

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ ผลการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมรวม ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุขยะพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติกประเภทโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ผลการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนชั้นทาง Wearing Course 3 รูปแบบ ประกอบด้วย แอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนแบบธรรมดา (HMA) ชั้น Wearing Course ตามมาตรฐานกรมทางหลวง แอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนที่มีขยะพลาสติกทดแทนบางส่วนในมวลรวมส่วนละเอียด (R-PET-HMA) แอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนที่มีขยะพลาสติกผสมเพิ่ม (A-PET-HMA) ผลการทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐานกรมทางหลวง และผลการทดสอบสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม การทดสอบโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม การทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม การทดสอบการเกิดร่องล้อ การทดสอบความต้านทานการสั่นไถล การศึกษาโดยควบคุมคุณภาพเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมร้อนสำหรับชั้นทาง Wearing Course โดยใช้มาตรฐานงานทางกรมทางหลวง

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์

ในงานวิจัยนี้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 จากบริษัท ทิปปโก้แอสฟัลต์ จำกัด (มหาชน) โรงงานพระประแดง ตำบลบางจาก อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ โดยสรุปผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ก 401/2531 ประกอบด้วย การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของปิทมินัส (Penetration) การทดสอบหาจุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash Point) การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุปิทมิน (Softening Point) การทดสอบความหนืด การทดสอบความสามารถในการยึดตัว การทดสอบหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดิงสรุปได้ดังนี้

1) ค่าเพนิเทรชัน (Penetration) อ้างอิงตามข้อกำหนด ทล.-ก 401/2531 ระบุว่าค่าเพนิเทรชันควรอยู่ระหว่าง 60 ถึง 70 โดยค่าเพนิเทรชันของตัวอย่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 ที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าเท่ากับ 65 และ 67 ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นไปตามข้อกำหนด

2) ค่าจุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash Point) อ้างอิงตามข้อกำหนด ทล.ก 401/2531 ค่าจุดวาบไฟและจุดติดไฟของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 ด้วยวิธี (Cleveland Open Cup) ทล.-ท 406/2519 กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 232 องศาเซลเซียส โดยค่าจุดวาบไฟและจุดติดไฟของตัวอย่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 ที่ใช้ในงานวิจัย มีค่าเท่ากับ 358 ผลการทดสอบเป็นไปตามข้อกำหนด

3) ค่าความสามารถในการยืดตัว (Ductility) อ้างอิงตามข้อกำหนด ทล.-ก. 401/2531 ระบุว่า การทดสอบความสามารถในการยืดตัว อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่า 100 เซนติเมตร ผลทดสอบ พบว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 152 เซนติเมตร ผลการทดสอบผ่านข้อกำหนด

4) ผลการทดสอบการละลายของวัสดุบิตูเมนในสารทำละลายอินทรีย์ สมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 ของกรมทางหลวง (ทล.-ก. 401/2531) กำหนดค่าการละลายในสารทำละลายอินทรีย์ มากกว่าร้อยละ 99 ผลการทดสอบเท่ากับร้อยละ 99.9 จะเห็นว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 ผ่านตามข้อกำหนด

ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 มีสมบัติตามข้อกำหนดตาม ทล.-ก 401/2531 ของกรมทางหลวง สามารถใช้เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ AC 60/70

Properties	Unit	results	Specification	Test method
Penetration at 25°C	0.1 mm.	65	60 - 70	ทล.ท. 403/2518
Flash point (Cleveland open cup)	degree C	358	232 min.	ทล.ท. 406/2519
Ductility at 25°C	cm.	152	100 min.	ทล.ท. 405/2519
Solubility in Trichloroethylene	percent	99.9	99.0 min.	ทล.ท. 409/2520
Thin-film oven test.3.2 mm.,163°C 5 hour				AASHTO T 179
- Loss on heating	percent	0.08	0.8 max.	
- Penetration of residue	percent of original	85.1	54 min.	
- Ductility of residue at 25°C	cm.	150	50 min.	
Loss on heating, 163°C 5 hour	percent	0.09	0.8 max.	ทล.ท. 404/2518

ที่มาผลทดสอบ : Tipco Asphalt Test Report AC 60/70 (F/P) ., Bulk Storage: AC08

4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม

สมบัติพื้นฐานของมวลรวม หินปูนจากแหล่งวัสดุ โรงโม่หินชุมเงินชุมทอง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย ค่าความคงทน (Soundness) ค่าความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion) ปริมาณการแตกหักจากการกระแทก (Aggregate Impact Value, AIV) ปริมาณการแตกหักจากการบดอัด (Aggregate Crushing Value, ACV) และค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ (Asphalt Absorption) สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ค่าความคงทน (Soundness) ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 213/2531 พิจารณาค่าร้อยละการสูญเสีย (% Loss) เมื่อทดสอบด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟต อ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532 กำหนดไว้ว่าปริมาณค่าร้อยละการสูญเสียต้องไม่เกินร้อยละ 9 พบว่า วัสดุหินปูนในส่วนมวลรวมหยาบ Aggregate 3/4” มีค่าร้อยละการสูญเสียร้อยละ 1.00 และในส่วนมวลรวมละเอียด Fine Aggregate มีค่าร้อยละการสูญเสียร้อยละ 0.75 แสดงให้เห็นว่า หินปูนมีความคงทนผ่านข้อกำหนด

2) ค่าความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion) ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 202/2515 พิจารณาสัดส่วนที่เสียหายจากการขัดสี อ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532 กำหนดไว้ว่าค่าความสึกหรอต้องไม่เกินร้อยละ 40 พบว่า วัสดุหินปูนมีส่วนที่เสียหายร้อยละ 22.2 แสดงให้เห็นว่า หินปูนสามารถทนต่อการสึกหรอผ่านตามข้อกำหนด

3) ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 210/2515 อ้างอิงตามมาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต กำหนดไว้ว่าปริมาณของส่วนดัชนีความแบนต้องไม่เกินร้อยละ 35 พบว่า วัสดุหินปูนมีส่วนค่าอยู่ร้อยละ 23 แสดงให้เห็นว่า วัสดุหินปูนมีค่าดัชนีความแบนผ่านข้อกำหนด

4) ค่าดัชนีความยาว (Elongation Index) ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 211/2515 อ้างอิงตามมาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต กำหนดไว้ว่าปริมาณของส่วนดัชนีความยาว ต้องไม่เกินร้อยละ 35 พบว่า วัสดุหินปูนมีส่วนค่าอยู่ร้อยละ 17 แสดงให้เห็นว่า วัสดุหินปูนมีค่าดัชนีความยาวผ่านข้อกำหนด

5) ค่าการเทียบเท่าทราย Sand Equivalent ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 203/2515 พิจารณาร้อยละค่าการเทียบเท่าทรายของมวลรวม อ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532 กำหนดไว้ว่าค่าการเทียบเท่าทราย ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ผลการทดสอบวัสดุมวลรวมแสดงให้เห็นว่ากำหนดไว้ว่า หินปูนในส่วนมวลรวมละเอียด Fine Aggregate มีค่าเท่ากับ 70.8 ในส่วนมวลรวม Hot Bin 1 มีค่าเท่ากับ 72.9 จากผลการทดสอบแสดงถึงคุณภาพของวัสดุมวลรวม สัดส่วนความละเอียดและองค์ประกอบของวัสดุคล้ายดินเหนียวในมวลรวม จะทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณภาพ

6) ค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ (Asphalt Absorption) พิจารณาร้อยละการดูดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์ของมวลรวม หินปูน พบว่า มีค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ร้อยละ 0.24 แสดงให้เห็นว่ามวลรวมที่มีค่าการดูดซึมสูงจะทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตยึดเกาะกันได้ดีขึ้น

ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของมวลรวมเปรียบเทียบกับมาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 416/2556) แสดงดังตารางที่ 4.2

จะเห็นว่ามวลรวมทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สามารถใช้เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้

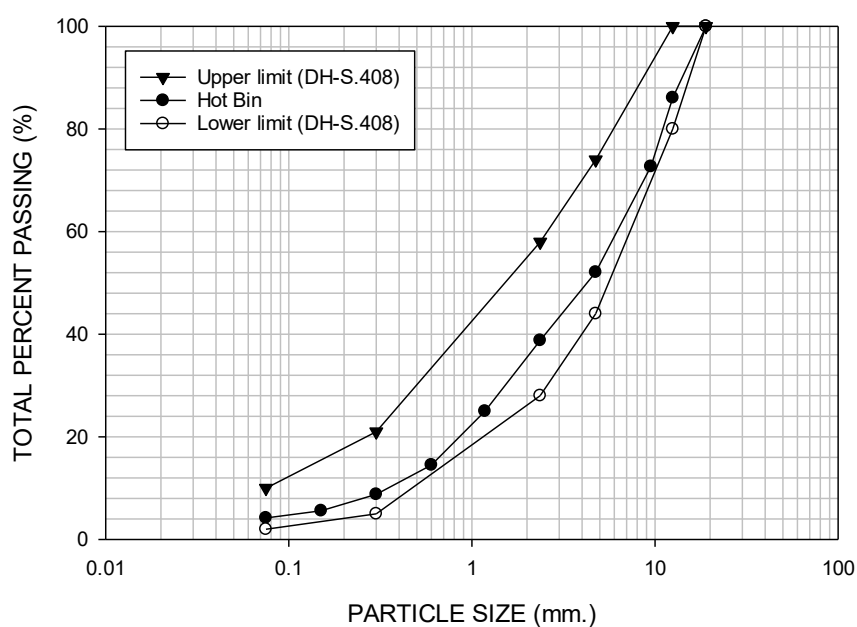
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมที่ใช้ออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

Description	Hot Bin1			Hot Bin			Total
	Passing #200	Retained #200	Total	Bin 2	Bin 3	Bin 4	
Mix Proportion (%)	-	-	45	20	20	15	100
Bulk Specific Gravity (%)	-	2.666	2.666	2.673	2.681	2.691	2.674
Apparent Specific Gravity	2.704	2.669	2.669	2.703	2.705	2.709	2.689
Effective Specific Gravity	-	-	-	-	-	-	2.691
Water Absorption (%)	-	0.80	-	0.43	0.36	0.29	-
Flakiness Index (%)	-	-	-	30	21	23	23.0
Elongation Index (%)	-	-	-	23	15	17	17
Asphalt Absorption (%)	-	-	-	-	-	-	0.24
Los Angeles Abrasion (%)	Aggregate 3/4" = 22.20						
Soundness (% WT. Loss)	Aggregate 3/4" = 1.00						
	Fine Aggregate = 0.75						
Sand Equivalent (%)	Fine Aggregate = 70.80						
	Hot Bin 1 = 72.90						

การทดสอบเพื่อหาขนาดผลจากการทดสอบเพื่อหาขนาดผลของวัสดุมวลรวมที่นำมาใช้ในงานวิจัย HOT BIN ประกอบไปด้วย BIN1 หินฝุ่น, BIN 2 หิน 3/8", BIN3 หิน 1/2", และ BIN4 หิน 3/4" ดังรูปที่ 4.1 จากแหล่งวัสดุ โรงไม้หินชุมเงินชุมทอง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุมวลรวมตาม ทล.ม.408/2532 มาตรฐานกรมทางหลวง ดัง ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบขนาดคละของวัสดุมวลรวม

Sive Size	%Passing				Combined	Desired	Tolerant Limit
	HB1	HB2	HB3	HB4			
1"	-	-	-	-	-	-	-
3/4"	-	-	100	100	100	100	100
1/2"	-	100	71.2	46.0	86.1	80 - 100	81 - 91
3/8"	100	98.8	23.7	21.6	72.7	-	68 - 78
#4	99.6	36.4	2.3	2.6	52.1	44 - 74	47 - 57
#8	84.5	2.8	1.2	-	38.8	28 - 58	34 - 44
#16	55.0	1.2	-	-	25.0	-	21 - 29
#30	32.3	-	-	-	14.5	-	11 - 19
#50	19.5	-	-	-	8.8	5 - 21	5 - 13
#100	12.5	-	-	-	5.6	-	3 - 9
#200	9.3	-	-	-	4.2	2 - 10	2 - 6



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบขนาดคละของวัสดุมวลรวม

4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุขยะพลาสติก

ผลการทดสอบหองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRF และวิธี LECO ในตัวอย่างที่นำส่งทดสอบ ซึ่งวัสดุของวัสดุขยะพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติกประเภทโพลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต จากโรงงานของ บริษัท สมคิดพลาสติกนำเข้าและส่งออก จำกัด ส่งตัวอย่างทดสอบ ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่า มีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุหลากหลายประเภท โดยมีธาตุคาร์บอน (Carbon, C) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งคาร์บอน (Carbon, C) เป็นส่วนประกอบหลักของพลาสติก จึงสามารถเชื่อได้ว่าคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับพลาสติกประเภทโพลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) ดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี X-ray Fluorescence Energy Dispersive Spectrometer , XRF

No.	รายการ	ผลการทดสอบ
1	Magnesium (Mg)	4.933 % Mass
2	Aluminium (Al)	0.997 % Mass
3	Silicon (Si)	30.892 % Mass
4	Phosphorus (P)	14.286 % Mass
5	Potassium (K)	3.007 % Mass
6	Calcium (Ca)	22.223 % Mass
7	Titanium (Ti)	0.663 % Mass
8	Manganese (Mn)	0.370 % Mass
9	Iron (Fe)	22.399 % Mass
10	Nikel (Ni)	0.230 % Mass

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี LECO (ASTM D5373-16)

No.	รายการ	ผลการทดสอบ
1	Carbon (C)	31.006 %Wt
2	Hydrogen (H)	2.788 %b Wt
3	Nitrogen (N)	N.D.

ที่มา : ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5 ผลการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต

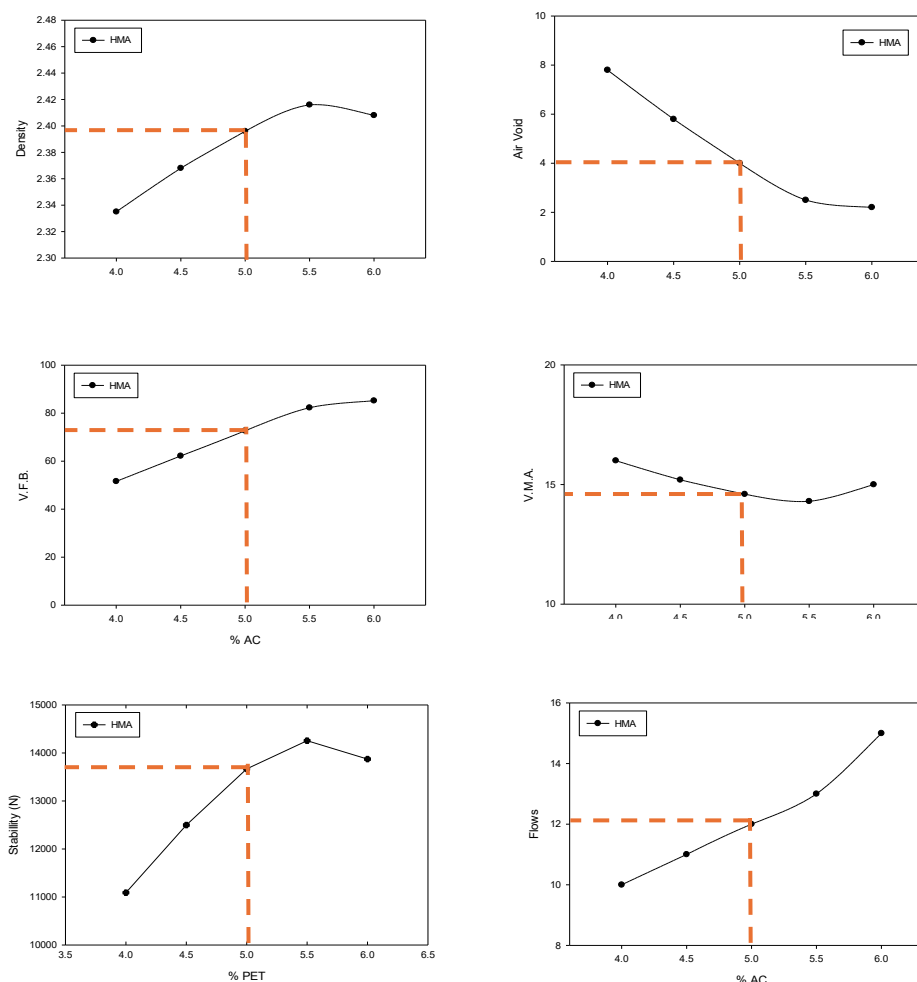
งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน 3 รูปแบบส่วนผสม ประกอบไปด้วย แอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนแบบธรรมดา (HMA) แอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีส่วนผสมของเศษขยะพลาสติกแบบผสมเพิ่ม (A-PET-HMA) และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีส่วนผสมของเศษขยะพลาสติกแบบทดแทนในมวลรวมส่วนละเอียดบางส่วน (R-PET-HMA) โดยวิธีมาร์แชล (Marshall) ตามข้อกำหนดมาตรฐานของกรมทางหลวง

ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนแบบธรรมดา (HMA) โดยวิธีมาร์แชล (Marshall) เปรียบเทียบกับขอบเขตบนและขอบเขตล่างสำหรับชั้นทาง Wearing Course ที่ขนาด 12.5 มิลลิเมตร ของมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ม.408/2532 มีผลทดลองดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนแบบธรรมดา (HMA)

Specimen	HMA					Tolerant limit
	%AC by total Wt. of Aggregate					
	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	
Total asphalt (by Wt. of Total Agg) (%)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	-
Ari Void (%)	7.8	5.8	4.0	2.5	2.2	3 - 6
Bulk Density (g/cm²)	2.335	2.368	2.396	2.416	2.408	-
V.M.A. (%)	16.0	15.2	14.6	14.3	15.0	>14
V.F.B. (%)	51.6	62.2	72.7	82.3	85.2	-
Stability (N) (N)	18,390	18,796	19,124	20,700	21,550	>6,672
Flow (0.25mm) (0.25mm)	11.82	11.25	11.85	12.35	13.14	8 - 16
Stability/Flow (N/0.25mm) (N/0.25mm)	1,556	1,670	1,614	1,676	1,640	>556
Strength Index (%)	88.7	92.4	92.6	94.4	94.8	>75

จากผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนโดยวิธีมาร์แชล ได้ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 เท่ากับ ร้อยละ $5.0 \pm 0.3\%$ ของน้ำหนักวัสดุรวม โดยที่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณช่องว่างอากาศ ร้อยละ 4.00 และมีผลการทดสอบเป็นไปตามข้อกำหนดแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนโดยวิธีมาร์แชล แสดงเป็นกราฟผลการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน (HMA) ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน (HMA)

ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนที่มีส่วนผสมขี้เถ้าพลาสติก โดยวิธีมาร์แชล สำหรับชั้นทาง Wearing Course ขนาด 12.5 ของมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ม.408/2532 อัตราส่วนผสมมวลรวม BIN1 = 45%, BIN2 = 20%, BIN3 = 20%, BIN4 = 15%, ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนที่มีส่วนผสมขี้เถ้าพลาสติกใช้อัตราส่วนน้ำหนักร้อยละของพลาสติกต่อน้ำหนักมวลรวม ที่ร้อยละ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 ตามลำดับ และแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนที่มีส่วนผสมขี้เถ้าพลาสติกใช้อัตราส่วนน้ำหนักร้อยละของพลาสติกแบบผสมเพิ่ม (A-PET-HMA) และทดแทนบางส่วนในมวลรวมส่วนละเอียด (R-PET-HMA) ที่ร้อยละ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนที่มีส่วนผสมขี้เถ้าพลาสติกนั้นมีการเติมเศษขี้เถ้าพลาสติกประเภทโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแล้วทำให้ปริมาณช่องว่างอากาศมากขึ้น เพื่อให้ส่วนผสมคอนกรีตมีปริมาณช่องว่างตามกำหนด ที่ร้อยละ 4 จึงต้องออกแบบเพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%AC) รวมในส่วนผสม (A-PET-HMA) เท่ากับ ร้อยละ 5.02, 5.03, 5.07, 5.09 และ 5.13 ตามลำดับ ส่วนปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%AC) รวมในส่วนผสม (R-PET-HMA) เท่ากับ ร้อยละ 5.01, 5.02, 5.05, 5.08 และ 5.11 ตามลำดับ มีผลทดลอง ดังตารางที่ 4.7

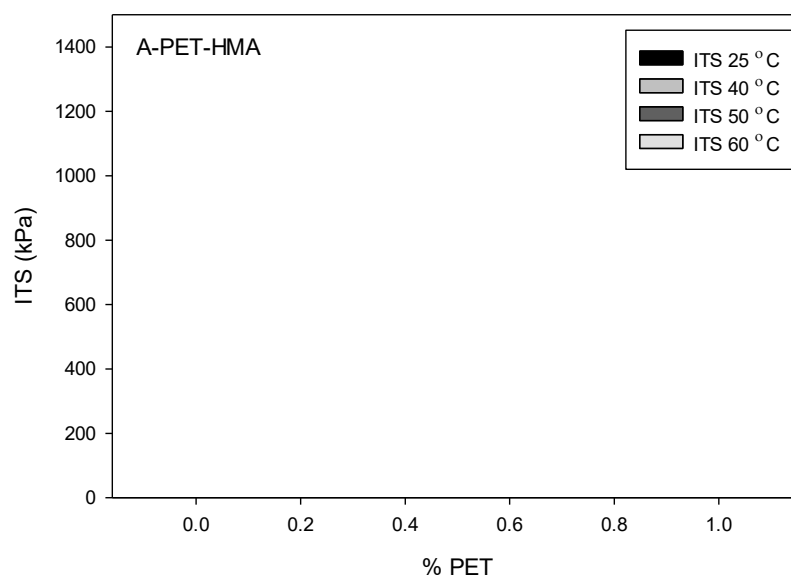
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง

Specimen	HMA	A-PET-HMA					R-PET-HMA					Specification
		%PET by total Wt. of Aggregate					%PET by total Wt. of Aggregate					
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
Total asphalt (%)	5.0	5.02	5.03	5.07	5.09	5.13	5.01	5.02	5.05	5.08	5.11	-
Ari Void (%)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3 - 5
Bulk Density (g/cm²)	2.396	2.396	2.394	2.396	2.397	2.394	2.394	2.396	2.398	2.394	2.392	-
V.M.A. (%)	14.6	14.8	14.8	14.7	14.7	14.8	14.7	14.8	14.9	14.8	14.7	≥14
V.F.B. (%)	72.7	72.3	72.2	72.8	72.1	71.2	72.1	72.3	72.6	72.3	72.0	-
Stability (N)	13,713	18,390	18,796	19,124	20,703	21,550	18,130	18,706	20,041	20,211	20,470	≥8006
Flow (0.25mm)	11	11	11	11	12	12	11	11	11	12	12	8 - 16
Stability/Flow	1,246	1,671	1,708	1,738	1,725	1,795	1,648	1,700	1,670	1,684	1,705	≥712
Strength Index (%)	85.51	83.70	83.50	85.20	84.70	82.90	81.60	83.20	84.40	82.90	83.50	≥75

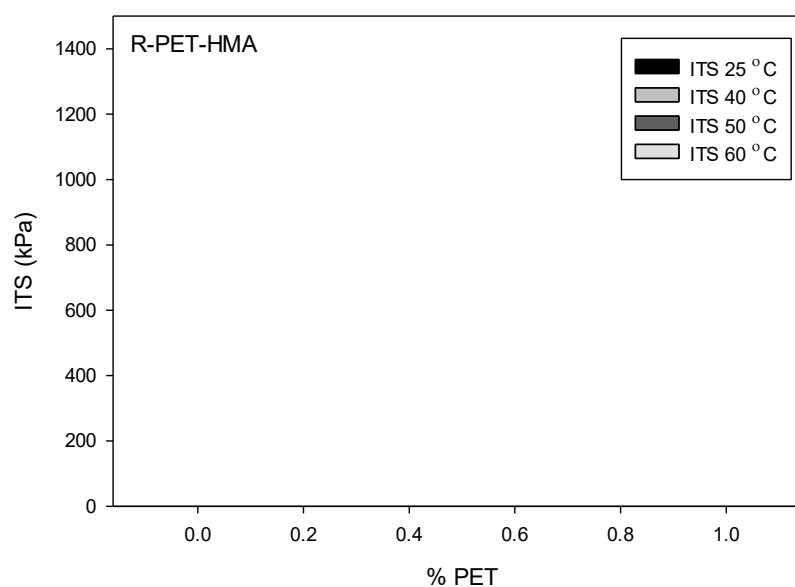
4.6 ผลการทดสอบสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.6.1 ผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS)

ผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีต ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D6931 (ASTM, 2015) ภายใต้อุณหภูมิ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่ออุณหภูมิทดสอบเพิ่มขึ้นกำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าลดลง เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตมีความอ่อนตัวมากขึ้น เมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดึงได้ลดลง ที่อุณหภูมิในการทดสอบค่าเดียวกัน (อภิชาติ สุดดีพงษ์ และคณะ, 2567) พิจารณาที่วิธีการใช้เศษขวด PET เดียวกัน พบว่า A-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มีกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 810.77 860.67 882.95 970.48 909.31 และ 888.24 กิโลพาสคัล ตามลำดับ กำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 354.7 385.43 394.30 454.19 441.15 และ 409.09 กิโลพาสคัล ตามลำดับ กำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 264.88 284.41 307.25 384.62 335.42 และ 329.23 กิโลพาสคัล ตามลำดับ และกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เท่ากับ 218.06 232.45 267.24 314.64 283.85 และ 274.2 กิโลพาสคัล ตามลำดับ ขณะที่ R-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มีกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 810.77 837.73 858.42 919.31 905.74 และ 866.12 กิโลพาสคัล ตามลำดับ กำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 354.7 357.21 382.13 425.18 396.82 และ 385.43 กิโลพาสคัล ตามลำดับ กำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 264.88 274.12 298.34 341.96 319.25 และ 305.07 กิโลพาสคัล ตามลำดับ และกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เท่ากับ 218.06 222.04 247.84 300.61 278.00 และ 270.63 กิโลพาสคัล ตามลำดับ กำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PET ที่เพิ่มขึ้น โดย A-PET-HMA และ R-PET-HMA มีกำลังดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ปริมาณเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 เนื่องจาก อนุภาคของ PET เป็นแบบกึ่งแข็งกึ่งอ่อน (Semicrystalline) ส่วนที่อ่อนจะละลายกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เหนียวขึ้น และส่วนที่แข็งทำหน้าที่รับน้ำหนักระหว่างมวลรวม อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเศษขวด PET มีค่ามากกว่าร้อยละ 0.6 ทำให้สมรรถนะแบบสถิตและแบบพลวัตลดลงตามปริมาณเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก เศษขวด PET มีความแกร่ง (Stiffness) น้อยกว่ามวลรวม เมื่อปริมาณเศษขวด PET มากเกินไปทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีกำลังดึงทางอ้อมลดลง นอกจากนี้ การใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีการเติมเพิ่มทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีสมรรถนะสูงกว่าการใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน



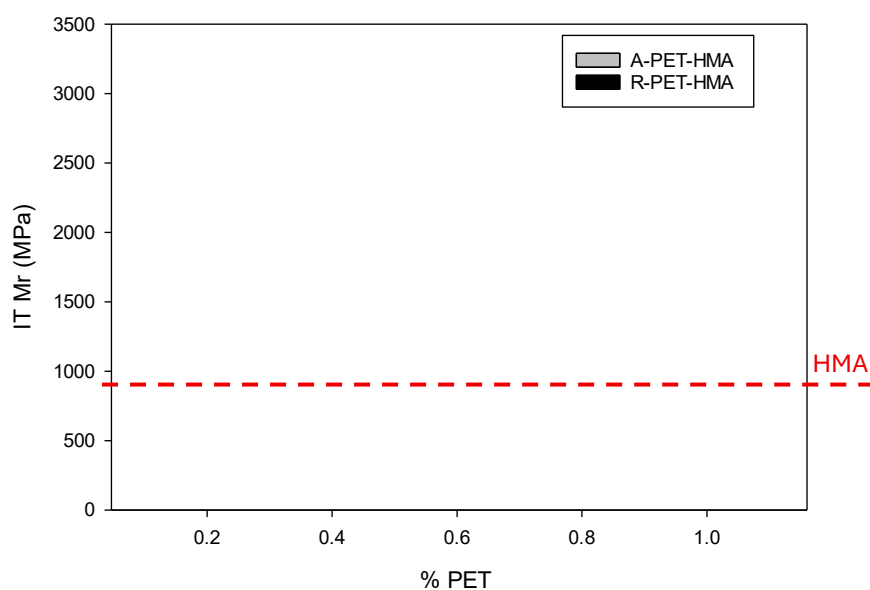
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดร้อนที่มีส่วนผสมขี้พลาสติกผสมเพิ่ม (A-PET-HMA)



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมขี้พลาสติกทดแทนในมวลรวมส่วนละเอียด (R-PET-HMA)

4.6.2 ผลการทดสอบโมดูลัสคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus, ITMr)

ผลทดสอบโมดูลัสคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม A-PET-HMA และ R-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 ผลทดสอบโมดูลัสคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม แสดงดังรูปที่ 4.5 A-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 โดยที่โมดูลัสคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมมีค่าเท่ากับ 915 1,303 1,830 2,350 2,124 และ 2,136 เมกะพาสคัล ตามลำดับ สำหรับโดย R-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มีโมดูลัสคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม เท่ากับ 915 1,282 1,755 2,224 2,081 และ 2,093 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ค่าโมดูลัสคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมมีค่าตามปริมาณ PET ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 จากนั้น เมื่อปริมาณ PET มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 0.6 ทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีโมดูลัสคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมลดลง เมื่อพิจารณาที่ปริมาณ PET เท่ากัน พบว่า A-PET-HMA มีค่าโมดูลัสคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมสูงกว่า R-PET-HMA ซึ่งผลการทดสอบเป็นลักษณะเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อมแสดงให้เห็นว่า PET ช่วยให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีความยืดหยุ่นภายใต้แรงพลวัตด้วย

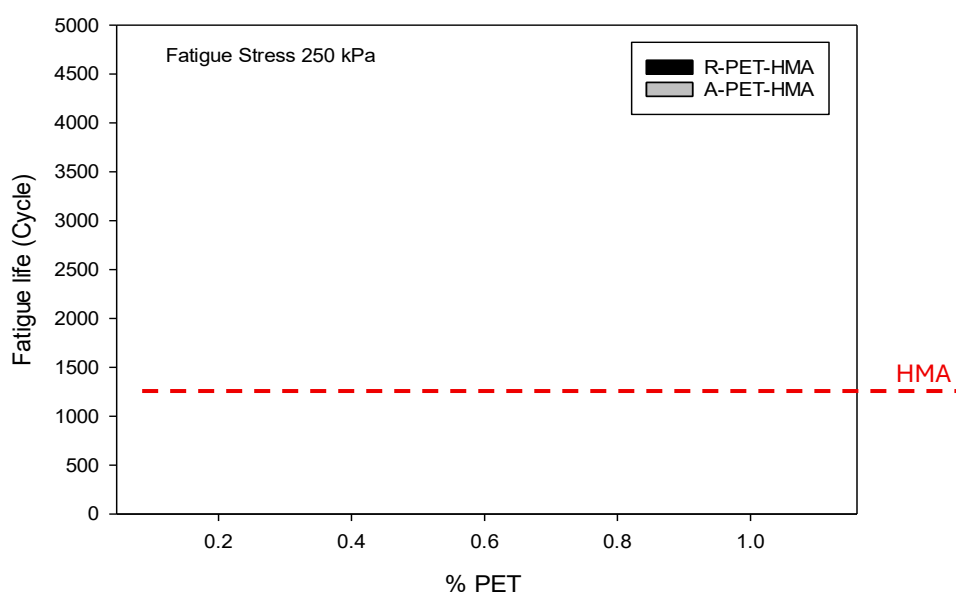


รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบโมดูลัสคืบตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม

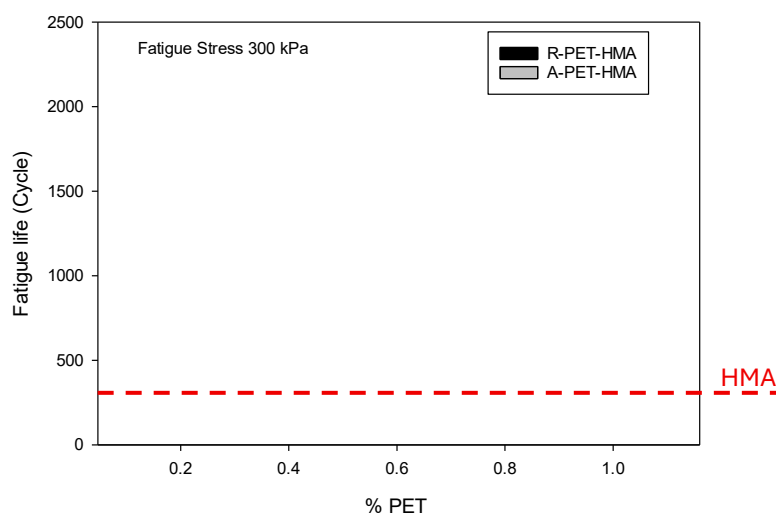
4.6.3 ผลการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue)

ผลการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ภายใต้หน่วยแรงดึงพลวัตเท่ากับ 250 300 และ 350 กิโลพาสคัล ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อายุการล้า พบว่า อายุการล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตทุกส่วนผสมจะมีค่าลดลง เมื่อหน่วยแรงในการทดสอบเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีต

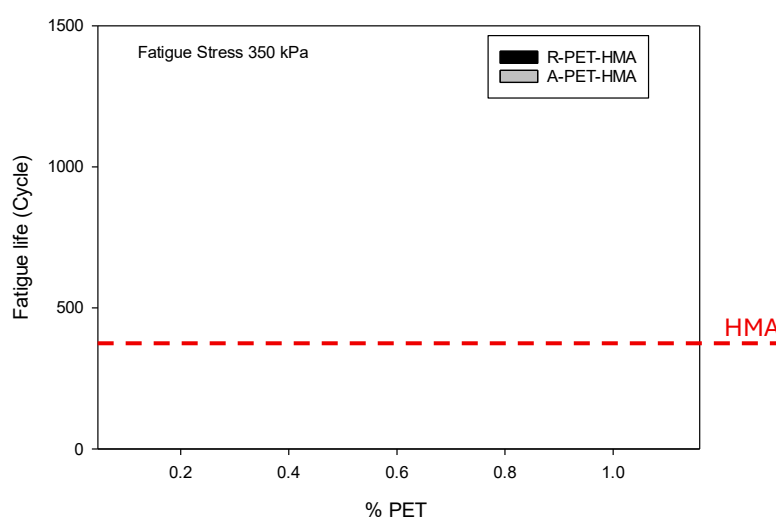
ที่ไม่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET พบว่า มีอายุการต้านทานการล้าเท่ากับ 97 235 และ 380 รอบ ที่หน่วยแรงทดสอบ 250 300 และ 350 กิโลพาสคาล ตามลำดับ ในส่วนของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET พบว่า A-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มีอายุการต้านทานการล้าเท่ากับ 1,848 2,966 3,303 3,551 3,483 และ 3,323 รอบ ที่หน่วยแรงทดสอบ 250 ตามลำดับ มีอายุการต้านทานการล้าเท่ากับ 602 750 941 1350 1190 และ 1094 รอบ ที่หน่วยแรงทดสอบ 300 ตามลำดับ มีอายุการต้านทานการล้าเท่ากับ 320 541 627 750 702 และ 653 รอบ ที่หน่วยแรงทดสอบ 350 ตามลำดับ และสำหรับ R-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มีอายุการต้านทานการล้าเท่ากับ 1,848 2,818 3,272 3,538 3,396 และ 3,281 รอบ ที่หน่วยแรงทดสอบ 250 ตามลำดับ มีอายุการต้านทานการล้าเท่ากับ 602 684 790 1,228 1,104 และ 1,085 รอบ ที่หน่วยแรงทดสอบ 300 ตามลำดับ มีอายุการต้านทานการล้าเท่ากับ 320 502 557 704 717 และ 641 รอบ ที่หน่วยแรงทดสอบ 350 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ที่กำลัง 250 กิโลพาสคาล



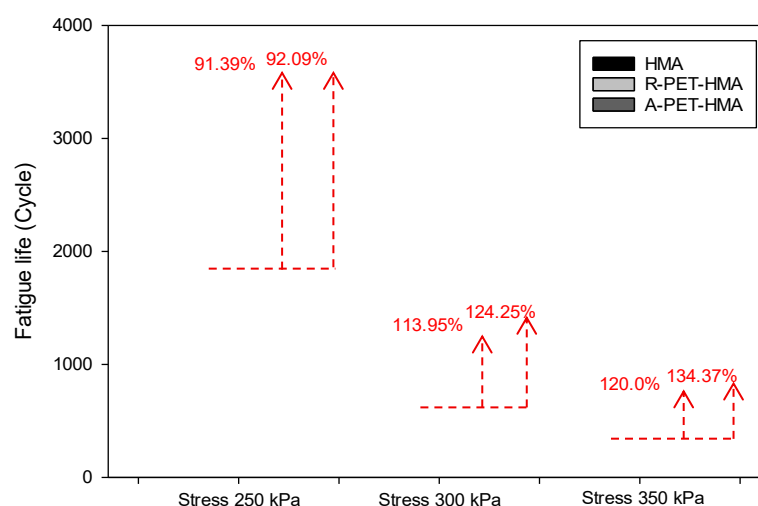
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ที่กำลัง 300 กิโลปาสกาล



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ที่กำลัง 350 กิโลปาสกาล

จากการทดสอบจะเห็นว่าผลทดสอบในทุกส่วนผสม อายุการล้ามีค่าลดลงตามขนาดของหน่วยแรงดึงพลวัตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีต และขนาดของหน่วยแรงดึงพลวัตเท่ากัน แอสฟัลต์คอนกรีตมีอายุการล้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเศษขยะพลาสติก ที่เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเศษขยะพลาสติก ร้อยละ 0.6 เมื่อปริมาณเศษขวด PET และอายุการล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าลดลง สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังดึง

ทางอ้อม และผลทดสอบโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม โดยพบว่า A-PET-HMA และ R-PET-HMA มีค่าอายุการล้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 92.09 และ 91.39 ที่หน่วยแรงทดสอบ 250 กิโลพาสคาล ร้อยละ 124.25 และ 113.95 ที่หน่วยแรงทดสอบ 300 กิโลพาสคาล และร้อยละ 134.37 และ 120.00 ที่หน่วยแรงทดสอบ 350 กิโลพาสคาล ตามลำดับ ในทางทฤษฎีความสามารถในการต้านทานการเกิดความเครียด เศษขวด PET ก็เป็นปัจจัยต่อความสามารถต้านทานการล้าของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET ทั้งสองรูปแบบ มีค่าอายุการล้าสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุง เนื่องจาก เศษขวด PET ส่วนที่แข็งก็จะไปแทรกตัวกับระหว่างมวลรวมและส่วนที่อ่อนละลายไปผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้เกิดความเหนียวไปเคลือบกับมวลรวมทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็ง (Penetration) และความยืดหยุ่น (Elasticity) ที่สูงขึ้น ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET สามารถรับแรงดึงได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุง ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบอายุการล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 กับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ปรับปรุง ที่กำลัง 250 300 และ 350 กิโลพาสคาล

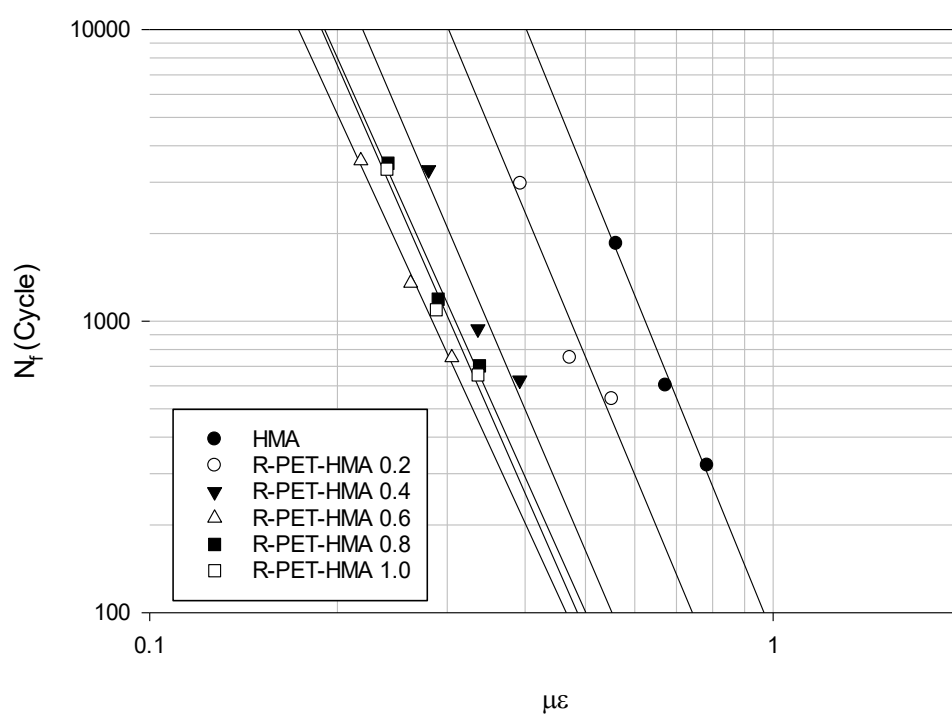
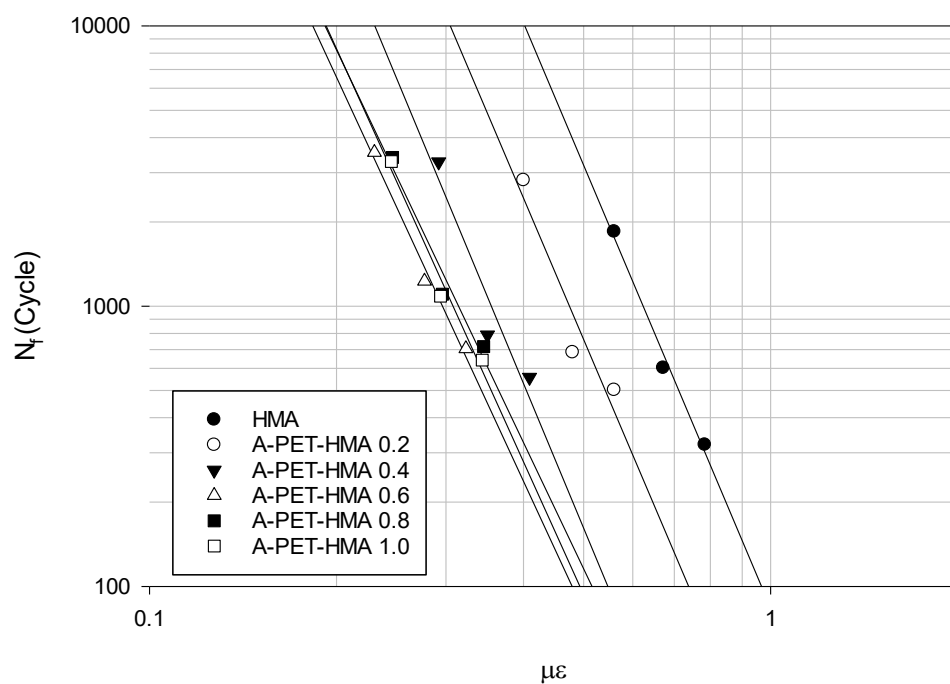
4.6.4 ผลสมการทำนายความเสียหายเนื่องจากการล้า

สมการทำนายความเสียหายเนื่องจากการล้า เป็นไปตามมาตรฐาน BS EN 12697 (2007) แนะนำสมการทำนายความเสียหายเนื่องจากการล้า (Nf) จากความเครียดเริ่มต้น (Initial Tensile Strain) และค่าคงที่ของวัสดุ (Material Constant) ดังสมการที่ (2.27) ซึ่งสามารถใช้ได้กับการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมทั้งแบบควบคุมความเค้นคงที่ (Stress Control) หรือควบคุมความเครียดคงที่ (Strain Control) (Gupta S. and A. Veeraragavan, 2009) รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้า (Nf) และความเครียดดึงเริ่มต้น (me) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีเศษขวด PET ด้วยวิธีการเติมเพิ่ม (Adding) ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยวิธีแบบแห้งต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต และส่วนที่ 2 ศึกษาการใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีการแทนที่ (Replacing) ในมวลรวมละเอียดบางส่วนในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตปริมาณเศษขวด PET ร้อยละ

0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเศษขวด PET ค่าเดียวกัน ความสัมพันธ์ระหว่าง N_f และ m_e เกือบจะกระจายอยู่บนเส้นตรงเดียวกันในความสัมพันธ์แบบ log-log หรืออาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วน RAP/RCA ไม่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่าง N_f และ m_e ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการยกกำลัง (Power Function) ตามสมการที่ (2.28) โดยที่ค่าคงที่ k และ n ของแอสปัลต์คอนกรีตในทุกปริมาณเศษขวด PET แสดงดังตารางที่ 4.8 จะเห็นว่า ค่าคงที่ k และ n เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเศษขวด PET โดยค่าคงที่ k มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ PET เพิ่มขึ้นและมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 หลังจากนั้นค่า k เพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามค่าคงที่ n มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเศษขวด PET เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 หลังจากนั้นค่า k ลดลงตามปริมาณเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.8 สมการและค่าคงที่ของวัสดุ k และ N_f จากความสัมพันธ์ระหว่าง N_f และ $\mu\epsilon$ ที่ปริมาณ PET ต่าง ๆ

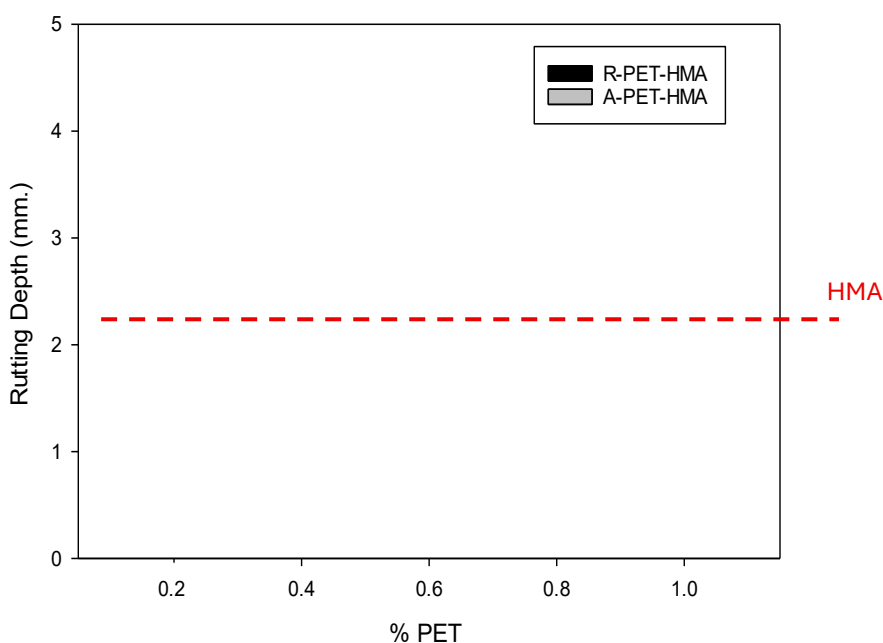
Mixing method	%PET	k	n
HMA	0.0	85.231	-5.196
R-HMA-PET	0.2	20.522	-5.027
	0.4	3.9763	-5.339
	0.6	2.7937	-4.829
	0.8	4.4898	-4.669
	1.0	4.1507	-4.890
A-HMA-PET	0.2	21.497	-5.132
	0.4	5.1228	-4.998
	0.6	2.9088	-4.642
	0.8	3.3497	-4.854
	1.0	3.0130	-4.855



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Fatigue Life

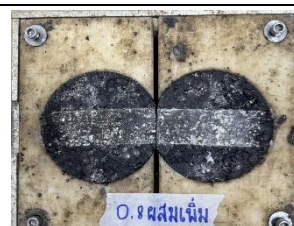
4.6.5 การทดสอบการเกิดร่องล้อ (Rutting Resistance)

ผลการทดสอบสิ้นสุดเมื่อจำนวนวิ่งของล้อทดสอบบนตัวอย่างเท่ากับ 10,000 รอบ หรือเมื่ออ่านค่าความลึกร่องล้อ (Rutting Depth) ได้เท่ากับ 20 มิลลิเมตรจากผลการทดสอบ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ความลึกร่องล้อ (Rut Depth) พบว่า A-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มีค่าความลึกร่องล้อ เท่ากับ 2.99 1.96 1.76 0.42 0.60 และ 1.71 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับ R-PET-HMA มีค่าความลึกร่องล้อ เท่ากับ 2.99 2.74 2.07 1.91 1.95 และ 1.94 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าความลึกร่องล้อมีค่าลดลงตามปริมาณเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าความลึกร่องล้อต่ำสุดที่ปริมาณเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 โดยที่แอสฟัลต์คอนกรีตอัตราส่วน A-PET-HMA มีค่าความลึกร่องล้อที่รอบการทดสอบ 10,000 รอบ เท่ากับ 1.42 มิลลิเมตร และสำหรับอัตราส่วน (R-PET-HMA) มีค่าเท่ากับ 1.91 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.11 อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบร่องล้อของแต่ละอัตราส่วน แสดงให้เห็นถึงค่าการเกิดร่องล้อของ A-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ที่เพิ่มขึ้น น้อยกว่าของ R-PET-HMA อาจเป็นผลมาจากคุณสมบัติของ PET มีความยืดหยุ่นสูงแต่มีความแรงแรงน้อยกว่าวัสดุรวม จึงทำให้มีผลต่อการต้านการเกิดร่องล้อเพียงเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.9 แสดงลักษณะการเกิดร่องล้อเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบการเกิดร่องล้อของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต จะเห็นว่า ความเสียหายจากการเกิดร่องล้อลดลงอย่างชัดเจน



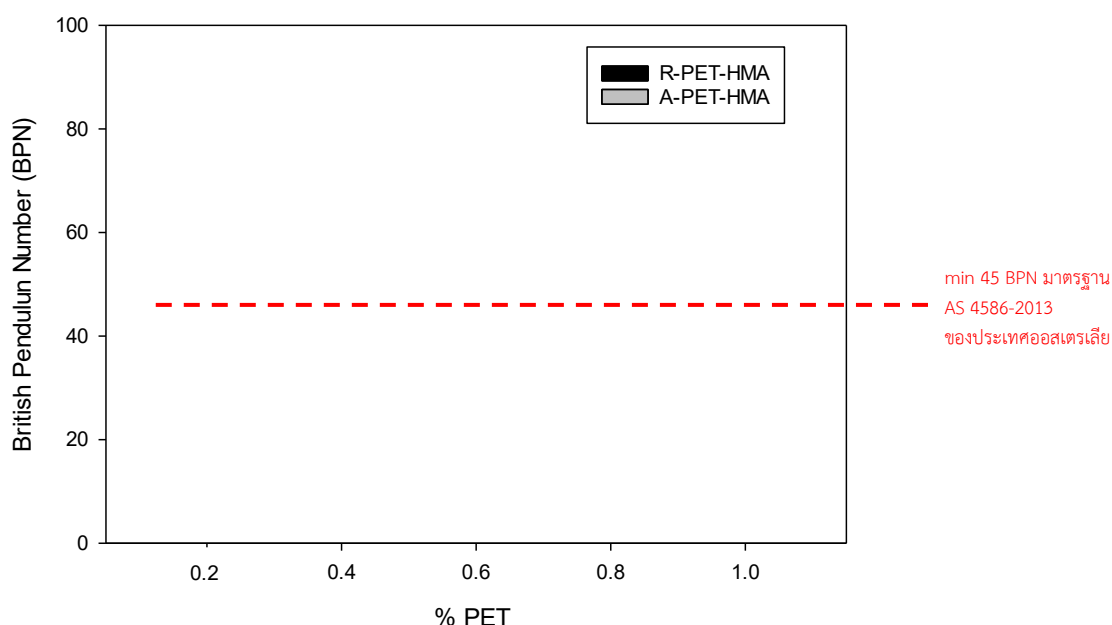
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีต .

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบลักษณะของแอสฟัลต์คอนกรีตหลังการทดสอบการเกิดร่อนล้อ

แอสฟัลต์คอนกรีต	PET (%)	R-PET-HMA	A-PET-HMA
ลักษณะการเกิดร่อนล้อ หลังการทดสอบ	HMA		
	0.2		
	0.4		
	0.6		
	0.8		
	1.0		

4.6.6 การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance) ตามมาตรฐาน ASTM E303

ผลการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถล (British Pendulum Number, BPN) แสดงดังรูปที่ 4.12 พิจารณาในกรณีที่ผสม PET ทั้ง 2 วิธี โดยที่เศษขวด PET ในอัตราส่วน 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มีค่า BPN 59.0 62.0 63.0 63.5 62.0 และ 59.0 ตามลำดับ สำหรับ A-PET-HMA และมีค่า BPN เท่ากับ 59.0 61.0 64.0 64.5 62.0 และ 60.0 ตามลำดับ สำหรับ R-PET-HMA ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองอัตราส่วนผสม มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่า BPN อยู่ในช่วง 59.00 ถึง 64.50 ซึ่งให้เห็นว่า อิทธิพลของเศษขวด PET ในส่วนผสมส่งผลต่อความต้านทานการลื่นไถลเพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบกับมาตรฐาน AS 4586-2013 ของประเทศออสเตรเลียที่แนะนำให้ค่า BPN ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไม่ควรต่ำกว่า 45 พบว่า ค่า BPN ของทุกส่วนผสมผ่านข้อกำหนดดังกล่าว



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance)