมาย เพื่อหาขนาดวัสดุที่เล็กกว่า 0.075 มม. (ตะแกรงเบอร์ 200) โดยการล้าง

อุปกรณ์

1) ตะแกรงขนาดเบอร์ 200 และเบอร์ 16 ซ้อนกันโดยตะแกรงเบอร์ 16 อยู่บน

2) ภาชนะที่ใส่น้ำและวัสดุที่ล้างผ่านตะแกรงได้

3) เครื่องชั่ง ชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม

4) เตาอบขนาดใหญ่ และสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 100 ± 5°C (230 ± 9°F)

วิธีทดลอง

1) อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5°C (230 ± 9°F) และชั่งให้ได้ละเอียด 0.1 กรัม

2) นำตัวอย่างใส่ในภาชนะและเติมน้ำพอที่จะให้ตัวอย่างชุ่ม กวนให้ส่วนละเอียดแยกออกจากวัสดุขนาดใหญ่ และวัสดุเม็ดเล็กลอยขึ้น เทน้ำที่ล้างผ่านตะแกรงออก

3) เติมน้ำลงไปอีกแล้วกวนต่อไป และกระทำซ้ำจนน้ำที่ล้างใส่

4) ใส่วัสดุที่ค้างในตะแกรงใส่ภาชนะและอบวัสดุที่ค้างตะแกรงให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5°C (230 ± 9°F) และนำไปชั่งให้ได้ละเอียด 0.1 กรัม

การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200} = \frac{(B - C)}{B} \times 100$$

เมื่อ B = น้ำหนักแห้งก่อนทำการล้างผ่านตะแกรง

C = น้ำหนักแห้งหลังทำการล้างผ่านตะแกรง

ภาคผนวก ฆ.2) วิธีการทดลองหาขนาดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง[10, 20]

(ASTM C 136-82, AASHTO T 27-78)

ความมุ่งหมาย เพื่อหาขนาดของวัสดุมวลรวมหยาบและละเอียด โดยการร่อนผ่านตะแกรง

อุปกรณ์

1) เครื่องชั่ง สำหรับวัสดุมวลรวมละเอียด อ่านได้ความละเอียด 0.1 กรัม หรือ 0.1 % ของน้ำหนักตัวอย่าง สำหรับวัสดุมวลรวมหยาบ อ่านได้ความละเอียด 0.5 กรัม หรือ 0.1 % ของน้ำหนักตัวอย่างที่ทดลอบ

2) ตะแกรงขนาดต่าง ๆ พร้อมทั้งเครื่องเขย่าตะแกรงที่สามารถเขย่าได้ทั้งแนวดิ่งและแนวราบ

3) เตาอบ มีขนาดที่เหมาะสมและควบคุมอุณหภูมิที่ 110 ± 5°C (230 ± 9°F)

วิธีทดลอง

1) ตัวอย่างที่นำมาใช้ทดลอบต้องมีจำนวนเพียงพอ ตามตารางที่ ผ.39 นำเอาตัวอย่างมาอบให้มีน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 110 ± 5°C (230 ± 9°F)

2) จัดเรียงตะแกรงขนาดใหญ่จนขนาดเล็ก จากบนลงล่างและเทตัวอย่างลงบนตะแกรงที่อยู่บนสุด เขย่าตะแกรงด้วยมือหรือเครื่องเขย่า เขย่าจนกระทั่งตัวอย่างผ่านตะแกรงแต่ละขนาดใน 1 นาที ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างทั้งหมด หรือใช้เวลาประมาณ 15 นาที สำหรับตะแกรงที่เล็กกว่า 4.75 มม. (เบอร์ 4) น้ำหนักที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงจะต้องไม่มากกว่า 6 กิโลกรัม/ตารางเมตร (4 กรัม/ตารางนิ้ว) ของพื้นที่ตะแกรง สำหรับตะแกรงที่ใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 4 น้ำหนักที่ค้างตะแกรงต้องไม่เกินผลคูณของ 2.5 กับขนาดของตะแกรงเป็น มม. กิโลกรัม/ตารางเมตร

3) ในการแยกวัสดุเม็ดหยาบและวัสดุเม็ดละเอียด ส่วนของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ และส่วนที่ผ่านตะแกรงเป็นวัสดุมวลรวมละเอียด

ตารางที่ ผ.39 น้ำหนักตัวอย่างในการหายนาดจากขนาดที่ใหญ่ที่สุดของวัสดุ

Nominal Maximum Size, Square Opening, mm (in.)	Minimum Weight of Test Sample, kg (lb)
9.5(3/4)	1(2)
12.5(1/2)	2(4)
19.0(3/4)	5(11)
25.0(1)	10(22)
37.5(1 1/2)	15(33)
50(2)	20(44)
63(2 1/2)	35(77)
75(3)	60(130)
90(3 1/2)	100(220)
100(4)	150(330)
112(4 1/2)	200(440)
125(5)	300(660)
150(6)	500(1100)

4) ชั่งน้ำหนักที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงให้มีความละเอียด 0.1 % ของน้ำหนักวัสดุแห้ง น้ำหนักรวมทั้งหมดของวัสดุที่ค้างตะแกรงจะต้องตรวจสอบกับน้ำหนักแห้งของวัสดุทั้งหมดก่อนทำการร่อน ถ้าจำนวนต่างกันเกินกว่า 0.3 % ของน้ำหนักก่อนทำการร่อนถือว่าใช้ไม่ได้

การรายงาน

1) จำนวนเปอร์เซ็นต์ทั้งหมดของวัสดุที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด

2) จำนวนเปอร์เซ็นต์ทั้งหมดของวัสดุที่ค้างตะแกรงแต่ละขนาด

3) เปอร์เซ็นต์ของวัสดุที่ค้างระหว่างตะแกรง 2 ขนาด

ภาคผนวก ข.3 วิธีการทดลอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมหยาบ[10, 20]

(ASTM C 127-81, AASHTO T 85-77)

ความมุ่งหมาย เพื่อที่จะหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมหยาบ

Bulk specific gravity เป็นอัตราส่วนของน้ำหนักที่ปริมาตรหนึ่งในอากาศ (รวมทั้งช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้และซึมผ่านไม่ได้ แต่ไม่รวมช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ) ที่อุณหภูมิหนึ่งต่อน้ำหนักของน้ำปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน

Bulk specific gravity (Saturated-surface-dry) เป็นอัตราส่วนของน้ำหนักที่ปริมาตรหนึ่งในอากาศ รวมทั้งน้ำหนักของน้ำที่ซึมอยู่ในช่องว่างหลังจากแช่ไว้ในน้ำ 24 ชั่วโมง (แต่ไม่รวมช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ) ที่อุณหภูมิหนึ่งต่อน้ำหนักของน้ำปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน

Apparent specific gravity เป็นอัตราส่วนของน้ำหนักที่ปริมาตรหนึ่ง (ปริมาตรที่น้ำซึมผ่านไม่ได้) ในอากาศที่อุณหภูมิหนึ่งต่อน้ำหนักของน้ำปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน

อุปกรณ์

1) เครื่องชั่งมีความละเอียด 0.05 % ของตัวอย่างหรือ 0.5 กรัม
2) ตะกร้าลวดตาข่ายขนาด 3.35 มม. หรือละเอียดกว่า
3) ถังน้ำมีขนาดพอที่จะใส่ตะกร้าชั่งในน้ำได้
4) เตาอบ ควบคุมอุณหภูมิที่ 110 ± 5°C
5) ผ้าซับน้ำ

วิธีทดลอง

1) วัสดุมวลรวมหยาบ เป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มม. (ตะแกรงเบอร์ 4) นำตัวอย่างมาทำการอบให้แห้งที่ 110 ± 5°C จนมีน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในอุณหภูมิห้องประมาณ 1 ถึง 3 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักวัสดุในอากาศ

2) นำเอาวัสดุตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ± 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำขึ้นจากน้ำ วางลงบนผ้าซับน้ำ แล้วคลึงจนหมดฟิล์มน้ำที่เกาะผิว ระวังอย่าให้เกิดการระเหยของน้ำจากรูในวัสดุ ทำการชั่งน้ำหนักในลักษณะที่เป็น Saturated Surface Dry

3) หลังจากชั่งแล้ว ใส่ตัวอย่างลงในตะกร้าตาข่ายแล้วนำไปชั่งน้ำหนักในน้ำที่อุณหภูมิ 23 ± 1.7°C (73.4 ± 3°F) ระวังฟองอากาศที่ค้างอยู่ควรจะเขย่าตะกร้าขณะที่แช่อยู่ในน้ำ

การคำนวณ

Bulk Specific Gravity = A/(B - C)

Bulk Specific Gravity (SSD) = B/(B - C)

Apparent Specific Gravity = A/(A - C)

เมื่อ A = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง

B = น้ำหนักของตัวอย่างในสภาพ Saturated-Surface-Dry

C = น้ำหนักของตัวอย่างในน้ำ

การหาค่าเฉลี่ยค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุหลายชนิด เป็นไปดังต่อไปนี้

$$G = \frac{1}{\frac{P_1}{100G_1} - \frac{P_2}{100G_2} + \frac{P_n}{100G_n}}$$

เมื่อ G = ค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย

$G_1, G_2, \ldots G_n$ = ค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละส่วนของวัสดุที่นำมาผสม

$P_1, P_2, \ldots P_n$ = น้ำหนักเป็นเปอร์เซ็นต์ของแต่ละส่วนของวัสดุที่นำมาผสม

ภาคผนวก ข.4 วิธีการทดลอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมละเอียด[10, 20]

(ASTM C 128-79, AASHTO T 84-77)

ความมุ่งหมาย เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมละเอียด

อุปกรณ์

1) เครื่องชั่ง อ่านค่าได้ละเอียดอย่างน้อย 0.1 กรัม

2) Pycnometer เป็นขวดแก้วแบบ Flask สามารถใส่วัสดุชนิดเม็ดละเอียดเข้าไปได้ และวัดปริมาตรได้แตกต่างกันไม่เกิน ± 0.1 ลบ.ซม.

3) แบบโลหะเป็นรูปกรวยมีเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบน 40 ± 3 มม. และเส้นผ่าศูนย์กลางด้านล่าง 90 ± 3 มม. ความสูง 75 ± 3 มม. ความหนาของแผ่นโลหะอย่างน้อย 0.8 มม.

4) โลหะกระทุ้ง น้ำหนัก 340 ± 15 กรัม ผ่าหน้าด้านที่ใช้กระทุ้งรวมเป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 ± 3 มม.

วิธีทดลอง

1) นำตัวอย่างประมาณ 1 กิโลกรัม ใส่ในภาชนะอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5°C ให้แห้งแล้ว ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ± 4 ชั่วโมง

2) นำตัวอย่างมาแผ่ กระจายบนภาชนะที่ไม่ดูดซึมน้ำ เพื่อให้ตัวอย่างค่อย ๆ แห้ง อาจใช้ลมร้อนเป่าผ่านตัวอย่าง และผสมให้แห้งเท่า ๆ กัน จนอยู่ในสภาพ Saturated Surface Dry

3) นำตัวอย่างใส่ลงในแบบอย่างหลวม ๆ จนเต็ม นำโลหะกระทุ้งทำการกระทุ้งตัวอย่างเบา ๆ 25 ครั้ง แล้วค่อย ๆ ยกแบบขึ้นตรง ๆ ถ้าตัวอย่างยังคงรูปอยู่ในลักษณะตามแบบ แสดงว่ายังคงมีน้ำที่ผิวอยู่ ทำซ้ำ ๆ จนกระทั่งเมื่อยกแบบออก ตัวอย่างวัสดุเริ่มทะลายแสดงว่าอยู่ในสภาพ Saturated Surface Dry

4) นำตัวอย่างนั้นหนัก 50 ถึง 500 กรัม ชั่งหาน้ำหนักของตัวอย่าง และใส่ลงใน Pycnometer เติมน้ำจนมีปริมาตรเกือบถึงขีดหมาย ทำการไล่ฟองอากาศจนหมด

โดยการเขย่าหมุนขวดกลับไปมา แล้วเติมน้ำจนถึงขีดหมาย

5) ทำการหาน้ำหนักของขวด, ตัวอย่างวัสดุ และน้ำ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ถึงขีดหมาย และหาน้ำหนักขวดและน้ำถึงขีดหมายที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อ Calibrated ขวด Pycnometer ที่ใช้

6) นำวัสดุตัวอย่างออกจาก Pycnometer อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5°C และปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ± 1/2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปชั่งหาน้ำหนัก

การคำนวณ

Bulk Specific Gravity = A/(B + W - C)

เมื่อ A = น้ำหนักของตัวอย่างแห้งในอากาศ

B = น้ำหนักของ Pycnometer และน้ำถึงขีดหมาย

W = น้ำหนักของตัวอย่างที่ SSD

C = น้ำหนักของ Pycnometer ตัวอย่างและน้ำถึงขีดหมาย

Bulk Specific Gravity = W/(B + W - C)

Apparent Specific Gravity = A/(B + A - C)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.5 วิธีการทดลอบหาความลึกหรอโดยใช้เครื่อง Los Angeles[10, 20]
(ASTM C 131-81, AASHTO T 96-77)

ความมุ่งหมาย เพื่อหาความต้านทานการลึกหรอของวัสดุมวลรวมหยาบ โดยใช้เครื่องทดลอบ Los Angeles

อุปกรณ์

1) Los Angeles Machine เป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วยถังเหล็กกลมทรงกระบอก ปิดทั้ง 2 ด้าน ติดอยู่กับแกนและสามารถหมุนรอบตัวเองในแนวนอน มีช่องสำหรับใส่วัสดุและมีแผ่นโลหะปิด ภายในถังเหล็กมีเหล็กยาวติดแน่นกับถังเหล็ก

2) ตะแกรงหายนาดต่าง ๆ ของวัสดุ

3) Abrasive Charge เป็นลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 46.8 มม. น้ำหนักแต่ละลูกอยู่ระหว่าง 390 และ 445 กรัม จำนวนและน้ำหนักของลูกเหล็กกลมที่ใช้ขึ้นอยู่กับเกรดของวัสดุมวลรวมหยาบ ตามตารางที่ ผ.40

วิธีทดลอง

1) ตัวอย่างที่นำมาทดลอบจะต้องล้างและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110°C (221 ถึง 230°F) ให้มีน้ำหนักคงที่ แบ่งแยกออกเป็นขนาดต่าง ๆ ให้เป็นไปตามเกรดของตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ ผ.41 น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ทดลอบนั้นทึกให้มีความละเอียด 1 กรัม

2) ใส่ตัวอย่างและลูกเหล็กกลมในเครื่อง Los Angeles หมุนเครื่องด้วยความเร็ว 30 ถึง 33 รอบต่อนาที จำนวน 500 รอบ หลังจากนั้นนำตัวอย่างออกจากเครื่อง

3) แบ่งตัวอย่างหายนาดที่ใหญ่กว่า 1.70 มม. (ตะแกรงเบอร์ 12) โดยทำการล้างผ่านตะแกรง นำตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110°C (221 ถึง 230°F) แล้วนำไปชั่งให้มีความละเอียด 1 กรัม

การคำนวณ

$$\text{ความลึกหรอ} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\ \%$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดก่อนการทดลอง .

W_2 = น้ำหนักตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12

ตารางที่ ผ.40 จำนวนและน้ำหนักลูกเหล็กกลมในการทดสอบความลึกหรอ

Grading	Number of Spheres	Weight of Charge. g
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

ตารางที่ ผ.41 การแบ่งเกรดของตัวอย่างในการทดสอบความลึกหรอ

Sieve Size (Square Openings)		Weight of Indicated Sizes.g			
Passing	Retained on	Grading			
		A	B	C	D
37.5 (1 ½ in.)	25.0 mm(1 in.)	1250±25	-	-	-
25.0 mm(1 in.)	19.0mm(3/4 in.)	1250±25	-	-	-
19.0 mm(3/4 in.)	12.5 mm(1/2 in.)	1250±10	2500±10	-	-
12.5 mm(1/2 in.)	9.5 mm(3/4 in.)	1250±10	2500±10	-	-
9.5 mm(3/4 in.)	6.3 mm(1/4 in.)	-	-	2500±10	-
6.3 mm(1/4 in.)	4.75-mm(No.4)	-	-	2500±10	-
4.75-mm (No.4)	2.36-mm(No.8)	-	-	-	5000±10
Total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

ภาคผนวก ฆ.6 วิธีการทดลอบหาค่า Sand Equivalent[10, 20]

(ASTM D 2419-74, AASHTO T 176-73)

ความมุ่งหมาย เพื่อหาอัตราส่วนของวัสดุพวกฝุ่นหรือดินเหนียว กับวัสดุพวกกรวด, ทราย

อุปกรณ์

1) หลอดทรงกระบอกพลาสติกโปร่งแสง จุกยางเปิดปากกระบอก ท่อลิ่งน้ำยา ดังแสดงในรูปที่ ผ.4

2) กระป๋องตวง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 37 มม. มีความจุด 85 ± 5 มิลลิลิตร

3) กรวยปากกว้าง สำหรับใส่ตัวอย่างลงในกระบอกพลาสติก

4) นาฬิกาจับเวลา

5) Weight foot Assembly ประกอบด้วย Sand Reading Indicator ติดอยู่กับแกนโลหะห่าง 10 นิ้ว จากตีนล่างที่ใช้วางติดกับทราย เมื่อต้องการวัดความสูงของทราย

6) เครื่องเขย่ากระบอก สามารถเขย่าได้ 175 ± 2 รอบต่อนาที ระยะทางเขย่าตามแนวราบ 8 ± 0.04 นิ้ว หรือการเขย่าด้วยมือในอัตรา 100 รอบใน 45 ± 5 วินาที ระยะทางเขย่าตามแนวราบ 9 ± 1 นิ้ว

7) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยใช้ Anhydrous calcium chloride 454 กรัม, USP Glycerine 2050 กรัม และ Formaldehyde 47 กรัม

การเตรียมสารละลายให้ละลายแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำกลั่น 1/3 แกลลอน (1.89 ลิตร) กรองผ่านกระดาษกรองแบบ Rapid filtering paper เติม glycerin และ formaldehyde ผสมให้เข้ากัน แล้วทำให้เจือจางจนมีปริมาตร 1 แกลลอน (3.78 ลิตร) สารละลายที่ใช้ working solution เตรียมได้จากน้ำสารละลายที่ได้ปริมาณ 1 กระป๋องตวง และทำให้เจือจางเป็นสารละลาย 1 แกลลอน (3.78 ลิตร)

วิธีทดลอง

1) นำตัวอย่างที่ผึ่งให้แห้งในอากาศ มาผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เอาส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มาใช้ ตักมา 1 กระป๋องตวง กระแทกกระป๋องให้แน่นเพื่อจะได้บรรจุตัวอย่างให้ได้มากที่สุด ใช้มีดปาดปากกระป๋องให้เรียบ

2) เติมสารละลาย Working Solution ลงในกระบอกพลาสติกสูงประมาณ 4 นิ้ว วางกรวยปากกว้างบนปากกระบอกแล้ว เทตัวอย่างจากกระป๋องตวงลงในกระบอก ไล่ฟองอากาศออกโดยกระแทกกับกระบอกพลาสติกด้วยฝ่ามือ 2-3 ครั้ง แล้วปล่อยวัสดุตัวอย่างแช่ไว้ในน้ำยาเป็นเวลา 10 ± 1 นาที

3) อุดกระบอกตวงด้วยจุกยาง คว่ำกระบอกไปมา 2-3 ครั้ง เพื่อไม่ให้วัสดุค้างอยู่ก้นกระบอก แล้วนำเข้าเครื่องเขย่า ถ้าเขย่าด้วยมือ เขย่าด้วยความกว้าง 9 ± 1 นิ้ว 90 รอบใน 30 วินาที

4) นำกระบอกตวงพลาสติกออกจากเครื่องเขย่า มาตั้งบนโต๊ะ เอาจุกยางออก แล้วใช้ท่อส่งน้ำยาไปที่ก้นกระบอก เปิดให้สารละลายผ่านออกไปล้างวัสดุที่ติดข้างกระบอกจนระดับของน้ำยาในกระบอกอยู่ที่ยืด 15 นิ้ว จึงค่อย ๆ ยกท่อส่งน้ำยาออก แล้วเติมน้ำยาให้ถึงยืด 15 นิ้วพอดี

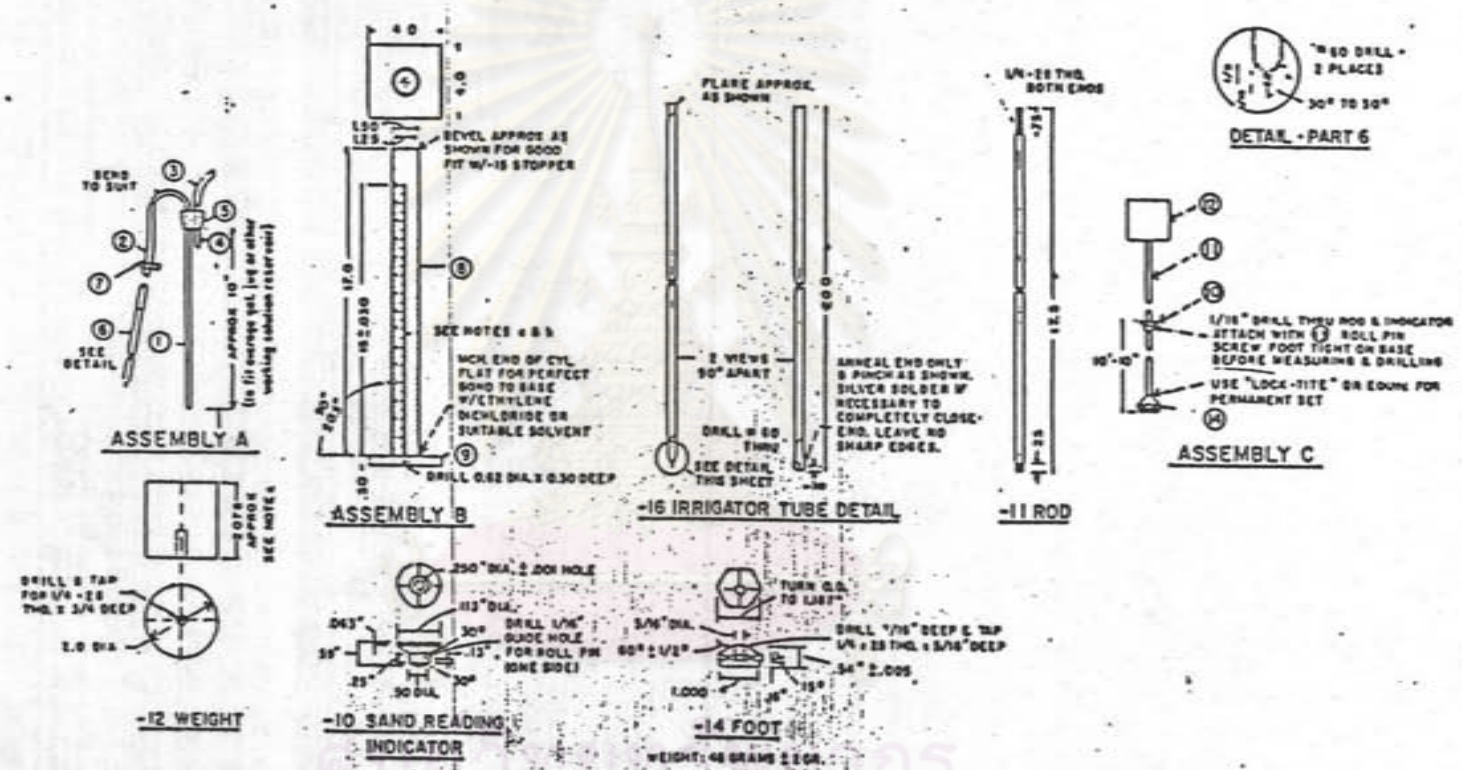
5) ปล่อยกระบอกตวงทิ้งไว้ 20 นาที โดยไม่ให้ถูกรบกวน ดินเหนียวจะลอยอยู่โดยแยกเป็นชั้นอย่างชัดเจน อ่านค่าระดับชั้นบนสุดของดินเหนียว เป็นค่า "Clay reading"

6) นำ Weight foot Assembly หย่อนลงในกระบอกตวงไปวางบนวัสดุเม็ดหยาบ อ่านค่าบนกระบอกตวงตรงระดับบนสุดของยืดหมาย แล้วลบด้วย 10 ก็จะได้ค่า "Sand reading"

การคำนวณ

$$\text{ค่า Sand Equivalent, SE} = \frac{\text{Sand reading}}{\text{Clay reading}} \times 100\ \%$$

หมายเหตุ ค่าของ Sand reading ของ Clay reading ใช้เลยทศนิยม 1 ตำแหน่ง สำหรับค่า Sand Equivalent เป็นเลยจำนวนเต็มให้ปัดทศนิยมเป็นจำนวนเต็มทั้งหมด



NOTE—The sand reading indicator and foot specified by ASTM Method D 2419 - 69, Fig. 1, may be used where this equipment is previously available.

รูปที่ ผ.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาค่า Sand Equivalent

ภาคผนวก ฆ.7 วิธีการทดลองการเคลือบและการหลุดร่อนของส่วนผสมบิทูเมนกับวัสดุมวลรวม[10, 20]

(ASTM D 1664-69, AASHTO T 182-70)

ความมุ่งหมาย

เพื่อที่จะหาการเคลือบผิวของบิทูเมนกับวัสดุมวลรวม และการหลุดร่อนของบิทูเมนออกจากวัสดุมวลรวมเมื่อนำไปแช่น้ำ วิธีนี้สามารถใช้ได้กับยางมะตอยประเภท Cut back, Emulsified, Semi Solid และ Tar

อุปกรณ์

1) กระป๋องบรรจุตัวอย่างและใช้สำหรับผสม ที่สามารถบรรจุได้ 16 ออนซ์ (500 มิลลิลิตร)

2) ตาชั่งละเอียดที่สามารถชั่งได้ 200 ± 0.1 กรัม

3) Spatula ทำด้วยเหล็กมีความกว้างประมาณ 1 นิ้ว (25 มม.) ยาว 4 นิ้ว (100 มม.)

4) เตาอบที่สามารถปรับอุณหภูมิคงที่ได้ มีอุณหภูมิระหว่าง 60° - 149°C (140° - 300°F)

5) ตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว, $\frac{1}{4}$ นิ้ว

6) น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

1) สำหรับการเคลือบวัสดุมวลรวมแห้งกับ Cut Back Asphalt และ Tars

1.1) การเคลือบ นำเอาวัสดุมวลรวมอบแห้ง 100 กรัม มาใส่ในกระป๋องที่ใช้ผสมตัวอย่าง เติมยางมะตอยที่จะใช้ 5.5 ± 0.2 กรัม โดยทำให้มีอุณหภูมิตามตาราง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเกรดของยาง ผสมวัสดุทั้ง 2 เข้าด้วยกันด้วย Spatula เป็นเวลา

2 นาที

1.2) การบ่ม ทำการบ่มวัสดุมวลรวมที่เคลือบแล้วเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C (140°F) เตาอบที่ใช้ควรจะเปิดในระหว่างการบ่ม หลังจากการบ่มแล้วก็ทำการคนล่วนผสมใหม่ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งการเคลือบระหว่างวัสดุมวลรวมกับยางมะตอยเข้ากันดีแล้ว

1.3) นำเอาวัสดุมวลรวมที่เคลือบยางมะตอยแล้วไปแช่ในน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง

1.4) การสังเกตประมาณค่าการหลุดร่อน ในระหว่างแช่น้ำต้องไม่รบกวน นำเอาฟิล์มที่ลอยอยู่เหนือน้ำออก แล้วเอาดวงไฟขนาด 75 วัตต์ ส่องดูจากด้านบนเหนือน้ำ และประมาณพื้นที่การเคลือบผิวดูว่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ (ส่วนที่มีสีน้ำตาลจาง ๆ ก็คือว่าเป็นการเคลือบที่สมบูรณ์)

2) สำหรับการเคลือบวัสดุมวลรวมแห้งกับยางมะตอยเหลวชนิด RS, MS, SS

2.1) การเคลือบ นำเอาวัสดุมวลรวมแห้งมาใส่ในกระป๋องที่ใช้ผสมตัวอย่าง 100 กรัม เติมยางมะตอยเหลว 8.0 ± 0.2 กรัม ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องคน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 135°C (275°F) เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำเอาออกมาคนด้วย Spatula จนกระทั่งเข้ากันดี

2.2) การบ่ม จะบ่มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 135°C (275°F)

3) สำหรับการเคลือบวัสดุมวลรวมเปียกกับ Cut Back Asphalt และ Tars

3.1) การเคลือบ นำเอาวัสดุมวลรวมอบแห้งมาใส่ในกระป๋องผสม 100 กรัม เติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร ผสมด้วย Spatula จนกระทั่งทั่ว แล้วเติมยางมะตอย 5.5 ± 0.2 กรัม ทำให้มีอุณหภูมิได้ตามตารางที่ ผ.42 แล้วทำการผสมกันเป็นเวลา 5 นาที

3.2) การสังเกต ดูเปอร์เซ็นต์การเคลือบผิวของยางมะตอยมากกว่าหรือน้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ (ส่วนที่มีสีน้ำตาลจาง ๆ ก็ถือว่าเป็นการเคลือบที่สมบูรณ์)

4) สำหรับการเคลือบวัสดุมวลรวมแห้งกับ Semi Solid Asphalt และ Tars

4.1) การเคลือบ นำเอาวัสดุมวลรวมอบแห้งมาใส่ในกระป๋องผสม 100 กรัม โดยมาทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 135° - 149°C (275° - 300°F) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติมแอสฟัลท์ที่อุณหภูมิ 135° - 149°C (275° - 300°F) ถ้าเป็น Tars ให้ความร้อนวัสดุมวลรวมอุณหภูมิ 79° - 140°C (175° - 225°F) และ 93° - 121°C (200° - 250°F) สำหรับ Tars เติมยางมะตอย 5.5 ± 0.2 กรัม ที่กำลังร้อนแล้วทำการผสมด้วย Spatula เป็นเวลา 2-3 นาที จนกระทั่งเคลือบจนทั่ว แล้วนำเอาส่วนผสมไว้ที่อุณหภูมิห้อง

4.2) นำเอาส่วนผสมที่ได้ไปแช่น้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง 125°C)

4.3) การสังเกตดูเปอร์เซ็นต์การเคลือบผิวของยางมะตอยมากกว่าหรือน้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ (ส่วนที่มีสีน้ำตาลจาง ๆ ก็ถือว่าเป็นการเคลือบที่สมบูรณ์)

การรายงาน

รายงานส่วนที่เคลือบมากกว่าหรือน้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.42 แสดงข้อกำหนดของอุณหภูมิยางมะตอยที่ใช้ผสม

Material	Temperature
Cutback asphalt, Grades 30 and 60	room temperature
Cutback asphalt, Grade 250	35 ± 2 C (95 ± 5 F)
Cutback asphalt, Grade 800	52 ± 2 C (125 ± 5 F)
Cutback asphalt, Grade 3000	68 ± 2 C (155 ± 5 F)
Tar, Grades RT-1, RT-2, and RT-3	60 ± 2 C (140 ± 5 F)
Tar, Grades RTCB-5 and RTCB-6	60 ± 2 C (140 ± 5 F)
Tar, Grade RT-5, and RT-6	71 ± 2 C (160 ± 5 F)
Rar, Grades RT-7, RT-8, and RT-9	93 ± 2 C (200 ± 5 F)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

การทดลอบแอล์พีลท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบแอสฟัลท์

ภาคผนวก ช.1 วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ[10, 20]

(ASTM D 70-82, AASHTO T 228-78)

ความมุ่งหมาย

เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุบิทูมินัสที่มีสภาพทึบแข็ง รวมอีมัลชั่น โดยใช้วิธี Pycnometer ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุบิทูมินัส เป็นอัตราส่วนของมวลวัสดุที่อุณหภูมิ 77°F (25°C) ต่อมวลของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน

อุปกรณ์

1) Pycnometer เป็นภาชนะแก้วรูปทรงกระบอกหรือรูปกรวยมีฝาแก้วปิด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.20 - 2.60 ซม. กึ่งกลางฝามีรูเจาะไว้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.10 - 0.20 ซม. ผิวบนของฝาเรียบ ส่วนผิวล่างเป็นรูปโค้ง เพื่อให้อากาศผ่านออกได้ มีความจุประมาณ 24 - 30 ลบ.ซม. และน้ำหนักทั้งหมดไม่เกิน 40 กรัม ตามรูปที่ ผ.5

2) อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ เปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 0.2°F (0.1°C) จากที่อุณหภูมิทดสอบ

3) เทอร์โมมิเตอร์อ่านละเอียด 0.2°F (0.1°C)

4) เครื่องชั่งน้ำหนักอ่านละเอียด 0.001 กรัม

5) น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

1) ทำความสะอาด Pycnometer ทำให้แห้งและชั่งน้ำหนักรวมทั้งจุกปิด

2) เติมน้ำกลั่นลงใน Pycnometer แช่ทิ้งไว้ในน้ำที่อุณหภูมิที่ทดสอบไม่น้อยกว่า 30 นาที แล้วจึงนำขึ้นมาเช็ดผิวนอกของ Pycnometer และฝาปิดให้แห้ง และทำการชั่งน้ำหนัก

3) ทำความสะอาด Pycnometer ทำให้แห้ง นำเอายางมะตอยที่จะทดสอบมาทำให้เหลวพอที่จะเทได้ อุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรเกินจุดอ่อนตัว (Softening point) สำหรับ Tars ไม่ควรเกิน 100°F (56°C) และไม่มากกว่า 200°F (111°C) สำหรับแอสฟัลท์ อย่าทำให้ร้อนเกิน 30 นาที เทตัวอย่างลงใน Pycnometer ประมาณ 3 ใน 4 ของความจุ การเทต้องระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศ ควรจะเทให้เป็นสายเล็ก ๆ เพื่อที่จะให้ฟองอากาศลอยขึ้นมาบนผิวบนได้ง่าย อย่าให้ยางมะตอยมาแตะข้างขวดได้ ปิดฝาแล้วชั่ง

4) เติมน้ำกลั่นลงใน Pycnometer ปิดฝา และนำไปแช่ในอ่างปรับอุณหภูมิไม่น้อยกว่า 30 นาที นำขึ้นจากอ่างเช็ดผิวนอกของ Pycnometer ให้แห้ง และชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

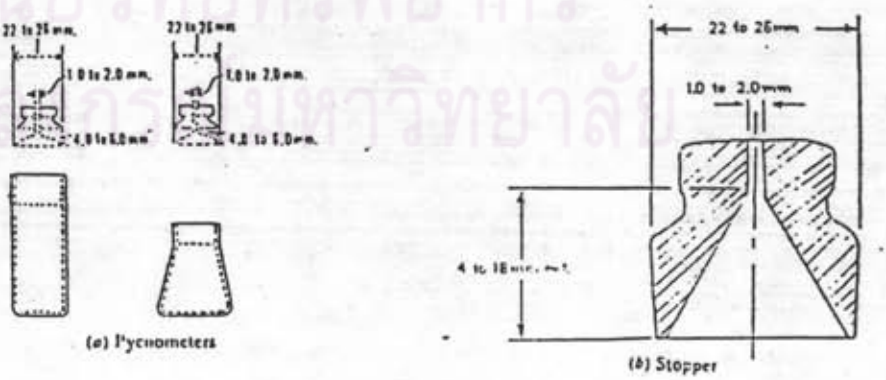
$$\text{ค่าความถ่วงจำเพาะ} = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)}$$

เมื่อ A = น้ำหนักของ Pycnometer

B = น้ำหนักของ Pycnometer และน้ำ

C = น้ำหนักของ Pycnometer และน้ำหนักของแอสฟัลท์

D = น้ำหนักของ Pycnometer, น้ำหนักของแอสฟัลท์และน้ำ



รูปที่ ผ.5 Pycnometer และฝาปิด

ภาคผนวก ฆ.2 วิธีการทดสอบหาค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐาน (Penetration) (10, 20)

(ASTM D 5-73, AASHTO T 49-78)

ความมุ่งหมาย

เพื่อหา Consistency ของวัสดุบิทูมินัส หรือแอสฟัลท์ที่อยู่ในสภาพแข็งหรือกึ่งของแข็ง การทดสอบนี้ใช้ได้กับวัสดุที่มีค่า Penetration ต่ำกว่า 350 ค่า Penetration เป็นส่วนที่เข็มมาตรฐานจมลงในเนื้อแอสฟัลท์ในแนวดิ่งภายใต้น้ำหนัก เวลา และอุณหภูมิที่กำหนด โดยที่ 1 Penetration เท่ากับ 1 ใน 10 ของมิลลิเมตร

อุปกรณ์

1) Penetration Apparatus ประกอบด้วยแกนยึดเข็มที่เคลื่อนที่ในแนวดิ่ง สามารถอ่านละเอียดได้ 0.1 มม. น้ำหนักของแกนเคลื่อนที่นี้เท่ากับ 47.5 ± 0.05 กรัม เมื่อรวมน้ำหนักของเข็มแล้วเท่ากับ 50.0 ± 0.05 กรัม จะเป็นน้ำหนักที่ใช้ถ่วง 100 ± 0.05 กรัม

2) เข็มมาตรฐานทำจากแสตนเลสยาวประมาณ 50 มม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.00 - 1.02 มม. ปลายข้างหนึ่งแหลมเป็นรูปกรวย ปลายแหลมด้านนี้จะเรียบ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.14 ถึง 0.16 มม. อีกปลายหนึ่งฝังในโลหะทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 ± 0.05 มม. ยาว 3.8 ± 1 มม. เข็มมาตรฐานจะยาวออกมาภายนอก 40 - 45 มม.

3) ภาชนะบรรจุตัวอย่างขนาดความจุ 3 ออนซ์ เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 5.5 ซม. ลึก 3.5 ซม. สำหรับแอสฟัลท์ที่มี Penetration ไม่เกิน 200 ถ้าเกินใช้ขนาดความจุ 6 ออนซ์ เส้นผ่าศูนย์กลาง 7 ซม. ลึก 4.5 ซม.

4) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 25°ซ. พร้อมเทอร์โมมิเตอร์อ่านได้ละเอียดถึง 0.1°ซ. และจุ่มลงในน้ำประมาณ 15 ซม.

5) ภาชนะย้ายตัวอย่าง (Transfer Dish) มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 90 มม. ลึกไม่น้อยกว่า 55 มม.

6) นาฬิกาจับเวลา อ่านได้ละเอียด 0.1 วินาที

7) ไฟส่องดูเงาของเข็มในน้ำ

วิธีการทดลอง

1) ทำตัวอย่างให้เหลว โดยใช้ความร้อนจนตัวอย่างมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดอ่อนตัว (Softening point) เล็กน้อย เพื่อที่จะให้แอสฟัลท์เหลว และต้องคนเพื่อไม่ให้ส่วนใดส่วนหนึ่งร้อนเกินไป และต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ

2) เทตัวอย่างลงในภาชนะบรรจุตัวอย่างให้มากพอ โดยเข็มมาตรฐานจะจมลงไปไม่ติดก้นภาชนะ และห่างจากก้นภาชนะไม่น้อยกว่า 10 มม.

3) ปิดภาชนะบรรจุเพื่อป้องกันฝุ่นละออง ทำให้เย็นในบรรยากาศธรรมดาประมาณ 1 - 1 $\frac{1}{2}$ ชั่วโมง สำหรับภาชนะเล็ก และ 1 $\frac{1}{2}$ - 2 ชั่วโมง สำหรับภาชนะใหญ่ หลังจากนั้นวางไว้ในภาชนะย้ายตัวอย่าง แล้วนำไปแช่ในอ่างน้ำ ปรับอุณหภูมิ 1 - 1 $\frac{1}{2}$ ชั่วโมง สำหรับภาชนะเล็ก และ 1 $\frac{1}{2}$ - 2 ชั่วโมง สำหรับภาชนะใหญ่

4) ในการทดลอง ตามปกติทดลองที่ 25°C (77°F) น้ำหนักกด 100 กรัม ใช้เวลา 5 วินาที

5) ทำความสะอาดเข็มมาตรฐานด้วยกระดาษชุบคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ปรับเครื่องมือให้ปลายเข็มมาตรฐานสัมผัสที่ผิวตัวอย่างพอดี อาจสังเกตได้จากเงาของเข็มที่เกิดจากการสะท้อนบนผิวหน้าของตัวอย่าง ปรับหน้าปัทม์ให้อ่านค่าศูนย์ ปล่อยเข็มให้จมลงบนตัวอย่างตามระยะเวลาที่กำหนด จะได้ค่า Penetration

6) ทำการทดลองอย่างน้อย 3 ครั้ง ตำแหน่งในแต่ละครั้งที่กดเข็มลงบนตัวอย่างให้ห่างจากขอบภาชนะไม่น้อยกว่า 10 มม. และจุดทดลองห่างกัน 10 มม. เช่นกัน

การรายงาน

การรายงานโดยทำการเฉลี่ยค่า Penetration ที่ได้ทั้ง 3 ครั้ง โดยที่ค่าแตกต่างระหว่างแต่ละครั้งต้องไม่เกินค่ากำหนดตามตารางที่ ผ.43 และ ผ.44

ตารางที่ ผ.43 ค่าแตกต่างสูงสุดที่ได้จากการทดลอง Penetration

Penetration	0-49	50-149	150-249	250
Maximum difference between highest and lowest determination	2	4	6	8

ถ้าค่าที่ได้แตกต่างมากกว่าตารางที่ ผ.43 ให้ทำการทดลองใหม่ สำหรับการทดสอบหลาย ๆ ตัวอย่าง หรือผลการทดลองจากผู้ทดสอบหลายคน ค่าแตกต่างที่จะยอมรับผลการทดลองนั้น แสดงในตารางที่ ผ.44

ตารางที่ ผ.44 ค่าแตกต่างในการยอมรับผลการทดลองหาค่า Penetration

Material	Standard Devision or Coefficient of Variation (IS) or (I5 %)	Acceptable Range of two Test Rusults (D25) or (D25 %)
Single-operator precision:		
Asphalts at 77 F(25 C) below 50 penetration, units	0.35	1
Asphalts at 77 F (25 C) 50 penetration and above, precent of their mean	1.1	3
Tar pitches at 77 F (25 C)* percent of their mean	5.2	15
Multilaboratory precision :		
Asphalts at 77 F (25 C) below 50 penetration, units	1.4	4
Asphalts at 77 F (25 C) 50 penetration and above, percent of their mean	2.8	8
Tar pitches at 77 F(25 C)* units	1.4	4

* Estimates of precision for tar pitches are based on results from 2 pitches with penetration of 7 and 24. Estimates may not be applicable to appreciably harder or softer materials.

ภาคผนวก ง.3 วิธีการทดลอบหาค่าการดึงยืดเป็นเส้น (Ductility)[10, 20]

(ASTM D 113-79, AASHTO T 51-74)

ความมุ่งหมาย

เพื่อที่จะหาค่าการดึงยืดเป็นเส้นของวัสดุแอสฟัลท์ โดยดูจากระยะที่ยืดออกไปก่อนขาด การดึงจะดึงที่ปลายทั้ง 2 ข้างที่ยึดอยู่กับแบบมาตรฐาน ดึงที่อุณหภูมิและความเร็วตามที่กำหนด ตามปกติทดลอบที่อุณหภูมิ 25 ± 0.5°C (77 ± 1.0°F) อัตราความเร็ว 5.0 ซม. ต่อนาที ± 5.0 เปอร์เซ็นต์

อุปกรณ์

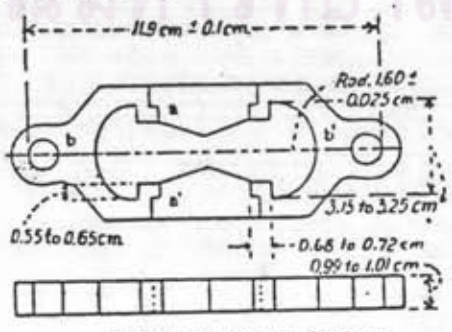
1) แบบมาตรฐาน (Mold) มีความยาว 7.45 - 7.55 ซม., ระยะระหว่างตัวยึด 2.97 - 3.03 ซม., ความกว้างที่ปากตัวยึด 1.98 ถึง 2.02 ซม., ความกว้างที่กึ่งกลางของแบบ 0.99 - 1.01 ซม. ความหนาทั้งหมด 0.99 - 1.01 ซม. ตามรูปที่ ผ.6

2) อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ สำมารถปรับน้ำให้มีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนด ความจุของน้ำไม่น้อยกว่า 10 ลิตร ตัวอย่างจมอยู่ในน้ำลึกไม่น้อยกว่า 10 ซม. และวางอยู่บนชั้นโปร่งสูง 5 ซม.

3) เครื่องดึงยืด สำหรับดึงตัวอย่างตามความเร็วสม่ำเสมอ โดยไม่เกิดการสั่นสะเทือน และตัวอย่างต้องจมอยู่ในน้ำตลอดเวลา

4) แผ่นทองเหลืองสำหรับวางแบบหล่อตัวอย่าง

5) ตะแกรงเบอร์ 50



Mold for Ductility Test Specimen.

รูปที่ ผ.6 แบบมาตรฐานในการทดลอบ Ductility

วิธีการทดลอง

1) ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างและคนส่ำเล่มอไม่ให้เกิดความร้อนมากเกินไป เทตัวอย่างผ่านตะแกรงเบอร์ 50 หลังจากนั้นเทตัวอย่างลงในแบบมาตรฐานที่วางอยู่บนแผ่นทองเหลือง ในการป้องกันตัวอย่างยึดกับแผ่นทองเหลืองและส่วนข้างของแบบ ให้ทาผิวแผ่นทองเหลืองและแบบข้างด้วยปรอท ในการเทควรจะเทให้เป็นลายเล็ก ๆ โดยเริ่มจากปลายข้างหนึ่ง ให้ล้นออกจากแบบเล็กน้อย ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 ถึง 40 นาที และแช่ในอ่างปรับอุณหภูมิเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นก็ตัดส่วนของแอล์พัลท์ที่เกินจากแบบออก โดยใช้ Spatulaเพื่อให้ตัวอย่างเรียบ

2) วางแผ่นทองเหลืองและแบบในอ่างควบคุมอุณหภูมิประมาณ $1\frac{1}{2}$ ชั่วโมง แล้วนำเอาแผ่นทองเหลืองและแบบด้านข้างออก แล้วนำไปทดลองทันที

3) นำตัวอย่างที่ติดกับแบบใส่ลงในหมุดหัวท้ายของเครื่องดึง แล้วเดินเครื่องให้แยกออกจากกันด้วยอัตราเร็วส่ำเล่มอ จนกระทั่งตัวอย่างที่ยืดยาดออกจากกัน

4) ในระหว่างทดลองต้องตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำให้อยู่ที่ 25°C พอดี และให้เติมเมทิลแอลกอฮอล์ลงในน้ำเพื่อให้น้ำมีความถ่วงจำเพาะน้อยลง ถ้าเส้นตัวอย่างลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ แต่ถ้าเส้นตัวอย่างสัมผัสพื้นล่างอ่างให้เติมโซเดียมคลอไรด์ลงในน้ำเพื่อให้มีความถ่วงจำเพาะมากขึ้น

การรายงาน

รายงานค่าเฉลี่ยของการทดลอง 3 ครั้งของการดึงตัวอย่างเป็นค่า Ductility ของตัวอย่างนั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช.4 วิธีการทดลองการละลายของวัสดุบิทูเมนในสารทำละลายอินทรีย์[10, 20]
(ASTM D 2042-81, AASHTO T 44-78)

ความมุ่งหมาย

เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การละลายของวัสดุบิทูเมน ในสารทำละลายอินทรีย์ได้แก่ สารละลายคาร์บอนเตตระคลอไรด์

อุปกรณ์

1) ถ้วยกรอง Gooch Crucible เป็นถ้วยกระเบื้องเคลือบทนไฟ มีขนาดปากกว้าง 4.4 ซม. ก้นกว้าง 3.6 ซม. มีรูพรุนสูงประมาณ 2.5 ซม.

2) หลอดกรอง (Filter tube) เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.0 - 4.2 ซม.

3) ขวดกรอง (Filtering Flask) เป็นแก้วหนาและมีท่อที่คอขวด ขนาดความจุประมาณ 250 - 500 ลบ.ซม.

4) เครื่องดูดอากาศ (Suction pump)

5) Asbestos (ใยหิน) ใช้สำหรับถ้วยกรองไม่ละลายในคาร์บอนเตตระคลอไรด์

6) ตะเกียงบุนเซ็นต์และเตาอบ พร้อมเครื่องชั่งอย่างละเอียด

7) สารทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนเตตระคลอไรด์

วิธีการทดลอง

1) นำเอาใยหินมาใส่ในน้ำกลั่น แล้วเทลงใน Gooch Crucible เป็นแผ่นบาง ๆ ปิดรูพรุนพอดี ใช้เครื่องดูดให้ใยหินติดแน่นที่ก้นถ้วยกรอง และดึงน้ำออกจนแห้ง โดยที่จะมีใยหินอยู่ประมาณ 0.5 – 0.1 กรัม นำถ้วยกรองเข้าเตาอบเพื่ออบให้แห้ง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 - 650°C ทิ้งให้เย็นลง นำไปชั่งในเครื่องชั่งละเอียด 0.0001 กรัม

2) ชั่งตัวอย่างหนักประมาณ 2 กรัม ในขวดแก้วรูปกรวยขนาด 125 ลบ.ซม. ชั่งน้ำหนักให้ละเอียด 0.001 กรัม เติมสารละลายอินทรีย์ที่จะใช้ 100 ลบ.ซม. เทีละน้อย

จนละลายวัสดุตัวอย่างหมด ทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 15 นาที

3) นำถ้วยกรองที่เตรียมไว้ ใส่สารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 2 ลงในถ้วยกรองใช้เครื่องดูดดูดเบา ๆ เทตัวอย่างจนหมดแล้วใช้ตัวทำละลายล้างขวดที่ละลายตัวอย่างอีกครั้ง แล้วเทลงในถ้วยกรองจนหมด

4) นำถ้วยกรองออกจากขวดกรอง ล้างด้านล่างภายนอกด้วยตัวทำละลาย แล้วนำไปไว้ในเตาอบจนแห้ง ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 100 ± 5°C อย่างน้อย 20 นาที ทำให้เย็นลง แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำ ๆ จนได้น้ำหนักคงที่

การคำนวณ

$$\% \text{ บิทูเมนที่ละลาย} = \frac{(\text{นน. ของบิทูเมน}) - (\text{นน. ของสารที่ไม่ละลาย})}{\text{นน. ของบิทูเมน}}$$

หมายเหตุ

1) ถ้าตัวอย่างมีน้ำปนอยู่เกิน 2 % ต้องนำมาทำให้แห้งโดยการกลั่น แล้วนำเอาส่วนที่เหลือ (Residue) ไปใช้

2) สารละลายที่สามารถนำมาใช้ในการทดลองได้มี Carbon Disulfide, Trichloroethylene หรือ Benzene

3) การรายงานต้องรายงานส่วนที่ละลายให้ได้มีความละเอียด 0.1 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลอง 2 ครั้ง จากผู้ทดลองเดียวกัน ผลที่ได้จะต้องต่างกันไม่มากกว่า 0.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช.5 วิธีการทดลองหาความหนืดของแอสฟัลท์เหลว[10]

(ASTM D 244)

ความมุ่งหมาย

เพื่อเป็นการหาค่าความหนืดของแอสฟัลท์เหลว โดยใช้วิธี Saybolt Furol

อุปกรณ์

1) Saybolt Forol Viscosimeter เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความหนืดของแอสฟัลท์เหลว มีส่วนประกอบดังนี้

1.1) Oil Tube เป็นหลอดโลหะปลายล่างมีรูเจาะเป็นให้แอสฟัลท์เหลวไหลผ่านและยันติดกับอ่างปรับอุณหภูมิ มีจุกก๊อกปิดอยู่ เปิดออกได้เมื่อทำการทดลอง

1.2) อ่างบรรจุของเหลวปรับอุณหภูมิ มีท่อน้ำเข้าไหลผ่านเมื่อต้องการปรับอุณหภูมิให้ต่ำลง และมี Coil ร้อน ปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้น, เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ และระดับของของเหลวที่บรรจุในอ่างนี้จะต้องสูงกว่า Overflow rim ไม่น้อยกว่า 1/2"

1.3) ขวดแก้วมาตรฐานสำหรับรองตัวอย่างเวลาทดลอบเรียกว่า Receiving Flask มีรูปร่างดังรูป มีปริมาตรถึงขีดหมายที่คอขวด 60 ± 0.05 ลบ.ซม.

1.4) อุณหภูมิของ Oil Tube และอ่างน้ำปรับอุณหภูมิให้ใช้ตามข้อกำหนดของแอสฟัลท์เหลวแต่ละชนิด

2) นาฬิกาจับเวลา อ่านได้ละเอียดถึง 0.2 วินาที

3) ปิเปต ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มม. ใช้สำหรับดูดตัวอย่างที่ล้นออกมาจาก Oil Tube

วิธีการทดลอง

1) ทำความสะอาด Oil Tube, Orifice และจุกก๊อกที่ปิด Orifice ให้สะอาด

2) ตั้ง Receiving Flask ให้ตรงกับ Orifice ของ Oil Tube โดยตรวจดูให้การไหลของแอสฟัลท์เหลวไหลลงกึ่งกลางรู Flask พอดี

3) ทำการปรับอุณหภูมิให้อยู่ตามข้อกำหนดของแอสฟัลท์เหลวแต่ละชนิด โดยปรับให้สูงหรือต่ำกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย

4) เทตัวอย่างลงใน Oil Tube โดยให้มีระดับสูงกว่า Overflow rim เล็กน้อย แล้วใช้เทอร์โมมิเตอร์คนไปรอบ ๆ รอจนมีอุณหภูมิตรงตามที่ต้องการ

5) รอจนอุณหภูมิคงที่ แล้วจึงทำการเปิดจุกก๊อกให้ตัวอย่างไหล พร้อมทั้งจับเวลาตั้งแต่เริ่มเปิด จนตัวอย่างไหลลงไปถึงขีดหมายของ Receiving Flask จึงปิด อ่านเวลาที่จับได้ จะเป็นค่าของ Furol Viscosity

การรายงาน

การรายงานโดยหาค่าเฉลี่ยของการทดลอง 3 ค่า โดยให้มีความละเอียด 0.1 วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฆ.6 วิธีการทดลองวัสดุบิทูมินัสแบบจานลอย (Float Test)[1, 10, 20]

(ASTM D 139-78, AASHTO T 50-77)

ความมุ่งหมาย

เป็นการทดลองหาความหนืด ซึ่งถ้าจะใช้วิธี Penetration จะให้การจมตัวของเข็มมากกว่า 300 และใช้เวลานานมาก ส่วนมากจะใช้กับพวกแอสฟัลท์เหลวที่เกรดสูง ๆ

อุปกรณ์

1) จานลอยอะลูมิเนียม และ Collar ทองเหลือง ขนาดและน้ำหนักตามรูปที่ ผ.7

2) เทอร์โมมิเตอร์ อ่านได้ระหว่าง -2°C ถึง +80°C

3) อ่างน้ำทดลองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 18.5 ซม. บรรจุน้ำได้พอสมควร

4) อ่างน้ำเย็น อุณหภูมิ

5) แผ่นทองเหลือง

6) นาฬิกาจับเวลา

วิธีการทดลอง

1) ทำความสะอาดแผ่นทองเหลืองด้วยกรดเกลืออย่างอ่อน แล้วทาผิวด้วยปรอทหรือน้ำมันเครื่อง

2) วาง Collar ลงบนแผ่นทองเหลืองตรงที่ทาผิวไว้ โดยเอาทางปลายบานขึ้นด้านบน

3) นำตัวอย่างที่ถูกทำให้เหลวสามารถเทลงใน Collar ได้ เทลงใน Collar ระวังอย่าให้มีฟองอากาศแทรกอยู่โดยให้ตัวอย่างสูงกว่าขอบ Collar เล็กน้อย

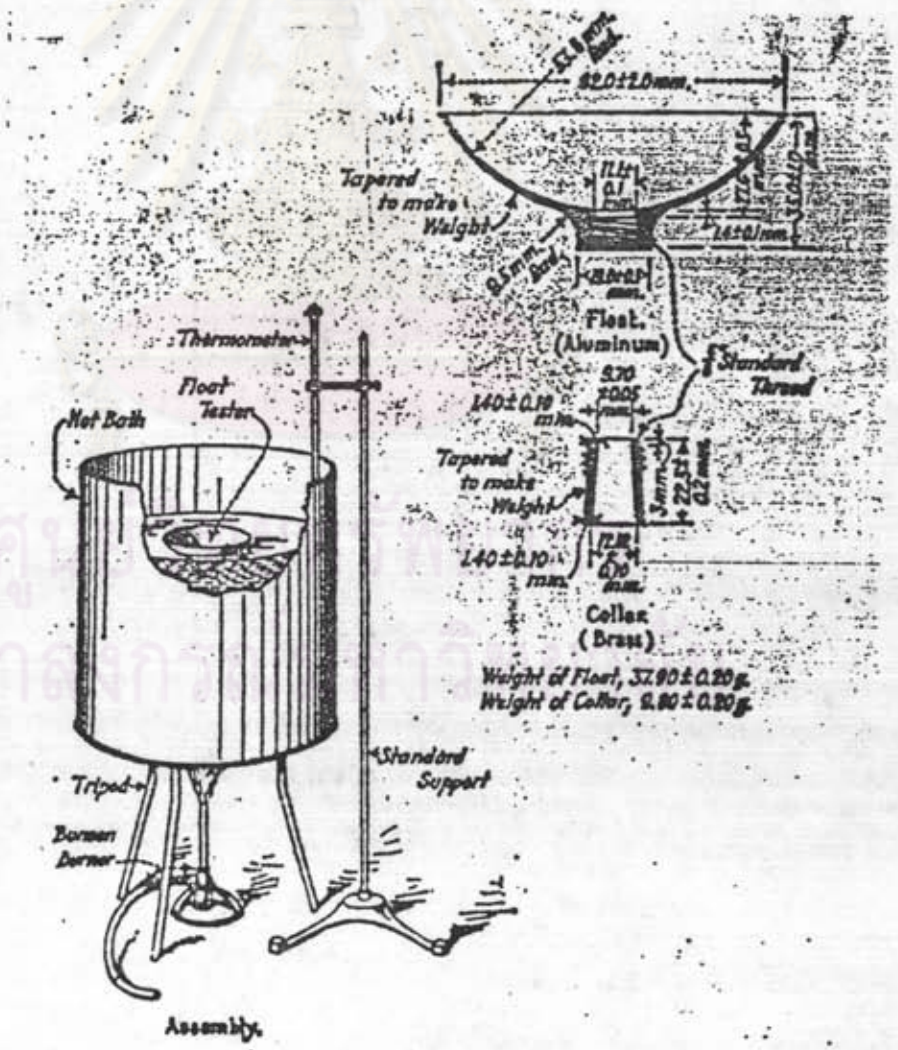
4) นำ Collar ที่บรรจุตัวอย่างมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 15-

60 นาทีแล้วนำไปแช่ในอ่างน้ำเย็นอุณหภูมิ 5°C ที่เตรียมไว้ประมาณ 5 นาที แล้วนำขึ้นมาตัดให้เรียบด้วย Spatula ร้อน ๆ แล้วแช่ลงในอ่างน้ำเย็นอุณหภูมิ 5°C อีกประมาณ 15-30 นาที

5) นำ Collar ที่บรรจุตัวอย่างขึ้นจากอ่างน้ำเย็น ขัดเกลียวติดกับจานอะลูมิเนียมทางด้านล่าง แล้วนำไปลอยในอ่างน้ำที่ปรับอุณหภูมิไว้คงที่ 50°C (122°F ± 0.9°F) เป็นเวลาของ Float Test ทำแบบนี้ 3 ตัวอย่าง แล้วนำค่ามาเฉลี่ยเป็น Average Float Test Value เป็นวินาที

การรายงาน

ค่า Float Test ได้จากค่าเฉลี่ยของการทำการทดลอง 3 ค่า มีความละเอียด 0.1 วินาที



Float Test Apparatus.

รูปที่ ผ.7 เครื่องมือทดลอง Float Test

ภาคผนวก ฆ.7 วิธีการทดลองการกลั่นยางมะตอยชนิดอิมัลชั่น[1, 10, 20]

(ASTM D 244 , AASHTO T 52-77)

ความมุ่งหมาย

เพื่อหาเปอร์เซนต์ของน้ำที่ผสมรวมอยู่เป็นองค์ประกอบในยางมะตอยชนิดอิมัลชั่น และหากาก (Residue) รวมถึงสารที่ประกอบเป็นแอสฟัลท์อิมัลชั่น เช่น Asphalt Base, น้ำ และพวก Emulsifying Agent

1) การหาเปอร์เซนต์ของน้ำในแอสฟัลท์อิมัลชั่น

อุปกรณ์

1) Metal Still เป็นภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.7 นิ้ว (9.39 ซม.) สูง 6 นิ้ว (15.24 ซม.) ตอนบนเป็นแผ่นฝาโลหะ มีรูเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว (2.54 ซม.) สำหรับใส่หลอดแก้วที่จะติดอยู่กับ Trap

2) Heat Source ทำเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 4 นิ้ว (10 ซม.) มีรูเจาะด้านในเพื่อให้เปลวไฟออกได้โดยรอบขณะดำเนินการทดลอง

3) Condenser เครื่องควบแน่นประกอบด้วย Jacket ยาว $15\frac{3}{4}$ นิ้ว (40 ซม.) หลอดแก้วชั้นในมีเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน $\frac{3}{8}$ นิ้ว (0.95 ซม.) และเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก $\frac{1}{2}$ นิ้ว (1.27 ซม.)

4) Trap ทำด้วยแก้ว มีขีดแบ่งออกอ่านได้ละเอียดถึง 0.05 มิลลิลิตร จาก 0 ถึง 2 มิลลิลิตร และอ่านได้ละเอียดถึง 0.10 มิลลิลิตร จาก 2 ถึง 25 มิลลิลิตร

5) ตัวทำละลายประเภท Xylol หรืออื่น ๆ เช่น จากการกลั่นของปิโตรเลียมที่ 98 % ระหว่างอุณหภูมิ 120° - 250°C

วิธีการทดลอง

1) เตรียมยางมะตอยที่จะนำมาใช้กลั่นโดยเตรียม 50 ± 0.1 กรัม ถ้าคาดว่ามีน้ำมากกว่า 25 % และเตรียม 100 ± 0.1 กรัม ถ้าคาดว่ามีน้ำน้อยกว่า 25 % แล้วเติมสารละลาย Xylol ในปริมาตรเท่ากัน เขย่าจนเข้ากัน

2) เชื่อมต่อ Metal Still, Trap และ Condenser เข้าด้วยกัน โดยใช้จุกก๊อกอุดให้แน่นทุกข้อต่อปรับปลาย Condenser ใน Trap ให้อยู่ในตำแหน่ง ซึ่งคาดว่าปลายจะจมลงในผิวของน้ำใน Trap หลังการกลั่นเสร็จแล้วไม่เกิน 1 มม. (0.04 นิ้ว) สอดกระดาษ Gasket ชุบตัวทำละลายระหว่าง Metal Still กับฝาปิด เพื่อป้องกันการเกิดควบแน่นเกี่ยวกับความชื้นของบรรยากาศ

3) ส่วม Ring Burner เข้ากับ Metal Still ให้อยู่สูงจากขอบล่าง 7.62 ซม. (3 นิ้ว) ปรับความร้อนจะเกิดการควบแน่นที่ Condenser ใน Trap น้ำจะหยดลงมาประมาณ 2-5 หยดต่อวินาที ทำการกลั่นต่อไปจนกระทั่งไม่มีน้ำหยดลงมาอีก และสังเกตุเห็นปริมาตรของน้ำใน Trap เร่งไฟต่ออีก 2-3 นาทีจึงหยุดกลั่น

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณน้ำ, \%} = \frac{B}{A} \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่างเป็นกรัม

B = ปริมาตรของน้ำใน Trap เป็นมิลลิลิตร

2) การหาเปอร์เซนต์ของกาก (Residue) โดยการกลั่น

อุปกรณ์

1) Alluminum-Alloy Still สูง $9\frac{1}{2}$ นิ้ว (24.13 ซม.) เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน $3\frac{3}{4}$ นิ้ว (9.53 ซม.) มีฝาปิดเจาะรู 3 รู สำหรับเสียบเทอร์โมมิเตอร์ 2 รู และรูที่ 3 ใช้เสียบ Connecting Tube

2) อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบเชื่อม มี Connecting Tube, Tinshield, Metal Jacket บรรจุน้ำผ่านเป็นเครื่องควบแน่น และกระบอกแก้วตวงสำหรับใส่ส่วนที่กลั่นออกมา

3) เทอร์โมมิเตอร์ อ่านได้ระหว่าง -2 ถึง 300°C

4) เครื่องชั่งความจุ 2,500 กรัม อ่านได้ละเอียดถึง ±0.1 กรัม

วิธีการทดลอง

1) ชั่งตัวอย่าง 200 ± 0.1 กรัม เทลงใน Alluminum-Alloy Still ซึ่งชั่งน้ำหนักรวมฝาปิดเทอร์โมมิเตอร์ และ

2) ใช้ Gasket คั่นระหว่าง Still และฝาปิดเพื่อให้สนิท

3) เสียบเทอร์โมมิเตอร์ผ่านจุกก๊อก ทางรูเล็กของแผ่นฝาปิดที่เจาะไว้ 2 รู โดยอันหนึ่งเสียบลงจนกระเปาะปรอทสูงจากก้น Still $\frac{1}{4}$ นิ้ว (6.4 มม.) อีกอันหนึ่งกระเปาะอยู่สูงจากก้น Still ประมาณ $6\frac{1}{2}$ นิ้ว (16.51 ซม.)

4) เอา Ring Burner ล้วมรอบ Still ให้อยู่ ณ ตำแหน่งสูงจากก้น Still ราว 6 นิ้ว (15.24 ซม.) ปรับเปลวไฟให้มีความร้อนเพียงพอแก่ Connecting Tube เพื่อกันไม่ให้มีการควบแน่นที่บริเวณนี้

5) กลั่นจนถึงอุณหภูมิ 215°C (420°F) จึงลดระดับของ Ring Burner ลงมาอยู่ในระดับเดียวกันกับของ Still กลั่นต่อไปโดยเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 260°C (500°F) และรักษาอุณหภูมิให้คงที่ประมาณ 15 นาที และการกลั่นต้องทำให้เสร็จภายในเวลา 60 ± 15 นาที นับแต่เริ่มแรก

6) เมื่อการกลั่นสิ้นสุดลง ชั่งน้ำหนักของ Still พร้อมส่วนประกอบทั้งหมดเหมือนที่ชั่งไว้ครั้งแรก นำไปคำนวณหาค่า Residue เป็นเปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างทั้งหมด อ่านค่าปริมาตรของน้ำมันซึ่งลอยอยู่ส่วนบนของน้ำในกระบอกตวง ซึ่งถูกกลั่นออกมาด้วยให้ละเอียดถึง $\frac{1}{2}$ มิลลิลิตร แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างทั้งหมด

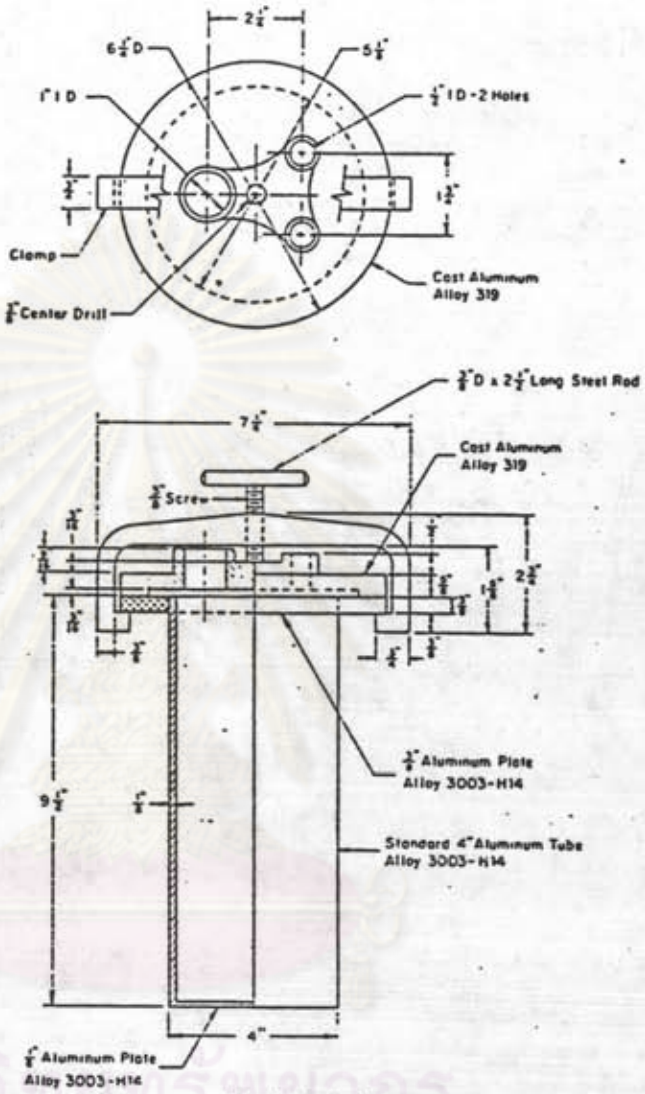
7) เปิดฝา Still ออก เทตัวอย่างผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ลงในกระป๋องความจุ 8 ออนซ์ ทิ้งไว้ให้เย็นในอุณหภูมิของห้อง แล้วจึงนำไปทำการทดลองอื่น ๆ ต่อไป

หมายเหตุ

1) ตำแหน่งของ Ring Burner อาจเลื่อนขึ้นลงได้ เช่น ถ้าสังเกตเห็นว่าจะเกิด Foam ก็ ขึ้นสูงหรือลดลงต่ำมาอยู่ราว ๆ กึ่งกลางของ Still ในเมื่อ Emulsion ตัวอย่างไม่มีตัวทำละลาย

2) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วของเทอร์โมมิเตอร์อันบน แล้วงว่าเกิด Foam ใน Still แล้ว ต้องเอาไฟออกก่อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Metric Equivalents

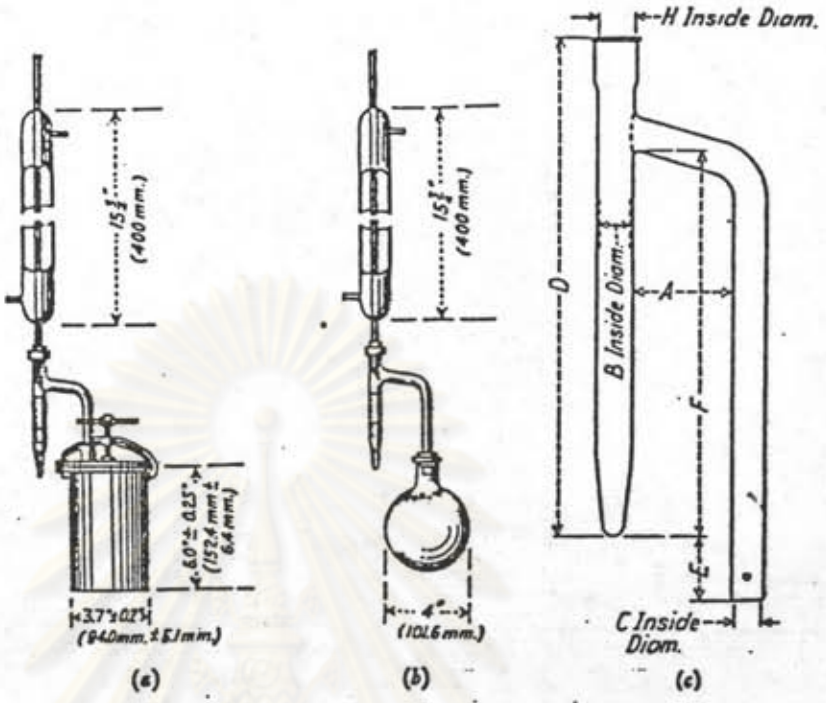
in.	mm
1/8	3.2
3/16	4.8
3/8	9.5
1/2	12.7
9/16	14.3
5/8	15.9
3/4	19.1
1	25.4
1 3/8	41.3
1 3/4	44.5
2 1/4	57.2
2 1/2	63.5
4	101.6
5 1/8	130.2
6 1/4	158.8
7 1/4	184.2
9 1/2	241.3

NOTE—The still cover may be machined from Rolled Aluminum Plate Alloy 3003-H14.

Aluminum-Alloy Still.

รูปที่ ผ.8 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการกลั่นยางมะตอยน้ำ

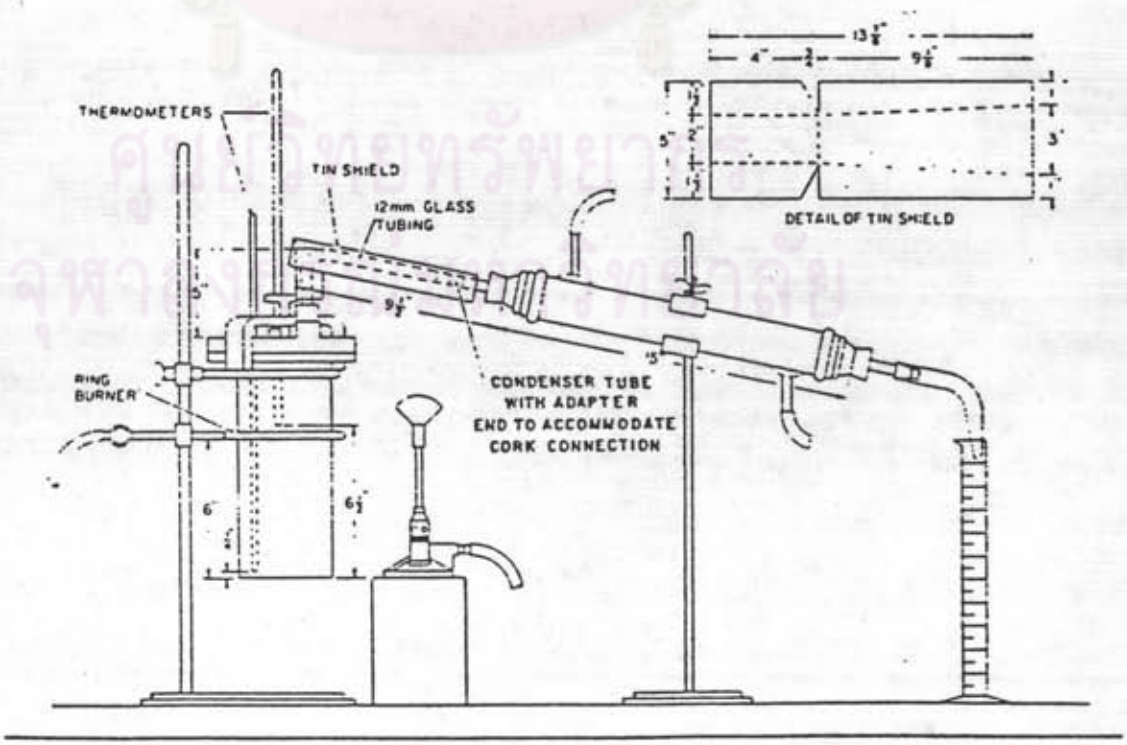
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



A = 45 to 55 mm
B = 14 to 16 mm
C = 12 to 16 mm
D = 235 to 255 mm
E = 25 to 38 mm
F = 186 to 194 mm
H = 18 to 19 mm

Apparatus for Determining Water.

รูปที่ ผ.9 แสดงเครื่องมือในการกลั่นหาปริมาณน้ำในยางมะตอยน้ำ



รูปที่ ผ.10 แสดงการกลั่นยางมะตอยน้ำ

ภาคผนวก ฎ

ขั้นตอนการ Run เครื่อง Servopulser

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

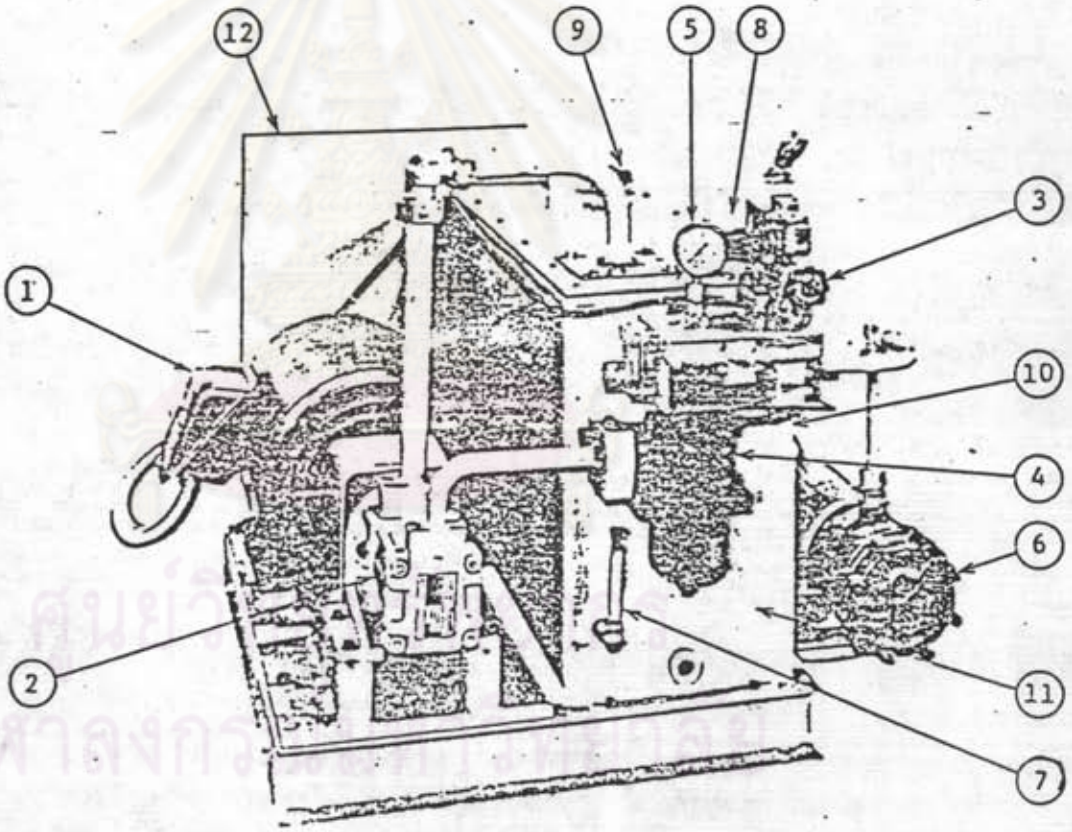
ขั้นตอนการ Run เครื่อง Servopulser แบบ EHF-EA10

ขั้นที่ I เปิด Pump

- คลาย Regulator ให้หลวม
- เปิด Drain system (ระบบระบายน้ำ)

  Switch (ดู Control/Switch Control)
- รอไฟเขียวที่ DC. Source Unit ~ 5 นาที

Fig. 1 Appearance of Hydraulic Pump



① Electric motor
② Hydraulic pump
③ Pressure control valve(Relief valve)
④ Filter
⑤ Pressure gauge
⑥ Oil cooler
⑦ Thermometer
⑧ Temperature detector, Float swit
⑨ Oil inlet port
⑩ Oil gauge
⑪ Oil tank
⑫ Power control panel

ขั้นที่ II Master Unit

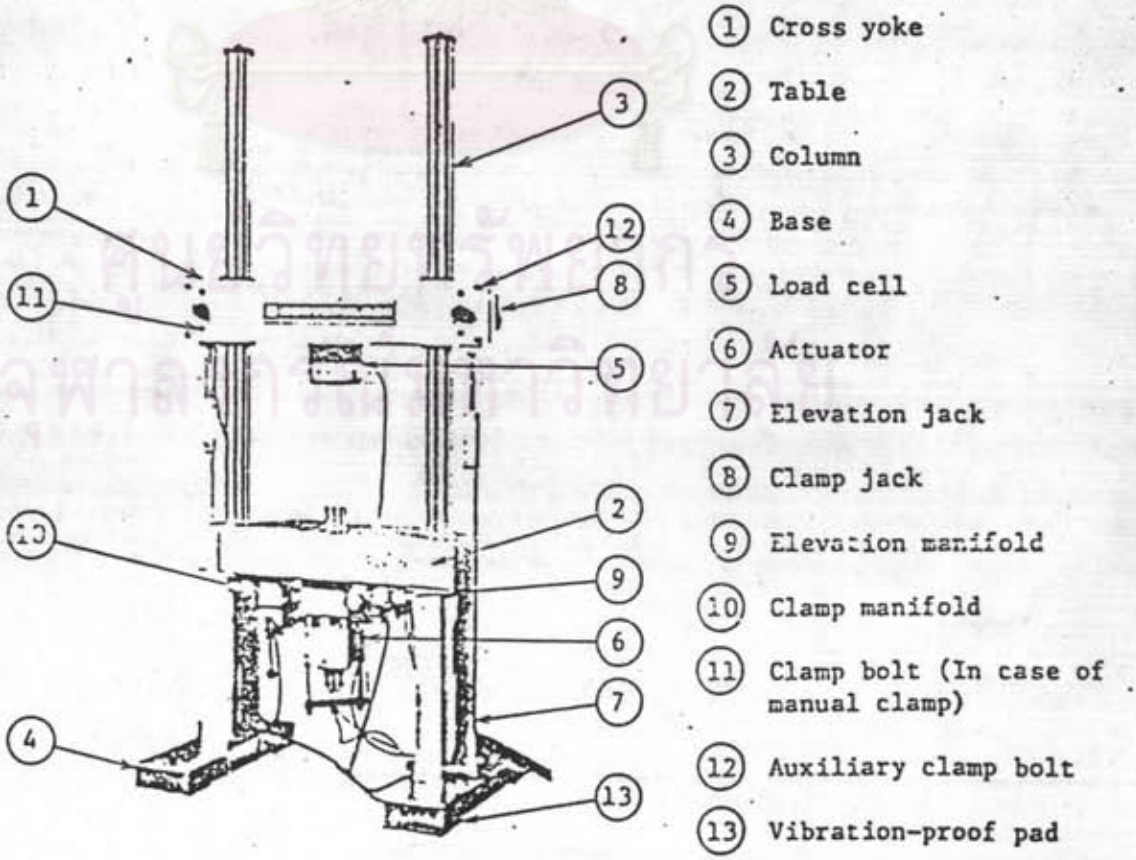
- กด Reset เพื่อปรับค่าต่าง ๆ ให้เป็น 0 หมด
- เปิด Run pump ตัว pump จะเดินเครื่องเพื่อที่จะ Load
- Set pressure ที่ pump ~ 50 ksc

ขั้นที่ III Frame

- คลาย Clamp ที่ฐาน
- ปรับ Up-Down เพื่อให้แท่นด้านบนและล่างขยับขึ้นลง
- ปิด Clamp เพื่อการใช้งาน

Names of Main Parts

Fig. II Appearance of Loading Frames



ขั้นที่ IV Sub Control

- ดู Actuator
- ตั้ง Mean ที่ 500 ∿ 50 %
- ลอง Sub Control
- ตั้ง I-act Amplitude (Aux ไม่ใช้)

ขั้นที่ V แผง Control

- ทำการตรวจสอบดูว่าจะใช้ทดสอบแบบ Compression หรือ Tension
- เลือก Load range 10, 20, 50, 100 % ของน้ำหนักที่กดได้สูงสุดของเครื่อง (Adjust Zero by knob)
- ใส่ Sample
- Program การบรรทุกน้ำหนัก (ดูตาม Catalog)
- Run

การปิดเครื่อง Servopulser

1. ที่ Control Unit
   - Amp. = 0
   - Mean = 500
   - เลิก I-act
2. ลด Pressure pump = 0
3. Master Unit
   - กด Pump - Stop
4. แผงสวิทส์ off
5. ระบายน้ำ ปิดน้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ญ

การนำไปใช้ประโยชน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฌ

การนำผลการทดลองและยาง HFMS ไปใช้ประโยชน์

1. การนำผลการทดลองประยุกต์ใช้ในสนาม

ในการวิจัยครั้งนี้ จากผลการทดลองของยางมะตอยน้ำประเภทไฮโฟลต จะมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานของ ASTM D977 และเมื่อนำเอายางมะตอยน้ำชนิดนี้ ไปทำเป็นยางมะตอยผสมกับวัสดุมวลรวม แล้วทำการทดลองหาคุณสมบัติต่าง ๆ จะปรากฏผลดังนี้

ก. ยางมะตอยผสมที่ได้มีความสามารถที่จะใช้งานได้ในบริเวณที่การจราจรไม่สูงมาก ซึ่งอาจจะเป็นแบบต่ำหรือปานกลาง

ข. ยางมะตอยผสมจะมีความสามารถเกาะกันได้ดี ไม่หลุดร่อนได้ง่าย

ค. จะมีความสามารถต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิได้ โดยที่อุณหภูมิสูงจะมีการเปลี่ยนสภาพและความแข็งแรงน้อยมาก เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิต่ำ แต่ความแข็งแรงจะมีน้อยกว่ายางชนิดอื่น

สำหรับในประเทศไทยแล้ว เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติที่ได้ จะเห็นได้ว่ายางมะตอยน้ำชนิดนี้จะสามารถนำไปใช้งานได้ แต่คุณสมบัติบางอย่างจะไม่ดีไปกว่ายางมะตอยน้ำชนิดอื่น เช่น ความแข็งแรง เป็นต้น ในการที่จะนำไปใช้งานนั้นจากผลการทดลองที่ได้ จะสามารถนำไปใช้งานได้หลายแบบ กล่าวคือ จากคุณสมบัติที่นำไปใช้งานได้ในการจราจรแบบต่ำหรือปานกลาง จะใช้เป็นผิวจราจรแอสฟัลท์ติกคอนกรีต แบบผสมเย็นหรือพื้นทางที่รับการจราจรไม่มาก อาจจะใช้เป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ จะช่วยให้ผิวทางมีความคงทน และป้องกันการซึมของน้ำจากผิวหน้าลงสู่ชั้นพื้นทาง จะประกอบด้วยการผสมวัสดุมวลรวมกับยางมะตอยน้ำประเภทไฮโฟลต แล้วนำไปปูลงบนพื้นที่ได้จัดเตรียมไว้เรียบร้อยแล้ว และทำการบดอัดส่วนผสมที่ปูลงไปให้มีความแน่นตามต้องการ ความหนาของชั้นวัสดุที่ปูลงไปจะขึ้นอยู่กับปริมาณการจราจรที่ใช้รับเป็นแบบต่ำหรือปานกลางลักษณะของยางมะตอยที่ใช้จะต้องมีความเหลวเพียงพอที่ใช้ในการผสม และสามารถเกาะกับวัสดุมวลรวมได้ดี มีการบ่มตัว และปรับสภาพการยึดเหนี่ยวได้เร็วตามกำหนด หลังจากบดทับแล้วจะสามารถยึดมวลรวมไว้อย่างแน่นป้องกันการหลุดออกจากการกระทำของการจราจร ซึ่งยางมะตอยน้ำประเภทไฮโฟลตก็มีคุณสมบัติสามารถใช้งานแบบนี้ได้

นอกจากนี้แล้วยังจะสามารถนำไปทำเป็น Pre-mix ที่มาใช้กับงานซ่อม (Patching) ซึ่งตามปกติ Pre-mix ที่ใช้กันอยู่จะใช้ยางคัทแบคแอสฟัลท์ (Cut back Asphalt) มาทำ ซึ่งจะมีอายุการเก็บรักษาไว้ได้ไม่นาน และไม่สามารถผสมกับหินที่เปียกได้ จึงทำให้การซ่อมไม่ทันทีกับความต้องการ ยางมะตอยน้ำประเภทไอโฟลตจะสามารถผสมกับหินที่เปียกได้และเก็บไว้ได้นาน ถ้ามีการป้องกันการระเหยของน้ำที่ดี ทำการซ่อมได้ทันทีโดยไม่ต้องรอ

สำหรับในการซ่อมจะมีอยู่ 2 แบบคือ การซ่อมแบบถาวร และการซ่อมแบบชั่วคราว แต่ถ้าทางที่ดีแล้วควรที่จะซ่อมแบบถาวร เพราะจะลดเปลืองค่าใช้จ่ายถูกกว่าและไม่ต้องมาบำรุงรักษาอยู่ตลอดเวลา ในการซ่อมที่ถูกต้องจะมีลักษณะดังนี้

ก. หลุมที่จะซ่อมควรเป็นหลุมที่ไม่มีน้ำยังอยู่และแห้งสนิท กำจัดชิ้นส่วนที่หลุดลุ่ยออก ให้มีลักษณะเป็นเหลี่ยมลงไปในผิวถนนนั้น ๆ

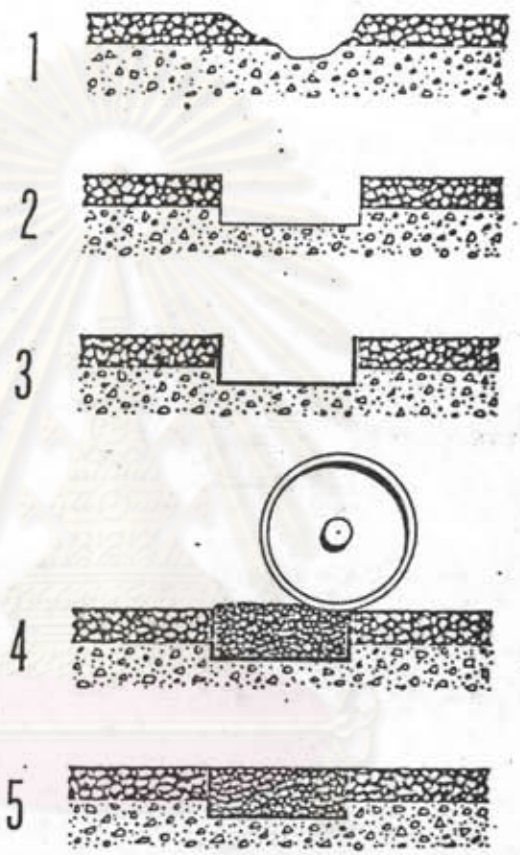
ข. เทหรือลาดยางมะตอยน้ำประเภทไอโฟลต เพื่อทำการแทคโค้ต (Tack Coat) เหมือนกับเป็นการประสานทั้งด้านข้างและก้นหลุมให้ทั่ว

ค. นำเอา Pre-mix ที่เตรียมไว้ เทลงหลุมให้นูนออกมาพอสมควร

ง. ปรับระดับของ Pre-mix และบดอัดด้วยวิธีที่สามารถทำได้โดยง่าย หลังจากการบดอัดผิวของ Pre-mix ที่ใส่ลงใหม่ ควรจะสูงกว่าระดับผิวเดิมเล็กน้อย เหลือไว้ให้รถยนต์ที่วิ่งไปมาบดอัดส่วนที่สูงเกินลงมาให้เท่ากับระดับของผิวเดิม

จ. โรยทรายเล็กน้อยเพื่อป้องกันไม่ให้ Pre-mix ที่ใช้ซ่อมติดกับล้อรถและทรายจะช่วยให้ผิวแน่นขึ้นด้วย

ยางมะตอยน้ำประเภทไอโฟลตก็ยังจะสามารถใช้ในการซีลรอยแตก (Crack Sealing) ได้ เนื่องมาจากว่ายางมะตอยน้ำชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิน้อย และมีการแตกตัวไม่เร็วนัก จะสามารถทำงานได้สะดวก ไม่ต้องรีบร้อน รอยแตกที่จะทำการซีล ควรที่จะได้รับการทำความสะอาด โดยการเป่าลมเสียก่อน หลังจากนั้นก็เทยางมะตอยน้ำลงบนบริเวณรอยแตกแล้วโรยทรายเพื่อป้องกันไม่ให้ยางมะตอยติดล้อรถ ในการซีลจะทำเพื่อป้องกันการซึมของน้ำที่จะลงจากผิวทางลงสู่ชั้นพื้นทาง ป้องกันวัสดุที่ใช้อุดรอยต่อไม่ให้หลุดร่อน วัสดุที่ใช้ซีลจะต้องไม่เปราะง่ายในสภาพอากาศเย็น และไม่อ่อนตัว หรือเป็นรอยล้อเมื่อมีการจราจรในสภาพอากาศร้อน ซึ่งยางมะตอยน้ำประเภทไอโฟลตสามารถที่จะนำไปใช้ได้



รูปที่ ผ.11 การซ่อมหลุมบ่อแบบถาวร (Pot hole permanent repari)

(1) หลุมบ่อที่เกิดขึ้น

(2) ขุดชั้นผิวทางและพื้นทางที่เสียหายออกจนถึงชั้นที่แข็งแรง

(3) พ่นแทคโค้ท

(4) กลบหลุมด้วยวัสดุผสมแล้วบดทับ

(5) ตกแต่งผิวของการซ่อมให้มีระดับเสมอผิวเดิม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การนำไปใช้ในการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่น

สำหรับคุณสมบัติไดนามิกที่ได้จากการทดลองจะเป็นค่า Resilient Modulus (Mr) ซึ่งจะเป็นค่าที่บอกความแข็งแรงของวัสดุนั้น ๆ ได้จากกราฟความเค้นต่อความเครียดในการทำ Repeated Triaxial Compression Test ถ้านำเอาวิธีนี้ไปทดลองหาคุณสมบัติของชั้นดินเดิม (Sub grade) แล้ว ก็จะสามารถออกแบบชั้นความหนาของส่วนโครงสร้างถนนที่อยู่เหนือชั้นดินเดิมได้ โดยที่เรารู้ค่า Mr ของชั้นดินเดิม และปริมาณการจราจร ซึ่งจะมีแผนภูมิในการออกแบบ (Design Chart) สำหรับชั้นแอสฟัลท์ติกคอนกรีต และวัสดุผสมอีมัลซิไฟด์แอสฟัลท์ มีการกำหนดชั้นความหนาต่ำสุดของแต่ละชนิดไว้ด้วย

ส่วนยางมะตอยผสมชนิดต่าง ๆ ที่เราสามารถทดสอบหาค่า Mr หรือค่าความแข็งแรงของวัสดุนั้น ๆ ได้ ก็จะสามารถหาความหนาของชั้นวัสดุนั้น ๆ ได้ เมื่อนำไปทำเป็นชั้นพื้นทางหรือรองพื้นทาง ซึ่งเมื่อดูให้ดีแล้วค่า Resilient Modulus (Mr) จะมีลักษณะคล้ายกับค่า Modulus of Elasticity ที่ได้หามาจากการทดลอง Triaxial Compression Test ซึ่งจะใช้ความดันข้าง (Lateral Pressure) ที่นิยมใช้ 20 psi ซึ่งค่านี้จะใกล้เคียงกับการอัดตัวโดยรอบวัสดุในสภาพถนนจริง ๆ ดังนั้นในการออกแบบความหนาจะใช้ค่า Mr นี้แทนค่า Modulus of Elasticity ซึ่งจะใช้วิธี Triaxial Test Method[16] วิธีนี้ได้ดัดแปลงมาจากทฤษฎีของการแอ่นตัวของ Boussinesq โดยตั้งข้อสมมติฐานไว้ดังนี้

ก. วัสดุที่เป็น pavement จะต้องเป็น Incompressible Material

ข. Elastic Strain จะเกิดขึ้นในชั้น Sub grade เท่านั้น

ในการหาความหนาจะใช้น้ำหนักที่กดลงบนผิวทางที่เป็นวงกลม ซึ่งจะได้ความหนาดังนี้

$$T = \sqrt{\left(\frac{3P}{2\pi E\Delta}\right)^2 - a^2} \qquad \text{---------- (1)}$$

เมื่อ T = ความหนาของ

P = น้ำหนักบนล้อเดี่ยวทั้งหมด

E = Modulus of Elasticity of Sub grade

a = รัศมีของการสัมผัสของล้อ

Δ = ค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้

สำหรับการแอ่นตัวที่ยอมให้ สำหรับการออกแบบถนนยืดหยุ่น กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.1 นิ้ว นอกจากนี้ในการทดลองชั้นดินเดิมจะต้องทดลองในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพเป็นจริงของถนน เมื่ออยู่ในสภาพที่อ่อนตัวมากที่สุด ดังนั้นจะเห็นว่าในสภาพที่มีฝนตกน้อย ดินเดิมมีโอกาสจะแข็งมากกว่าอ่อนตัว แต่การออกแบบจะถือว่าดินเดิมมีสภาพอิ่มตัวอยู่ตลอดเวลาก็จะเป็นการไม่ประหยัดคือ ถนนหนาเกินความจำเป็น จึงได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ n เข้าไปเกี่ยวข้องเพื่อที่จะใช้ลดความหนาลงมา ค่า n เป็นแฟคเตอร์ที่เกี่ยวกับปริมาณน้ำฝน ซึ่งมีดังนี้

Saturation Coefficient n	Avergae Annual Rainfall (in)
0.5	15.0 - 19.9
0.6	20.0 - 24.9
0.9	25.0 - 29.9
0.8	30.0 - 34.9
0.9	35.0 - 39.9
1.0	40.0 - 50.0

นอกจากปริมาณน้ำฝนแล้วน้ำหนักล้อสูงสุด 9,000 ปอนด์ หรือมากกว่านี้ของยวดยานจะมีผลกระทบกระเทือนต่อการออกแบบ เนื่องจากปริมาณยวดยานที่วิ่งผ่านต่อวันด้วยซึ่งกำหนดไว้ดังนี้

Traffic Coefficient m	Total Traffic (Vehicle/day)
1/2	50 - 400
2/3	401 - 800
5/6	801 - 1200
1	1201 - 1800
7/6	1801 - 2700
8/6	2701 - 4000
9/6	4001 - 6000
10.6	6001 - 9000
11.6	9001 - 13,500
12.6	13501 - 20,000

ดังนั้น Palmer และ Banber ได้ดัดแปลงสูตรขึ้นมาใหม่ เป็น

$$T = \left[\sqrt{\frac{3Pmn}{2\pi E\Delta}^{2} - a^{2}}\right]\left[\sqrt[3]{\frac{E}{Ep}}\right] \qquad \text{---------- (2)}$$

เมื่อ T = ความหนาที่ต้องการ

Ep = Modulus of Elasticity ของผิวทาง

E = Modulus of Elasticity ของชั้นดินเดิม, ชั้นรองพื้นทางหรือชั้นพื้นทาง

P = น้ำหนักล้อ

m = Traffic Coefficient

n = Saturation Coefficient

a = รัศมีของพื้นที่สัมผัสของล้อ

Δ = ค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้

และในกรณีที่ต้องการใส่ชั้น Granular Base Course ลงบนชั้นดินเดิมก่อนใส่ชั้นผิวทางก็จะสามารถเลือกความหนาของชั้นผิวทางที่กำหนดไว้ต่ำสุด แล้วหาค่าความหนาของชั้นพื้นทางได้จาก

$$t_B = (T - t_p) \sqrt[3]{\frac{E_P}{E_B}} \qquad \text{--------- (3)}$$

เมื่อ t_B = ความหนาของชั้นพื้นทาง

T = ความหนาของชั้นผิวทางทั้งหมด

t_P = ความหนาของผิวทางที่จะต้องใช้

E_P = Modulus of Elasticity ของชั้นผิวทาง

E_B = Modulus of Elasticity ของชั้นพื้นทาง

สำหรับความหนาต่ำสุดของชั้นผิวทางที่เป็นแอสฟัลท์ติกคอนกรีตไม่ควรต่ำกว่า 2 นิ้ว เหนือชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง ในการออกแบบเราจะต้องทราบค่าความแข็งแรงของชั้นวัสดุทุกชั้นที่จะต้องใช้ และเงื่อนไขในการออกแบบ เช่น น้ำหนักของล้อ, ปริมาณน้ำฝน, ปริมาณยวดยานที่วิ่งต่อวัน เป็นต้น

สำหรับยาง HFMS-2 ที่จะนำมาทำเป็นพื้นทางหรือผิวทางแล้ว จากการทดลองได้ค่า Mr = 25545 psi (สำหรับมีความดันด้านข้าง 15 psi) จะนำค่านี้ไปแทนเป็นค่าในสูตร โดยสมมติให้ปริมาณฝนตกเฉลี่ย 45 นิ้ว รับปริมาณการจราจร 1,200 Vehicle/day น้ำหนักล้อเดี่ยวสูงสุด 9,000 ปอนด์ a = 6 นิ้ว และ E ของชั้นดินเดิม = 4,000 psi, Δ = 0.1 นิ้ว

ดังนั้นปริมาณน้ำฝนและปริมาณยวดยาน ค่า m = 1, n = 1

$$\therefore \text{ความหนาทั้งหมด} = \left[\sqrt{\left(\frac{3\times9000\times1\times1}{2\times4000\times0.1}\right)^2 - 6^2}\right]\left[\sqrt[3]{\frac{4000}{25.545}}\right] \text{ (จากสมการ (2))}$$

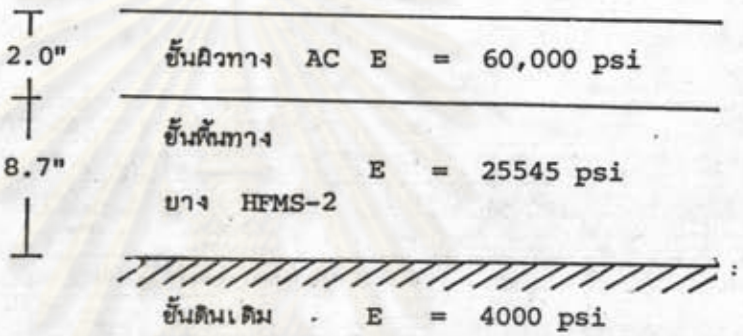
$$= 8.37 \text{ นิ้ว} \approx 8.4 \text{ นิ้ว}$$

ดังนั้นถ้าหากจะใช้ส่วนผสมของยาง HFMS-2 เป็นผิวทางแล้วจะต้องใช้ส่วนผสมหนาถึง 8.4 นิ้ว แต่ถ้าจะใส่ชั้นผิวของพลาสติกคอนกรีตที่มีค่า E_p = 60,000 psi แล้วจะได้ความหนาดังต่อไปนี้ โดยให้ความหนาที่ชั้นผิวหนา 2.0 นิ้ว

$$\therefore \text{ความหนาของชั้นพื้นทาง} = (8.5 - 2)\sqrt[3]{\frac{60,000}{25,545}} \quad \text{(จากสมการ (3))}$$

$$= 8.64 \text{ นิ้ว} \approx 8.7 \text{ นิ้ว}$$

ความหนาของพื้นทางที่ทำด้วยยาง HFMS-2 จะมีค่าเท่ากับ 8.7 นิ้ว



นอกจากนี้ยังสามารถใส่ชั้นที่มีค่า E ที่มีความแข็งแรงมากกว่าค่า E(Mr) ของยาง HFMS-2 ลักษณะการคิดความหนาก็จะคล้าย ๆ กับการหาความหนาของชั้นพื้นทาง

ดังนั้นจึงจะเห็นได้ว่าในการออกแบบความหนาแบบยืดหยุ่น โดยใช้ค่า Resilient Modulus ก็จะให้ค่าความหนาของชั้นวัสดุต่าง ๆ ได้ ซึ่งค่าที่ได้ก็สามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกันกับในการออกแบบโดยใช้วิธีอื่น ซึ่งจะสามารถออกแบบความหนาของชั้นต่าง ๆ ได้อย่างเดียวกัน เช่น วิธีแรงเค้นในระบบชั้น (Stress in Layered System) เป็นต้น

ประวัติผู้เขียน

ร.ท. พิพัฒน์ ล่อนวงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2503 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ว.ศ.บ (โยธา) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2524 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งนายทหารการทาง ฝ่ายวิศวกรรมการทาง แผนกวิศวกรรมโยธา กองวิทยาการ กรมช่างโยธาทหารอากาศ กองทัพอากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย