บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการศึกษา

4.1 ผลการทดลองหาคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์

จากการนำตัวอย่างยางแอสฟัลต์ซีเมนต์(AC 60/70) ซึ่งจะใช้ในการศึกษามาทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ดังที่กล่าวในบทที่ 3 สามารถสรุปค่าต่างๆได้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติต่างๆของแอสฟัลต์ซีเมนต์

ลำดับที่	คุณลักษณะ	ค่าที่ได้	เกณฑ์ที่กำหนดตาม มอก. 851	วิธีทดสอบที่ใช้อ้างอิง
1	ค่าความถ่วงจำเพาะ	1.031	-	AASHTO T 228
2	เพนิเทรชั่น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที	66	60 – 70	ASTM D 5
3	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส	342	$\geq$ 232	ASTM D 92
4	การยืดดึง(ductility) ที่อุณหภูมิ 25 องศา-เซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตร ต่อนาที เซนติเมตร	$>$ 100	$\geq$ 100	ASTM D 113
5	การละลายในไตรคลอโรเอทิลีน ร้อยละโดยน้ำหนัก	99.0	$\geq$ 99.0	ASTM D 2042
6	ความหนืด ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส เซนติสโตกส์	675	-	ASTM D 2170
7	Dynamic shear , G*/sin δ , kPa ที่อุณหภูมิ 58°C ที่อุณหภูมิ 64°C ที่อุณหภูมิ 70°C	 3.4 1.6 0.8	-	AASHTO TP5

ผลการทดลองที่ได้จะแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ผ่านตามเกณฑ์ของแอสฟัลต์ซีเมนต์เพนิเทรชั่นเกรด AC 60/70 ทุกประการ และนอกจากนี้ยังได้ทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานอื่นๆที่อยู่ในระบบการจัดเกรดยางวิธีอื่น คือ ค่าความหนืดซึ่งอยู่ในการจัดเกรดแบบวิสโคซิตี้เกรด และค่าไดนามิกโมดูลัสซึ่งอยู่ในการจัดเกรดแบบเพอร์ฟอร์มแมนซ์เกรด

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติต่างๆของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหลือจากการอบตาม ASTM D 1754

ลำดับที่	คุณลักษณะ	ค่าที่ได้	เกณฑ์ที่กำหนดตาม มอก. 851	วิธีทดสอบที่ใช้อ้างอิง
1	น้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อน ร้อยละ	0.07	≤ 0.8	ASTM D 1754
2	เพนิเทรชั่น ร้อยละของเพนิเทรชั่นเดิม	70	≥ 54	ASTM D 1754 และ ASTM D 5
3	การยืดดึง(ductility) ที่อุณหภูมิ 25 องศา-เซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อนาที เซนติเมตร	65	≥ 50	ASTM D 1754 และ ASTM D 113
4	Dynamic shear , G*/sin δ , kPa ที่อุณหภูมิ 58°C ที่อุณหภูมิ 64°C ที่อุณหภูมิ 70°C	 8.67 4.08 1.92	-	AASHTO TP5

4.2 ผลการทดลองหาคุณสมบัติของมวลรวม

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะซึ่งใช้เป็นค่าพื้นฐานในการออกแบบส่วนผสมที่จะทำในขั้นตอนต่อไป และค่าการดูดซึมของมวลรวม จะแสดงดังตารางที่ 4.3 และสำหรับตารางที่ 4.4 และ 4.5 จะแสดงคุณสมบัติพื้นฐานอื่นๆเมื่อแยกเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตามลำดับ

บางคุณสมบัติที่แสดงจะเป็นคุณสมบัติที่เกิดจากการนำมวลรวมมาผสมกันตามสัดส่วนขนาดคละต่างๆ ซึ่งเป็นขนาดคละที่ผสมกันจนสามารถนำไปออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

ได้ทั้ง 3 ขนาดคละตรงตามหลักเกณฑ์การเลือกขนาดคละที่จะนำมาใช้ในการศึกษาดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 รายละเอียดของขนาดคละทั้ง 3 ขนาด ข้อกำหนดของกรมทางหลวงและข้อแนะนำของซูเปอร์เพฟ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.1

เมื่อพิจารณาผลของมวลรวมทั้งมวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด และขนาดคละที่ใช้แล้ว จะเห็นว่าผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมทางหลวงที่ใช้เป็นข้อกำหนดในการก่อสร้างในประเทศไทยทุกประการ สามารถนำไปก่อสร้างชั้นผิวทาง(Wearing Course)ได้

ตารางที่ 4.3 ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมของมวลรวม

ประเภทของมวลรวม	คุณสมบัติที่ได้				วิธีทดสอบที่ใช้อ้างอิง
	Bulk specific gravity (dry)	Bulk specific gravity (SSD)	Apparent specific gravity	การดูดซึมร้อยละ	
มวลรวมหยาบ					
- ผ่านตะแกรง 1/2 " ค้างบนตะแกรง 3/8"	2.58	2.60	2.61	0.610	ASTM C 127
- ผ่านตะแกรง 3/8" ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4	2.67	2.70	2.73	0.826	
มวลรวมละเอียด					
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 8	2.64	2.64	2.66	0.326	
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 16	2.58	2.58	2.59	0.323	ASTM C 128
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 30	2.55	2.56	2.58	0.402	
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 50	2.55	2.56	2.58	0.387	
- ผ่านตะแกรงเบอร์50ค้างบนตะแกรงเบอร์ 200	2.72	-	-	-	
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	2.75	-	-	-	

I19423585

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมหยาบ

ลำดับที่	คุณลักษณะ	ค่าที่ได้	เกณฑ์ที่กำหนดใน งานแอสฟัลต์คอนกรีตตามข้อกำหนดการก่อสร้างทางหลวง	วิธีทดสอบที่ใช้อ้างอิง
1	ค่าความสึกหรอของมวลรวม ร้อยละ - ผ่านตะแกรง 1/2" ค้างบนตะแกรง 3/8" - ผ่านตะแกรง 3/8" ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4	 15.0 18.5	≤ 40	ASTM C 131 หรือ ทล.-ท.202
2	ค่าของส่วนที่ไม่คงทน(Soundness) ร้อยละ - ผ่านตะแกรง 1/2" ค้างบนตะแกรง 3/8" - ผ่านตะแกรง 3/8" ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4	 1.03 1.92	≤ 9	AASHTO T 104 หรือ ทล.-ท.213
3	แอสฟัลต์ที่เคลือบผิว ร้อยละ	> 95	≥ 95	AASHTO T 182
4	ปริมาณวัสดุที่เปราะบาง ร้อยละ - ผ่านตะแกรง 1/2" ค้างบนตะแกรง 3/8" - ผ่านตะแกรง 3/8" ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4	 0.11 0.34	-	AASHTO T 112
5	ค่าเหลี่ยมมุมของวัสดุ ร้อยละ - จำนวนด้านเหลี่ยมคม หนึ่งด้านขึ้นไป - จำนวนด้านเหลี่ยมคม สองด้านขึ้นไป	 100 98	-	ASTM D 5821
6	ปริมาณวัสดุที่มีรูปร่างแบนยาว ร้อยละ	-	-	ASTM D 4791

สำหรับคุณสมบัติปริมาณวัสดุที่มีรูปร่างแบนยาว ทดสอบตาม ASTM D4791 นั้น ไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากขนาดของมวลรวมที่ใหญ่ที่สุดที่ใช้ในการศึกษามีขนาดความยาวน้อยกว่าช่องเปิดของเครื่องมือ(ที่สัดส่วน 1:5) จึงไม่มีค่ามาแสดงในตารางข้างต้น

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมละเอียด

ลำดับที่	คุณลักษณะ	ค่าที่ได้	เกณฑ์ที่กำหนดใน งานแอสฟัลต์คอนกรีตตามข้อกำหนดการก่อสร้างทางหลวง	วิธีทดสอบที่ใช้อ้างอิง
1	ค่า Sand Equivalent ร้อยละ		≥ 50	
	- ขนาดคละ 1 (เหนือพื้นที่ถูกจำกัด)	68		AASHTO T 176
	- ขนาดคละ 2 (ผ่านพื้นที่ถูกจำกัด)	74		หรือ ทล.-ท.203
	- ขนาดคละ 3 (ใต้พื้นที่ถูกจำกัด)	91		
2	ค่าของส่วนที่ไม่คงทน(Soundness) ร้อยละ		≤ 9	AASHTO T 104
	- ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 8	3.10		หรือ ทล.-ท.213
	- ผ่านตะแกรงเบอร์8 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 16	4.10		
3	ปริมาณวัสดุที่เปราะบาง ร้อยละ		-	
	- ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 8	1.22		AASHTO T 112
	- ผ่านตะแกรงเบอร์8 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 16	3.25		

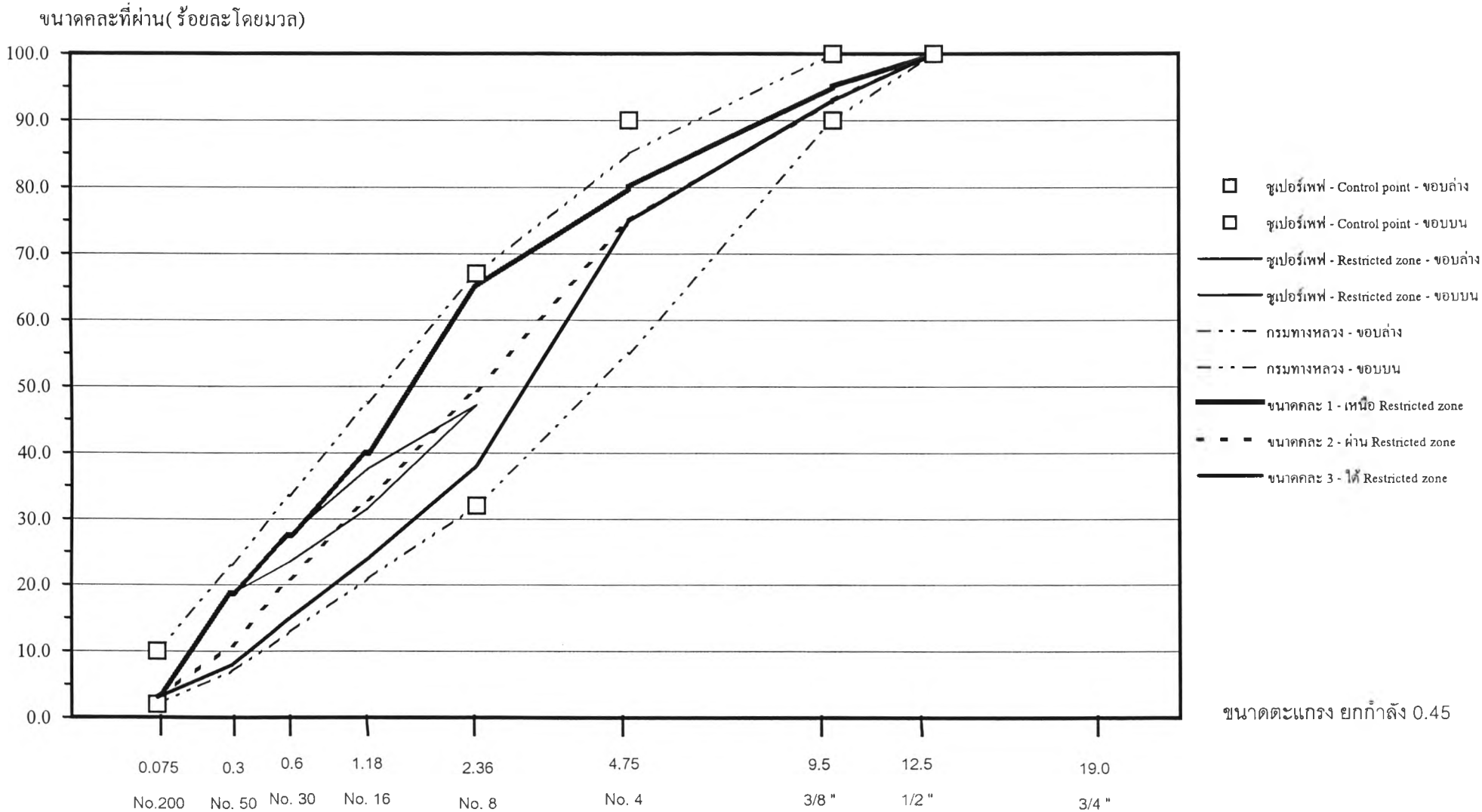
ตารางที่ 4.6 สัดส่วนขนาดคละ ข้อกำหนดของกรมทางหลวงและข้อแนะนำของซูเปอร์เพฟ สำหรับมวลรวมขนาด 9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว)

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ปริมาณที่ผ่านตะแกรง (ร้อยละโดยมวล)								
	ข้อกำหนดและข้อแนะนำ						ปริมาณขนาดคละที่ใช้		
	ซูเปอร์เพฟ				กรมทางหลวง		ขนาดคละ 1	ขนาดคละ 2	ขนาดคละ 3
	Control point		Restricted zone						
12.5	-	100	-	-	100	100	100	100	100
9.5	90	100	-	-	90	100	93	93	93
4.75	-	90	-	-	55	85	75	75	75
2.36	32	67	47.2	47.2	32	67	55	49.5	38
1.18	-	-	31.6	37.6	20.9	47.5	40	33	24
0.6	-	-	23.5	27.5	12.9	33.5	27.5	21	15
0.3	-	-	18.7	18.7	7	23	18.7	11	8
0.075	2	10	-	-	2	10	3	3	3

หมายเหตุ : ขนาดคละ 1 หมายถึงขนาดคละที่อยู่เหนือพื้นที่ถูกจำกัด (Restricted Zone)

ขนาดคละ 2 หมายถึงขนาดคละที่ผ่านพื้นที่ถูกจำกัด (Restricted Zone)

ขนาดคละ 3 หมายถึงขนาดคละที่อยู่ใต้พื้นที่ถูกจำกัด (Restricted Zone)



รูปที่ 4.1 สัดส่วนขนาดคลละ ข้อกำหนดของกรมทางหลวงและข้อแนะนำของซูเปอร์เพฟ

4.3 ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล

เมื่อนำยางแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวมข้างต้น มาทำการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ทั้งการจราจรแบบปานกลาง(Medium) และหนัก(Heavy) ผลของการออกแบบจากการใช้ขนาดคละทั้ง 3 ขนาด แสดงสรุปไว้ดังตารางที่ 4.7

จากผลที่ได้ แสดงให้เห็นว่าขนาดคละทั้ง 3 ขนาด ล้วนผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของวิธีการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลทุกประการ

จากผลการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลของส่วนผสมทั้ง 3 ส่วนผสม เมื่อออกแบบให้เหมาะสมกับระดับปริมาณจราจรปานกลางจะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมมากกว่าเมื่อออกแบบสำหรับปริมาณจราจรหนัก โดยปริมาณที่แตกต่างกันของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์จะเป็นผลมาจากส่วนผสมที่แตกต่างกัน สำหรับช่องว่างในมวลรวม เมื่อออกแบบสำหรับปริมาณจราจรมากกว่าจะให้ค่าช่องว่างในมวลรวมน้อย และสุดท้ายค่าช่องว่างที่เติมด้วยแอสฟัลต์ จะไม่แสดงแนวโน้มที่ชัดเจนว่าถ้าปริมาณจราจรเพิ่มขึ้นแล้วค่านี้จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือไม่ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าทำการออกแบบเพียงสองระดับปริมาณจราจร จึงไม่เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน

4.4 ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1

ยางแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวมแบบเดียวกับที่ใช้ในการออกแบบโดยวิธีมาร์แชล นำมาทำการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 สามารถแสดงผลการออกแบบแยกตามประเภทของขนาดคละได้ดังตารางที่ 4.8 4.9 และ 4.10 โดยในแต่ละตารางจะแสดงผลตามปริมาณการจราจรและอุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบ

จากผลที่ได้ มวลรวมแต่ละขนาดคละจะให้ผลการออกแบบที่เหมาะสมกับช่วงปริมาณจราจรและอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป(แสดงด้วยค่าที่ขีดเส้นใต้) โดยผลการออกแบบที่นำมาแสดงนี้จะแสดงเฉพาะค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์(ร้อยละโดยน้ำหนักของมวลรวม) ปริมาณช่องว่างในมวลรวม(ร้อยละโดยปริมาตร)และปริมาณช่องว่างที่ถูกเติมด้วยแอสฟัลต์(ร้อยละโดยปริมาตร) แทน

ด้วยตัวแปร Pb VMA และ VFA ตามลำดับ สาเหตุที่เลือกค่าเหล่านี้มาแสดงก็เพื่อให้สอดคล้องกับการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากวิธีมาร์แชล ดังที่กล่าวในวิธีการศึกษา

ส่วนผสมที่ได้จากวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 ทั้งสามขนาดคละ จะให้ผลในลักษณะเดียวกัน สำหรับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์และช่องว่างในมวลรวม คือเมื่อปริมาณจราจรเพิ่มขึ้น ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์และช่องว่างในมวลรวมจะลดลง แต่ที่เพิ่มขึ้นมาก็คือมีการคำนึงถึงอุณหภูมิอากาศสูงสุดที่ใช้งานด้วย โดยเมื่อออกแบบสำหรับอุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้น ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์และปริมาณช่องว่างในมวลรวมที่ได้จะลดลง สำหรับค่าช่องว่างที่เติมด้วยแอสฟัลต์ที่ได้พอจะเห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น คือ เมื่อปริมาณจราจรเพิ่มขึ้นหรืออุณหภูมิอากาศที่ออกแบบสูงขึ้น ค่าช่องว่างที่เติมด้วยแอสฟัลต์จะมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.7 ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล

	Marshall Method Mix Criteria		ขนาดคละ 1		ขนาดคละ 2		ขนาดคละ 3	
Design Traffic	Medium	Heavy	Medium	Heavy	Medium	Heavy	Medium	Heavy
No. of blows/side	50	75	50	75	50	75	50	75
Stability , N	> 5333	> 8000	8500.0	10500.0	6700.0	8500.0	5900.0	8200.0
Flow , 0.25 mm	8 - 16	8 - 14	15.0	11.8	16.0	14.0	15.0	13.8
Air voids , %	3 - 5	3 - 5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Voids in Mineral Aggregate , %	> 14.5	> 14.5	19.50	17.50	19.60	18.50	22.00	19.50
Voids fill with asphalt , %	-	-	79.0	75.0	80.0	75.0	82.0	82.0
Optimum asphalt content , %of aggregate	-	-	7.50	6.50	7.70	7.00	9.10	7.90

ตารางที่ 4.8 ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1

โดยใช้ขนาดคละ 1

Design ESALs (millions)	Average Design High Air Temperature											
	< 39 °c			39 - 40 °c			41 - 42 °c			43 - 44 °c		
	Pb	VMA	VFA	Pb	VMA	VFA	Pb	VMA	VFA	Pb	VMA	VFA
< 0.3	(5.6)	(15.3)	(73.9)	(5.6)	(15.3)	(73.9)	(5.5)	(15.1)	(73.6)	(5.5)	(15.1)	(73.6)
0.3 - 1.0	(5.5)	(15.1)	(73.6)	(5.5)	(15.1)	(73.6)	(5.4)	(14.9)	(73.2)	5.3	14.7	72.9
1.0 - 3.0	(5.4)	(14.9)	(73.2)	5.3	14.7	72.9	5.2	14.6	72.5	5.1	14.4	72.1
3.0 - 10.0	5.3	14.7	72.9	5.1	14.4	72.1	5.0	14.2	71.8	5.0	14.2	71.8
10.0 - 30.0	5.1	14.4	72.1	5.0	14.2	71.8	5.0	14.2	71.8	4.8	13.8	71.0
30.0 - 100.0	5.0	14.2	71.8	4.8	13.8	71.0	4.8	13.8	71.0	4.8	13.8	71.0
> 100.0	4.8	13.8	71.0	4.8	13.8	71.0	4.8	13.8	71.0	4.8	13.8	71.0

หมายเหตุ : ตัวเลขในวงกลม คือ กรณีที่ผ่านตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ ระดับ 1

(ดังรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.9 ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1

โดยใช้ขนาดคละ 2

Design ESALs (millions)	Average Design High Air Temperature											
	< 39 °c			39 - 40 °c			41 - 42 °c			43 - 44 °c		
	Pb	VMA	VFA	Pb	VMA	VFA	Pb	VMA	VFA	Pb	VMA	VFA
< 0.3	5.9	15.8	74.7	5.9	15.8	74.7	(5.8)	(15.6)	(74.4)	(5.7)	(15.4)	(74.1)
0.3 - 1.0	(5.8)	(15.6)	(74.4)	(5.7)	(15.4)	(74.1)	(5.6)	(15.3)	(73.8)	(5.5)	(15.1)	(73.4)
1.0 - 3.0	(5.6)	(15.3)	(73.8)	(5.4)	(14.9)	(73.1)	5.3	14.7	72.7	5.2	14.5	72.4
3.0 - 10.0	5.4	14.9	73.1	5.2	14.5	72.4	5.2	14.5	72.4	5.1	14.3	72.0
10.0 - 30.0	5.2	14.5	72.4	5.1	14.3	72.0	5.0	14.1	71.6	4.9	13.9	71.2
30.0 - 100.0	5.0	14.1	71.6	4.9	13.9	71.2	4.9	13.9	71.2	4.8	13.7	70.8
> 100.0	4.9	13.9	71.2	4.8	13.7	70.8	4.7	13.5	70.4	4.7	13.5	70.4

หมายเหตุ : ตัวเลขในวงกลม คือ กรณีที่ผ่านตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ ระดับ 1

(ดังรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.10 ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 โดยใช้ขนาดคละ 3

Design ESALs (millions)	Average Design High Air Temperature											
	< 39 °c			39 - 40 °c			41 - 42 °c			43 - 44 °c		
	Pb	VMA	VFA	Pb	VMA	VFA	Pb	VMA	VFA	Pb	VMA	VFA
< 0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.2	18.2	78.0
0.3 - 1.0	-	-	-	7.2	18.2	78.0	7.0	17.8	77.5	6.8	17.4	77.1
1.0 - 3.0	7.0	17.8	77.5	6.2	16.3	75.5	6.2	16.3	75.5	6.0	16.0	75.0
3.0 - 10.0	6.2	16.3	75.5	6.0	16.0	75.0	5.9	15.8	74.7	(5.8)	(15.6)	(74.4)
10.0 - 30.0	6.0	16.0	75.0	(5.8)	(15.6)	(74.4)	(5.6)	(15.2)	(73.7)	5.4	14.8	73.0
30.0 - 100.0	(5.6)	(15.2)	(73.7)	5.4	14.8	73.0	5.4	14.8	73.0	5.2	14.5	72.3
> 100.0	5.4	14.8	73.0	5.2	14.5	72.3	5.1	14.3	71.9	5.1	14.3	71.9

หมายเหตุ : ตัวเลขในวงกลม คือ กรณีที่ผ่านตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 (ดังรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข)

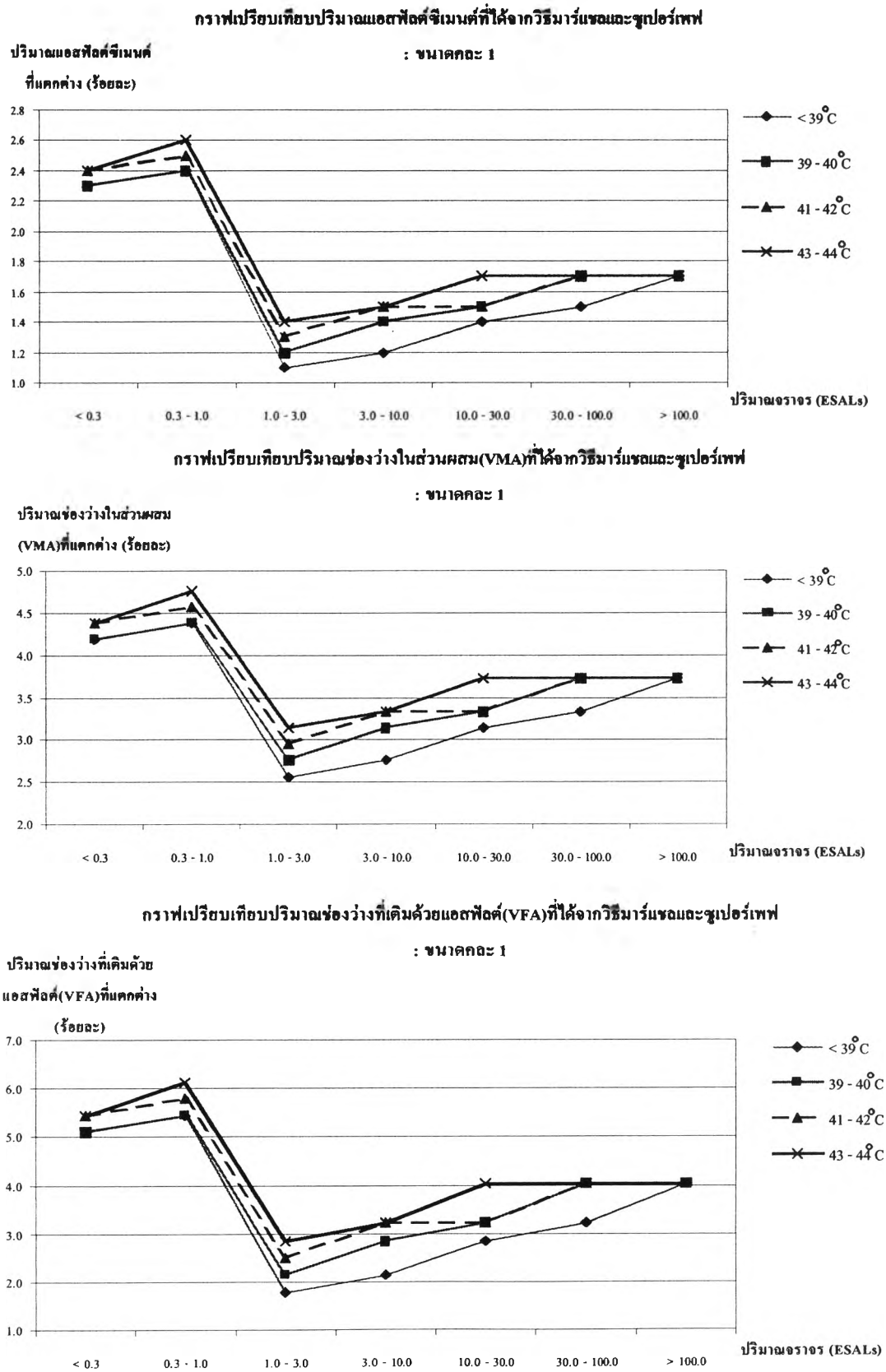
4.5 วิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะของส่วนผสมที่ได้

นำค่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ ค่าช่องว่างในมวลรวม และค่าช่องว่างที่เติมด้วยแอสฟัลต์ของแต่ละขนาดคละจากการออกแบบแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน ในการเปรียบเทียบได้แสดงถึงผลต่างของค่าต่างๆข้างต้น โดยค่าผลต่างสามารถอธิบายได้โดย

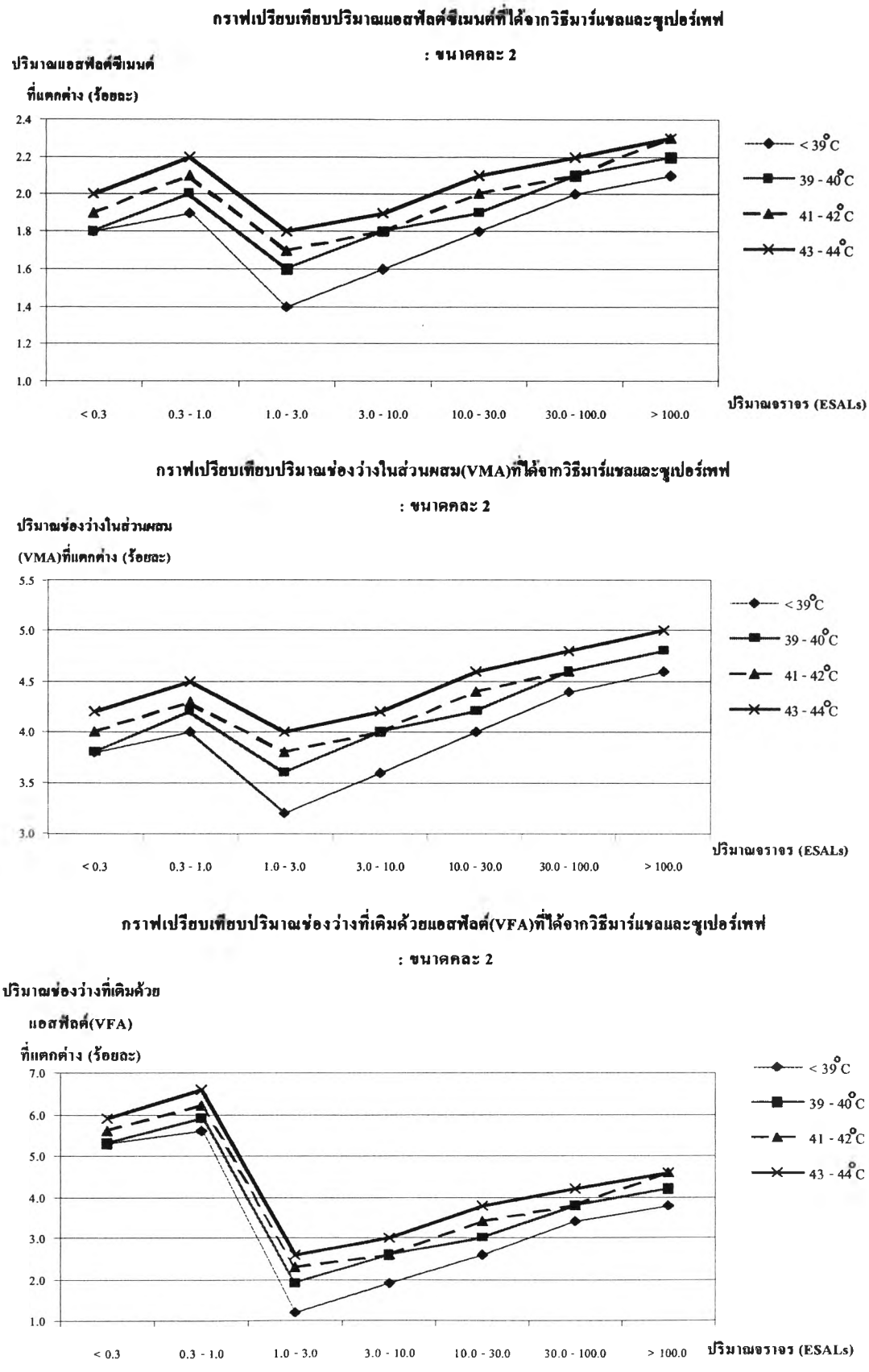
ปริมาณที่แตกต่าง = ค่าที่ได้จากวิธีมาร์แชล – ค่าที่ได้จากวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1

ในการเปรียบเทียบกันนี้ ปริมาณจราจรปานกลางของวิธีมาร์แชลจะเทียบกับปริมาณจราจร < 0.3 และ 0.3–1.0 Millions ESALs ของวิธีซูเปอร์เพฟ เนื่องจากปริมาณจราจรที่ประมาณให้เทียบเท่ากับ

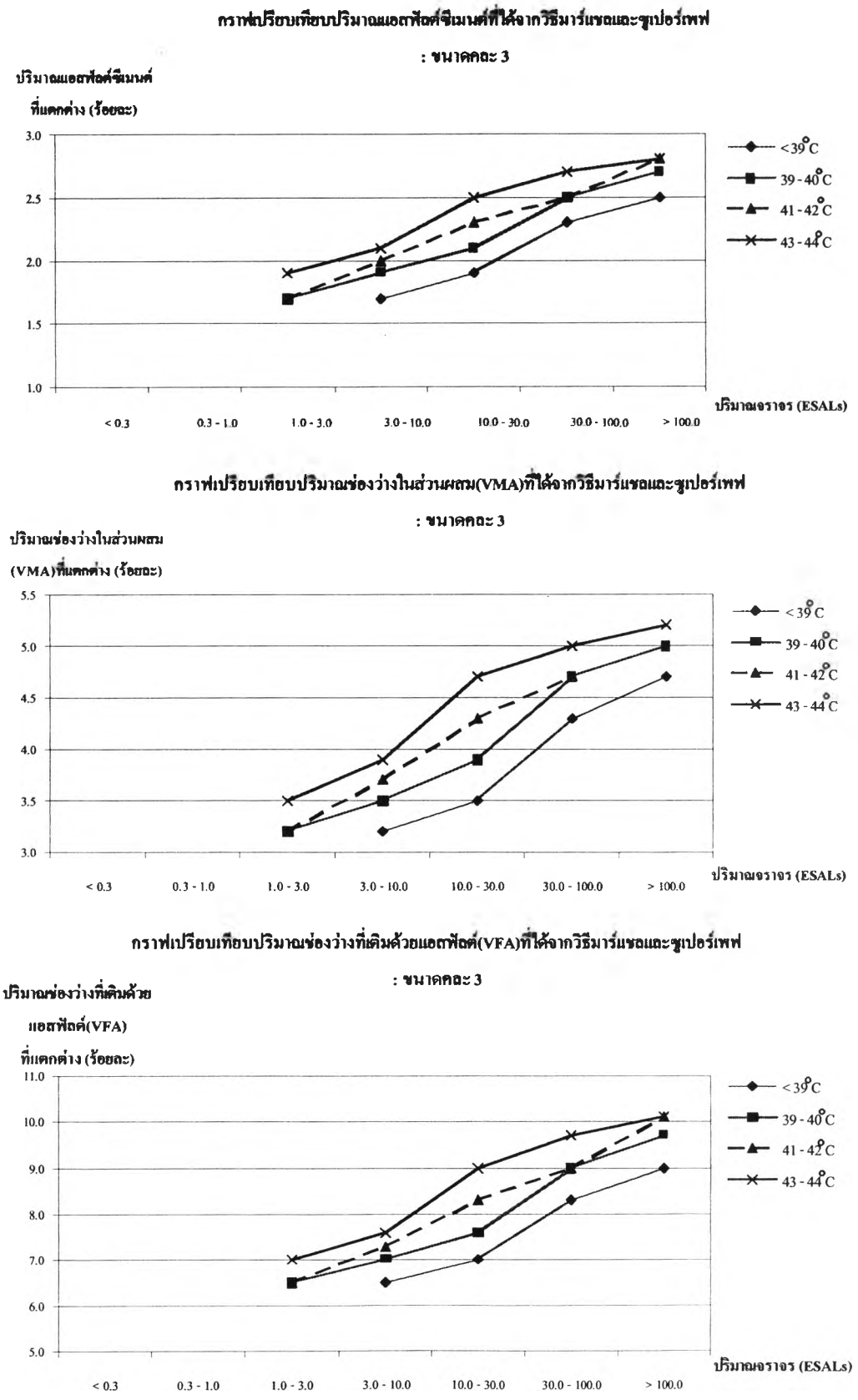
ปริมาณจราจรปานกลางในวิธีออกแบบวิธีมาร์แชลจะอยู่ในช่วง 10^4–10^6 ESALs ส่วนปริมาณจราจรหนักของวิธีมาร์แชลจะเทียบกับปริมาณจราจร 1.0–3.0 3.0-10.0 10.0–30.0 30.0–100.0 และ > 100.0 Millions ESALs ของวิธีซูเปอร์เพฟ เนื่องจากปริมาณจราจรที่ประมาณให้เทียบเท่ากับปริมาณจราจรปานกลางในวิธีออกแบบวิธีมาร์แชล ปริมาณจราจรหนักจะอยู่ในช่วง > 10^6 ESALs กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบจะแสดงดังรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4 ซึ่งเป็นของขนาดคละ 1 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าแตกต่างของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ค่าช่องว่างในมวลรวม และค่าช่องว่างที่เติมด้วยแอสฟัลต์ ของขนาดคละ 1



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าแตกต่างของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ค่าช่องว่างในมวลรวม และค่าช่องว่างที่เติมด้วยแอสฟัลต์ ของขนาดคละ 2



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าแตกต่างของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ค่าช่องว่างในมวลรวม และค่าช่องว่างที่เติมด้วยแอสฟัลต์ ของขนาดคละ 3

กราฟที่แสดง กราฟของขนาดคละ 3 จะไม่ได้แสดงข้อมูลในระดับปริมาณจราจรระดับที่ 1 และ 2 (< 0.3 และ 0.3–1.0 Millions ESALs)หรือปริมาณจราจรที่เทียบเท่ากับระดับปานกลางของวิธีมาร์แชล เนื่องจากในขั้นตอนการออกแบบไม่ได้ทำครอบคลุมถึงระดับปริมาณจราจรดังกล่าว เพราะทราบจากการออกแบบในขั้นเบื้องต้นว่าที่ระดับปริมาณจราจรดังกล่าว ไม่ได้ปริมาณส่วนผสมที่ผ่านตามข้อกำหนด ในขณะที่ขนาดคละอื่นๆ(ขนาดคละ 1 และ 2)ให้ผลการออกแบบในขั้นเบื้องต้นว่าสามารถทำได้ที่ระดับปริมาณจราจรอื่นๆด้วย นั่นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ขนาดคละที่ 3 มีข้อมูลดังที่แสดง

ผลที่ได้ทั้ง 3 รูป หากพิจารณาภาพรวมที่เกิดขึ้น โดยไม่ได้คำนึงถึงเฉพาะส่วนผสมที่ผ่านตามข้อกำหนดทุกประการ จะทำให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนว่าหากทำการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 แทนวิธีมาร์แชลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จะส่งผลให้ได้ส่วนผสมที่ใช้ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์น้อยลง หากยิ่งนำไปใช้กับปริมาณจราจรหรืออุณหภูมิอากาศที่ยิ่งสูงเพียงใด ก็ยิ่งใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์น้อยลงมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีมาร์แชล

ปริมาณช่องว่างในมวลรวม(VMA)และช่องว่างที่เติมด้วยแอสฟัลต์ก็เช่นเดียวกัน เมื่อออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ จะได้ค่าปริมาณช่องว่างในมวลรวม(VMA)และช่องว่างที่เติมด้วยแอสฟัลต์ที่ต่ำลงเมื่อออกแบบสำหรับปริมาณจราจรและอุณหภูมิของอากาศที่มากขึ้น

ผลที่ได้ยังชี้ให้เห็นอีกว่าส่วนผสมเดียวกันเมื่อนำไปออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน วิธีมาร์แชลสามารถหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมได้สำหรับประเภทปริมาณจราจรที่กำหนด แต่เมื่อเป็นวิธีซูเปอร์เพฟ ส่วนผสมนั้นๆกลับเหมาะสมกับช่วงปริมาณจราจรหรืออุณหภูมิบางค่าเท่านั้น หรือสามารถนำไปใช้งานได้แต่กับบางปริมาณจราจรและอุณหภูมิเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ไม่ได้ครอบคลุมการพิจารณาข้อกำหนดคุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ที่กำหนดไว้ในวิธีของซูเปอร์เพฟ ซึ่งเพิ่มการทดสอบมากขึ้นและการทดสอบเหล่านั้นก็เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริง แต่ในการศึกษานี้ก็ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติบางประการ คือ ค่าเหลี่ยมมุมของวัสดุมวลรวมหยาบแต่เนื่องจากมวลรวมที่นำมาศึกษาเป็นมวลรวมที่ผ่านกระบวนการผลิตจากโรงโม่ทำให้ค่าที่ได้มีความเหมาะสมในการออกแบบสำหรับทุกระดับการนำไปใช้งาน แต่ยังขาดการทดสอบค่าเหลี่ยมมุมของวัสดุมวลรวมละเอียดซึ่งเป็นวัสดุส่วนใหญ่ในการศึกษานี้

สำหรับเรื่องของขนาดคละที่ใช้ซึ่งซูเปอร์เพฟได้มีการแนะนำถึง "พื้นที่ถูกจำกัด" ซึ่งเส้นสัดส่วนของขนาดคละไม่ควรผ่านเข้าไป แต่ในการศึกษานี้ก็ได้มีบางขนาดคละ (ขนาดคละ 2) ผ่านเข้าไปในบริเวณดังกล่าว ซึ่งต้องทดสอบกันต่อไปถึงสมรรถนะของส่วนผสมที่ได้ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ เพราะบริเวณ "พื้นที่ถูกจำกัด" ดังกล่าวนั้น มีการกำหนดขึ้นก็เพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนผสมมีปริมาณมวลรวมละเอียดที่มีอยู่ในธรรมชาติมากเกินไป(Natural Sand) เพราะจะส่งผลให้เกิดส่วนผสมที่เป็น Tender Mix หรือเป็นส่วนผสมที่ไม่ต้องการ แต่ในการศึกษานี้ดังที่ได้กล่าวแล้วว่ามวลรวมที่นำมาใช้เป็นมวลรวมที่ผ่านการผลิตจากโรงโม่หิน

4.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบหาความแปรปรวนของการบดอัดด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

หลังจากผ่านขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งวิธีมาร์แชลและวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 แล้ว จะทำให้ทราบว่าแต่ละขนาดคละควรใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นปริมาณเท่าไร ในขั้นตอนนี้จะนำปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ดังกล่าวมาเลือกใช้ในการทดสอบ ซึ่งปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ครอบคลุมค่าทั้งหมดก็คือร้อยละ 5.0 ถึงร้อยละ 8.0 แต่ในการทดสอบนี้จะเลือกใช้ตั้งแต่ร้อยละ 5.0 ถึงร้อยละ 7.0 เท่านั้น เนื่องจากว่าที่ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ปริมาณมากๆ สำหรับบางส่วนผสมจะเกิดปัญหาเรื่องการเยิ้มของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์

ดังนั้นการทดสอบสำหรับแต่ละขนาดคละจะทำที่ 3 ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละ 5.0 6.0 และ 7.0 โดยน้ำหนักของมวลรวม) ปริมาณละ 8 ก้อนตัวอย่าง (บดอัดวิธีละ 4 ก้อนตัวอย่าง) รวมตัวอย่างทั้งหมด 24 ก้อน แสดงการทดสอบสำหรับแต่ละขนาดคละได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การทดสอบความแปรปรวนของการบดอัดสำหรับแต่ละขนาดคละ

	ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักมวลรวม)		
	5.0	6.0	7.0
บดอัดโดยวิธีมาร์แชล	4 ก้อน	4 ก้อน	4 ก้อน
บดอัดโดย Gyratory Compactor	4 ก้อน	4 ก้อน	4 ก้อน

ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างในลักษณะของความหนาแน่นและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 4.12 4.13 และ 4.14 สำหรับส่วนผสมที่ใช้ขนาดคละ 1 2 และ 3 ตามลำดับ และรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 จะเป็นกราฟแสดงความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้ง 3 ขนาดคละ เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.12 ความหนาแน่นและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของก้อนตัวอย่าง : ขนาดคละ 1

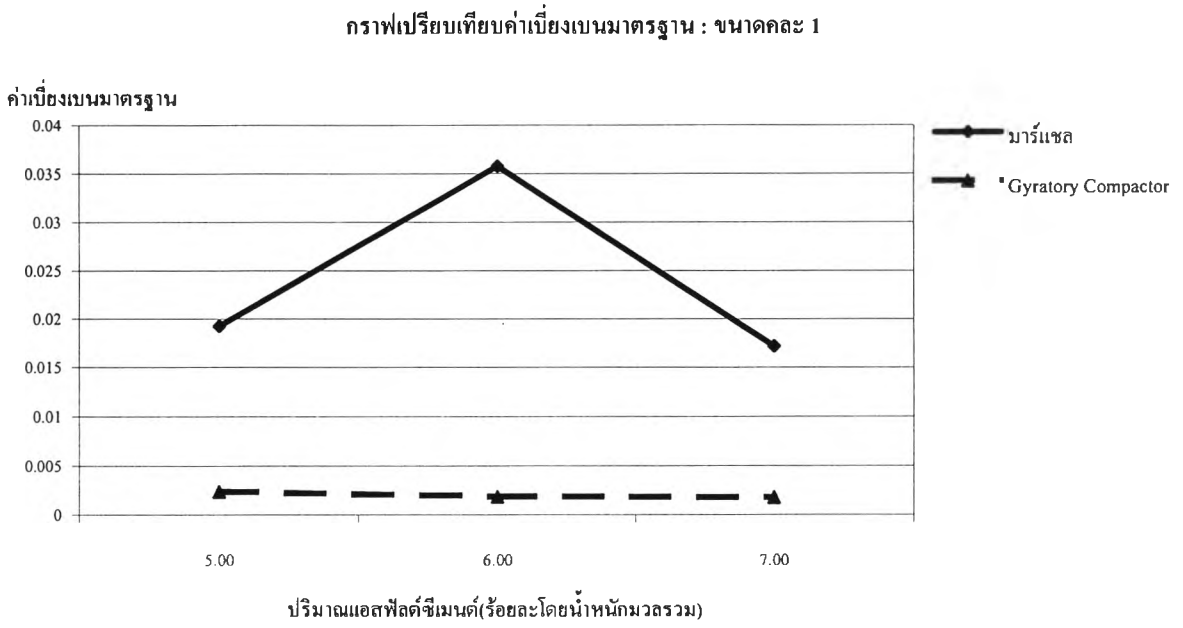
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักมวลรวม)	วิธีมาร์แชล		Gyratory Compactor ในวิธีซูเปอร์เพฟ	
	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/มิลลิลิตร)	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/มิลลิลิตร)	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5.0	2.278	0.0193	2.421	0.0024
6.0	2.328	0.0358	2.434	0.0018
7.0	2.362	0.0172	2.418	0.0018

ตารางที่ 4.13 ความหนาแน่นและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของก้อนตัวอย่าง : ขนาดคละ 2

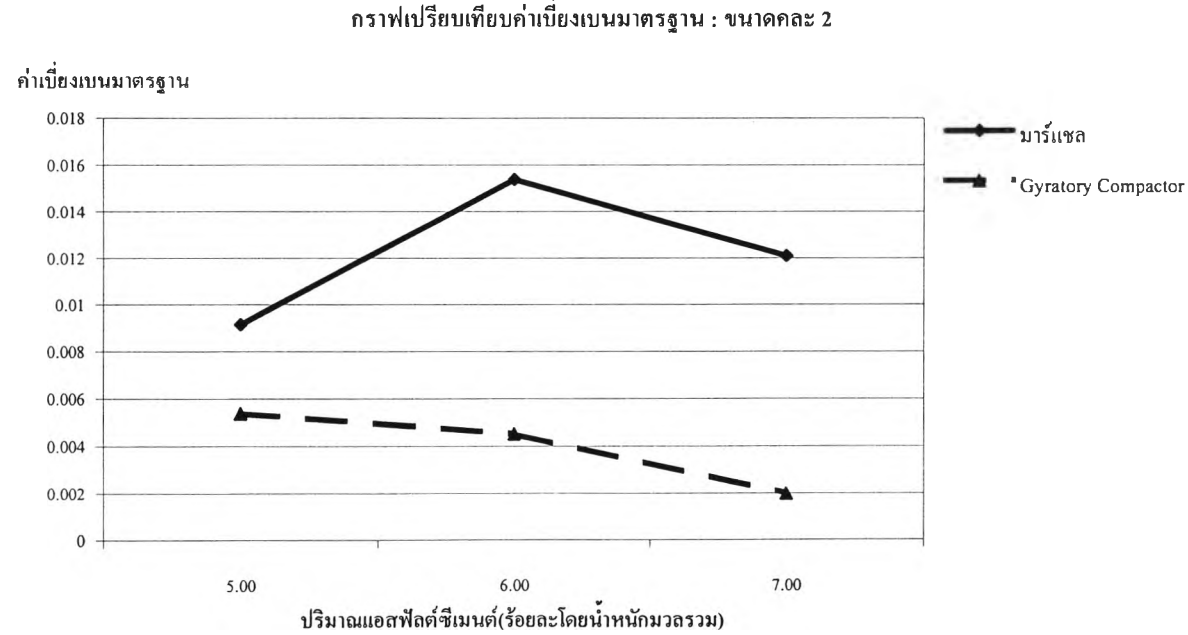
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักมวลรวม)	วิธีมาร์แชล		Gyratory Compactor ในวิธีซูเปอร์เพฟ	
	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/มิลลิลิตร)	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/มิลลิลิตร)	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5.0	2.293	0.0092	2.432	0.0054
6.0	2.329	0.0154	2.449	0.0045
7.0	2.354	0.0121	2.432	0.0020

ตารางที่ 4.14 ความหนาแน่นและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของก้อนตัวอย่าง : ขนาดคละ 3

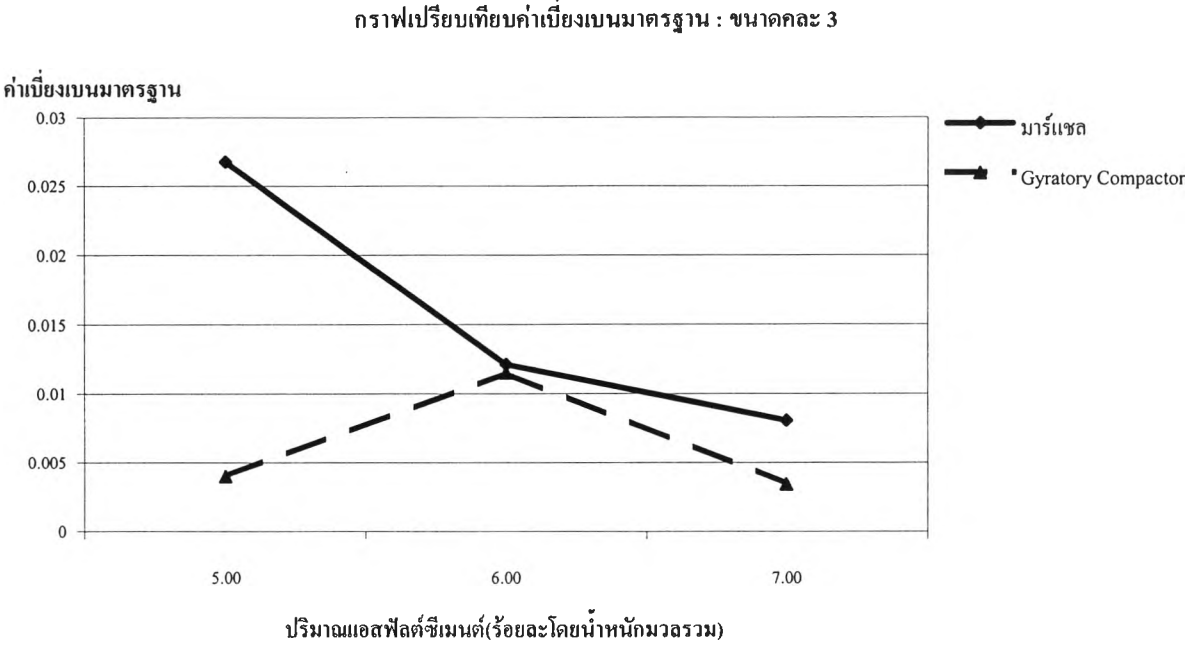
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละโดยนำหนักมวลรวม)	วิธีมาร์แชล		Gyratory Compactor ในวิธีซูเปอร์เพฟ	
	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/มิลลิลิตร)	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/มิลลิลิตร)	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5.0	2.237	0.0268	2.375	0.0040
6.0	2.199	0.0121	2.411	0.0115
7.0	2.257	0.0081	2.426	0.0034



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน : ขนาดคละ 1



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน : ขนาดคละ 2



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน : ขนาดคละ 3

ค่าความหนาแน่นที่ได้นี้เป็นค่าที่วัดจากก้อนตัวอย่างที่หลังจากบดอัดเสร็จ นั่นคือหากเป็นก้อนที่ได้จากวิธีมาร์แชลก็จะเป็นตัวอย่างที่บดอัด 75 ครั้งต่อด้าน หากเป็นก้อนที่ได้จาก Gyratory Compactor ในวิธีซูเปอร์เพฟ ก็คือตัวอย่างที่บดอัดจนถึงจำนวนรอบที่ครอบคลุมจำนวนรอบสูงสุดที่ใช้ในขั้นตอนการออกแบบ(300 รอบ)

จากนั้นจะนำค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างจากทั้งสองวิธีมาทำการทดสอบสมมติฐาน โดยสมมติฐานที่ใช้คือ

H_0 : ความแปรปรวนของความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ทำการบดอัดด้วยวิธีมาร์แชลมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับความแปรปรวนของความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ทำการบดอัดด้วย Gyratory Compactor ในวิธีของซูเปอร์เพฟ ($\sigma^2_M \leq \sigma^2_S$)

H_a : ความแปรปรวนของความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ทำการบดอัดด้วยวิธีมาร์แชลมีค่ามากกว่าความแปรปรวนของความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ทำการบดอัดด้วย Gyratory Compactor ในวิธีของซูเปอร์เพฟ ($\sigma^2_M > \sigma^2_S$)

ค่าสถิติ F ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 จำนวนชั้นแห่งความเป็นอิสระเท่ากับ 3 และ 3 โดยจะยอมรับสมมติฐานเมื่อค่า F ที่คำนวณได้(Fc) มีค่าน้อยกว่าค่า $F_{95,3,3}$ และในทางกลับกันจะปฏิเสธสมมติฐานเมื่อค่า F ที่คำนวณได้(Fc) มีค่ามากกว่าค่า $F_{95,3,3}$

แต่ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างจากวิธีซูเปอร์เพฟ จะนำมาทำการคำนวณกลับเพื่อหาค่าความหนาแน่นที่จำนวนรอบอื่นๆด้วยเพื่อให้ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่รอบอื่นๆของการบดอัด เนื่องจากในขั้นตอนการออกแบบโดยวิธีซูเปอร์เพฟก็ใช้การคำนวณกลับเพื่อหาค่าความหนาแน่นที่จำนวนรอบต่างๆเช่นกัน ตารางที่ 4.15 4.16 และ 4.17 เป็นการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานความแตกต่างของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดคละที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของวิธีซูเปอร์เพฟที่จำนวนรอบที่แสดงในตารางนั้น เป็นค่าจำนวนรอบที่ต้องการ (N_{des})บางค่าเพื่อแสดงถึงภาพรวม

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบสมมติฐานความแตกต่างของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

: ขนาดคละ 1

ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักมวลรวม)	จำนวนรอบการบดอัดของ Gyratory Compactor	$F_c = \frac{(S.D._{Marshall}^2)}{(S.D._{Gyratory}^2)}$	$F_{95,3,3} = 9.28$
5.00	300	64.6	Reject
	172	31.7	Reject
	128	33.6	Reject
	95	31.6	Reject
	68	28.0	Reject
6.00	300	374.4	Reject
	172	224.9	Reject
	128	159.0	Reject
	95	123.3	Reject
	68	94.1	Reject
7.00	300	95.4	Reject
	172	74.3	Reject
	128	104.0	Reject
	95	115.0	Reject
	68	29.3	Reject

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบสมมติฐานความแตกต่างของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

: ขนาดคละ 2

ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักมวลรวม)	จำนวนรอบการบดอัดของ Gyratory Compactor	$F_c = \frac{(S.D._{Marshall}^2)}{(S.D._{Gyratory}^2)}$	$F_{95,3,3} = 9.28$
5.00	300	2.9	Accept
	172	4.4	Accept
	128	5.8	Accept
	95	12.8	Reject
	68	19.6	Reject
6.00	300	11.6	Reject
	172	14.3	Reject
	128	21.4	Reject
	95	14.4	Reject
	68	13.1	Reject
7.00	300	36.7	Reject
	172	19.0	Reject
	128	9.8	Reject
	95	6.5	Accept
	68	9.5	Reject

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบสมมติฐานความแตกต่างของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน : ขนาดคละ 3

ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักมวลรวม)	จำนวนรอบการบดอัดของ Gyratory Compactor	$F_c = \frac{(S.D._{Marshall}^2)}{(S.D._{Gyratory}^2)}$	$F_{95,3,3} = 9.28$
5.00	300	44.7	Reject
	172	37.0	Reject
	128	33.6	Reject
	95	29.3	Reject
	68	27.2	Reject
6.00	300	1.1	Accept
	172	1.3	Accept
	128	1.6	Accept
	95	1.9	Accept
	68	2.2	Accept
7.00	300	5.5	Accept
	172	3.7	Accept
	128	3.6	Accept
	95	3.2	Accept
	68	3.3	Accept

จากผลการทดสอบสมมติฐานความแตกต่างของความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ได้รับการบดอัดด้วยวิธีที่แตกต่างกัน พบว่าขนาดคละ 1 และ 2 ให้ผลเช่นเดียวกัน คือปฏิเสธสมมติฐานหรือหมายความว่าก้อนตัวอย่างที่บดอัดด้วยวิธีมาร์แชลมีความแปรปรวนของความหนาแน่นมากกว่าก้อนตัวอย่างที่บดอัดด้วย Gyratory Compactor ในวิธีซูเปอร์เพฟ ยกเว้นที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.0 ของขนาดคละ 2 ที่ไม่ปรากฏความแตกต่างอย่างชัดเจน (ยอมรับสมมติฐาน)

ขนาดคละ 3 จะมีการปฏิเสธสมมติฐานที่ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ค่าเดียวคือที่ร้อยละ 5.0 ส่วนอีก 2 ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ คือที่ร้อยละ 6.0 และ 7.0 จะยอมรับสมมติฐาน นั่นคือไม่ปรากฏความแตกต่างของความแปรปรวนของความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างอย่างเห็นได้ชัด

เมื่อพิจารณาถึงค่าที่จำนวนรอบต่างๆจากการคำนวณค่าความหนาแน่นจากความสูงซึ่งเลียนแบบขั้นตอนที่ใช้ในการออกแบบโดยวิธีซูเปอร์เพฟ พบว่าที่จำนวนรอบแตกต่างกันไม่ปรากฏแนวโน้มที่ชัดเจนถึงความแตกต่างของความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ได้จากวิธีการบดอัดที่แตกต่างกัน ซึ่งพิจารณาจากค่า F_c ในการทดสอบสมมติฐาน โดยให้ผลลักษณะเดียวกันทั้ง 3 ขนาดคละ

4.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวและทดสอบความล้า

การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวและความล้า จะใช้เครื่องมือ Digital Servo Control Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ ง-1 มีการควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการคำนวณเพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัว โดยสูตรในการคำนวณที่ใช้คือ

$$Er = F (R + 0.27) / L H$$

$$\varepsilon r = H / D$$

เมื่อ Er = ค่าโมดูลัสคืนตัวที่ใช้ในการศึกษา (MPa)

F = ค่าแรงสูงสุด (N)

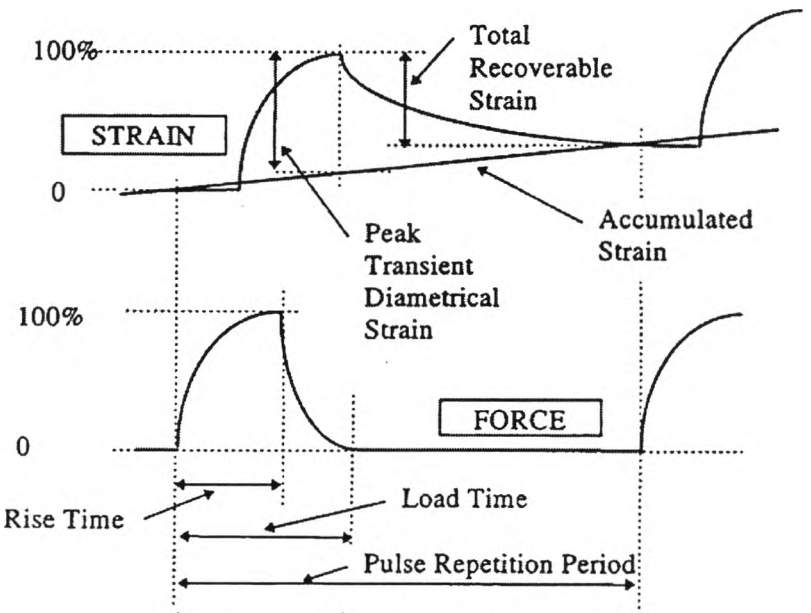
R = ค่าสัดส่วนปัวซอง

L = ความยาวก้อนตัวอย่าง

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง

H = ค่าการคืนตัวทั้งหมด(มิลลิเมตร)(Total Recoverable Strain ในรูปที่ 4.8)

εr = ค่าการคืนตัว (strain)



รูปที่ 4.8 แสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม

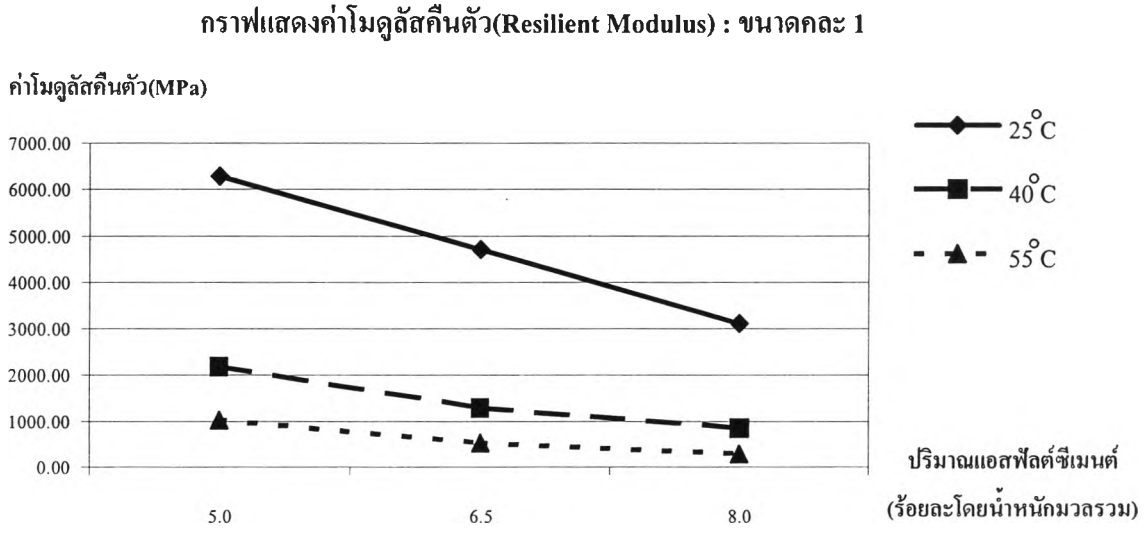
ที่มา : Thailand. Ministry of Transportation and Communications. Department of Highways (2000)

จากนั้นทำการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 25°C 40°C และ 55°C ที่ระดับของน้ำหนักที่กระทำต่างๆกันโดยใช้ความถี่ 1 Hz (1รอบ/วินาที) ช่วงเวลาในการกดน้ำหนักคือ 0.1 วินาที (หรือ Load Time ดังรูปที่ 4.8) ดังรายละเอียดที่กล่าวในบทที่ 3 สำหรับแต่ละขนาดคละจะเลือกใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.0 6.5 และ 8.0 ซึ่งเป็นค่าที่ครอบคลุมผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากทั้ง 3 ขนาดคละ ผลการทดสอบสำหรับทั้ง 3 ขนาดคละแสดงได้ดังตารางที่ 4.18 รูปที่ 4.9 4.10 4.11 4.12 4.13 และ 4.14 ค่าที่นำมาแสดงนี้จะเป็นค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) และค่าการคืนตัว(Resilient Strain) เนื่องจากว่าในการวัดค่าโมดูลัสนี้จะทำการทดสอบให้น้ำหนักกระทำซ้ำจนกระทั่งค่าการคืนตัวมีค่าค่อนข้างคงที่ จึงจัดเป็นค่าโมดูลัสคืนตัวที่ต้องการ ดังนั้นจึงนำค่าการคืนตัวที่คงที่แล้วมาแสดงควบคู่ไปด้วย

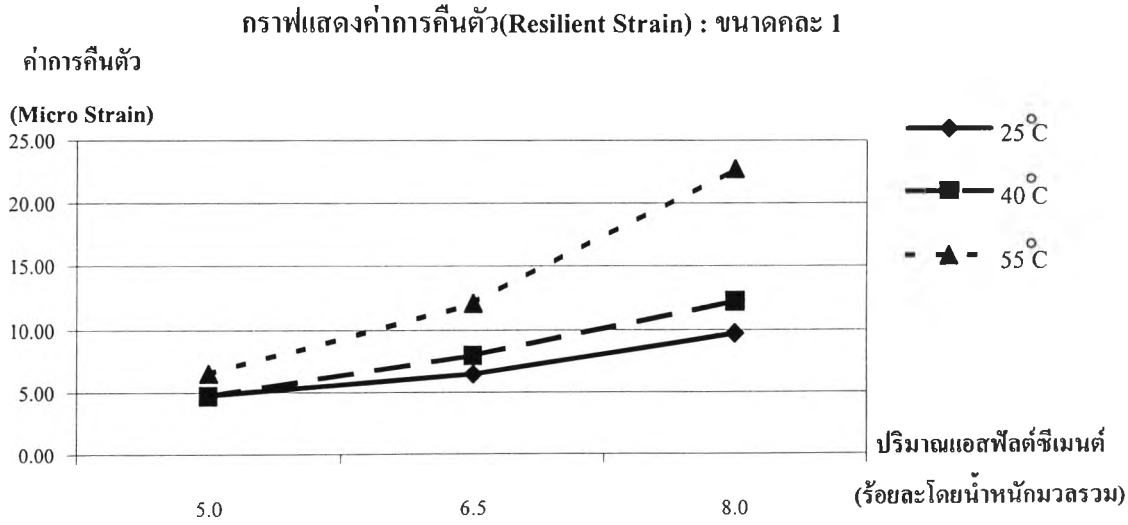
ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวและค่าการคืนตัว

ขนาดคละ	ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักมวลรวม)	25°C		40°C		55°C	
		โมดูลัสคืนตัว (MPa)	การคืนตัว (Micro Strain)	โมดูลัสคืนตัว (MPa)	การคืนตัว (Micro Strain)	โมดูลัสคืนตัว (MPa)	การคืนตัว (Micro Strain)
1	5.0	6292.75	4.83	2197.00	4.74	1018.79	6.51
	6.5	4707.15	6.48	1291.75	8.01	531.17	12.10
	8.0	3116.45	9.71	850.15	12.23	277.58	22.67
2	5.0	6147.50	4.97	1561.05	6.64	904.35	6.97
	6.5	4676.30	6.52	1046.62	10.18	600.41	9.96
	8.0	2833.80	10.64	593.63	17.30	353.45	16.27
3	5.0	5942.55	5.09	1499.95	6.96	673.45	9.21
	6.5	4638.15	6.55	995.00	10.78	530.62	11.74
	8.0	2720.10	11.18	524.32	19.57	441.90	14.06

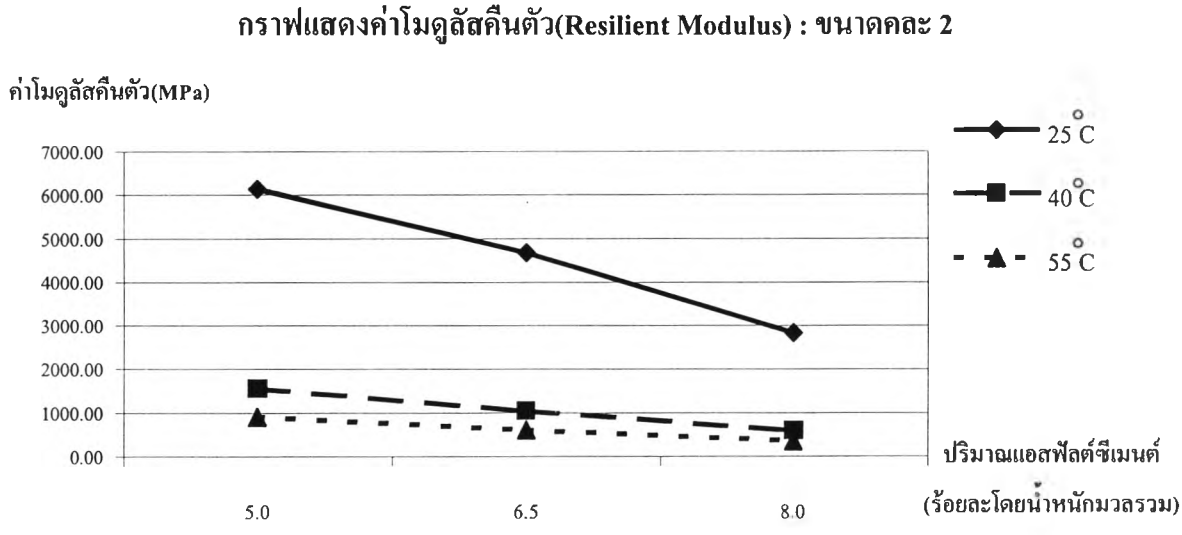
สำหรับค่าโมดูลัสคืนตัวของทั้ง 3 ขนาดคละ พบว่าหากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์มากขึ้นจะส่งผลให้วัสดุผสมมีค่าโมดูลัสคืนตัวลดลง เช่นเดียวกับอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นวัสดุก็จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวลดลง ค่าการคืนตัวที่ได้จากการทดสอบก็พบว่าเมื่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีในส่วนผสมมีค่าสูงขึ้นหรืออุณหภูมิที่ใช้ทดสอบมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการคืนตัวที่ได้จากการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย นั่นแสดงว่าสำหรับขนาดคละและวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อผสมด้วยปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์มากขึ้นจะส่งผลให้ได้มาซึ่งวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่าโมดูลัสคืนตัวลดลง การลดลงของค่าโมดูลัสคืนตัวนี้จะเห็นได้ชัดเจนที่อุณหภูมิต่ำ (25°C) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเห็นการลดลงที่ไม่มากนัก



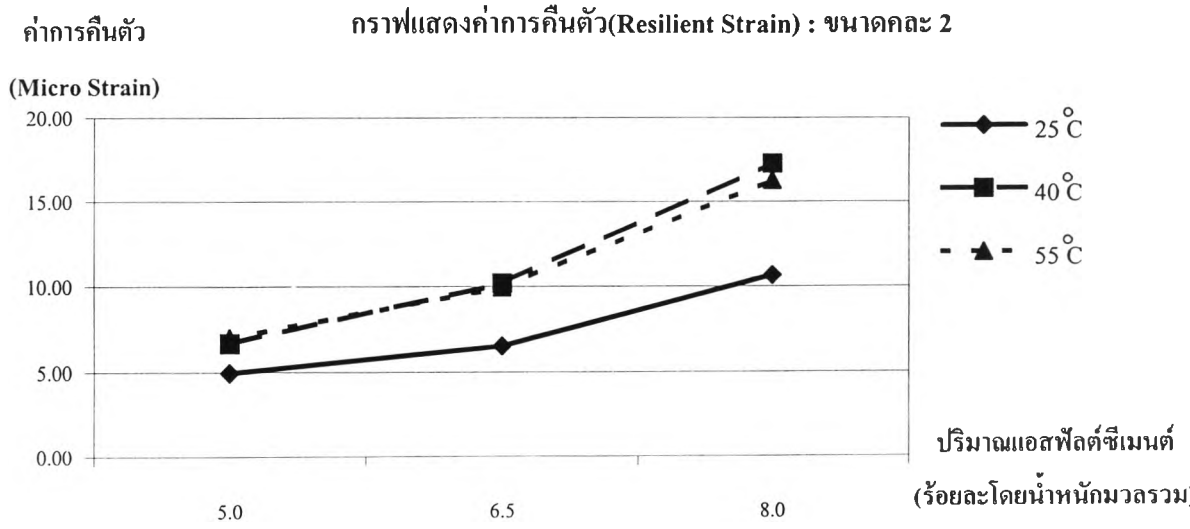
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว : ขนาดคละ 1



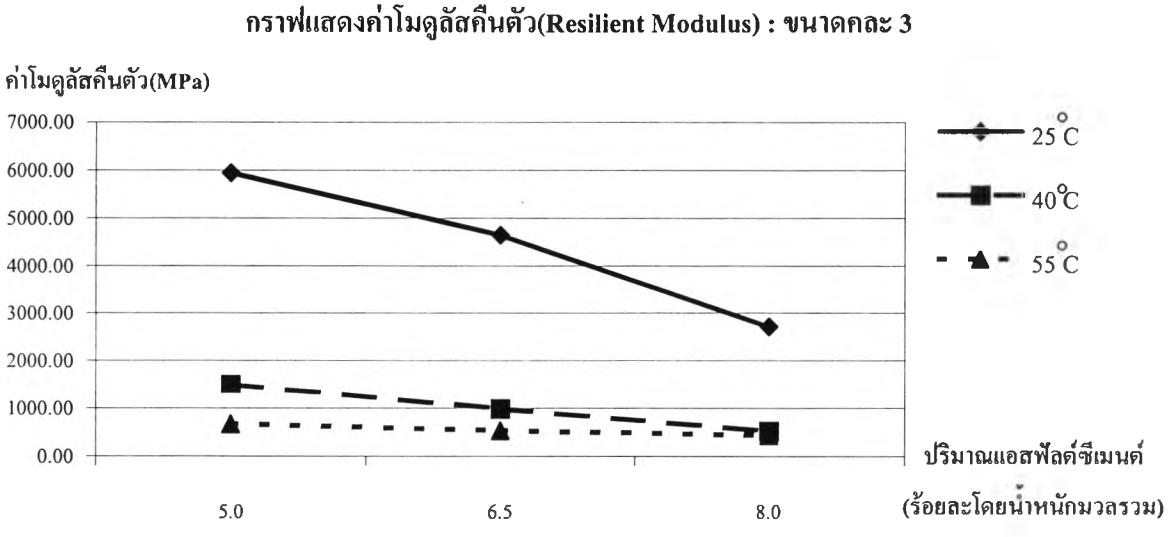
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบค่าการคืนตัว : ขนาดคละ 1



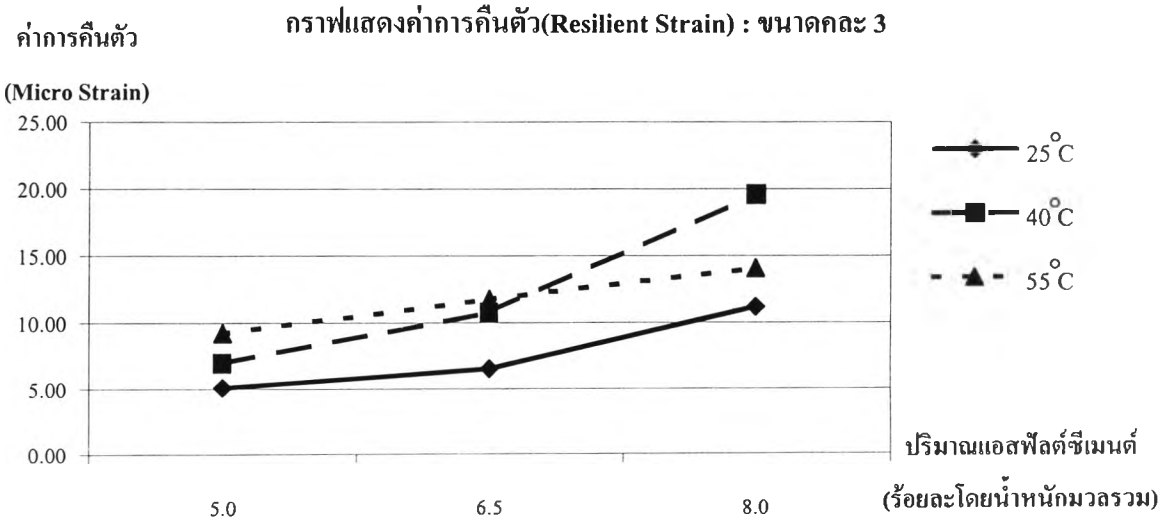
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว : ขนาดคละ 2



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบค่าการคืนตัว : ขนาดคละ 2



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว : ขนาดคละ 3



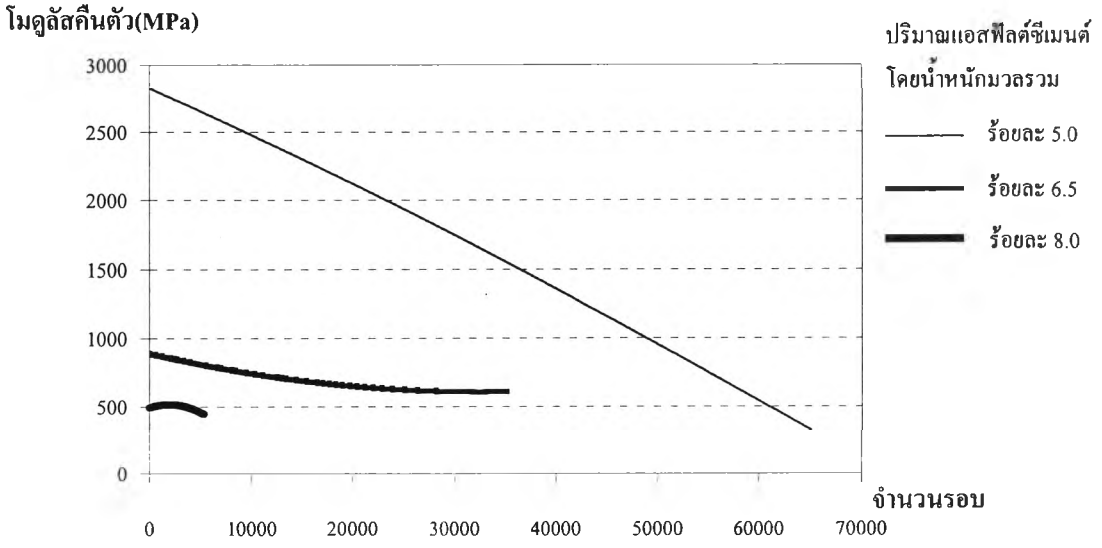
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบค่าการคืนตัว : ขนาดคละ 3

ผลการทดสอบความล้าที่อุณหภูมิ 40°C แสดงดังตารางที่ 4.19 โดยจะนำค่าจำนวนรอบของการให้น้ำหนักจนกระทั่งตัวอย่างเสียหาย ค่าโมดูลัสคืนตัวเริ่มต้น ค่าโมดูลัสคืนตัวเมื่อตัวอย่างเสียหาย ค่าการคืนตัวเริ่มต้น และค่าการคืนตัวเมื่อตัวอย่างเสียหาย มาแสดง ส่วนรูปที่ 4.15 4.16 4.17 4.18 4.19 และ 4.20 จะแสดงลักษณะที่เกิดขึ้นที่จำนวนรอบต่างๆ

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบความล้า

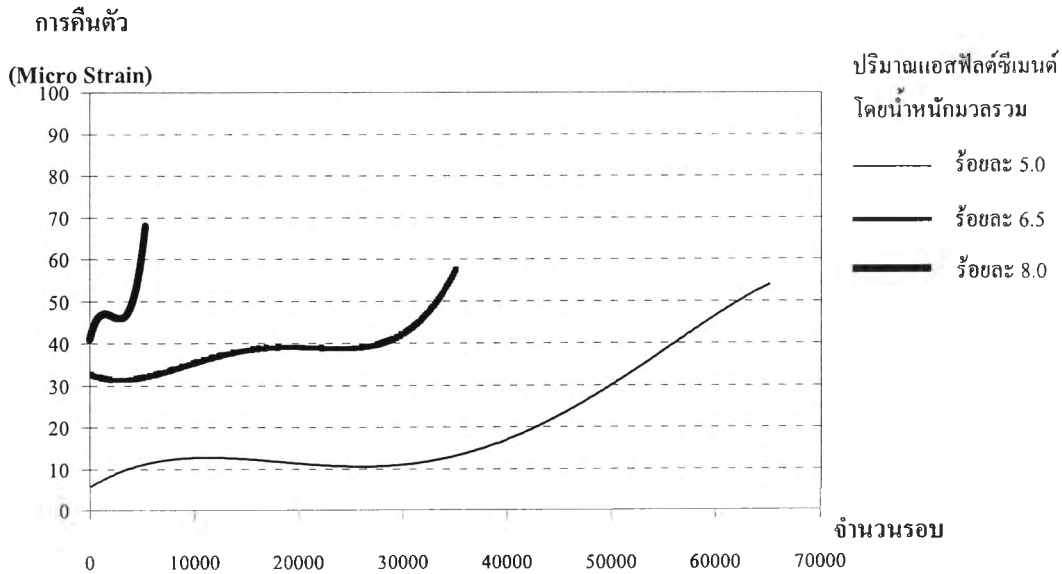
ขนาดคละ	ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักมวลรวม)	จำนวนรอบ	โมดูลัสคืนตัวเริ่มต้น (MPa)	โมดูลัสคืนตัวสุดท้าย (MPa)	ค่าการคืนตัวเริ่มต้น (Micro Strain)	ค่าการคืนตัวสุดท้าย (Micro Strain)
1	5.0	65555	2637.00	480.90	8.23	56.62
	6.5	35285	1185.65	440.65	12.37	58.97
	8.0	5375	850.15	383.78	20.18	62.07
2	5.0	38991	1583.12	467.80	19.32	52.04
	6.5	22199	1245.67	586.99	15.22	44.34
	8.0	657	564.80	361.08	23.23	68.17
3	5.0	58123	1369.02	561.28	9.27	38.54
	6.5	57103	956.39	668.55	15.76	32.09
	8.0	403	508.18	349.14	22.54	57.69

กราฟแสดงค่าโมดูลัสคืนตัว : ขนาดคละ 1



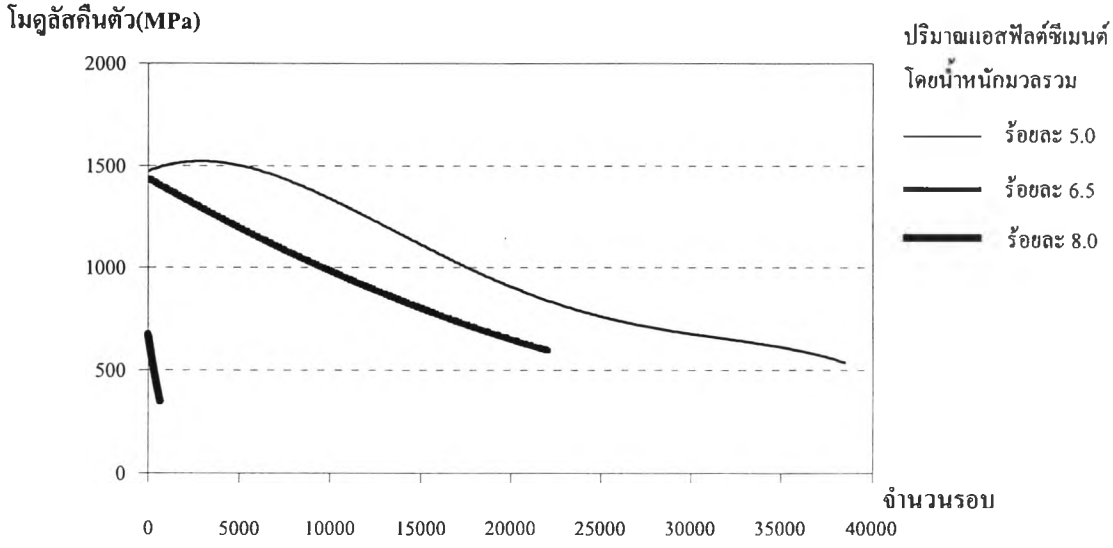
รูปที่ 4.15 ค่าโมดูลัสในการทดสอบความล้า : ขนาดคละ 1

กราฟแสดงค่าการคืนตัว : ขนาดคละ 1



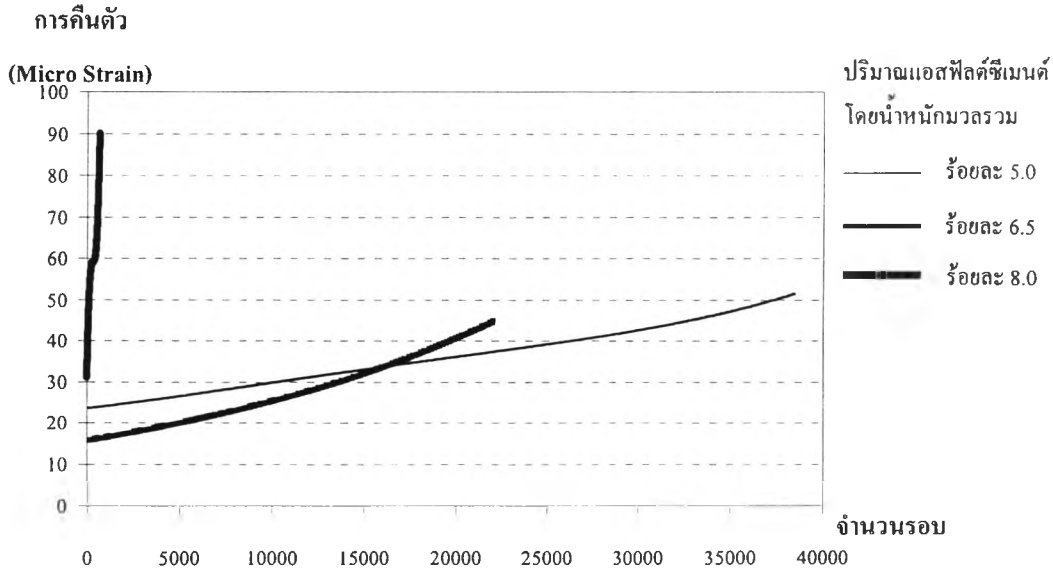
รูปที่ 4.16 ค่าการคืนตัวในการทดสอบความล้า : ขนาดคละ 1

กราฟแสดงค่าโมดูลัสคืนตัว : ขนาดคละ 2

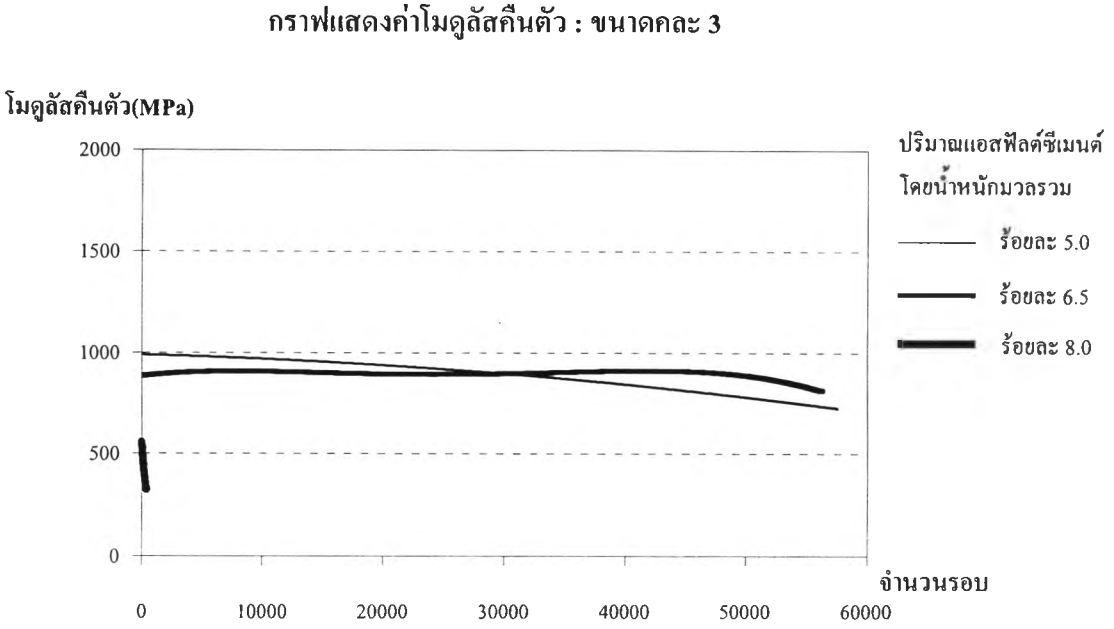


รูปที่ 4.17 ค่าโมดูลัสในการทดสอบความล้า : ขนาดคละ 2

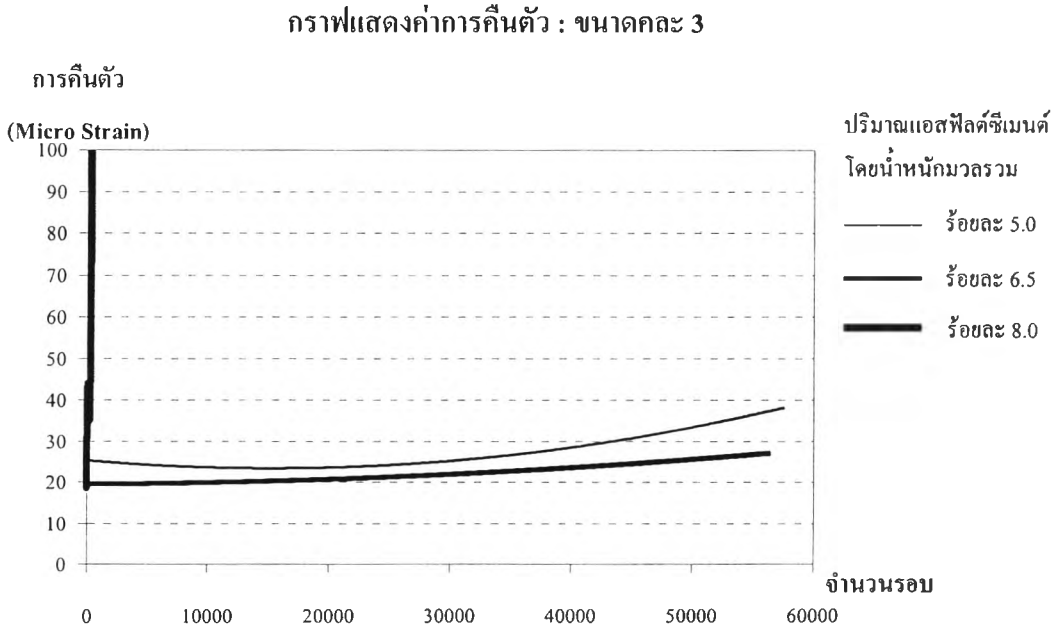
กราฟแสดงค่าการคืนตัว : ขนาดคละ 2



รูปที่ 4.18 ค่าการคืนตัวในการทดสอบความล้า : ขนาดคละ 2



รูปที่ 4.19 ค่าโมดูลัสในการทดสอบความล้า : ขนาดคละ 3



รูปที่ 4.20 ค่าการคืนตัวในการทดสอบความล้า : ขนาดคละ 3

ผลการทดสอบความล้าที่แสดงในตารางที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสคืนตัวสุดท้ายสำหรับบางปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่บางขนาดคละจะมีค่าลดลงถึงครึ่งหนึ่งหรือมากกว่านั้นของค่าโมดูลัสคืนตัวเริ่มต้น(เช่น ขนาดคละ 1 ทุกค่าปริมาณยาง) แต่บางค่าจะลดลงไม่ถึงครึ่งหนึ่ง(เช่น ขนาดคละ 3 ร้อยละ 6.5) ซึ่งสาเหตุเกิดจากข้อจำกัดในการทดสอบ คือบางตัวอย่างสามารถทดสอบต่อไปได้ถึงแม้ค่าโมดูลัสคืนตัวจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่งแล้ว แต่บางตัวอย่างจะทดสอบต่อไม่ได้ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปของก้อนตัวอย่างเกินพิกัดของเครื่องมือที่ใช้ยึดจับก้อนตัวอย่างแล้ว จึงต้องทำการหยุดทดสอบ ค่าที่แสดงในตารางจึงเป็นค่าสุดท้ายเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ

ผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.15 ถึง 4.20 จะเป็นเพียงการใช้เส้นมาเป็นตัวแทน ซึ่งเส้นที่แสดงนี้เกิดจากการประมาณเท่านั้น เพื่อเปรียบเทียบภาพรวมของผลการทดสอบ หากทำการเปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 4.19 จะพบว่าคลาดเคลื่อนกันเล็กน้อย แต่กราฟที่แสดงนี้ได้จากการใช้ข้อมูลชุดเดียวกันกับตารางที่ 4.19

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่ได้ เนื่องจากว่าการทดสอบที่ทำนี้จะเป็นลักษณะของน้ำหนักกระทำซ้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จำนวนรอบที่ทนต่อน้ำหนักกระทำซ้ำที่แสดงในตารางที่ 4.19 นั้นจึงอาจไม่สื่อถึงการพังทลายของวัสดุในสนามในลักษณะรอยร้าวที่เกิดจากความล้าได้ (Fatigue Cracking) แต่ค่าการคืนตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบสำหรับทั้ง 3 ขนาดคละจะให้ผลในลักษณะเดียวกันคือ เมื่อใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในการผสมมากขึ้นจะส่งผลให้วัสดุสามารถต้านทานการยุบตัวได้น้อยลง(จากค่าการคืนตัวเริ่มต้นและค่าการคืนตัวสุดท้าย) และจะน้อยลงอย่างมากที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ค่ามากที่สุดที่ใช้ทดสอบ(ร้อยละ 8.0) ส่วนที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.0 และร้อยละ 6.5 บางขนาดคละจะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับบริเวณ “พื้นที่ถูกจำกัด” ที่ได้กล่าวถึงแล้วในส่วนของการวิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะของส่วนผสมที่ได้ จากการทดสอบในส่วนนี้จะเห็นว่าขนาดคละที่ 2 ซึ่งเป็นขนาดคละที่ผ่านเข้าไปในพื้นที่ดังกล่าวไม่แสดงความต้านทานการยุบตัวที่แตกต่างไปจากขนาดคละอื่นเลย ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า “พื้นที่ถูกจำกัด” นี้ซึ่งมีวัตถุประสงค์เบื้องต้นเพื่อจำกัดปริมาณของทรายธรรมชาติ(Natural Sand)ไม่ให้มีในปริมาณที่ส่งผลเสียต่อส่วนผสม แต่มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาเป็นมวลรวมที่ได้จากการผลิตจากโรงโม่ ขนาดคละที่ผ่านเข้าไปจึงไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของส่วนผสมที่ได้