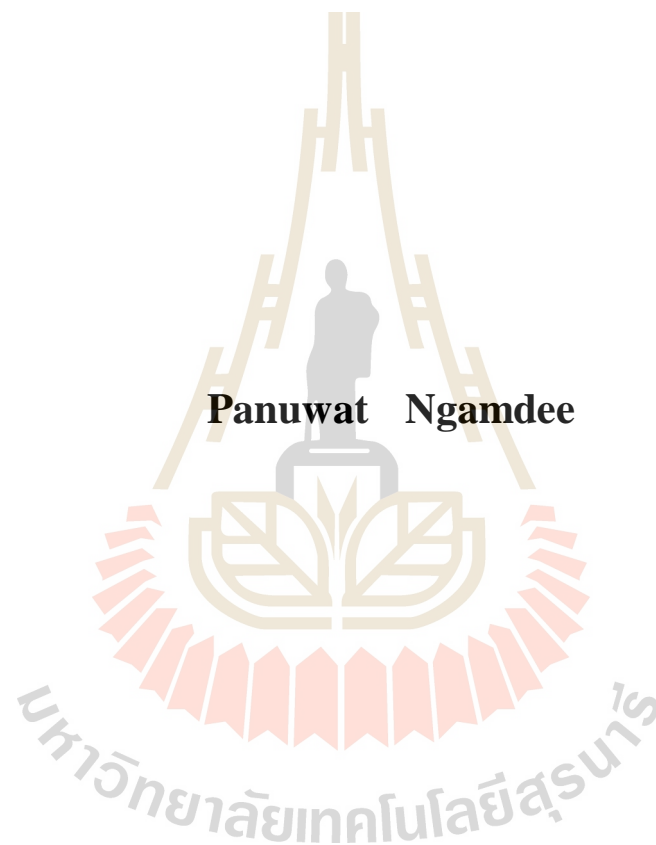


การใช้พลาสติกกรีซเกิดชนิด HDPE และชนิด PET เป็นส่วนผสม
ในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**USING HDPE AND PET RECYCLED PLASTIC IN STONE
MASTIC ASPHALT PAVEMENT**



Panuwat Ngamdee

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Transportation Engineering**


Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

การใช้พลาสติกรีไซเคิลชนิด HDPE และชนิด PET เป็นส่วนผสม
ในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




(ผศ. ดร.รัฐพล ภูบวบผาพันธ์)

ประธานกรรมการ



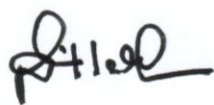
(อ. ดร.ณัฐภรณ์ เจริญธรรม)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ร.อ. ดร.สุทธิพงษ์ มีไชย)

กรรมการ



(ศ. ดร.ตันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาณุวัฒน์ งามดี : การใช้พลาสติกรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นส่วนผสมใน
ผิวทางสโตนมาستيكแอสฟัลต์ (USING HDPE AND PET RECYCLED PLASTIC AS
ADDTIVE IN STONE MASTIC ASPHALT) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ณัฐกรณ์
เจริญธรรม, 138 หน้า.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกแบบส่วนผสมและคุณสมบัติของสโตนมาستيك
แอสฟัลต์ที่ใช้พลาสติกรีไซเคิลชนิด PET และพลาสติกรีไซเคิลชนิด HDPE เป็นส่วนผสม
เปรียบเทียบกับการใช้พอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS พร้อมทั้งศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้พลาสติก
รีไซเคิลแต่ละชนิดเป็นส่วนผสม ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 ผสมด้วย
พลาสติกรีไซเคิลชนิด PET ในปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และการใช้พลาสติกรีไซเคิลชนิด HDPE
ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุเชื่อมประสานในผิวทางสโตนมาستيكแอสฟัลต์ ได้ค่าคุณสมบัติ
เหมาะสมที่สุดตามข้อกำหนดส่วนผสมสโตนมาستيكแอสฟัลต์สำหรับการบดอัดด้วยวิธีมาร์แชลล์
อีกทั้งในขั้นตอนการผสมโดยใช้พลาสติกรีไซเคิลชนิด HDPE มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอน-
มอนอกไซด์ (CO) สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัย ซึ่งอาจส่งผลเสียและเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน



สาขาวิชา วิศวกรรมขนส่ง
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา ภาณุวัฒน์ งามดี
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ณัฐกรณ์

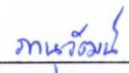
PANUWAT NGAMDEE : USING HDPE AND PET RECYCLED PLASTIC
IN STONE MASTIC ASPHALT PAVEMENT. THESIS ADVISOR :
NATTAPORN CHAROENTHAM, Ph.D, 138 PP.

PLASTIC RECYCLE/MODIFIED ASPHALT/STONE MASTIC ASPHALT

This study aims to investigate the mixture design and engineering properties of Stone Mastic Asphalt (SMA) mixed with polyethylene terephthalate (PET) and high-density polyethylene (HDPE) recycled plastic modified asphalt. Both SMA mixtures were then compared with SMA which was mixed with unmodified asphalt and styrene-butadiene-styrene (SBS) polymer modified asphalt. The optimum contents of HDPE and PET were also determined. The results showed that using 6% of PET and 2% of HDPE by mass as the binders of SMA pavement yielded the optimum engineering properties based on SMA mixture specifications for Marshall hammer compacted designs. Moreover, carbon monoxide (CO) emission from using HDPE recycled plastic modified asphalt in mixing process exceeded the permissible exposure limit that could expose workers to dangerous health and safety conditions.

School of Transportation Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature _____ 

Advisor's Signature _____ 

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ บุคคลต่างๆ รวมไปถึงหน่วยงานราชการและเอกชนที่
ให้คำแนะนำ ปรีกษา และสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้โดยมี

อาจารย์ ดร.ณัฐภรณ์ เจริญธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้การอบรม แนะนำ
ช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนแนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณวันเพ็ญ สืบสาย เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง ที่
ช่วยประสานงานเอกสาร และให้คำปรึกษาแนะนำ

ขอขอบคุณ คุณสวัสดิ์ เกตุสระน้อย เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการห้องทดสอบทางวิศวกรรม 2
(อาคารเครื่องมือ 5) ที่ช่วยประสานงานอุปกรณ์ทดสอบ และให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณสำนักงานทางหลวงที่ 8 (มหาสารคาม), บริษัท เซลล์แห่งประเทศไทย จำกัด,
บริษัท อินโดไชน่า แอสฟัลท์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณส่วนวิเคราะห์และตรวจสอบทางวิศวกรรม สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 5
(นครราชสีมา) รวมไปถึงข้าราชการประจำ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือใน
การใช้อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

ขอขอบคุณสำนักงานทางหลวงที่ 8 (มหาสารคาม) ส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทาง
วิศวกรรม และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือ
ทดสอบ

ท้ายนี้ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงบุคลากร
ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์
และเครื่องมือทดสอบ

ภาณุวัฒน์ งามดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา	3
2 การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แอสฟัลต์คอนกรีต	4
2.2 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall	5
2.3 ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์	7
2.4 วัสดุปรับปรุงคุณภาพ	25
2.5 วิธีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ	29
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำพลาสติกกรีไซ์เคลมาใช้ในผิวทางแอสฟัลต์.....	35
3 การดำเนินการศึกษา	
3.1 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวเชื่อมประสาน.....	45
3.2 การศึกษาตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมรวม	52
3.3 การออกแบบส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์โดยวิธี Marshall	54
3.4 การทดสอบหาแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5	การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมสโตนมาสดิกแอสฟัลต์ที่ใช้พลาสติก รีไซเคิลเป็นสารผสม	57
3.6	วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ	61
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์	
4.1	ผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์	62
4.2	ผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม	75
4.3	ผลการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล	78
4.4	การทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม	79
4.5	การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมสโตนมาสดิกแอสฟัลต์ที่ใช้พลาสติก รีไซเคิลเป็นสารผสม	92
5	สรุปและอภิปรายผลการศึกษา	
5.1	สรุปผลการศึกษา	96
5.2	ข้อเสนอแนะ	97
	รายการอ้างอิง	98
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก	101
	ภาคผนวก ข	108
	ภาคผนวก ค	111
	ภาคผนวก ง	136
	ประวัติผู้เขียน	138

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ขนาดกละของวัสดุมวลรวม9
2.2	มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศเยอรมัน14
2.3	มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของสาธารณรัฐเช็ก15
2.4	มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศเคนมาร์ก16
2.5	มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศฮังการี17
2.6	มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศอิตาลี18
2.7	มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศเนเธอร์แลนด์19
2.8	มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศนอร์เวย์20
2.9	มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศโปรตุเกส21
2.10	มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศสหรัฐอเมริกา22
2.11	มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศนิวซีแลนด์23
2.12	มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศออสเตรเลีย24
2.13	ความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิด26
2.14	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ38
2.15	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย41
2.16	ขนาดกละของ SMA ที่ใช้ในงานวิจัยในประเทศไทย43
2.17	ขนาดกละของ SMA ที่ใช้ในงานวิจัยในประเทศมาเลเซีย44
3.1	รายการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติของตัวเชื่อมประสาน52
3.2	รายการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม54
3.3	รายการเตรียมตัวอย่างเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม56
3.4	ข้อกำหนดอัตราส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์สำหรับการบดอัดโดยวิธีมาร์แชลล์56
3.5	รายการตัวอย่างสำหรับการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์ ที่ใช้พลาสติกกรีซเกิดเป็นสารผสม60
4.1	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบค่าการเจาะทะลุของวัสดุเชื่อมประสาน63
4.2	ผลการทดสอบค่าการยึดตัวเฉลี่ย64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.3 ผลการทดสอบความหนืดเฉลี่ย.....	66
4.4 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวเฉลี่ยของวัสดุเชื่อมประสาน	68
4.5 ผลการทดสอบความยืดหยุ่นกลับเฉลี่ย.....	70
4.6 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบจุดวาบไฟและจุดติดไฟ	71
4.7 ค่าเฉลี่ยการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂) ขณะผสม.....	73
4.8 ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะของมวลรวม.....	75
4.9 ค่าเฉลี่ยความตึกหรือของมวลรวม.....	75
4.10 ค่าครรชนีความแบนเฉลี่ย	75
4.11 ค่าครรชนีความยาวเฉลี่ย.....	76
4.12 ความคงทนต่อการกัดกร่อนเฉลี่ย.....	76
4.13 ค่าเทียบเท่าทรายเฉลี่ย	76
4.14 การออกแบบขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ในการศึกษา	77
4.15 ขนาดคละที่ใช้ในการศึกษา	78
4.16 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ VCAmix, VCA _{drc} และอัตราการใช้มวลรวมแห้งเฉลี่ยของ ตัวเชื่อมประสาน.....	92
4.17 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมโตนมาสดิกแอสฟัลต์	93

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยวิธีการทดสอบแบบ Marshall.....	7
2.2 โครงสร้างผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์.....	8
2.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (ก) กับแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป (ข).....	8
2.4 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ.....	29
2.5 การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูเมน.....	30
2.6 การทดสอบความหนืด โดยใช้วิธี Brook fields.....	30
2.7 การทดสอบความสามารถในการยึดตัว.....	31
2.8 การทดสอบหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์.....	31
2.9 เครื่อง Los Angeles Abrasion.....	32
2.10 อุปกรณ์วัดค่าครรชนีความแบน.....	32
2.11 อุปกรณ์วัดค่าครรชนีความยาว.....	33
2.12 สารละลายที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
2.13 เครื่องมือทดสอบความคงทนของวัสดุมวลรวม.....	34
2.14 อุปกรณ์ทดสอบค่าเทียบเท่าทราย.....	34
2.15 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบขนาดคละของมวลรวม.....	35
3.1 กรอบการดำเนินงานวิจัย.....	45
3.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70.....	46
3.3 AC60/70 หลังจากผสมกับพลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE.....	47
3.4 AC60/70 หลังจากผสมกับพลาสติกกรีไซเคิลชนิด PET.....	47
3.5 AC60/70 หลังจากผสมกับเทอร์โมพลาสติกชนิด SBS.....	48
3.6 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ.....	49
3.7 การทดสอบความสามารถในการยึดตัว.....	49
3.8 การทดสอบความหนืด.....	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.9 การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุเชื่อมประสาน	50
3.10 การทดสอบความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์	51
3.11 การทดสอบจุดวาบไฟและจุดติดไฟ.....	51
3.12 เครื่อง Q-rea plus	52
3.13 วัสดุผสมรวมที่ใช้ในการศึกษา.....	53
3.14 ก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ.....	55
3.15 การทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหล	58
3.16 การทดสอบการไหลแยกตัว	58
3.17 การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม	59
4.1 ค่าการการเจาะทะลุเฉลี่ย	63
4.2 ค่าการยึดตัวเฉลี่ยที่ 5 องศาเซลเซียส.....	65
4.3 ค่าการยึดตัวเฉลี่ยที่ 13 องศาเซลเซียส	65
4.4 ความหนืดเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส.....	67
4.5 ความหนืดเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส.....	67
4.6 จุดอ่อนตัวเฉลี่ยของวัสดุเชื่อมประสาน.....	69
4.7 ความยืดหยุ่นกลับเฉลี่ย	70
4.8 จุดวาบไฟเฉลี่ย	72
4.9 จุดติดไฟเฉลี่ย	72
4.10 ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO).....	74
4.11 ปริมาณการปลดปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂).....	74
4.12 ขนาดคละของมวลรวมแต่ละขนาดที่ใช้ในการศึกษา	77
4.13 ขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ในการศึกษา.....	79
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต	80
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 2%SBS และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต	80
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 4%SBS และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต	81
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 6%SBS และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต	82
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 8%SBS และคุณสมบัติต่างๆของแอสฟัลต์คอนกรีต	83

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 2%PET และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต	84
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 4%PET และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต	85
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 6%PET และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต	86
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 8%PET และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต	87
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 2%HDPE และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์ คอนกรีต	88
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 4%HDPE และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์ คอนกรีต	89
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 6%HDPE และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์ คอนกรีต	90
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 8%HDPE และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์ คอนกรีต	91
4.27 เปรียบเทียบร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม (VMA) ระหว่างชนิดวัสดุเชื่อม ประสาน	93
4.28 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพระหว่างชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	94
4.29 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมระหว่างชนิดของวัสดุเชื่อมประสาน	94
4.30 เปรียบเทียบสัดส่วนกำลังรับแรงดึงระหว่างชนิดของวัสดุเชื่อมประสาน	95

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

LDPE	=	พลาสติกชนิดความหนาแน่นต่ำ
HDPE	=	พลาสติกชนิดความหนาแน่นสูง
PET	=	พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
SBS	=	พอลิเมอร์ชนิด styrene-butadiene-styrene
VCA	=	ร้อยละช่องว่างที่มีแอสฟัลต์ซีเมนต์
VMA	=	ร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม
TSR	=	สัดส่วนความเค้นแรงดึง
IDT	=	กำลังรับแรงดึงทางอ้อม
OAC	=	ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม
TWA	=	ค่าเฉลี่ยของการสัมผัสอันตราย
PPE	=	อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล
V_a	=	ช่องว่างอากาศ
P_s	=	ร้อยละมวลรวมในส่วนผสม
P_{ca}	=	ร้อยละมวลรวมหยาบในส่วนผสมทั้งหมด
G_{mb}	=	bulk specification gravity ของก้อนตัวอย่างภายหลังการบดอัด
G_{mm}	=	theoretical maximum density ของส่วนผสม
G_{sb}	=	bulk specific gravity ของมวลรวมทั้งหมด
G_{ca}	=	bulk specific gravity ของมวลรวมหยาบ
γ_s	=	unit weight ของมวลรวมส่วนหยาบที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4, kg/m^3 (AASHTO T19)
γ_w	=	unit weight ของน้ำ (998 kg/m^3)
S_{tm}	=	ค่าเฉลี่ยของ tensile stress ในสถานะเปียก
S_{td}	=	ค่าเฉลี่ยของ tensile stress ในสถานะแห้ง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ข้อมูลในปัจจุบันจากกรมทางหลวงเมื่อปี 2558 พบว่าร้อยละ 92.19 ของผิวทางในประเทศไทยเป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากผิวทางแอสฟัลต์ใช้เวลาในการก่อสร้างน้อย ซ่อมแซมง่าย และมีพื้นผิวเรียบไม่มีรอยต่อ ซึ่งผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีหลายชนิดสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสภาพการจราจร ทั้งน้ำหนักบรรทุกและปริมาณการจราจรตลอดจนความเร็วในการขับขี่ โดยการเลือกใช้ผิวทางที่มีความต้านทานต่อการเกิดความเสียหาย ได้แก่ การเกิดร่องล้อ (Rutting) การเกิดรอยแตก (Cracking) ได้ดี จะช่วยให้ผู้ใช้บริการได้รับความสะดวกสบายและมีความปลอดภัยในการคมนาคมขนส่ง

ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) เป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนชนิดหนึ่งที่มีการจัดเรียงตัวกันของมวลรวมแบบ Gap Graded ที่มีขนาดกะของมวลรวมใหญ่และเล็กกะกันแตกต่างจากแอสฟัลต์คอนกรีตแบบทั่วไปที่มีการจัดเรียงตัวของมวลรวมแบบ Dense Graded ซึ่งมีขนาดกะของมวลรวมขนาดใหญ่ กลาง และขนาดเล็กกะกันดีทุกขนาด ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์มีคุณสมบัติที่ดีกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแบบทั่วไปทั้งทางด้านเสถียรภาพ ความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อ (Rut-Resistance) ความต้านทานต่อการเกิดรอยแตก (Cracking) และการที่มีสภาพผิวที่หยาบกว่าจึงทำให้มีความต้านทานการลื่นไถล (Skidding Resistance) ได้ดีกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแบบทั่วไป

ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ประกอบด้วยมวลรวมขนาดหยาบ มวลรวมละเอียด สารผสมแทรก (filler) แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) และวัสดุปรับปรุงคุณภาพ (Stabilizing Agent) โดยโครงสร้างผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์จะมีมวลรวมหยาบเป็นส่วนประกอบประมาณ 70-80% จัดเรียงตัวกันแบบ stone on stone ทำให้มีความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อได้ดี ในขณะที่โครงสร้างแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไปจะมีมวลรวมหยาบเพียงเล็กน้อย อีกทั้งการออกแบบส่วนผสมผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ยังต้องการใช้แอสฟัลต์ในปริมาณที่สูง (ประมาณ 6%) อย่างไรก็ตามปัญหาหลักในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ก็คือการไหลแยกตัว (Drain Down) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์จากโครงสร้างของมวลรวม ซึ่งการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีความหนืดสูงจะช่วยลดโอกาสเกิดการไหลแยกตัวและยังช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดร่องล้อที่อุณหภูมิสูงได้ด้วย แต่การใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์

มีความหนืดสูงจะทำให้เกิดปัญหาแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal cracking) จากปัญหาดังกล่าวในการออกแบบส่วนผสมโตนมาสติกแอสฟัลต์จึงนิยมใช้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (Polymer Modified Asphalt) เป็นส่วนผสม ซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาการเกิดการไหลแยกตัวในแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ โดยการใช้พอลิเมอร์เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพในแอสฟัลต์ซีเมนต์จะช่วยเพิ่มค่าความต้านทานต่อแรงกระทำ (stiffness) ที่อุณหภูมิสูงและลดความต้านทานต่อแรงกระทำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

ในการใช้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์เป็นส่วนประกอบในผิวทางสโตนมาสติก ส่งผลให้ผิวทางมีต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุที่มีราคาแพง จึงทำให้ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์มีต้นทุนการผลิตสูงกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแบบทั่วไปประมาณ 20-25% สำหรับทางเลือกในการลดต้นทุนการผลิตผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์มีหลายทางเลือก เช่น การใช้พอลิเมอร์ที่มีราคาถูก, การนำพอลิเมอร์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ในงานทางมีหลายชนิด เช่น Low density polyethylene (LDPE), High Density Polyethylene (HDPE), Polyethylene Terephthalate (PET) เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการนำพลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE และชนิด PET มาเป็นส่วนผสมในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับการนำพลาสติกใหม่ชนิด Styrene Butadiene Styrene (SBS) มาเป็นส่วนผสม

1.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์โดยใช้พลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE และชนิด PET เป็นส่วนผสม

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์โดยใช้พลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE และชนิด PET เป็นส่วนผสมเปรียบเทียบกับการใช้พลาสติกใหม่ชนิด (SBS)

1.2.3 เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้พลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE และชนิด PET ในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้จะศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของผิวทางที่มีอัตราส่วนผสมของพลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE และชนิด PET กับพลาสติกใหม่ชนิด Styrene Butadiene Styrene (SBS) ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ 2%, 4%, 6% และ 8% โดยจะทดสอบค่าความเสถียรภาพ (Stability) ค่าการไหล (Flow) ค่าช่องว่างอากาศ (Air void) ค่าช่องว่างของวัสดุรวมรวม (Void in mineral) ค่าการไหล

แยกตัว (Drain Down) และค่าแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test) ทั้งในสถานะเปียกและสถานะแห้ง โดยการศึกษานี้จะใช้มวลรวมชนิดหินปูน (Limestone) เป็นส่วนผสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

1.4.1 ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติด้านต่างๆของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) ที่ใช้พลาสติกกรีซเคลิชนิด HDPE และชนิด PET เป็นวัสดุผสมเพิ่ม

1.4.2 ทำให้สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆ ของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) ที่ใช้พลาสติกกรีซเคลิชนิด HDPE และชนิด PET เป็นวัสดุผสมเพิ่มกับพลาสติกใหม่ชนิด Styrene Butadiene Styrene (SBS)

1.4.3 ทำให้ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสม จากการใช้พลาสติกกรีซเคลิชนิด HDPE และชนิด PET เป็นส่วนผสมเพิ่ม

1.4.4 ทำให้ทราบแนวทางในการศึกษาคุณสมบัติของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) เมื่อใช้มวลรวมชนิดหินปูน (Limestone) และใช้พลาสติกกรีซเคลิชนิด HDPE และชนิด PET เป็นวัสดุผสมเพิ่ม ต่อไปในอนาคต



บทที่ 2

การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบระหว่างการนำพลาสติกกรีซเคลิซชนิด HDPE และชนิด PET มาใช้กับพลาสติกใหม่ชนิด Styrene Butadiene Styrene (SBS) มาใช้ในส่วนผสมของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) เพื่อหาปริมาณของส่วนผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสม ในบทนี้เป็น การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. แอสฟัลต์คอนกรีต
2. การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์
3. ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA)
4. วัสดุปรับปรุงคุณภาพ
5. วิธีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ
 - 5.1 วิธีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเชื่อมประสาน
 - 5.2 วิธีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำพลาสติกกรีซเคลิซมาใช้ในผิวทางแอสฟัลต์

2.1 แอสฟัลต์คอนกรีต

แอสฟัลต์คอนกรีต คือ วัสดุผสมที่ได้จากการผสมร่อนระหว่างวัสดุมวลรวม (Aggregate) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) โดยมีการควบคุมอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิตามที่กำหนด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง งานบูรณะและงานบำรุงทาง ในการผสมแอสฟัลต์ส่วนหนึ่งจะถูกดูดซึมเข้าไปในเม็ดวัสดุมวลรวม (Absorbed Asphalt) ในขณะที่แอสฟัลต์ส่วนที่เหลือซึ่งเรียกว่า แอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (Effective Asphalt) จะทำหน้าที่เคลือบผิวเม็ดวัสดุมวลรวม

คุณสมบัติที่สำคัญของการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

1. ความหนาแน่น (Density) คือ ปริมาณมวลของแอสฟัลต์คอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่อแอสฟัลต์คอนกรีตมีความหนาแน่นมาก จะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรงคงทนและมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น
2. ความเสถียรภาพ (Stability) คือ ความสามารถของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในการต้านทานการเสียดรู่ปร่าง จากน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำ ถนนที่มีเสถียรภาพต่ำจะมีโอกาสเกิดความเสียหายชนิดร่องล้อ (rutting) ได้ง่าย

3. ความยืดหยุ่น (Flexibility) คือ ความสามารถในการปรับตัวตามการทรุดตัว และการเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ ของชั้นทาง โดยทั่วไปเมื่อใช้ปริมาณแอสฟัลต์มากในการออกแบบวัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีตจะมีความยืดหยุ่นมากขึ้นด้วย

4. ความคงทน (Durability) คือ คุณสมบัติที่สามารถต้านทานการเสียหายเนื่องจากสภาพดิน, ฟ้า, อากาศและการจราจร ซึ่งสภาพดิน, ฟ้า, อากาศ จะมีผลต่อคุณลักษณะของแอสฟัลต์ จะมีผลต่อโครงสร้างถนนและมวลรวม

5. ความต้านทานความล้า (Fatigue Resistance) คือ ความสามารถในการต้านทานการแอ่นตัว ซึ่งเกิดจากการบดทับของน้ำหนักบรรทุกของการจราจร เมื่อเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์จะทำให้ความต้านทานความล้าเพิ่มขึ้นด้วย

6. ความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance) คือ ความสามารถในการต้านทานการลื่นไถล โดยเฉพาะเมื่อผิวถนนเปียก วัสดุผสมที่มีปริมาณแอสฟัลต์มากจะทำให้เกิดการเยิ้ม (Bleeding) ซึ่งการเยิ้มนี้อาจทำให้เกิดการลื่นไถลเมื่อถนนเปียก

7. การซึมผ่านไม่ได้ (Impermeability) คือ ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของอากาศและน้ำไม่ให้เข้าไปในโครงสร้างถนน ปริมาณโพรงอากาศเป็นตัวชี้วัดความไวของน้ำและอากาศที่ซึมผ่านได้ ความซึมผ่านไม่ได้มีความสำคัญอย่างมากในแง่ความคงทนของผิวจราจร

2.1.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) เป็นวัสดุที่มีความหนืดสูง ประกอบด้วยโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่ซับซ้อน และอะตอมอื่นๆ เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) แอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งต้องใช้ความร้อนประมาณ 140-150 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิลดลงแอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีความหนืดสูงขึ้นทำให้เป็นวัสดุประสานและยึดเกาะวัสดุต่างๆ ได้ดี แบ่งเป็นเกรดต่างๆ ตามค่าเพนิเทรชันเป็น 6 เกรด คือ 40-50, 50-60, 60-70, 80-100, 120-150 และ 200-300

คุณสมบัติที่สำคัญของการออกแบบแอสฟัลต์ซีเมนต์

1. สามารถเกาะรวมกับวัสดุผสมได้ทันทีเมื่อได้รับความร้อน
2. ป้องกันการซึมน้ำได้ดี
3. มีความทนทานต่อลม แสงแดด ความเป็นกรด-ด่าง เกลือและสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี
4. มีความยืดหยุ่นและทนทานต่อแรงกด แรงสั่นสะเทือนได้ดี

2.2 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall (ASTM D1559)

การเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall จะทำการบดอัดส่วนผสม โดยใช้จำนวนครั้งของการบดอัดก่อนตัวอย่างแต่ละด้าน (no. of blows) ตามเกณฑ์เทียบเท่าที่ปริมาณ

การจราจรสูง (heavy traffic criteria) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานวิธีทดสอบ ทล.-ท.604/2517 ของกรมทางหลวง “วิธีการทดลองแอสฟัลต์ติกคอนกรีต โดยวิธี Marshall” (เทียบเท่า ASTM D-1559) โดยใช้แบบหล่อ (Mold) ขนาด 4 นิ้ว หรือ 101.6 มิลลิเมตร เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (optimum asphalt content) ที่ค่าร้อยละช่องว่างของอากาศ (air void) เท่ากับ 4 รวมทั้งพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ unit weight, Marshall stability/flow, ร้อยละช่องว่างที่มีแอสฟัลต์ซีเมนต์ (voids filled with asphalt cement, VCA) และร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (voids in mineral aggregate, VMA)

การบดอัดและทดสอบคุณสมบัติตามวิธี Marshall นั้น เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (optimum asphalt content) และพิจารณาว่าวัสดุเชื่อมประสานดังกล่าวเมื่อนำไปเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแล้ว สามารถผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดและนำไปใช้งานจริงได้ในประเทศไทย ซึ่งในปัจจุบันใช้วิธีมาร์แชลล์สำหรับการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

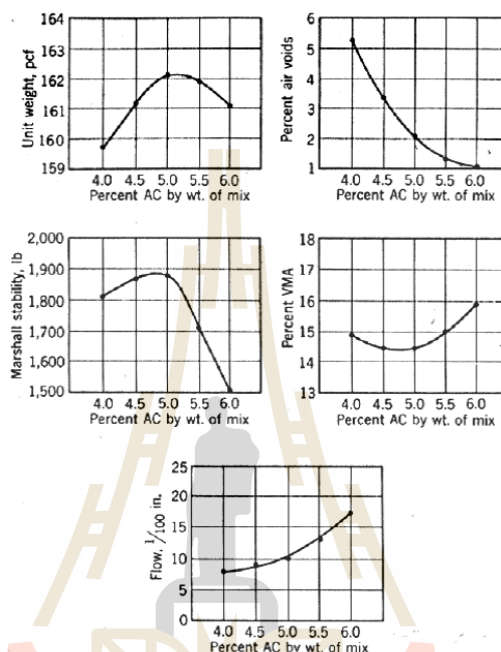
การหาปริมาณแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสม (optimum asphalt content) จะแบ่งชุดตัวอย่างการทดสอบออกเป็นหลายๆ ชุด โดยแต่ละชุดจะมีปริมาณแอสฟัลต์ที่แตกต่างกัน สำหรับการทดสอบจะให้ชุดตัวอย่างทดสอบมีปริมาณแอสฟัลต์ที่ต่างกัน โดยเพิ่มครั้งละ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้จะต่ำกว่าค่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมอย่างน้อย 2 ค่า และสูงกว่าค่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมอย่างน้อย 2 ค่า โดยจะทำการทดสอบก่อนตัวอย่าง 3 ก่อนต่อหนึ่งค่าปริมาณแอสฟัลต์ การศึกษาการออกแบบส่วนผสมร้อนทั่วไปจะใช้ปริมาณแอสฟัลต์ที่ต่างกัน 5 ค่า ดังนั้นจะต้องทำก่อนตัวอย่าง อย่างน้อย 15 ตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ และก่อนตัวอย่างแต่ละก้อนจะมีน้ำหนักประมาณ 1200 กรัม

เมื่อทราบผลการทดสอบ สามารถนำไปเขียนกราฟได้โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอสฟัลต์กับความหนาแน่น การไหล เสถียรภาพ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ และเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.1 และพิจารณาความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้

1. เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ (air voids) จะลดลง เมื่อปริมาณแอสฟัลต์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้นนั้นเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างแทนที่อากาศ
2. ความหนาแน่น (density) จะเพิ่มสูงขึ้นในตอนแรก เนื่องจากความเหลวในแอสฟัลต์ทำให้อนุภาคต่างๆ ในส่วนผสมสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว จนถึงจุดที่ความหนาแน่นสูงสุด หลังจากนั้นความหนาแน่นจะเริ่มลดลงเนื่องจากแอสฟัลต์ที่เบากว่าได้เข้ามาแทรกมวลรวมในบางส่วนส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคมีระยะที่ห่างออกไป
3. การไหล (flow) จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแอสฟัลต์ที่เพิ่มสูงขึ้น

4. เสถียรภาพ (stability) เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นจึงมีลักษณะที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อถึงจุดหนึ่งเสถียรภาพจะเริ่มลดลง

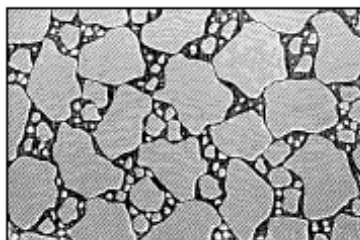
5. เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Void in Mineral Aggregate, VMA) จะลดลงจนถึงจุดหนึ่งแล้วจะเพิ่มสูงขึ้น มีลักษณะตรงข้ามกับกราฟของความหนาแน่น



รูปที่ 2.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยวิธีการทดสอบแบบ Marshall
ที่มา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา (2559)

2.3 ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA)

ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) เป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมร้อนชนิดหนึ่ง ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของผิวทาง SMA ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างของมวลรวมหยาบ (coarse aggregate skeleton) เป็นโครงสร้างที่มีความสำคัญอย่างมากในการทำหน้าที่ส่งผ่านแรงหรือถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากการจราจรลงสู่ชั้นโครงสร้างทาง โดยจะส่งผ่านแรงหรือน้ำหนักระหว่างมวลรวมหยาบด้วยกัน ก้อนต่อก้อนที่อยู่ติดกันหรือสัมผัสกัน ที่เรียกว่า stone-on-stone contact ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผิวทางสโตนมาสต์คิกแอสฟัลต์ (SMA)

ที่มา: พรหมมา เทพศรีหา (2558)

อีกส่วนหนึ่งคือ มอตาร์ จะทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานเพื่อให้โครงสร้างมีเสถียรภาพสูง ซึ่งประกอบไปด้วย แอสฟัลต์ซีเมนต์ วัสดุผสมแทรก และ (stabilizing agent) ซึ่งส่วนประกอบดังกล่าวจะส่งผลให้ผิวทางสโตนมาสต์คิกแอสฟัลต์ (SMA) มีคุณสมบัติที่ดี และมีประสิทธิภาพในการใช้งาน ลักษณะโครงสร้างส่วนผสมของผิวทางสโตนมาสต์คิกแอสฟัลต์ (SMA) เมื่อเปรียบเทียบกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไปจะมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 2.3



ก) Stone Mastic Asphalt (SMA)

ข) Conventional Hot Mix Asphalt

รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างผิวทางสโตนมาสต์คิกแอสฟัลต์ (ก) กับแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป (ข)

ที่มา: พรหมมา เทพศรีหา (2558)

2.3.1 วัสดุที่ใช้ในผิวทางสโตนมาสต์คิกแอสฟัลต์

ผิวทางสโตนมาสต์คิกแอสฟัลต์ประกอบด้วย มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด วัสดุผสมแทรก (filler) แอสฟัลต์ซีเมนต์ และวัสดุปรับปรุงคุณภาพ (stabilizing agent) ซึ่งปกติผิวทางสโตนมาสต์คิกแอสฟัลต์มีค่าการสึกหรอต่ำกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแบบทั่วไป เนื่องจากผิวทางสโตนมาสต์คิกแอสฟัลต์มีโครงสร้างแบบ stone on stone ซึ่งการถ่ายแรงระหว่างมวลรวมทำให้เกิด

ความเครียด (stress) ภายใต้แรงกระทำจากกระแสจราจรสูง โดยทั่วไปค่าการสึกหรอของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์จะมีค่าประมาณ 30%

ขนาดผล โดยทั่วไปของส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์แสดงดังตารางที่ 2.1 โดยมี 20-28% ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 mm และ 8-10% ของมวลรวมที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 mm ซึ่งสัดส่วนของมวลรวมที่ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 mm มีผลต่อโครงสร้างแบบ stone-on-stone content และเป็นปัจจัยที่ทำให้ส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์มีค่า VMA เป็นไปตามค่าที่กำหนด (มากกว่าหรือเท่ากับ 17%) โดยสัดส่วนของมวลรวมที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 mm จะมีผลต่อความต้านทานการเกิดร่องล้อของผิวทาง และช่วยป้องกันการเกิด draindown ในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้าง

ตารางที่ 2.1 ขนาดผลของวัสดุมวลรวม

Sieve Designation	Percent Passing
19.0 mm (3/4 นิ้ว)	100
12.5 mm (1/2 นิ้ว)	85-95
9.5 mm (3/8 นิ้ว)	75 maximum
4.75 mm (#4)	20-28
2.36 mm (#8)	16-24
0.6 mm (#30)	12-16
0.3 mm (#50)	12-15
0.075 mm (#200)	8-10
0.020 mm (pan)	Less than 3

ที่มา: Freddy L. Roberts. (1996)

ปัญหาที่เกิดขึ้นในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ก็คือ การไหลแยกตัว (drain down) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์จากโครงสร้างของมวลรวม ซึ่งการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีความหนืดสูงจะช่วยลดโอกาสเกิดการไหลแยกตัวและยังช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดร่องล้อที่อุณหภูมิสูงได้ด้วย แต่การใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีความหนืดสูงจะทำให้เกิดปัญหาแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal cracking) จากปัญหาดังกล่าว ในการออกแบบส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์จึงนิยมใช้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (polymer modified asphalt) เป็นส่วนผสม ซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาการเกิดการไหลแยกตัวในแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ โดยการใช้พอลิเมอร์เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพในแอสฟัลต์ซีเมนต์จะช่วยเพิ่มค่าความต้านทานต่อแรงกระทำ (stiffness) ที่อุณหภูมิสูงและลดความต้านทานต่อแรงกระทำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

2.3.2 การออกแบบส่วนผสมผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์

ในการออกแบบผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ มวลรวมมีความสำคัญต่อผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์เป็นอย่างมาก เนื่องจากหลักการของสโตนมาสติกแอสฟัลต์คือ การถ่ายน้ำหนักจากมวลรวมขนาดใหญ่ไปยังมวลรวมขนาดเล็กที่สัมผัสกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งถือเป็นโครงสร้างหลักที่สำคัญของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ ดังนั้นมวลรวมจะต้องมีความแข็งแรงเป็นพิเศษ มวลรวมที่ดีนั้นจะต้องมีค่าช่องว่างของมวลรวมหยาบ (voids in the coarse aggregate fraction, VCA) ตามมาตรฐานที่กำหนด โดยค่าช่องว่างของมวลรวมหยาบ (VCA) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_a = 100 \times \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (2.1)$$

$$VMA = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times P_s \right) \quad (2.2)$$

$$VCA_{mix} = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{ca}} \times P_{ca} \right) \quad (2.3)$$

โดยที่

P_s = ร้อยละมวลรวมในส่วนผสม

P_{ca} = ร้อยละมวลรวมหยาบในส่วนผสมทั้งหมด

G_{mb} = bulk specification gravity ของก้อนตัวอย่างภายหลังการบดอัด

G_{mm} = theoretical maximum density ของส่วนผสม

G_{sb} = bulk specific gravity ของมวลรวมทั้งหมด

G_{ca} = bulk specific gravity ของมวลรวมหยาบ

โดยที่กำหนดให้มีช่องว่างอากาศอยู่ระหว่าง 3-4% และสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (VMA) ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 17% อีกทั้งเพื่อให้ได้โครงสร้างของมวลรวมเป็นแบบ stone-on-stone contact อีกทั้งร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมส่วนหยาบของก้อนตัวอย่างภายหลังการบดอัด (VCA_{mix}) จะต้องมีค่าน้อยกว่าร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมส่วนหยาบในการทดสอบ dry-rodded test (dry-rodded voids in coarse aggregate fraction, VCA_{DRC}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$VCA_{DRC} = \frac{G_{ca}\gamma_w - \gamma_s}{G_{ca}\gamma_w} \quad (2.4)$$

โดยที่

G_{ca} = bulk specific gravity ของมวลหยาบ (AASHTO T85)

γ_s = unit weight ของมวลรวมส่วนหยาบที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4, kg/m^3 (AASHTO T19)

γ_w = unit weight ของน้ำ (998 kg/m^3)

การรักษาโครงสร้างมวลรวมในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ให้คงสภาพ stone-on-stone contact นั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมาก จะทำได้โดยการกำหนดค่าช่องว่างในส่วนของมวลรวมหยาบ (VCA in the Coarse Aggregate Fraction) และทำการทดสอบหาค่าช่องว่างในส่วนผสมที่บดอัดแล้ว ซึ่งค่า VCA_{mix} ที่ได้จะต้องมีค่าน้อยกว่าค่า VCA_{DRC} เมื่อส่วนผสมมีค่า VCA มาก แสดงว่ามวลรวมหยาบในตัวอย่างมีการบดอัดที่ดี และค่า VCA จะลดลงเมื่อลดปริมาณมวลรวมละเอียด ซึ่งถ้าลดปริมาณมวลรวมละเอียดลง จะทำให้ค่า VMA เพิ่มขึ้นและค่า VCA ลดลง

ส่วนของมวลรวมหยาบหมายถึง ส่วนของมวลรวมทั้งหมดที่ค้ำตะแกรงขนาดที่เรียกว่า Break Sieve ซึ่งขนาดตะแกรงดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับขนาดใหญ่สุดของมวลรวมในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์นั้นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลรวมที่ผ่าน break sieve มาก การที่มวลรวมผ่าน break sieve มากเกินไปจะทำให้ไม่สามารถคงสภาพโครงสร้างแบบ stone-on-stone contact ได้ ดังนั้นการควบคุมปริมาณมวลรวมที่ผ่าน Break sieve ให้อยู่ในช่วงกำหนด จึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก ยกตัวอย่างเช่น ในการออกแบบผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ขนาด 25 mm นั้นส่วนของมวลรวมหยาบคือส่วนของวัสดุมวลรวมทั้งหมดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 mm)

2.3.3 การก่อสร้างผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์

การผสมผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์มีความแตกต่างจากการผสมผิวทางแอสฟัลต์แบบทั่วไปเล็กน้อย นั่นคือการใช้สารผสมเพิ่มด้วยปริมาณ 3-5% โดยส่วนมากจะไม่กำหนดชนิดสารผสมเพิ่มจะขึ้นอยู่กับแต่ละการผลิต

ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์จะมีความแข็งแรงมากกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป แต่จะใช้อุณหภูมิการผสมสูงกว่าและใช้เวลานานกว่า เป็นเหตุผลหลักในการใช้สารผสมแทรกโมดิไฟเออร์แอสฟัลต์ และไฟเบอร์ ในการใส่พอลิเมอร์เป็นส่วนผสมจะต้องผสมพอลิเมอร์กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ก่อนที่จะนำไปใช้ แต่จะติดปัญหาเรื่องของการเก็บรักษา เนื่องจากอุณหภูมิและ

ความสามารถในการผสมสำหรับการใส่ไฟเบอร์เป็นส่วนผสมจะต้องควบคุมอย่างใกล้ชิด แม้ว่าจะผสมในอัตราส่วนที่น้อย เนื่องจากไฟเบอร์มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของส่วนผสม

การบดอัดผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์มีความคล้ายคลึงกับผิวทางแอสฟัลต์แบบทั่วไป แต่ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ผสมยากกว่าเพราะมีมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ผสมอยู่มากกว่าจากการก่อสร้างพบว่าผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์สร้างยากในกรณีที่ต้องสร้างในพื้นที่ที่มีความยาวมาก แต่จากประสบการณ์ของพรหมมา เทพศรีหา จะมีระยะเวลาการก่อสร้างที่เหมาะสม การไหลแยกตัว (Drain Down) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์จะไม่เกิดขึ้นหากผสมส่วนผสมตามที่ออกแบบไว้ (พรหมมา เทพศรีหา (2558))

รถบดต้นสะเก็อนจะต้องบดหลังจากการบดอัดทันที เนื่องจากผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์จะเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้การบดอัดทำได้ยากเมื่อส่วนผสมเย็น ลูกกลิ้งแบบยางไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการบดอัดผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์เนื่องจากส่วนผสมจะติดกับยาง และในการผสมผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์จะมีช่องว่างในอากาศประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์

การออกแบบส่วนผสมผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) ในแต่ละประเทศมีขั้นตอนหรือการทดสอบคุณสมบัติวัสดุที่คล้ายกัน แต่จะมีมาตรฐานที่แตกต่างกันไปตามความเหมาะสมกับสภาพวัสดุ สภาพแวดล้อม และภูมิอากาศของแต่ละประเทศ เช่น ในแถบยุโรป แถบอเมริกา ต่างก็จัดทำมาตรฐานเป็นของตนเอง สำหรับในสหรัฐอเมริกาได้มีมาตรฐานของ National Asphalt Pavement Association (NAPA) ส่วนในแถบยุโรปมีมาตรฐานของประเทศต่างๆ เช่น เยอรมัน ฝรั่งเศส เดนมาร์ก

สำหรับในประเทศไทย ได้ทำการออกแบบโดยวิธี Marshall โดยใช้การบดอัด 50 ครั้งต่อด้าน และ Strength Index เหมือนการออกแบบ Job Mix Formula เช่นเดียวกับงานแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป (พรหมมา เทพศรีหา (2558))

2.3.4 พฤติภาพที่สำคัญของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์

ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์สามารถต้านทานการเกิดร่องล้อบนถนนที่มีปริมาณจราจรสูงได้ดี และผิวทางชนิดนี้มีเสถียรภาพและความทนทานมากกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแบบทั่วไป

2.3.5 ข้อกำหนดและมาตรฐานวัสดุผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์

European Asphalt Pavement Association (1998) กล่าวถึงการพัฒนาผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) ในระหว่างปี ค.ศ. 1960 ถึง ค.ศ. 1968 (พ.ศ. 2503-2511) กระทรวงคมนาคม ประเทศเยอรมัน ได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาหารอยร่องล้อที่เกิดจากล้อรถชนิด Studded Snow Tires การแก้ไขปัญหาในระยะแรกมีชื่อเรียกว่า Mastic Treatments ซึ่งประกอบด้วย Mastic กบหินขนาด 5-8 มิลลิเมตรในส่วนของ Mastic ประกอบด้วยหินฝุ่นขนาด #200 ประมาณ 0-2% วิธีการทำ

Mastic Treatments คือ ผสม Mastic แบบชนิดผสมร้อนที่โรงงานผสมแล้วลาดลงบนผิวทางเดิม จากนั้นโรยหินขนาด 5-8 มิลลิเมตร ร้อยละ 70 (โดยน้ำหนัก) แต่เนื่องจากวิธีการทำ Mastic Treatments ต้องใช้จ่ายสูง และสภาพผิวทางจะมีอัตราส่วนผสมที่ไม่สม่ำเสมอ (Inhomogeneous) เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว จึงพัฒนาวิธีการโดยใช้โรงงานผสมและเครื่องจักรปูลาดส่วนผสมที่ได้มาตรฐานเข้ามาแทนแรงงานมนุษย์ ในการผลิตส่วนผสมจะทำการผสมหินขนาด 5-8 มิลลิเมตร เข้ากับส่วนประกอบของ Mastic เข้าด้วยกันที่โรงงานผสม และลาดส่วนผสมด้วยเครื่องจักร Paver ผิวทางที่ได้พัฒนาขึ้นตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะเรียกว่า สโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) และได้ทำการพัฒนาแบบส่วนผสม จนสามารถจัดทำเป็นมาตรฐานในปี ค.ศ.1996 (พ.ศ.2539) โดยจัดแบ่งชนิดผิวทางเป็น 4 ชนิด ตามตารางที่ 2.2 มวลรวมต้องเป็นหินที่มีคุณภาพสูง และต้องใช้ Cellulose Fiber เพื่อทำหน้าที่ Drainage Inhibitor ประมาณ 0.3 -1.5% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้

ต่อมาในแต่ละประเทศได้ทำการจัดทำมาตรฐานของแต่ละประเทศโดยจะมีความคล้ายคลึงกับในแต่ละทวีป โดยมีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดคละและความหนาของชั้นผิวทาง เป็นต้น มาตรฐานของประเทศต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2 ถึงตารางที่ 2.12

คุณสมบัติของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์

ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) มีคุณสมบัติในการใช้งานที่ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) มีเสถียรภาพและความคงทนสูง (High Stability and Durability) เนื่องจากผิวทางชนิดนี้ใช้มอดิไฟเออร์แอสฟัลต์ซีเมนต์ และใช้มวลรวมหยาบที่มีคุณภาพสูงในปริมาณมากกว่า จึงมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร เช่นการเกิดร่องล้อ (Rutting) ได้ดีกว่าผิวทางแอสฟัลต์แบบ Dense Graded HMA ทั่วไป, มีความต้านทานต่อการเกิดรอยแตก (Cracking) และลดการหลุดล่อน (Raveling) ของผิวทางได้มากกว่า จึงลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาผิวทางทำให้ผิวทางมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

- ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) มีความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid Resistance) ดี เนื่องจากผิวทางชนิดนี้จะเลือกใช้มวลรวมที่มีคุณภาพสูง มีความแข็งแรงแทนทาน และใช้มวลรวมหยาบในปริมาณที่มาก จึงสามารถลดการสึกหรอจากการถูกขัดสีของมวลรวม มีความต้านทานการลื่นไถลได้ดี มีความปลอดภัยในการขับขี่สูงแม้ในขณะที่ผิวทางอยู่ในสภาวะเปียกเนื่องจากฝนตก

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศเยอรมัน

SMA	0/11S ^a	0/8S ^a	0/8	0/5
Mineral Aggregate (mm)	Crushed Aggregate. Crushed Sand. Manufactured Filler	Crushed Aggregate. Crushed Sand. Manufactured Filler	Crushed Aggregate. Crushed & Natural Sand, Manufactured Filler	Crushed Aggregate. Crushed & Natural Sand, Manufactured Filler
>11.2 mm	≤ 10	-	-	-
>8.0 mm	≥ 40	≤ 10	≤ 10	-
>5.0 mm	60-70	55-70	45-70	≤ 10
>2.0 mm	75-80	75-80	70-80	60-70
<90 μm	9-13	10-13	8-13	8-13
Binder type	B 65 (PmB 45)	B 65 (PmB 45)	B 80	B 80 (B200)
Binder Contact ^b	≥ 6.5 (6.95)	≥ 7.0 (7.53)	≥ 7.0 (7.53)	≥ 7.2 (7.75)
Type Testing Requirement (Mashall Specimen) : Void Content,%(V/V)	3.0-4.0	3.0-4.0	2.0-4.0	2.0-4.0
Layer Thickness, mm	35-40	30-40	20-40	15-30

a) S : Heavy Duty Pavements. The ratio of crushed sand versus normal sand is 1:0

b) Binder content in Mixture. In brackets : binder content on 100% aggregate = 100 : (100-binder content in mixture) x (binder content in 100% mixture)

ที่มา: European Asphalt Pavement Association (1998)

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของสาธารณรัฐเช็ก

SMA Mineral aggregate	AKMS (SMA 0/11) Crushed aggregate ^a	AKMJ (SMA 0/8) Crushed aggregate ^a
% (mm) passing:		
< 0.009 mm	10-13	10-13
< 2.0 mm	20-26	22-30
< 4.0 mm	26-38	28-42
< 8.0 mm	45-60	90-100
<11.0 mm	90-100	100
Binder type	AP-65 PmB 45, (PmB 65)	AP-65 PmB 45, PmB 65
Binder content, % ^{bed}	6.5-7.0 (7.0-7.5)	6.8-7.2 (7.3-7.8)
Marshall test ^{efg}		
Stability	≥ 6kN	≥ 6kN
Voids% vol.		
2 x 50 blows	3.0-4.5	3.0-4.5
2 x 100 blows	2.5	2.5
Layer		
Thickness (mm)	34-45	(25) 30-40
Degree of compaction	min 97%	min 97%
Voids content, %	3.0-6.0 (7.0)	3.0-6.0 (7.0)

- a) Crushed aggregate with good adhesion to bitumen used
- b) In the case of modified binder the lower limit can be decreased by no. more than 0.3%
- c) Binder content "in" mixture. In brackets: binder content "on" 100% aggregate
- d) Addition of modifying agents into mixer also led to successful products
- e) In mixture design and during production the resistance against rutting must be checked
- f) Compaction temperature depends on the type of bitumen used (usually 140-150°C)
- g) Calculation of a voids content is based on the "bulk" density of an uncompacted mixture, determined using solvent

ที่มา: European Asphalt Pavement Association (1998)

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศเคนยา

Grading	% passing, m/m		
	SMA 8	SMA 11	SMA 16
16.0 mm	-	-	> 90
11.2 mm	-	> 90	< 90
8.0 mm	> 90	< 90	-
5.6 mm	90	30-50	24-45
2.0 mm	21-35	18-30	15-25
0.074 mm	> 4	> 4	> 4
Layer Thickness; mm	20-30	30-40	40-50
Voids, %(v/v)			
Average	< 6.0	< 6.0	< 6.0
Tolerance ^a	< 8.0	< 7.0	< 7.0
Compaction, %			
Average	> 97.0	> 97.0	> 97.0
Tolerance ^b	> 95.0	> 95.0	> 95.0

a) Tolerance = $A + t \cdot s / \sqrt{n}$

b) Tolerance = $A - t \cdot s / \sqrt{n}$

where: A = Average

s = standard deviation

n = Sample size

For $\alpha = 0.10$ (single side):

t = Statistic number

n = 6 9 12

t = 1.48 1.40 1.36

ที่มา: European Asphalt Pavement Association (1998)

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศอังกฤษ

	ZMA-8	ZMA-12
Mineral aggregate	Crushed rock, crushed sand and manufactured filler	
Passing sieve:	% (m/m)	% (m/m)
0.09 mm	8-13	8-13
0.20 mm	11-18	11-18
0.63 mm	14-24	14-24
2.00 mm	20-30	20-30
5.00 mm	30-50	30-53
8.00 mm	90-100	50-70
12.50 mm	100	90-100
16.00 mm	-	100
Binder type	B-50, B-65, PmB-80A, PmB-80B	
Binder content, % ^a	6.5-7.5 (6.1-7.0)	6.0-7.5 (5.66-7.0)
Filler content	8	8
Voids content Marshall, %	2.5-4.5	3.0-4.5
Wheel tracking test : LCPC method: \mathcal{E} (%), max	15	15(10) ^b
Dynamic creep: N/ \mathcal{E} , min	4000	4000
Layer thickness (mm)	25-30	30-50

a) binder content on 100% aggregate: In brackets; binder content in mm:me.

b) when polymer modified binder is used.

ที่มา: European Asphalt Pavement Association (1998)

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศอิตาลี

Passing sieve (%)	SMA 0/10	SMA 0/15
15 mm	100	80-100
10 mm	80-100	46-66
5 mm	47-64	30-44
2 mm	30-45	20-36
420 μm	12-20	10-17
180 μm	10-16	9-15
75 μm	9-14	8-13
Binder type	PmB 50	
Binder Content, % ^a	5.5-7.0 (5.2-6.55)	5.5-7.0 (5.2-6.55)
Voids content, %	1.0-4.0	1.0-4.0
Layer thickness, mm	20-30	40-50

a) binder content on 100% aggregate. In brackets; binder content "in" mixture

ที่มา: European Asphalt Pavement Association (1998)



ตารางที่ 2.7 มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศเนเธอร์แลนด์

SMA	0/11 Type 2 ^a	0/11 Type 1	0/8	0/5
Mineral aggregate %(m/m)	Crushed aggregate, crushed sand, manufactured filler		Crushed aggregate, crushed & natural sand, manufactured filler	
< 63 μ m	6-10	7-11	8-12	9.5-13.5
> 2.0 mm	72.5-82.5	70-80	67.5-77.5	62.5-72.5
> 5.6 mm	60-70	55-70	40-60	≤ 6
> 8.0 mm	40-55	35-50	≤ 6	-
> 11.2 mm	≤ 6	≤ 6	-	-
Binder type	B 80	B 80	B80	B80
Binder content ^b	≥ 7.0 (6.54)	≥ 7.0 (6.54)	≥ 7.4 (6.89)	≥ 8.0 (7.41)
Type testing Requirement (Marshall specimen): Voids content, %(v/v)	5.0	4.0	4.0	4.0
Layer thickness, mm	35	30-40	20-30	15-20

a) Type 2: Heavy loading.

b) Binder content on 100% aggregate. In brackets: binder content "in

ที่ ๗: European Asphalt Pavement Association (1998)

ตารางที่ 2.8 มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศนอร์เวย์

Passing sieve	SKA 11	SKA 16
22.4 mm	-	100
16.0 mm	100	80-100
11.2 mm	80-100	46-66
8.0 mm	47-64	30-44
4.0 mm	30-45	20-36
2.0 mm	20-32	15-30
1.0 mm	16-27	12-24
500 μm	14-24	11-21
250 μm	12-20	10-17
125 μm	10-16	9-15
75 μm	9-14	8-13
Annual Daily Traffic (ADT)		
	ADT < 15000	ADT \geq 15000
Number of blows	2 x 75	2 x 75
Stability (N)	\geq 4500	\geq 6000
Flow Value (mm)	1.5-4.6	1.5-4.0
Stiffness (N/mm)	\geq 1600	\geq 2300
Air voids (%)	1-5	2-5
Bitumen filled voids (%)	70-90	70-85

ที่มา: European Asphalt Pavement Association (1998)

ตารางที่ 2.9 มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศโปรตุเกส

SMA Types	0/12.5	0/9.5
Mineral Aggregate	Crushed coarse & fine aggregate, manufactured filler	
(% m/m)		
≥ 75 μm	6-10	7-12
≥ 2.0 mm	70-78	68-78
≥ 4.75 mm	58-68	58-70
≥ 9.5 mm	25-40	10-20
≥ 12.5 mm	10-20	-
Binder Type	Only modified Binder	
Binder Content ^a	≥ 5.0%	≥ 5.0%

a) Binder content on 100% aggregate

ที่มา: European Asphalt Pavement Association (1998)

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศสหรัฐอเมริกา

SMA Type	D4	D6(1)	D6(2)	D8	D10	D11	D14	D16	D20	D22
Percentages passing sieves (% m/m)										
31.5									100	100
22.4								100		90-100
20.0							100		90-100	
16.0						100		90-100		
14.0					100		90-100			60-80
11.2				100		90-100			60-80	
10.0			100		90-100			45-75		35-60
8.0		100		90-100			50-75		35-60	
6.3			90-100			45-75		25-40		25-40
5.6	100	90-100			30-50		20-35		20-35	
4.0	90-100			25-45		25-40		20-35		20-35
2.0	30-40	30-40	25-35	20-30	20-30	20-30	15-30	15-30	15-30	15-30
0.063	8-12									
Binder content "in" mixture	7.0-8.0	6.5-7.5	6.5-7.5	6.0-7.0	6.0-7.0	6.0-7.0	5.8-6.8	5.8-6.8	5.7-7.2	5.7-7.2
Additives	0.3-1.5									
Layer thickness (mm)	12-25	15-30	15-30	20-40	25-50	25-50	30-55	30-55	40-70	40-70

ที่มา: European Asphalt Pavement Association (1998)

ตารางที่ 2.11 มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศนอร์เวย์

Sieve Size (mm)	Mix Designation		
	SMA7	SMA10	SMA14
	Percentage Passing Sieve Size (By Mass)		
19.0	-	-	100
13.2	-	100	90-100
9.5	100	90-100	30-55
6.7	85-100	30-55	20-35
4.75	30-62	20-40	18-30
2.38	20-35	15-28	15-28
1.18	16-28	13-24	13+24
0.6	14-24	12-21	12-21
0.3	12-20	10-18	10-18
0.150	10-16	9-14	9-14
0.075	8-12	8-12	8-12
Minimum Layer Thickness(mm)	30	40	55
Binder Content (% by mass)	6.0-7.3	6.0-7.0	5.8-6.8

ที่มา: European Asphalt Pavement Association (1998)

ตารางที่ 2.12 มาตรฐานวัสดุของผิวทาง SMA ของประเทศออสเตรเลีย

Australian Standard Sieve (AS1152) mm	Percentage Passing	
	Nominal 7mm Granite	Nominal 10mm Granite
13.20	-	100
9.50	100	90-100
6.70	90-100	25-40
4.75	25-40	18-30
2.36	15-28	15-28
1.18	13-24	13-24
0.600	12-21	12-21
0.300	10-18	10-18
0.150	9-14	9-14
0.075	8-12	8-12
Binder Content (by percentage mass of whole mixture)	6.5-7.5	6.0-7.0
Hydrated Lime (by percentage mass of total aggregate)	1.5	1.5
Fibre Content (by percentage mass of whole mixture)	0.3 min.	0.3 min.
Binder Drain-off at 185°C	0.3 max.	0.3 max.

ที่มา: European Asphalt Pavement Association (1998)

- ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) สามารถลดเสียงจากการจราจร (Noise Reduction) ให้มีระดับที่ต่ำกว่าผิวทางแอสฟัลต์แบบ Dense Graded HMA ทั่วไป จากผลการศึกษาพบว่า ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) ที่ใช้มวลรวมที่มีขนาด Maximum nominal size ที่เล็กกว่า จะเกิดเสียงจากการจราจรในระดับที่ต่ำกว่า

- ผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) ทำให้มีทัศนวิสัยในการขับขี่ที่ดี (Visibility) เมื่อเปรียบเทียบกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไปเนื่องจากผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) มี

ลักษณะที่หายากกว่า เมื่อเกิดฝนตกจะมีน้ำที่ขังอยู่บนผิวหน้าน้อยกว่า จึงช่วยลดแสงสะท้อนจากผิวทางได้ดี ไม่ว่าจะเป็นแสงสะท้อนเนื่องจากไฟของรถคันอื่น หรือจากแหล่งกำเนิดแสงอื่นใดก็ตาม นอกจากนี้ยังลดการเกิดละอองน้ำจากรถที่กำลังวิ่งอยู่บนผิวทางที่เปียกชื้น ได้จึงทำให้เกิดทัศนวิสัยในการขับขี่ที่ดี และลดการลื่นไถลในขณะที่ขับขี่ได้

เนื่องจากผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (SMA) ใช้วัสดุที่มีคุณภาพสูงกว่า จึงมีราคาแพงกว่า ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไปประมาณ 20-25% แต่จะมีความแข็งแรงและมีความทนทานมากกว่า อายุการใช้งานยาวนานกว่า สามารถเลือกใช้ Maximum nominal size ได้หลายขนาดตามความหนาของชั้นผิวทางที่ต้องการ จึงเหมาะสำหรับทั้งงานก่อสร้างผิวจราจรที่รองรับน้ำหนักบรรทุกที่มาก มีปริมาณการจราจรสูง และยังสามารถก่อสร้างเป็นชั้น Overlay ที่บางกว่าสำหรับงานบำรุงทาง ซึ่งจะทำได้ผิวทางใหม่ที่ดีกว่า และมีความเสียดทานมากขึ้นช่วยให้การขับขี่ปลอดภัยมากขึ้น ช่วยยืดอายุการใช้งานของผิวทางให้ยาวนานออกไป และเนื่องจากเป็นชั้นที่บางกว่าจึงใช้ปริมาณที่น้อยกว่า ช่วยประหยัดทั้งงบประมาณ และลดการใช้มวลรวมจากแหล่งธรรมชาติได้

2.4 วัสดุปรับปรุงคุณภาพ

วัสดุปรับปรุงคุณภาพ หมายถึง วัสดุผสมเพิ่มที่ผสมลงไปเพื่อให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีคุณสมบัติดีขึ้น สำหรับงานทางนิคมใช้โพลีเมอร์มาเป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพ เช่น พลาสติกชนิด PVC พลาสติกชนิด PET พลาสติกชนิด HDPE พลาสติกชนิด LDPE และยางเทอร์โมพลาสติกชนิด SBS เป็นต้น นอกจากนี้ในงานทางยังนิยมใช้ไฟเบอร์มาเป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพอีกด้วย เนื่องจาก HDPE ให้คุณสมบัติที่ดีกว่า LDPE และใกล้เคียงกับ PET งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ HDPE และ PET มาเป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพ (Esmaeil Ahmadinia, 2011)

2.4.1 พลาสติก

พลาสติก เป็นสารประกอบของไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วย โมเลกุลซ้ำๆ ต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาวๆ ประกอบด้วยธาตุสำคัญคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน นอกจากนี้อาจมีธาตุอื่นๆ เช่น ส่วนประกอบย่อย ได้แก่ ไนโตรเจน, ฟลูออรีน, คลอรีน และกำมะถัน เป็นต้น ความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวแสดงดังตารางที่ 2.13 สามารถแยกได้ 6 ชนิด ดังนี้

1. โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET)

โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติเป็นพลาสติกแข็งไปจนถึงแข็งโดยการปรับความหนา, มีน้ำหนักเบา, มีความเหนียวและทนทาน มีการยืดหยุ่นต่อแรงกระแทก และไม่แตกเมื่อถูกแรงกดดัน แต่มีข้อเสียคือฝุ่นและสิ่งสกปรกเกาะติดได้ง่าย

2. โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)

โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงคือ เป็นพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ที่มีค่าความหนาแน่นสูง มีโครงสร้างทางเคมีที่เป็นกิ่งสาขา (branching) น้อย จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง มีความแข็งแรง เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้ผิวแตกรานได้ง่าย ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนสารเคมีได้ดี โดยทนความร้อน (ทนอุณหภูมิสูงถึง 110°C และทนอุณหภูมิสูงถึง 120°C ได้ในช่วงสั้นๆ) ทนต่อสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่อากาศสามารถซึมผ่านได้

3. โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC)

โพลีไวนิลคลอไรด์เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ และสลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนหรือเมื่ออยู่ภายใต้แสงแดดเป็นเวลานาน จึงมีการเติมสารเติมแต่งเพื่อทำให้มีคุณสมบัติตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ทำให้พลาสติกชนิดนี้กลายเป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรง ทนร้อน ทนไฟ และมีความคงทน

4. โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นพลาสติกที่ผลิตโดยใช้แรงดันสูง มีความเหนียวและยืดหยุ่น ทนต่อการกรอกรอบแตก มีความนิ่ม แต่ไม่ใส ทนต่อสารเคมีได้ดี ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 95 องศาเซลเซียสในช่วงสั้นๆ ได้

5. โพลีโพรพิลีน (polypropylene, PP)

โพลีโพรพิลีนเป็นพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็ง ความเปราะและแตกหักง่ายน้อยกว่า HDPE, ทนต่อแรงกระแทก รอยขีดข่วน ไม่เสียรูปง่าย ทนความร้อนสูง

ตารางที่ 2.13 ความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิด

ชนิดของพลาสติก	จุดหลอมเหลว (°C)	ความหนาแน่น
PET	250-260	1.38-1.39
HDPE	130	0.95-0.97
PVC	75-90	1.15-1.35
LDPE	110	0.92-0.94
PP	160-170	0.90-0.91
PS	70-115	1.05-1.07

ที่มา: ปัญญาไทยพลาสติก (2553)

6. โพลีสไตรีน (polystyrene, PS)

โพลีสไตรีนเป็นพลาสติกชนิดแข็ง มีความคงรูปดีแต่เปราะ สามารถทำสีต่างๆ ได้และมีความยืดหยุ่นได้จำกัด ไม่สามารถรับน้ำหนักได้มากเพราะเปราะ

2.4.2 ยางเทอร์โมพลาสติก

ยางเทอร์โมพลาสติกเกิดจากการผสมกันระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับยาง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เป็นวัสดุที่มีบทบาทมากในอุตสาหกรรม

ยางเทอร์โมพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้เหมือนพลาสติก มีสมบัติที่ยืดหยุ่นอ่อนนุ่มคล้ายยาง แต่ยางเทอร์โมพลาสติกจะมีสมบัติเหมือนยางเฉพาะในอุณหภูมิบางช่วง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางเทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัวและไหลได้เหมือนพลาสติก และเมื่ออุณหภูมิต่ำลงยางเทอร์โมพลาสติกจะเปลี่ยนสภาพจากของเหลวที่ไหลได้ไปเป็นของแข็งที่มีสมบัติคล้ายยาง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ยางเทอร์โมพลาสติกแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. บล็อกโคพอลิเมอร์ (Block copolymer)

ยางเทอร์โมพลาสติกประเภทนี้จะมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ยาว ในสายโซ่โมเลกุลจะประกอบด้วย 2 เฟส คือ ส่วนแข็ง คือ สายโซ่โมเลกุลที่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน จะมีค่า Tg สูง และส่วนอ่อน คือ สายโซ่โมเลกุลที่มีการจัดเรียงกันแบบบอสันฐานมีสมบัติเป็นอิลาสติกสามารถหัก, งอ ได้ง่าย มีค่า Tg ต่ำ

สมบัติโดยทั่วไปของยางเทอร์โมพลาสติกแบบบล็อกโคพอลิเมอร์จะขึ้นกับอัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ และสัดส่วนของส่วนอ่อน-ส่วนแข็งที่มีอยู่ในสายโซ่โมเลกุลชนิดของยางเทอร์โมพลาสติกแบบบล็อกโคพอลิเมอร์มี 4 ชนิด ได้แก่

1) ยางเทอร์โมพลาสติกจากสไตรีน

โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยโพลีสไตรีนเป็นส่วนแข็งกระจายอยู่ในวัฏภาคของพอลิไดอินที่เป็นส่วนอ่อน ยางเทอร์โมพลาสติกชนิดนี้ที่มีพอลิไดอินต่างกัน แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่

- Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)
- Styrene-Isoprene-Styrene (SIS)
- Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene (SEBS)

คุณสมบัติเด่นของยางเทอร์โมพลาสติกจากสไตรีนคือ มีความใสกว่ายางเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่น, ค่าความแข็งอยู่ในช่วง 40 Shore A ถึง 50 Shore D, ค่าอุณหภูมิในการใช้งาน -50°C ถึง 65°C , ความทนต่อสารเคมีแล้วสภาพอากาศใกล้เคียงกับ Styrene-Butadiene-Rubber (SBR)

2) ยางเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

ยางเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นยางเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนแข็งและส่วนอ่อน โดยส่วนแข็งเป็นพันธะยูรีเทนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไดไอโซไซยานาตและสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ส่วนอ่อนเป็นพันธะเคมีของพอลิเอสเตอร์หรือพอลิอีเทอร์ ยางชนิดนี้มีราคาสูง แต่มีจุดเด่นเรื่องความทนทานต่อการเสียดสีและการฉีกขาด จึงเหมาะสำหรับทำพื้นรองเท้า หรือทดแทนชิ้นส่วนยางชนิดอื่นที่ไม่ทนทานต่อการเสียดสี คุณสมบัติเด่นของยางเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนคือ ความทนต่อการฉีกขาดและการขัดสีสูง, ทนต่อน้ำ ตัวทำละลาย และทนความร้อนได้ -50°C ถึง 220°C

3) ยางเทอร์โมพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์

โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยสายโซ่พอลิอีเทอร์ที่ไม่มีวงแหวนเป็นองค์ประกอบที่เป็นส่วนอ่อน ส่วนแข็งประกอบด้วยพอลิเอสเตอร์ที่มีวงแหวนเป็นองค์ประกอบ คุณสมบัติเด่นของยางเทอร์โมพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์คือ มีความแข็งแรงสูง, ความต้านทานต่อการล้าตัวเนื่องจากการหักงอสูง, ทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและโอโซนสูง, ทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีวงแหวนเป็นองค์ประกอบ, ช่วงอุณหภูมิในการใช้งานกว้าง

4) ยางเทอร์โมพลาสติกพอลิเอไมด์

โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยบล็อกพอลิอีเทอร์ที่เป็นส่วนอ่อนและบล็อกพอลิเอไมด์เป็นส่วนแข็ง ยางเทอร์โมพลาสติกพอลิเอไมด์เป็นยางเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนแข็ง ได้แก่ พอลิเอไมด์ และส่วนอ่อน ได้แก่ พอลิเอสเตอร์หรือพอลิอีเทอร์ จัดเป็นยางเทอร์โมพลาสติกเชิงวิศวกรรม มีสมบัติทนความร้อนได้สูง ทนสารเคมีได้ดี และต้านทานต่อการหักพับได้ดี นำไปผลิตเป็นท่อสวนปัสสาวะในทางการแพทย์ ปลอกหุ้มสายไฟและสายเคเบิล ชิ้นส่วนยานยนต์ และอุปกรณ์กีฬา

คุณสมบัติเด่นของยางเทอร์โมพลาสติกพอลิเอไมด์ คือ ค่าความแข็งแรงอยู่ในช่วง 60 Shore A ถึง 70 Shore D, อุณหภูมิใช้งาน -40°C ถึง 80°C , การกระด้างกระดอนสูง, ความต้านทานต่อการล้าตัวเนื่องจากการหักงอสูง, ความทนต่อน้ำมัน จาระบี สารเคมีและตัวทำละลาย

2. วัสดุผสมระหว่างยางกับพอลิโอลิฟินส์

1) ยางเทอร์โมพลาสติกพอลิโอลิฟินส์

ยางเทอร์โมพลาสติกพอลิโอลิฟินส์ เป็นยางเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยของผสมระหว่างพอลิโอลิฟินส์กับยาง โดยที่วิภาคของยางจะไม่เกิดพันธะเชื่อมโยง เช่น ของผสมระหว่างเอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอิน เทอร์พอลิเมอร์กับพอลิโพรพิลีน จัดเป็นกลุ่มพอลิเมอร์

ผสมที่ได้จากการนำยางและพลาสติกมาผสมกัน โดยที่วิญญากาศของยางไม่ได้เกิดการวัลคาไนซ์ ยางเทอร์โมพลาสติกชนิดนี้มีราคาถูก เหมาะสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการคุณสมบัติสูง เช่น ปลอกหุ้มสายไฟและสายเคเบิล ยางกันโคลน บรรจุกัมภ์ทางการแพทย์

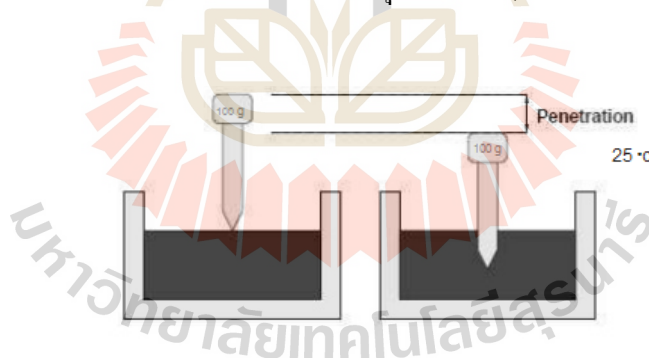
2) ยางเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต

ยางเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพลาสติกกับยาง โดยยางจะถูกทำให้คงรูปหรือวัลคาไนซ์ในระหว่างกระบวนการผสม กระบวนการที่ใช้ผลิตเรียกว่า ไดนามิก วัลคาไนเซชัน มีลักษณะเป็นอนุภาค ยางคงรูปกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติก มักใช้เป็นวัสดุหลักในการผลิตชิ้นงานบริเวณใต้กระโปรงรถ

2.5 วิธีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

2.5.1 วิธีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเชื่อมประสาน

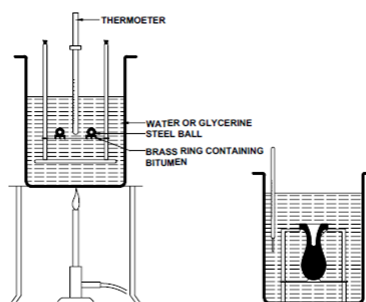
1. การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของบิทูมินัส Penetration มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความแข็งของบิทูมินัส โดยจะใช้เข็มมาตรฐานกดอย่างอิสระ เป็นเวลา 5 วินาที บนผิวของตัวอย่าง 3 ครั้ง แต่ทุกครั้งจะห่างจากขอบไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งหากค่า Penetration สูงจะแสดงว่าตัวอย่างมีความแข็งน้อย ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 403/2518 วิธีการทดสอบหาค่า Penetration ของวัสดุแอสฟัลต์ (เทียบเท่า AASHTO T. 46)



รูปที่ 2.4 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ

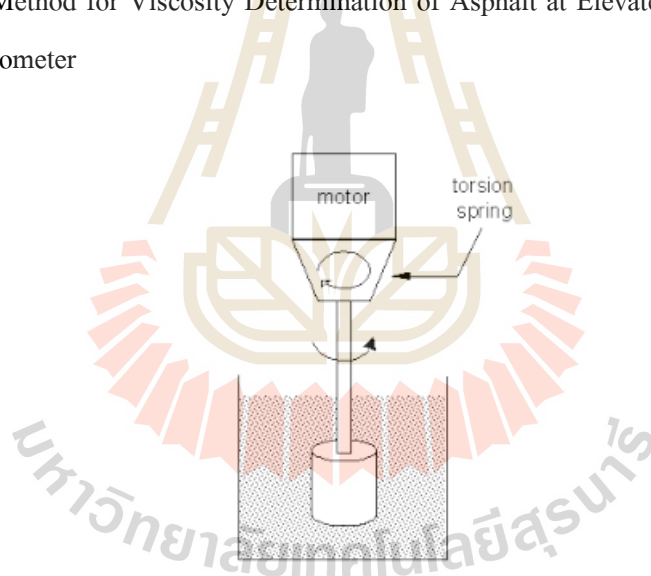
ที่มา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา (2559)

2. การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูมิเนน มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาจุดอ่อนตัวของบิทูมิเนนที่อุณหภูมิ 30°C โดยจะใช้เครื่องมือทดสอบ Ring-and-Ball และปรับอุณหภูมิสูงขึ้นในอัตรา 5°C ต่อนาที ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ASTM D36/D36M-14e1 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen



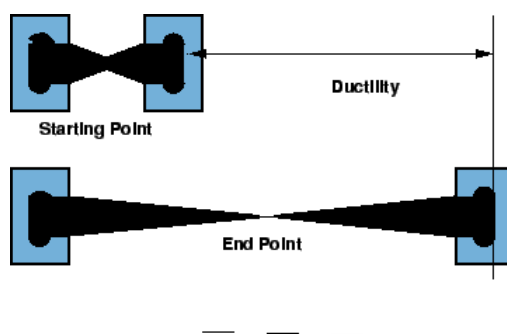
รูปที่ 2.5 การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูเมน
ที่มา: Expertsmind (2013)

3. ทดสอบความหนืด (viscosity) โดยการทดสอบนี้จะใช้วิธี Brook fields ในการทดสอบ และใช้เครื่องมือ Rotational Viscometer ตามมาตรฐานวิธีการทำสอบที่ ASTM D4402 Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer



รูปที่ 2.6 การทดสอบความหนืดโดยใช้วิธี Brook fields
ที่มา: Vincent A. Hackley (2001)

4. การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเหนียวของบิทูเมน ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 5°C 13°C และ 25°C ตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 405/2519 วิธีการทดลองหาค่า Ductility ของวัสดุแอสฟัลต์ (เทียบเท่า AASHTO T.-51)



รูปที่ 2.7 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว

ที่มา: Prof. Tom V. Mathew (2009)

5. การทดสอบหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึง (Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilometer) การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาความยืดหยุ่นแอสฟัลต์ โดยวัดระยะคืนตัวกลับหลังจากตัวอย่างแอสฟัลต์ถูกดึงจนขาด ตัวอย่างจะถูกดึงที่อุณหภูมิ $25+0.5^{\circ}\text{C}$ ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อนาที ตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 415/2548 วิธีการทดลองหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึง (Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilometer)



รูปที่ 2.8 การทดสอบหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์

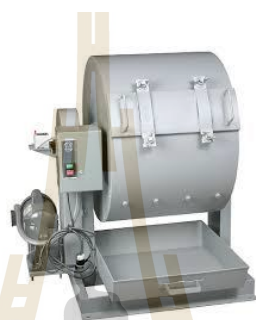
ที่มา: Suryakanta (2014)

2.5.2 วิธีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม

1. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมหยาบ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณของน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.207/2517 วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ

2. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมละเอียด มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณของน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.209/2518 วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดละเอียด

3. ความสึกหรอ (Abrasion) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสึกหรอของมวลรวม ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.202/2515 วิธีการทดลองหาความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion



รูปที่ 2.9 เครื่อง Los Angeles Abrasion

ที่มา: M&L Testing Equipment (1995)

4. ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) การทดสอบนี้เป็นการหาค่าดัชนีความแบนของวัสดุมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.210/2518 วิธีการทดลองหาค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index)



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์วัดค่าดัชนีความแบน

ที่มา: Pinzuar LTDA (2017)

5. ค่าดัชนีความยาว (Elongation Index) การทดสอบนี้เป็นการหาค่าดัชนีความยาวของวัสดุมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.211/2518 วิธีการทดลองหาค่าดัชนีความยาว (Elongation Index)



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์วัดค่าดัชนีความยาว
ที่มา: Pinzuar LTDA (2017)

6. ความคงทนต่อการกัดกร่อน (Soundness) การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาค่าต้านทานต่อการแตกแยกของมวลรวมในสารละลายอิมตัว เพื่อนำไปพิจารณาค่าความคงทนของมวลรวมที่ถูกกระทำโดยสภาพอากาศ ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.213/2531 วิธีการทดลองหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม โดยการใช้โซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียม ซัลเฟต



รูปที่ 2.12 สารละลายที่ใช้ในการทดสอบ
ที่มา: Suryakanta (2014)

7. ความทนทานของวัสดุ (Durability Factor) การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความทนทานของวัสดุทั้งชนิดเม็ดหยาบและชนิดเม็ดละเอียด ตามมาตรฐานวิธีทดสอบที่ ทล.-ท.206/2517 วิธีการทดลองหาค่า Durability ของวัสดุ



รูปที่ 2.13 เครื่องมือทดสอบความคงทนของวัสดุมวลรวม
ที่มา: M&L Testing Equipment (1995)

8. ค่าเทียบเท่าทราย (Sand Equivalent) การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัดส่วนระหว่างฝุ่นกับทราย ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.203/2515 วิธีการทดลองหาค่าเทียบเท่าทราย



รูปที่ 2.14 อุปกรณ์ทดสอบค่าเทียบเท่าทราย
ที่มา: Suryakanta (2014)

9. ขนาดกะของมวลรวม (Gradation) การทดสอบนี้เป็นการทดสอบสำหรับหาขนาดเม็ดของมวลรวมทั้งหยาบและละเอียด โดยให้ผ่านตะแกรงจากขนาดใหญ่ไปจนถึงขนาดเล็ก แล้วเปรียบเทียบกับมวลของตัวอย่างที่ผ่านหรือค้างตะแกรงขนาดต่างๆกับมวลทั้งหมดของตัวอย่าง ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.ม.205/2517 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบต่าง



รูปที่ 2.15 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบขนาดคละของมวลรวม
ที่มา: M&L Testing Equipment (1995)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำพลาสติกรีไซเคิลมาใช้ในผิวทางแอสฟัลต์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำพลาสติกรีไซเคิลมาใช้ในผิวทางแอสฟัลต์ในต่างประเทศ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ในประเทศไทยสามารถสรุปได้ดังนี้

Donnchadh Casey และคณะ (2008) ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับการพัฒนาพลาสติกรีไซเคิลกับแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ โดยการใส่รีไซเคิลพลาสติกชนิด HDPE และชนิด LDPE พบว่าค่าการทดสอบ wheel track and fatigue ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่อัตราการผสม 4% HDPE

Esmail Ahmadinia และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำขวดพลาสติกมาเป็นส่วนผสมในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ โดยใช้พลาสติกชนิด PET พบว่าการใช้ PET ที่ 6% ให้ค่าเสถียรภาพ (Stability) สูงสุด

Esmail Ahmadinia และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของพลาสติกในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ โดยใช้พลาสติกชนิด PET พบว่าอัตราการผสมที่ 4-6% ให้ค่าเสถียรภาพ (Stability) สูงที่สุดและค่าที่ได้อยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับ

Taher Baghaee Moghaddam และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางอ้อมของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์เมื่อผสมขวดพลาสติก โดยวิธี Indirect tensile stiffness modulus test พบว่าค่าความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการผสม PET และช่วยป้องกันไม่ให้ก้อนตัวอย่างแตกขณะเริ่มต้นผสม

F. Moghadas Nejad และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลต่อความชื้น เมื่อใส่พอลิเมอร์ในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการทดสอบ Indirect tensile test พบว่าในสภาพเปียกค่า ITS

ของตัวอย่างที่ผสมด้วย HDPE จะสูงกว่าการใช้ LDPE และการใช้พอลิเมอร์สามารถเพิ่มความแข็งของโมดูลัสในสภาพเปียก

Celaleddin E. Sengul (2013) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินพฤติกรรมเมื่อใส่พลาสติกชนิด SBS ในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ พบว่าการผสม SBS ทำให้ความต้านทานความชื้นและความต้านทานความเสียหายสูงขึ้น

Amir Modarres (2014) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบด้านแรงกระทำและความล้าในโมดิฟายด์แอสฟัลต์ โดยใช้วิธี resilient modulus test และ Indirect Tensile Test ในการทดสอบ พบว่าที่ 20°C PET และ SBS มีค่า Stiffness ใกล้เคียงกัน แต่ที่ 5°C SBS มีค่า Stiffness ลดลง และค่าความยืดหยุ่นเมื่อผสม PET มากกว่า 2% จะมีค่าลดลง แต่อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวข้องกับการนำพลาสติกกรีไซเคิลมาใช้ในผิวทางแอสฟัลต์ในต่างประเทศสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.14

พริสา จันนุ้ย (2546) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของวัสดุเชื่อมประสานในสโตนมาสติกแอสฟัลต์ โดยใช้วิธี Indirect Tensile Test ในการทดสอบ พบว่า SMA ที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด PMA จะให้ค่าเสถียรภาพ, ค่าดัชนีความแข็งแรง, ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่า SMA ที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด Multigrade และ AC60-70

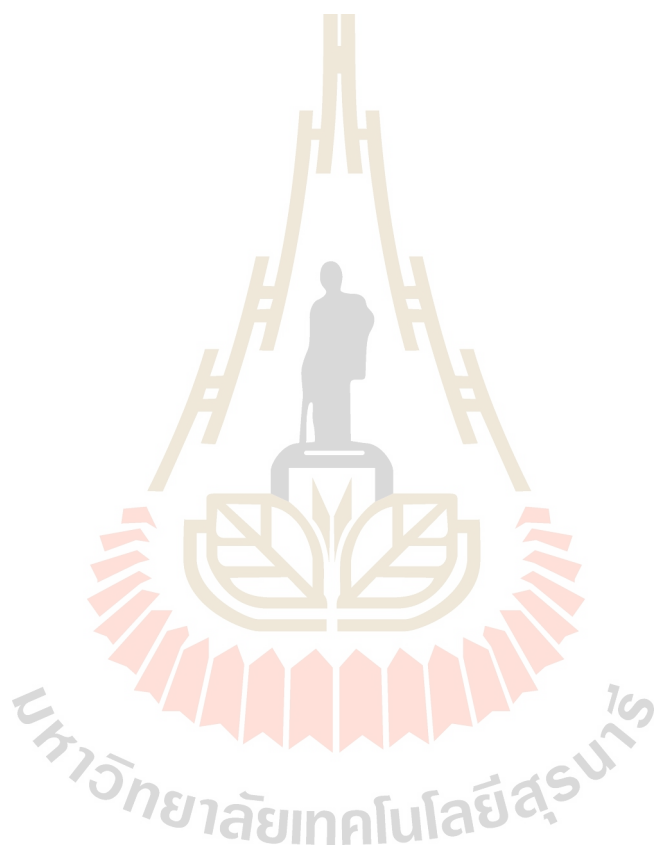
ปกรณณ์ มลิินทะเล (2548) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับโครงการศึกษาการเสริมผิวทางแอสฟัลต์ด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดสโตนมาสติกแอสฟัลต์ โดยใช้วิธี Indirect Tensile Test ในการทดสอบ พบว่าความเสียหายในลักษณะการเยิ้มของผิวทาง SMA การศึกษานี้ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงผิวทางจะไม่เกิดความเสียหายในลักษณะการเยิ้มและยังมีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้

เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร (2549) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของน้ำต่อผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้ตะกรันเตาหลอมเป็นวัสดุมวลรวม โดยใช้วิธี Indirect Tensile Test resilient modulus test, Dynamic Creep Test, Pendulum Test ในการทดสอบ พบว่าคุณสมบัติของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ด้านความหนาแน่น, ค่าเสถียรภาพ, ค่าความต้านทานแรงดึง, ค่าโมดูลัสคืนตัว, ค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร, ค่าต้านทานแรงเสียดทาน ตะกรันเตาหลอมมีค่ามากกว่าหินแกรนิต และผิวทางดังกล่าวต้านทานผลกระทบของน้ำได้เป็นอย่างดี

พรหมมา เทพศรีหา (2558) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของสโตนมาสติกแอสฟัลต์เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณของวัสดุผสมแทรกระหว่างฝุ่นหินกับปูนซีเมนต์ โดยใช้วิธี Indirect Tensile Test, Dynamic Creep Test, Indirect Tensile Fatigue test, resilient modulus test ในการทดสอบ พบว่าการใช้ฝุ่นหินชนิดหินปูนเป็นวัสดุผสมแทรกในส่วนผสม SMA มีความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมแทรก แต่มีความต้านทานการเกิดรอยแตกจาก

ความล้า, ทนรับน้ำหนักกระทำแบบซ้ำๆ ได้ดีกว่า แสดงให้เห็นว่าการใช้ฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสม
แทรกทำให้ผิวทางมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ในประเทศไทย สามารถสรุป
ได้ดังตารางที่ 2.15



ตารางที่ 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ

ปี	ประเทศ	ผู้ค้นคว้า	แอสฟัลต์ที่ใช้ศึกษา	มวลรวม		ขนาดคละที่ใช้	ชนิดของพอลิเมอร์		เปอร์เซ็นต์การผสม	วิธีที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
				ชนิด	filler		ใหม่	เก่า			
2008	ไอร์แลนด์	Donnchadh Casey และคณะ	N/A	N/A	3%	SMA14	-	HDPE, LDPE	N/A	wheel track and fatigue tests	ค่าการทดสอบ wheel track and fatigue ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่อัตรา การผสม 4% HDPE
2011	มาเลเซีย	Esmacil Ahmadinia และคณะ	AC80/100	Granite	N/A	SMA12.5	-	PET	0% 2% 4% 6% 8% 10%	creep test	การใช้ PET ที่ 6% ให้ค่าเสถียรภาพ (Stability) สูงที่สุด
2012	มาเลเซีย	Esmacil Ahmadinia และคณะ	AC80/100	Granite	ซีเมนต์ 3-4%	SMA12.5	-	PET	0% 2% 4% 6% 8% 10%	creep test	อัตราการผสมที่ 4-6% ให้ค่าเสถียรภาพ (Stability) สูงที่สุดและค่าที่ได้อยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับ
2012	มาเลเซีย	Taher Baghaee Moghaddam และคณะ	AC80/100	Granite	N/A	SMA11	-	PET	N/A	ITS, ITSM	ค่าความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการผสม PET และช่วยป้องกันไม่ให้ก้อนตัวอย่างแตกขณะเริ่มต้นผสม

ตารางที่ 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ (ต่อ)

ปี	ประเทศ	ผู้ค้นคว้า	แอสฟัลต์ที่ใช้ศึกษา	มวลรวม		ขนาดคละที่ใช้	ชนิดของพอลิเมอร์		เปอเซ็นต์การผสม	วิธีที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
				ชนิด	filler		ใหม่	เก่า			
2012	มาเลเซีย	Taher Baghaee Moghaddam และคณะ	AC80/100	Granite	N/A	SMA11	-	PET	N/A	ITS,ITSM	ค่าความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการผลิตผสม PET และช่วยป้องกันไม่ให้ก้อนตัวอย่างแตกขณะเริ่มต้นผสม
2013	อิหร่าน	F. Moghadas Nejad และคณะ	AC60/70	Granite, Limestone	N/A	N/A	HDPE, LDPE	-	N/A	ITS,ITSM	- ในสภาพเปียกค่า ITS ของตัวอย่างที่ผสมด้วย HDPE จะสูงกว่าการใช้ LDPE - การใช้พอลิเมอร์สามารถเพิ่มความแข็งของโมดูลัสในสภาพเปียก
2013	ตุรกี	Celaleddin E. Sengul	AC80/100	Granite	N/A	SMA12.5	SBS	-	N/A	RCT, Indirect Tensile Test, wheel tracking Test	การผลิตผสม SBS ทำให้ความต้านทานความชื้นและความต้านทานความเสียหายสูงขึ้น

ตารางที่ 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ (ต่อ)

ปี	ประเทศ	ผู้ค้นคว้า	แอสฟัลต์ที่ใช้ศึกษา	มวลรวม		ขนาดคละที่ใช้	ชนิดของพอลิเมอร์		เปอร์เซ็นต์การผสม	วิธีที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
				ชนิด	filler		ใหม่	เก่า			
2014	อิหร่าน	Amir Modarres	AC80/100	Limestone	N/A	SMA12.5	SBS	PET	2% 4% 6% 8% 10%	resilient modulus test, Indirect Tensile Test	- ที่ 20°C PET และ SBS มีค่า Stiffness ใกล้เคียงกันแต่ที่ 5°C SBS มีค่า Stiffness ลดลง - ค่าความยืดหยุ่นเมื่อผสม PET มากกว่า 2% จะมีค่าลดลง แต่อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้



ตารางที่ 2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย

ปี	ผู้ค้นคว้า	แอสฟัลต์ที่ใช้ศึกษา	มวลรวม		ขนาดคละที่ใช้	ชนิดของพอลิเมอร์		เปอร์เซ็นต์การผสม	วิธีที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชนิด	filler		ใหม่	เก่า			
2546	พริสา จันนุ้ย	AC60/70, Multigrade Asphalt, PMA	หินปูน, ตะกรันเหล็ก	N/A	SMA12.5	SBS	-	N/A	Indirect Tensile Test	SMA ที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด PMA จะให้ค่าเสถียรภาพ, ค่าดัชนีความแข็งแรง, ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าโมดูลัสคืนตัว สูงกว่า SMA ที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด Multigrade และ AC60-70
2548	ปกรณ มีลิน ทะเลข	AC60/70	หินปูน	3%	SMA12.5	N/A	-	N/A	Indirect Tensile test	ความเสียหายในลักษณะการเย็บของผิวทาง SMA การศึกษานี้ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงผิวทางจะไม่เกิดความเสียหายในลักษณะการเย็บและยังมีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้
2549	เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร	AC60/70	หินแกรนิต, ตะกรันเตาหลอม	ฝุ่นหิน หินแกรนิต	SMA 12.5	N/A	-	N/A	Indirect Tensile Test, resilient modulus test, Dynamic Creep Test, Pendulum Test	คุณสมบัติของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ด้านความหนาแน่น, ค่าเสถียรภาพ, ค่าความต้านทานแรงดึง, ค่าโมดูลัสคืนตัว, ค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร, ค่าต้านทานแรงเสียดทาน ตะกรันเตาหลอมมีค่ามากกว่าหินแกรนิต และผิวทางดังกล่าวต้านทานผลกระทบของน้ำได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย (ต่อ)

ปี	ผู้ค้นคว้า	แอสฟัลต์ที่ใช้ศึกษา	มวลรวม		ขนาดคละที่ใช้	ชนิดของพอลิเมอร์		เปอร์เซ็นต์การผสม	วิธีที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชนิด	filler		ใหม่	เก่า			
2549	เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร	AC60/70	หินแกรนิต, ตะกรันเตา หลอม	ฝุ่นหิน หินแกรนิต	SMA12.5	N/A		N/A	Indirect Tensile Test, resilient modulus test, Dynamic Creep Test, Pendulum Test	คุณสมบัติของสโตนมาสดิกแอสฟัลต์ ด้านความหนาแน่น, ค่าเสถียรภาพ, ค่าความต้านทานแรงดึง, ค่าโมดูลัสคืนตัว, ค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร, ค่าต้านทานแรงเสียดทาน ตะกรันเตาหลอมมีค่ามากกว่า หินแกรนิต และผิวทางดังกล่าวต้านทานผลกระทบของน้ำได้เป็นอย่างดี
2558	พรหมมา เทพศรีหา	AC60/70	หินปูน	ฝุ่นหินชนิด หินปูน, ปูนซีเมนต์	SMA12.5	N/A		N/A	Indirect Tensile Test, Dynamic Creep Test, Indirect Tensile Fatigue test, resilient modulus test	การใช้ฝุ่นหินชนิดหินปูนเป็นวัสดุผสมแทรกในส่วนผสม SMA มีความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมแทรก แต่มีความต้านทานการเกิดรอยแตกจากความล้า, ทนรับน้ำหนักกระทำแบบซ้ำ ๆ ได้ดีกว่า แสดงให้เห็นว่าการใช้ฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมแทรกทำให้ผิวทางมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น

2.6.1 ขนาดคละของ SMA ที่ใช้ในงานวิจัยในประเทศไทยและประเทศมาเลเซีย

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งในประเทศไทยและประเทศมาเลเซียพบว่ายังไม่มีข้อกำหนดสำหรับผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่แน่นอน ซึ่งในประเทศไทยขนาดคละที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 2.16 และประเทศมาเลเซียใช้ขนาดคละที่แสดงดังตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.16 ขนาดคละของ SMA ที่ใช้ในงานวิจัยในประเทศไทย

Sieve Designation	Percent Passing
19.0 mm	100
12.5 mm	85-95
9.5 mm	75 maximum
4.75 mm	20-28
2.36 mm	16-24
0.6 mm	12-16
0.3 mm	12-15
0.075 mm	8-10
0.020 mm	Less than 3

ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานร้อยละของมวลรวม > 6

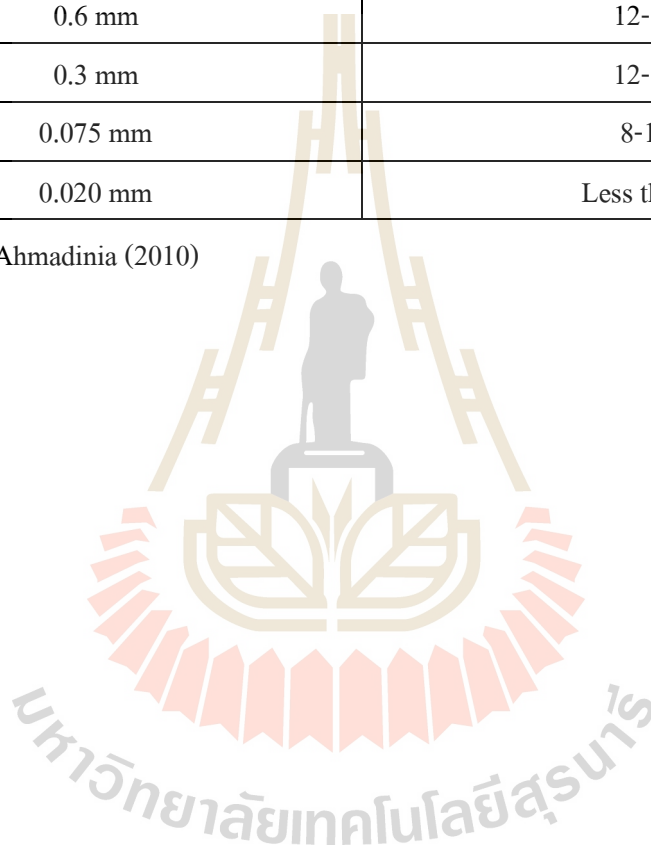
ปริมาณแอสฟัลต์ไฟเบอร์ร้อยละของส่วนผสม 0.3-1.5

ที่มา: สมัคร สันทอง (2535)

ตารางที่ 2.17 ขนาดละเอียดของ SMA ที่ใช้ในการวิจัยในประเทศมาเลเซีย

Sieve Designation	Percent Passing
19.0 mm	100
12.5 mm	85-95
9.5 mm	75 maximum
4.75 mm	20-28
2.36 mm	16-24
0.6 mm	12-16
0.3 mm	12-15
0.075 mm	8-10
0.020 mm	Less than 3

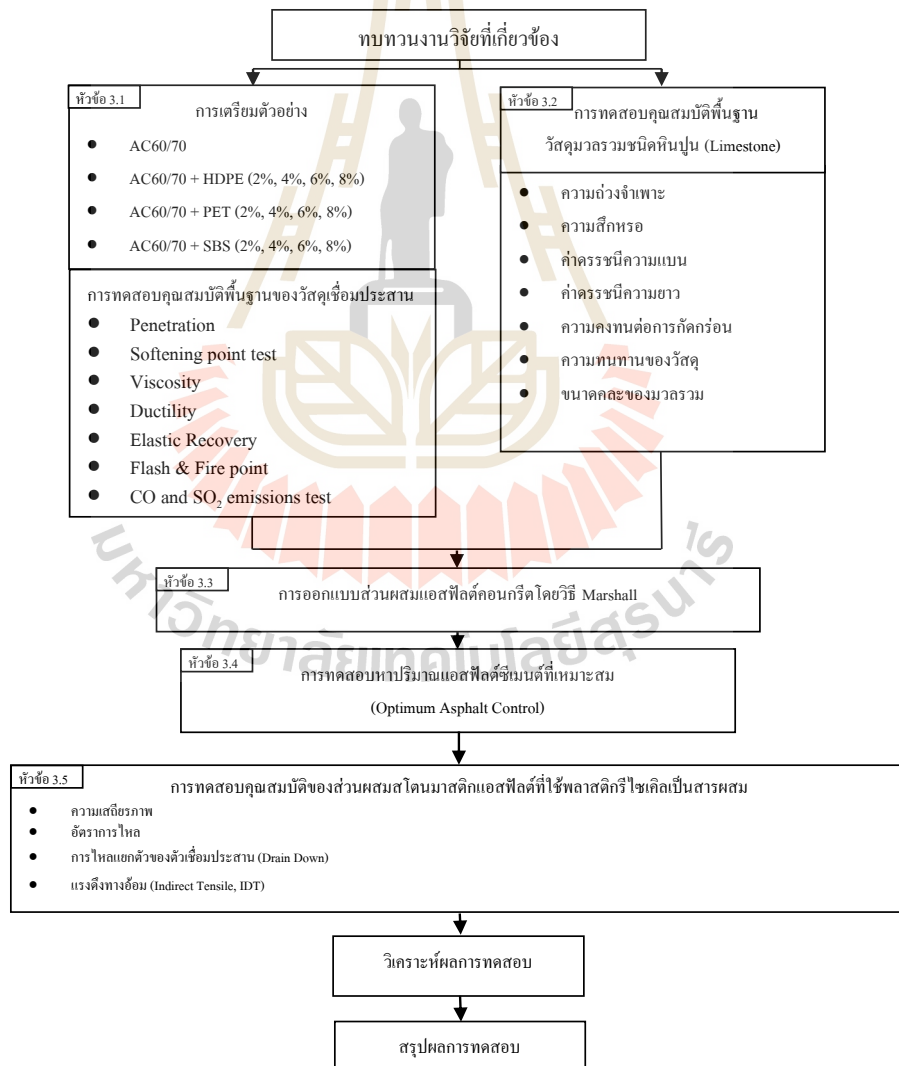
ที่มา: Esmacil Ahmadinia (2010)



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการออกแบบส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์โดยใช้พลาสติกกรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE), ชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) และ เทอร์โมพลาสติกจากสไตรีน (SBS) เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการนำสารผสมเพิ่มทั้ง 3 ชนิดมาเป็นส่วนผสม โดยมีกรอบการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กรอบการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเชื่อมประสาน

3.1.1 การเตรียมพลาสติกกรีซเคล็ด

พลาสติกกรีซเคล็ดที่นำมาศึกษาเป็นพลาสติกกรีซเคล็ดชนิด โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และพลาสติกกรีซเคล็ดชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โดยนำมาทำความสะอาดและตัดให้ขนาดเล็กประมาณ 1-2 มิลลิเมตร

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างวัสดุเชื่อมประสาน

1. แอสฟัลต์ซีเมนต์

แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาศึกษาเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC60/70 เนื่องจากเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดที่นิยมใช้และหาง่ายในประเทศไทย



รูปที่ 3.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC60/70 ด้วยวัสดุพอลิเมอร์สามชนิด ได้แก่ 1) พลาสติกกรีซเคล็ดชนิดความหนาแน่นสูง HDPE 2) พลาสติกกรีซเคล็ดชนิดความหนาแน่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) 3) เทอร์โมพลาสติกจากสไตรีน (SBS) เพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในส่วนผสมของสโตนมาสติกแอสฟัลต์

2. แอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับพลาสติกกรีซเคล็ดชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาศึกษาเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และพลาสติกกรีซเคล็ดชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยใช้พลาสติกกรีซเคล็ดชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่

อัตราส่วน 2% 4% 6% และ 8% โดยน้ำหนักอุณหภูมิผสมที่ผสมเท่ากับ 300°C อัตราเร็วในการผสม 1800 รอบ/นาที และระยะเวลาในการผสม 220 นาที



รูปที่ 3.3 AC60/70 หลังจากผสมพลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE

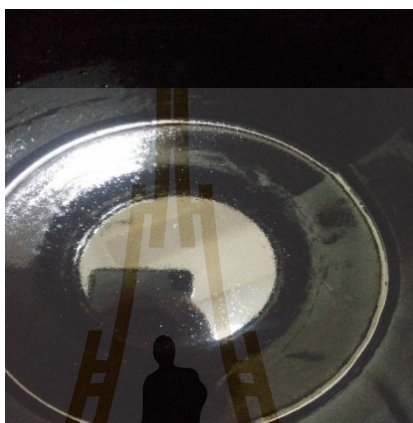
3. แอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับพลาสติกกรีไซเคิลชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาศึกษาเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และพลาสติกกรีไซเคิลชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โดยใช้พลาสติกกรีไซเคิลชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่อัตราส่วน 2% 4% 6% และ 8% โดยน้ำหนักอุณหภูมิผสมที่ผสมเท่ากับ 200°C อัตราเร็วในการผสม 1800 รอบ/นาที และระยะเวลาในการผสม 220 นาที



รูปที่ 3.4 AC60/70 หลังจากผสมกับพลาสติกกรีไซเคิลชนิด PET

4. แอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับเทอร์โมพลาสติกจากสไตรีน (SBS)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาศึกษาเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และเทอร์โมพลาสติกจากสไตรีน (SBS) โดยใช้เทอร์โมพลาสติกจากสไตรีน (SBS) ที่อัตราส่วน 2% 4% 6% และ 8% โดยน้ำหนัก ผสมที่อุณหภูมิผสมเท่ากับ 200°C อัตราเร็วในการผสม 1800 รอบ/นาที และเวลาในการผสม 220 นาที



รูปที่ 3.5 AC60/70 หลังจากผสมกับเทอร์โมพลาสติกชนิด SBS

3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเชื่อมประสาน

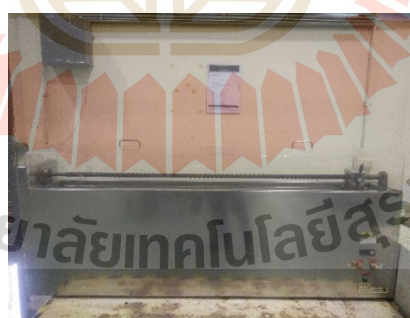
ในการศึกษานี้ได้นำวัสดุเชื่อมประสานที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อ 3.1.1 มาทำการทดสอบคุณสมบัติดังนี้

1. ความต้านทานการเจาะทะลุของบิทูมินัส (Penetration) ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 403/2518 วิธีการทดสอบหาค่า Penetration ของวัสดุแอสฟัลต์ (เทียบเท่า AASHTO T. 46) โดยใช้เข็มมาตรฐานกดอย่างอิสระ เป็นเวลา 5 วินาที บนผิวของตัวอย่าง 3 ครั้ง แต่ครั้งจะห่างจากขอบไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 25°C



รูปที่ 3.6 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ

2. ความสามารถในการยืดตัว (Ductility) ในการทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบความสามารถในการยืดตัวของวัสดุเชื่อมประสาน ตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 405/2519 วิธีการทดลองหาค่า Ductility ของวัสดุแอสฟัลต์ (เทียบเท่า AASHO T.-51) โดยวัดระยะการยืดตัวหลังจากที่ตัวอย่างถูกดึงจนขาดจากกันด้วยความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อนาทีที่อุณหภูมิ 5°C , 13°C และ 25°C



รูปที่ 3.7 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว

3. ความหนืด (viscosity) ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ASTM D4402 Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer โดยการนำตัวอย่างขนาด 8-10 กรัมใส่ใน Thermosel และให้ความร้อนที่อุณหภูมิทดสอบ



รูปที่ 3.8 การทดสอบความเหน็ด

4. จุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูเมน ตามมาตรฐานวิธีทดสอบที่ ASTM D36/D36M-14e1 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen โดยจะใช้เครื่องมือทดสอบ Ring-and-Ball และปรับอุณหภูมิสูงขึ้นในอัตรา 5°C ต่อนาที



รูปที่ 3.9 การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุเชื่อมประสาน

5. ความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึงตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 415/2548 วิธีทดสอบการหาค่าความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึง (Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilometer) ทำการยืดตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบให้มีระยะ 10 ซม. ด้วยความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อนาที จากนั้นตัดตัวอย่างให้ขาดจากกัน ทิ้งไว้ 60 นาที จึงเลื่อนปลายของตัวอย่างมาชนกันแล้วอ่านค่าความยืดหยุ่นกลับที่ได้ การทดสอบนี้จะทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C



รูปที่ 3.10 การทดสอบความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์

6. จุดวาบไฟและจุดติดไฟโดยใช้ Cleveland open cup ตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 406/2519 วิธีการทดสอบหาจุดวาบไฟและจุดติดไฟโดยใช้ Cleveland open cup โดยใส่ตัวอย่างลงใน Cleveland open cup จากนั้นให้ความร้อนจนเกิดประกายไฟและติดไฟและบันทึกอุณหภูมิขณะที่เกิดจุดวาบไฟและจุดติดไฟ



รูปที่ 3.11 การทดสอบจุดวาบไฟและจุดติดไฟ

7. ปริมาณมลพิษทางอากาศที่ปลดปล่อยจากการผสมวัสดุเชื่อมประสานที่เกิดขึ้น 2 ชนิด ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) โดยใช้เครื่อง Q-rea plus ในการทดสอบ ซึ่งการทดสอบนี้จะทำการทดสอบในขณะที่ทำการผสมตัวอย่างที่น้ำหนัก 1000 กรัม ที่อุณหภูมิผสมตามที่ระบุในข้อ 3.1.1



รูปที่ 3.12 เครื่อง Q-rea plus

การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของวัสดุเชื่อมประสาน แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยจะทดสอบ 3 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสม

ตารางที่ 3.1 รายการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

การทดสอบ	มาตรฐาน	จำนวนตัวอย่าง/อัตราส่วนวัสดุผสมเพิ่ม
ความต้านทานการเจาะทะลุของบิทูมินัส (Penetration)	ทล.-ท. 403/2518	3 ตัวอย่าง
ความสามารถในการยืดตัว (Ductility)	ทล.-ท. 405/2519	3 ตัวอย่าง
ความหนืด (viscosity)	ASTM D4402	3 ตัวอย่าง
จุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูเมน	ASTM D36 / D36M	3 ตัวอย่าง
ความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึง (Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilometer)	ทล.-ท. 415/2548	3 ตัวอย่าง
จุดวาบไฟและจุดติดไฟ	ทล.-ท. 406/2519	3 ตัวอย่าง
ปริมาณการปลดปล่อย CO และ SO ₂	OSHA	3 ตัวอย่าง

3.2 การศึกษาตัวอย่างและการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม

3.2.1 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวมที่นำมาศึกษาเป็นมวลรวมชนิดหินปูน (Limestone) ในการศึกษานี้ใช้มวลรวม 3 ขนาด คือ ขนาด 1/2 นิ้ว ขนาด 3/8 นิ้ว และหินฝุ่นแสดงดังรูป 3.13



รูปที่ 3.13 วัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษา

3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม

ในการศึกษานี้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม ดังนี้

1. ค่าเทียบเท่าทราย (Sand Equivalent) ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.203/2515 วิธีการทดลองหาค่าเทียบเท่าทราย
2. ความสึกหรอ (Abrasion) ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.202/2515 วิธีการทดลองหาความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion
3. ขนาดลักษณะของมวลรวม (Gradation) ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.ม.205/2517 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม้ล้าง
4. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.207/2517 วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ
5. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.209/2518 วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดละเอียด
6. ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.210/2518 วิธีการทดลองหาค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index)
7. ค่าดัชนีความยาว (Elongation Index) ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.211/2518 วิธีการทดลองหาค่าดัชนีความยาว (Elongation Index)
8. ความคงทนต่อการกัดกร่อน (Soundness) ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.213/2531 วิธีการทดลองหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม โดยการใช้โซเดียมซัลเฟต หรือแมกนีเซียม ซัลเฟต

การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของวัสดุผสมรวม แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมรวม

การทดสอบ	มาตรฐาน	จำนวนตัวอย่าง
ค่าเทียบเท่าทราย (Sand Equivalent)	ทล.-ท.203/2515	3 ตัวอย่าง
ความสึกหรอ (Abrasion)	ทล.-ท.202/2515	3 ตัวอย่าง
ขนาดคละของมวลรวม (Gradation)	ทล.-ท.205/2517	3 ตัวอย่าง
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมหยาบ	ทล.-ท.207/2517	3 ตัวอย่าง
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมละเอียด	ทล.-ท.209/2518	3 ตัวอย่าง
ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index)	ทล.-ท.210/2518	3 ตัวอย่าง
ค่าดัชนีความยาว (Elongation Index)	ทล.-ท.211/2518	3 ตัวอย่าง
ความคงทนต่อการกัดกร่อน (Soundness)	ทล.-ท.213/2531	3 ตัวอย่าง

3.3 การออกแบบส่วนผสมโตนมาตติกแอสฟัลต์โดยวิธี Marshall

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนผสมของสโตนมาตติกแอสฟัลต์ โดยทำการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธี Marshall ตามมาตรฐาน ASTM D6926 Standard Practice for Preparation of bituminous Specimens Using Marshall ซึ่งออกแบบให้ก้อนตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 mm. สูง 64 mm. (ตามรูปที่ 3.14) และมีน้ำหนัก 1200 g จำนวน 3 ก้อนตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วนผสมที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ พลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE, พลาสติกกรีไซเคิลชนิด PET และเทอร์โมพลาสติกชนิด SBS ตามอัตราส่วน 2% 4% 6% 8% โดยน้ำหนักโดยใช้อุณหภูมิผสม 170°C



รูปที่ 3.14 ก่อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

3.4 การทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม

ในขั้นตอนนี้จะทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม (Optimum Asphalt Content) ด้วยเครื่องทดสอบ Marshall ตามมาตรฐาน ASTM D 6927 Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures โดยพิจารณาค่าเสถียรภาพ (Stability), ค่าความหนาแน่น (Density), ค่าการไหล (Flow), ช่องว่าง (Air Voids), เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ (VFA,%) และเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (VMA) ทำการเตรียมตัวอย่าง อัตราส่วนผสมละ 3 ตัวอย่างต่อเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสาน (6%, 6.5%, 7% โดยน้ำหนัก) แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายการเตรียมตัวอย่างเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม

ชนิดของวัสดุประสาน	จำนวนตัวอย่างต่อเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์
AC60/70	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + HDPE (2%)	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + HDPE (4%)	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + HDPE (6%)	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + HDPE (8%)	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + PET (2%)	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + PET (4%)	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + PET (6%)	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + PET (8%)	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + SBS (2%)	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + SBS (4%)	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + SBS (6%)	3 ตัวอย่าง
AC60/70 + SBS (8%)	3 ตัวอย่าง

ในการศึกษานี้พิจารณาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสม (Optimum Asphalt Content, OAC) ให้เป็นไปตามข้อกำหนดอัตราส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์สำหรับการบดอัดโดยวิธีมาร์แชลล์ (SMA Mixture Specification for Marshall Hammer Compacted Designs) (Elton Ray Brown และคณะ, 2542) แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ข้อกำหนดอัตราส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์สำหรับการบดอัดโดยวิธีมาร์แชลล์

คุณสมบัติ	ข้อกำหนด
Air voids, V_a (%)	4.0
VMA (%)	มากกว่าหรือเท่ากับ 17
VCAmix (%)	น้อยกว่า VCA _{drc}
Stability (N)	มากกว่าหรือเท่ากับ 6200
TSR (%)	มากกว่าหรือเท่ากับ 70
Draindown (%)	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.3

ที่มา: Elton Ray Brown และคณะ (2542)

3.5 การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมสโตนมาติกแอสฟัลต์ที่ใช้พลาสติกกรีซเกิดเป็นสารผสม

3.5.1 คุณสมบัติเชิงปริมาตร

จากข้อกำหนดในตารางที่ 3.4 ประกอบไปด้วยคุณสมบัติเชิงปริมาตร ได้แก่ ร้อยละช่องว่างอากาศ (Air voids, V_a), ร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม (voids in mineral aggregate, VMA) และร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมหยาบของก้อนตัวอย่างภายหลังการบดทับ (voids in coarse aggregate of the compacted mixture, VCA_{mix}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ โดยกำหนดให้มีช่องว่างอากาศเท่ากับ 4% และสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (VMA) ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 17% อีกทั้งเพื่อให้ได้โครงสร้างของมวลรวมเป็นแบบ stone-on-stone contact อีกทั้งร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมส่วนหยาบของก้อนตัวอย่างภายหลังการบดทับ (VCA_{mix}) จะต้องมีค่าน้อยกว่าร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมส่วนหยาบในการทดสอบ dry-rodded test ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 ในบทที่ 2

3.5.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรม

ข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ ค่าเสถียรภาพ (stability) จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6200 N และการไหลแยกตัวของวัสดุเชื่อมประสาน (Drain down) ต้องมีค่าไม่เกิน 0.3% อีกทั้งสัดส่วนความเค้นแรงดึง (Tensile Stress Ratio, TSR) ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 70%

3.5.2.1 การทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหล

เสถียรภาพคือ ความสามารถในการรับน้ำหนักโดยไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่าง ดังนั้นค่าเสถียรภาพเป็นค่าที่บอกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตจะคงทนต่อการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อน้ำหนักมากระทำ ในขั้นตอนนี้จะนำก้อนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมมาทำการทดสอบหาค่าเสถียรภาพและค่าการไหล และทำการวิเคราะห์หาความหนาแน่นกับช่องว่างภายในส่วนผสม โดยใช้อุปกรณ์และวิธีการตามมาตรฐาน ASTM D 1559 Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus หรือเทียบเท่า AASHTO T 245 โดยตัวอย่างที่มีค่าเสถียรภาพสูงจะต้านทานแรงกระทำต่อการเปลี่ยนรูปได้ดี



รูปที่ 3.15 การทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหลด้วยเครื่องทดสอบ Marshall

3.5.2.2 การทดสอบการไหลแยกตัวของวัสดุเชื่อมประสาน Drain Down

การไหลแยกตัวของวัสดุเชื่อมประสานคือการที่วัสดุเชื่อมประสานแยกจากกัน ทำให้ไม่สามารถทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างมวลรวมได้ ในขั้นตอนนี้จะใช้วิธีการทดสอบ Schellenberg Binder Drainage โดยจะนำตัวอย่างส่วนผสมโตนมาสดักที่ยังไม่ได้บดอัด (uncompacted stone mastic asphalt mixture) ปริมาณ 1 กิโลกรัม เทใส่บีกเกอร์ขนาด 800 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเทตัวอย่างออกจากบีกเกอร์และชั่งน้ำหนักหาส่วนผสมที่คงติดอยู่ในบีกเกอร์ โดยที่น้ำหนักที่ค้างอยู่ต้องน้อยกว่า 0.3% ของน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด ตามมาตรฐาน EN 12697-18 BITUMINOUS MIXTURES TEST METHODS BINDER DRAINAGE from SAI Global



รูปที่ 3.16 การทดสอบการไหลแยกตัว

3.5.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

กำลังรับแรงดึงทางอ้อมคือความสามารถในการรับแรงที่กระทำในแนวตั้งของก้อนตัวอย่างโดยไม่เกิดความเสียหาย การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมจะทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยหาความเค้นดึงที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างเนื่องจากความเค้นอัด โดยให้แรงกดกระทำกับก้อนตัวอย่างในแนวตั้งของเส้นผ่านศูนย์กลางก้อนทดสอบ น้ำหนักที่กระทำจะเปลี่ยนเป็นแรงดึงในแนวตั้งจากกับทิศทางของน้ำหนักที่กระทำในแนวตั้งของเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งวัสดุที่มีค่า Tensile stress สูงสามารถบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อแรงภายนอกที่กระทำ โดยที่ค่า Tensile stress สูงจะสามารถรับดึงได้มาก ค่าพิกัดกำลังรับแรงดึงทางอ้อมได้จากสมการที่ 3.1 ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 6931 Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures และ ASTM D 4867 Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixture ดังนี้



รูปที่ 3.17 การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

$$S_t = \frac{2000P}{\pi D t} \quad (3.1)$$

โดยที่ S_t = Tensile stress, kPa

- P = น้ำหนักที่กระทำกับก้อนตัวอย่าง, N
 t = ความสูงของก้อนตัวอย่างก่อนทดสอบ, mm.
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง, mm.

การทดสอบหาค่าความเค้นแรงดึงที่เกิดขึ้นภายในก้อนตัวอย่าง ทำได้โดยให้แรงกดกระทำกับก้อนตัวอย่างในแนวตั้งของเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง จนกระทั่งก้อนตัวอย่างเกิดการวิบัติ ในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบก้อนตัวอย่างทั้งในสภาวะเปียกและสภาวะแห้ง แล้วคำนวณค่า Tensile Stress Ratio (TSR) ได้จากสมการที่ 3.2 โดยที่วัสดุที่มีค่า %TSR สูงจะมีความต้านทานความชื้นได้ดี ซึ่งจากข้อกำหนด Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements %TSR ต่ำสุดจะมีค่าประมาณ 0.7 ถึง 0.8

$$TSR = \left(\frac{S_{tm}}{S_{td}} \right) 100 \quad (3.2)$$

- โดยที่ TSR = tensile stress ratio, %
 S_{tm} = ค่าเฉลี่ยของ tensile stress ในสภาวะเปียก
 S_{td} = ค่าเฉลี่ยของ tensile stress ในสภาวะแห้ง

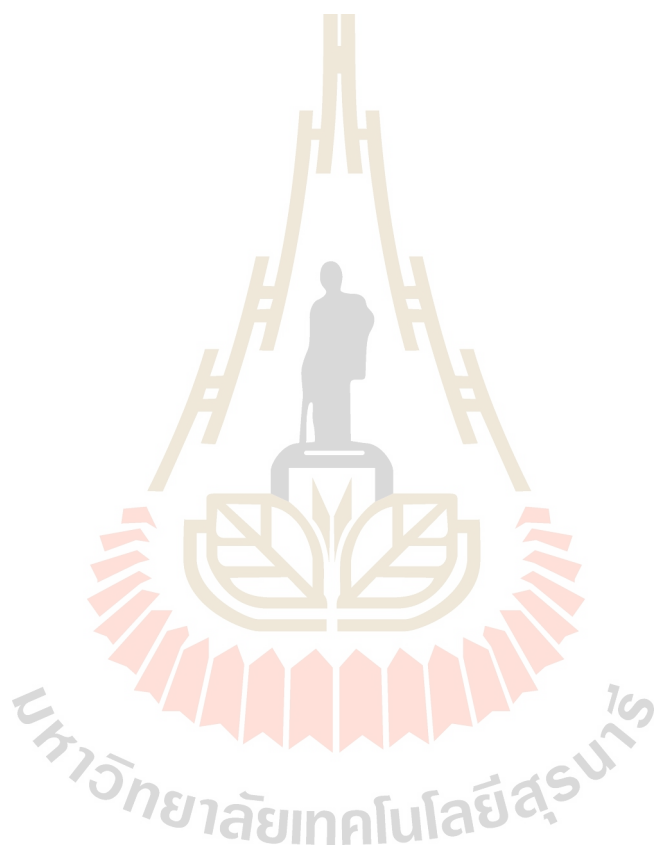
การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้พลาสติกกรีซเคลเป็นส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.5 รายการตัวอย่างสำหรับการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้พลาสติกกรีซเคลเป็นส่วนผสม

การทดสอบ	มาตรฐาน	จำนวนตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วนผสม
การทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหล	ASTM D 1559	3 ตัวอย่าง
การทดสอบการไหลแยกตัวของตัวเชื่อมประสาน Drain Down	EN 12697	3 ตัวอย่าง
การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม	ASTM D 6931	สภาวะเปียก 3 ตัวอย่าง
	ASTM D 4867	สภาวะแห้ง 3 ตัวอย่าง

3.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการทำการวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมเพิ่ม หาเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม และวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพ (Stability) การไหล (Flow) อัตราการไหลแยกตัว (Drain Down) กำลังรับแรงดึงทางอ้อม (IDT) และ %TSR ระหว่างส่วนผสมที่ใช้พลาสติกกรีซเคลซนิต HDPE และพลาสติกกรีซเคลซนิต PET เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกจากสไตรีนใหม่ชนิด SBS



บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

ในบทนี้เป็นการรวบรวมผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการศึกษาการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสม การทดสอบคุณสมบัติของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุปรับปรุงคุณภาพชนิดต่างๆ และการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุปรับปรุงคุณภาพชนิดต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์

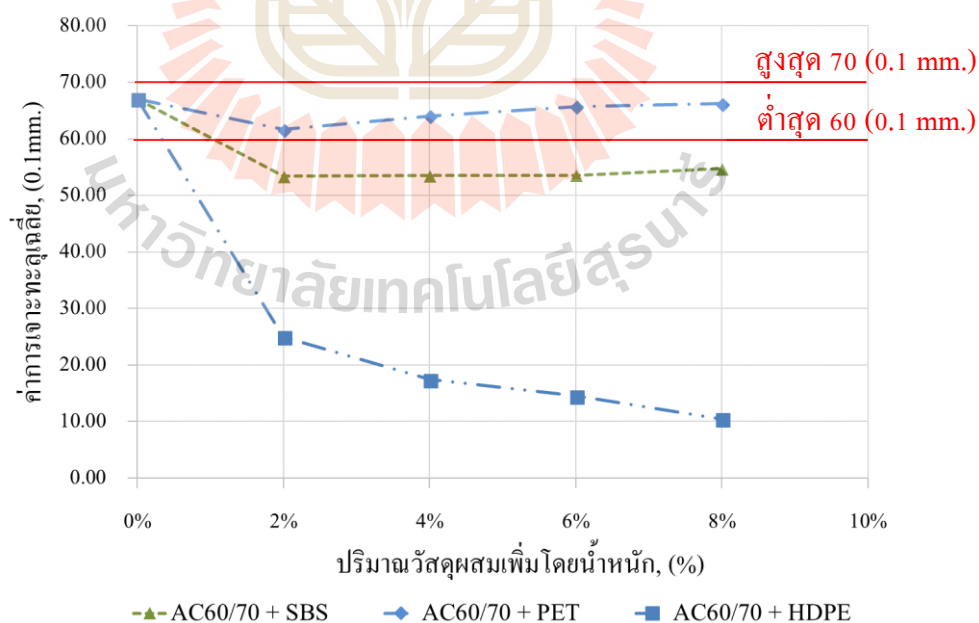
4.1.1 การทดสอบค่าการเจาะทะลุ (Penetration)

ผลการศึกษาค่าความสามารถในการเจาะทะลุโดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 403/2518 (แสดงดังภาคผนวก ก.1 โดยค่าการเจาะทะลุเฉลี่ยของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 4.1 ภาคผนวก ก1 และรูปที่ 4.1) จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อผสมพลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE พลาสติกกรีไซเคิลชนิด PET และพอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความหนืดเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการเจาะทะลุมีแนวโน้มต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผสมพลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE ที่อัตราส่วน 2% โดยเกณฑ์มาตรฐานกำหนดค่าต้านทานการเจาะทะลุต่ำสุดเท่ากับ 60 (0.1mm) และสูงสุด 70 (0.1mm) ตามมาตรฐาน มทข.234-2545 มาตรฐานวัสดุโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานโมดิฟายด์

จากการที่ได้ทำการจำลองสถานการณ์ของระบบการผลิตในขั้นตอนการตกแต่ง หลังจากขั้นตอนการขึ้นรูป ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองสถานการณ์โดยการใช้กฎการจัดลำดับงานที่เป็นกฎพื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือกฎ SPT และ กฎ LPT ทั้งยังประยุกต์จากกฎ SPT เพื่อให้เป็นการคิดแบบฮิวริสติก เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผลิต ด้วยการวัดผลจาก เวลาเฉลี่ยการไหลของงาน เวลาสูงสุดของการไหลของงาน และปริมาณงานระหว่างกระบวนการ ทั้งการวิเคราะห์ในแต่ละจุดประสงค์เดียว และการวิเคราะห์จุดประสงค์รวมมากกว่าหนึ่งจุดประสงค์ พร้อมทั้งวิเคราะห์ความไวของระบบนี้ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่มีผลกับระบบแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบค่าการเจาะทะลุของวัสดุเชื่อมประสาน

ชนิดของวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษา	ความสามารถในการเจาะทะลุ (0.1mm)
AC 60/70	67.05
AC60/70 + 2% Virgin SBS	53.24
AC60/70 + 4% Virgin SBS	53.52
AC60/70 + 6% Virgin SBS	53.57
AC60/70 + 8% Virgin SBS	56.03
AC60/70 + 2% Recycled HDPE	24.98
AC60/70 + 4% Recycled HDPE	17.44
AC60/70 + 6% Recycled HDPE	14.56
AC60/70 + 8% Recycled HDPE	10.44
AC60/70 + 2% Recycled PET	61.67
AC60/70 + 4% Recycled PET	64.07
AC60/70 + 6% Recycled PET	65.72
AC60/70 + 8% Recycled PET	66.21



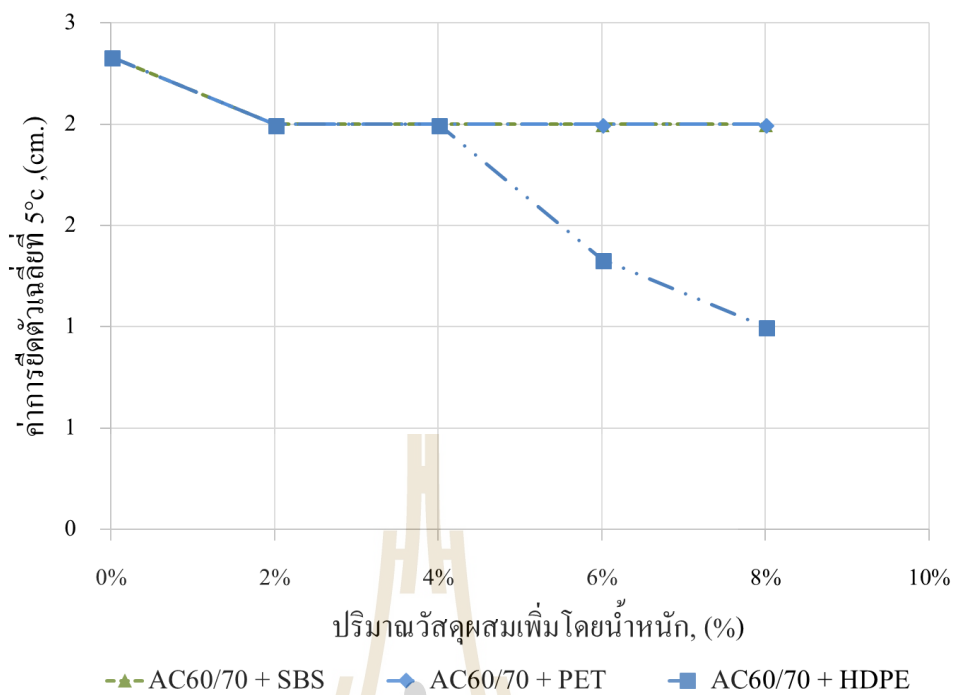
รูปที่ 4.1 ค่าการเจาะทะลุเฉลี่ย

4.1.2 การทดสอบค่าการยืดตัว (Ductility)

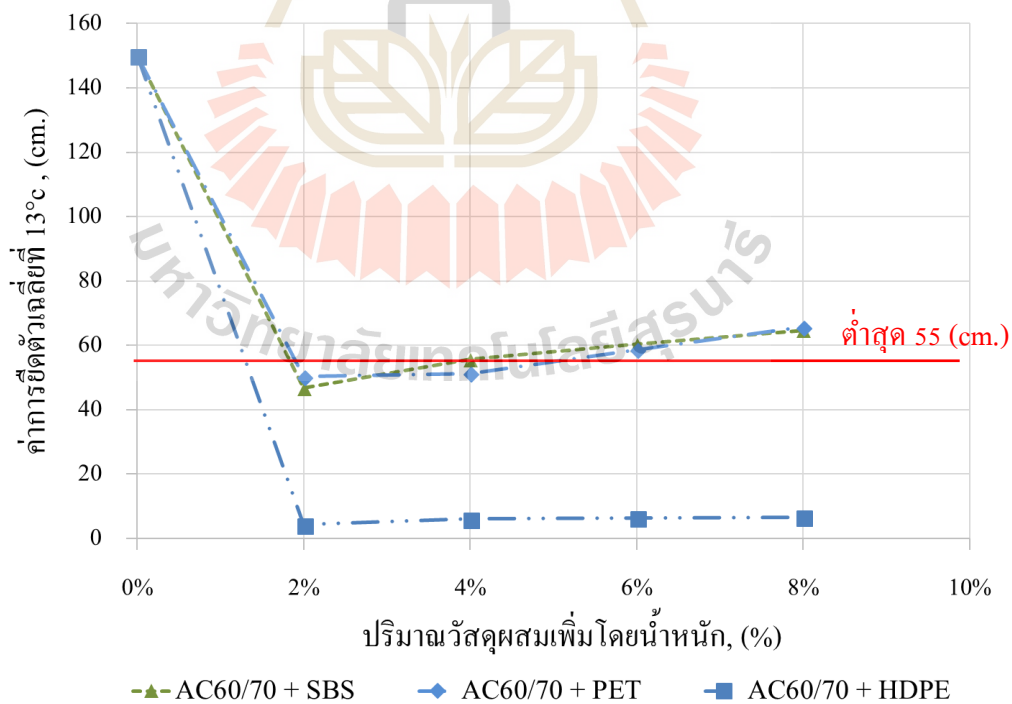
ผลการทดสอบค่าการยืดตัว (Ductility) ที่อุณหภูมิ 5°C, 15°C และ 25°C ตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 405/2519 แสดงในตารางที่ 4.2, ภาคผนวกที่ ก.2, รูปที่ 4.2 และ 4.3 จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อผสมพลาสติกกรีไฮเซลชนิด HDPE, พลาสติกกรีไฮเซลชนิด PET และพอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC60/70 จะทำให้วัสดุมีความสามารถในการยืดตัวลดลงโดยเฉพาะการใช้พลาสติกกรีไฮเซลชนิด HDPE เป็นส่วนผสมมีค่าความยืดตัวที่อุณหภูมิ 13 °C ต่ำกว่า 10 cm. ซึ่งค่าการยืดตัวขั้นต่ำที่อุณหภูมิ 13°C ของวัสดุพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ ตามมาตรฐาน มทข.234-2545 กำหนดไว้เท่ากับ 55 cm.

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าการยืดตัวเฉลี่ย

ชนิดของวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษา	ค่าการยืดตัวเฉลี่ย (cm)		
	5°C	13°C	25°C
AC 60/70	2	150	150
AC60/70 + 2% Virgin SBS	2	46.7	150
AC60/70 + 4% Virgin SBS	2	55.7	150
AC60/70 + 6% Virgin SBS	2	60.3	150
AC60/70 + 8% Virgin SBS	2	64.7	150
AC60/70 + 2% Recycled HDPE	2	4.3	150
AC60/70 + 4% Recycled HDPE	2	6.1	150
AC60/70 + 6% Recycled HDPE	1	6.5	150
AC60/70 + 8% Recycled HDPE	1	6.7	150
AC60/70 + 2% Recycled PET	2	50.3	150
AC60/70 + 4% Recycled PET	2	51.3	150
AC60/70 + 6% Recycled PET	2	58.7	150
AC60/70 + 8% Recycled PET	2	65.7	150



รูปที่ 4.2 ค่าการยึดตัวเฉลี่ยที่ 5 องศาเซลเซียส



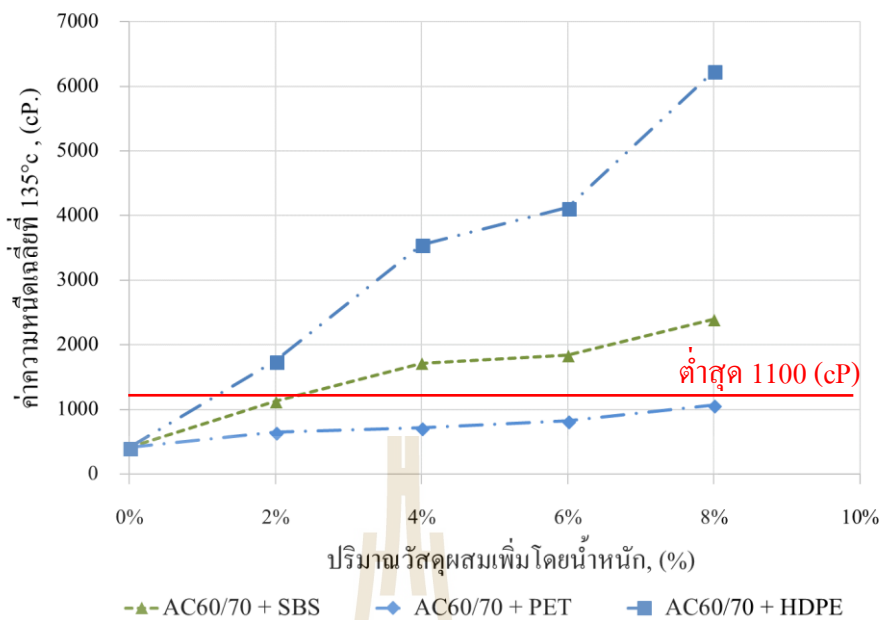
รูปที่ 4.3 ค่าการยึดตัวเฉลี่ยที่ 13 องศาเซลเซียส

4.1.3 การทดสอบความหนืด (viscosity)

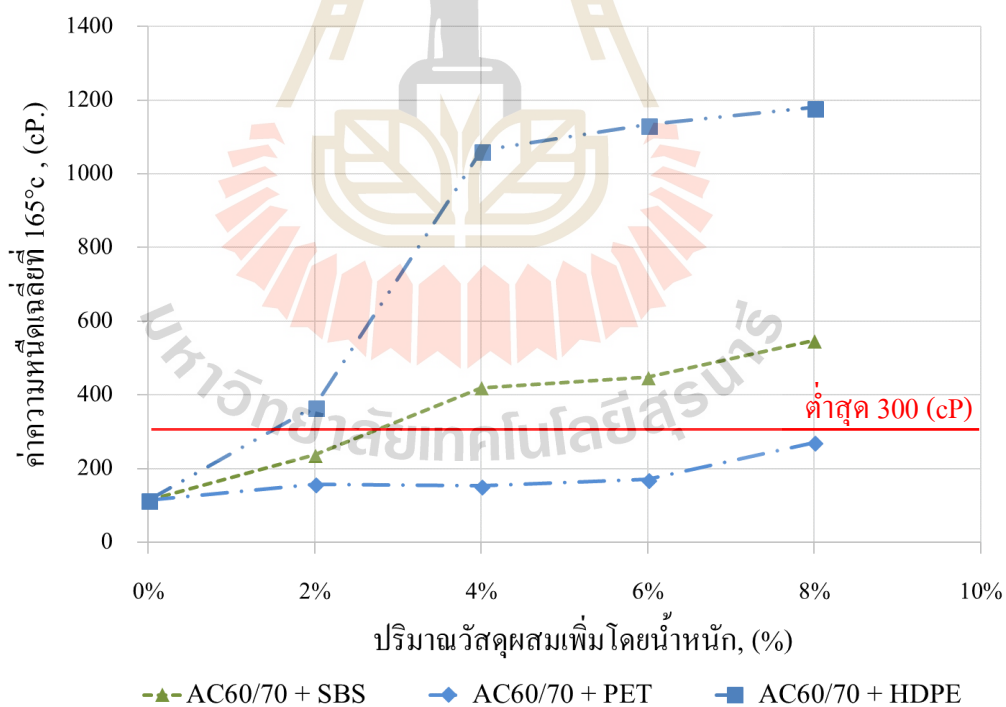
ผลการทดสอบความหนืด (viscosity) ในการทดสอบนี้จะทดสอบที่อุณหภูมิ 135°C และ 165°C ตามมาตรฐานวิธีการทำสอบที่ ASTM D4402 แสดงดังตารางที่ 4.3 และภาคผนวก ก.3, รูปที่ 4.4 และ 4.5 จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความหนืดของแอสฟัลต์ซีเมนต์มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผสมพลาสติกกรีซเคลซนิต HDPE, พลาสติกกรีซเคลซนิต PET และพอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS ซึ่งจากการทดสอบพบว่าการผสมพลาสติกกรีซเคลซนิต PET วัสดุโมดิฟายด์ แอสฟัลต์จะมีค่าความหนืดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งความหนืดที่อุณหภูมิ 135°C ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 1100 cP และที่อุณหภูมิ 165°C ต้องไม่ต่ำกว่า 300 cP ตามมาตรฐาน มทข.234-2545 มาตรฐาน วัสดุโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบความหนืด

ชนิดของวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษา	ความหนืดเฉลี่ย (cP)	
	135°C	165°C
AC 60/70	414	115
AC60/70 + 2% Virgin SBS	1124	237
AC60/70 + 4% Virgin SBS	1715	419
AC60/70 + 6% Virgin SBS	1840	448
AC60/70 + 8% Virgin SBS	2396	547
AC60/70 + 2% Recycled HDPE	1752	368
AC60/70 + 4% Recycled HDPE	3555	1064
AC60/70 + 6% Recycled HDPE	4125	1134
AC60/70 + 8% Recycled HDPE	6240	1181
AC60/70 + 2% Recycled PET	649	158
AC60/70 + 4% Recycled PET	715	153
AC60/70 + 6% Recycled PET	825	171
AC60/70 + 8% Recycled PET	1067	271



รูปที่ 4.4 ความหนืดเฉื่อยที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส



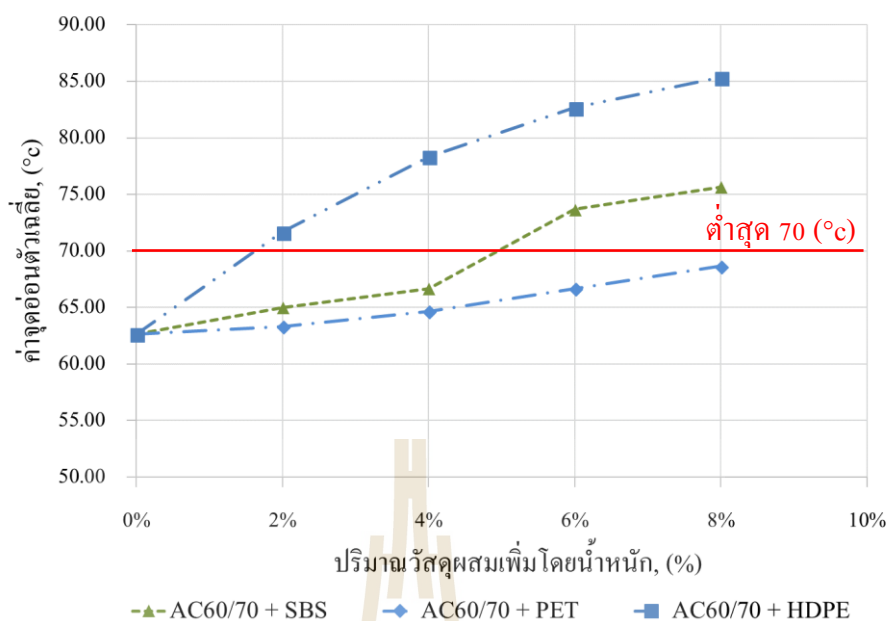
รูปที่ 4.5 ความหนืดเฉื่อยที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส

4.1.4 การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุเชื่อมประสาน

ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุเชื่อมประสาน ตามมาตรฐานวิธีทดสอบที่ ASTM D36/D36M-14e1 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen แสดงดังตารางที่ 4.4, ภาคผนวก ก.4 และรูปที่ 4.6 จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อผสมพลาสติกกรีซไคลินิก HDPE, พลาสติกกรีซไคลินิก PET และพอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS เข้ากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะทำให้แอสฟัลต์มีจุดอ่อนตัวสูงขึ้น แสดงว่าต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำให้วัสดุแอสฟัลต์อ่อนตัวและเหลวพอที่จะเคลือบมวลรวมได้ โดยการใช้พลาสติกกรีซไคลินิก HDPE เป็นสารผสมเพิ่ม ส่งผลให้จุดหลอมเหลวเกินค่ามาตรฐานต่ำสุด ซึ่งจากเกณฑ์มาตรฐานกำหนดไว้ไม่ต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน มทข.234-2545 มาตรฐานวัสดุโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานโมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวเฉลี่ยของวัสดุเชื่อมประสาน

ชนิดวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษา	จุดอ่อนตัวเฉลี่ยของวัสดุเชื่อมประสาน (°C)
AC 60/70	62.67
AC60/70 + 2% Virgin SBS	65.00
AC60/70 + 4% Virgin SBS	66.67
AC60/70 + 6% Virgin SBS	73.67
AC60/70 + 8% Virgin SBS	75.67
AC60/70 + 2% Recycled HDPE	71.67
AC60/70 + 4% Recycled HDPE	78.33
AC60/70 + 6% Recycled HDPE	82.67
AC60/70 + 8% Recycled HDPE	85.33
AC60/70 + 2% Recycled PET	63.33
AC60/70 + 4% Recycled PET	64.67
AC60/70 + 6% Recycled PET	66.67
AC60/70 + 8% Recycled PET	68.67



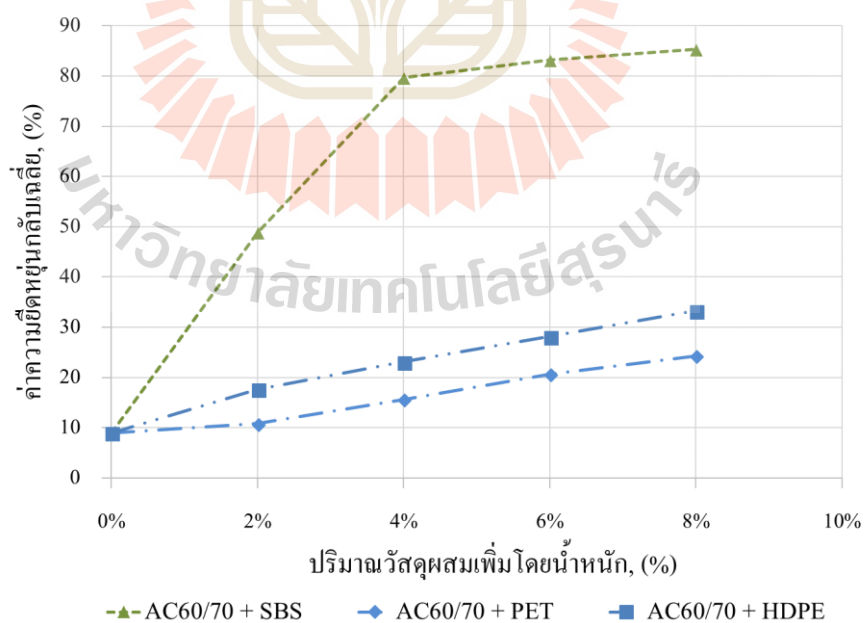
รูปที่ 4.6 จุดอ่อนตัวเฉลี่ยของวัสดุเชื่อมประสาน (Softening Point)

4.1.5 การทดสอบหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุเชื่อมประสานโดยเครื่องดึง

ผลการทดสอบหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุเชื่อมประสาน โดยเครื่องดึง (Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilometer) ตามมาตรฐานการทดสอบที่ทล.-ท. 415/2548 แสดงดังตารางที่ 4.5, ภาคผนวก ก.5 และรูปที่ 4.7 จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อผสมพลาสติกกรีซชนิด HDPE, พลาสติกกรีซชนิด PET และพอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะทำให้วัสดุแอสฟัลต์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น และจะเห็นได้ชัดเมื่อผสมพอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS ที่อัตราส่วน 4% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความยืดหยุ่นกลับเฉื่อย

ชนิดวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษา	ความยืดหยุ่นกลับเฉื่อย (%)
AC 60/70	9.0
AC60/70 + 2% Virgin SBS	48.8
AC60/70 + 4% Virgin SBS	79.7
AC60/70 + 6% Virgin SBS	83.2
AC60/70 + 8% Virgin SBS	85.3
AC60/70 + 2% Recycled HDPE	17.7
AC60/70 + 4% Recycled HDPE	23.2
AC60/70 + 6% Recycled HDPE	28.2
AC60/70 + 8% Recycled HDPE	33.3
AC60/70 + 2% Recycled PET	10.8
AC60/70 + 4% Recycled PET	15.7
AC60/70 + 6% Recycled PET	20.7
AC60/70 + 8% Recycled PET	24.3



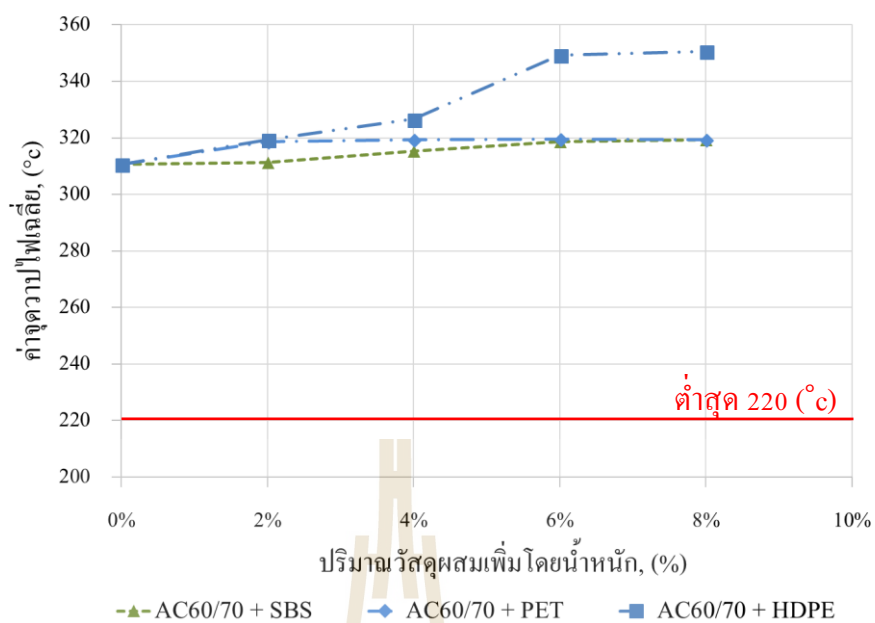
รูปที่ 4.7 ความยืดหยุ่นกลับเฉื่อย

4.1.6 การทดสอบจุดวาบไฟและจุดติดไฟ

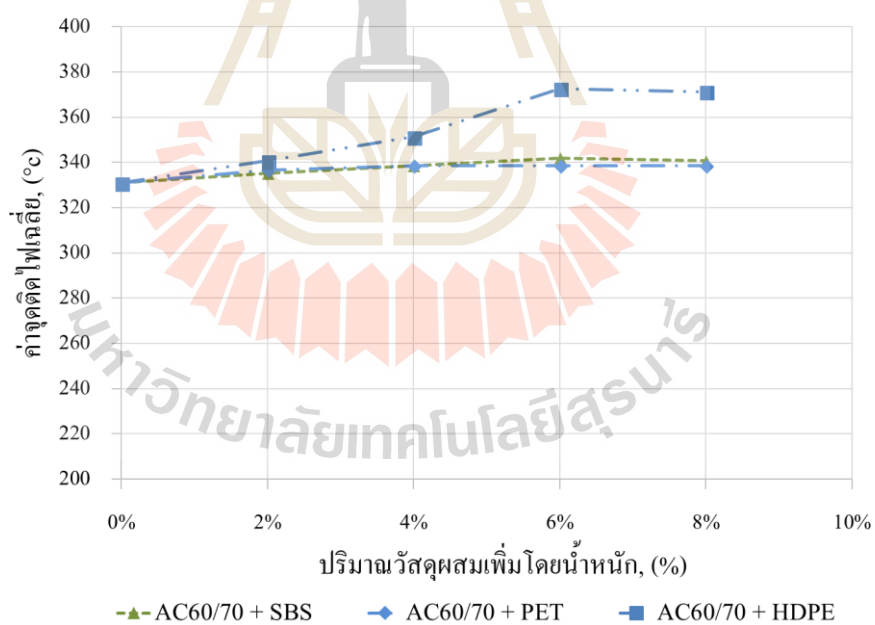
ผลการทดสอบจุดวาบไฟและจุดติดไฟโดยใช้ cleveland open cup ตามมาตรฐานจุดวาบไฟและจุดติดไฟการทดสอบที่ ทล.-ท.406/2519 แสดงดังภาคผนวก ก.6 และสามารถแสดงค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 4.6 รูปที่ 4.8 และ 4.9 จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อผสมพลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE พลาสติกกรีไซเคิลชนิด PET และพอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะทำให้จุดวาบไฟและจุดติดไฟมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิขั้นต่ำตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท.406/2519 อีกทั้งแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 ซึ่งการผสมด้วยพลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE มีจุดวาบไฟและจุดติดไฟที่อุณหภูมิสูงกว่าการผสมด้วยพลาสติกกรีไซเคิลชนิด PET และพอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบจุดวาบไฟและจุดติดไฟ

ชนิดวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษา	จุดวาบไฟเฉลี่ย (°C)	จุดติดไฟเฉลี่ย (°C)
AC 60/70	311	331
AC60/70 + 2% Virgin SBS	311	335
AC60/70 + 4% Virgin SBS	315	339
AC60/70 + 6% Virgin SBS	319	342
AC60/70 + 8% Virgin SBS	319	341
AC60/70 + 2% Recycled HDPE	311	341
AC60/70 + 4% Recycled HDPE	319	351
AC60/70 + 6% Recycled HDPE	327	373
AC60/70 + 8% Recycled HDPE	349	371
AC60/70 + 2% Recycled PET	319	337
AC60/70 + 4% Recycled PET	319	339
AC60/70 + 6% Recycled PET	320	339
AC60/70 + 8% Recycled PET	319	339



รูปที่ 4.8 จุดวาบไฟเฉลี่ย



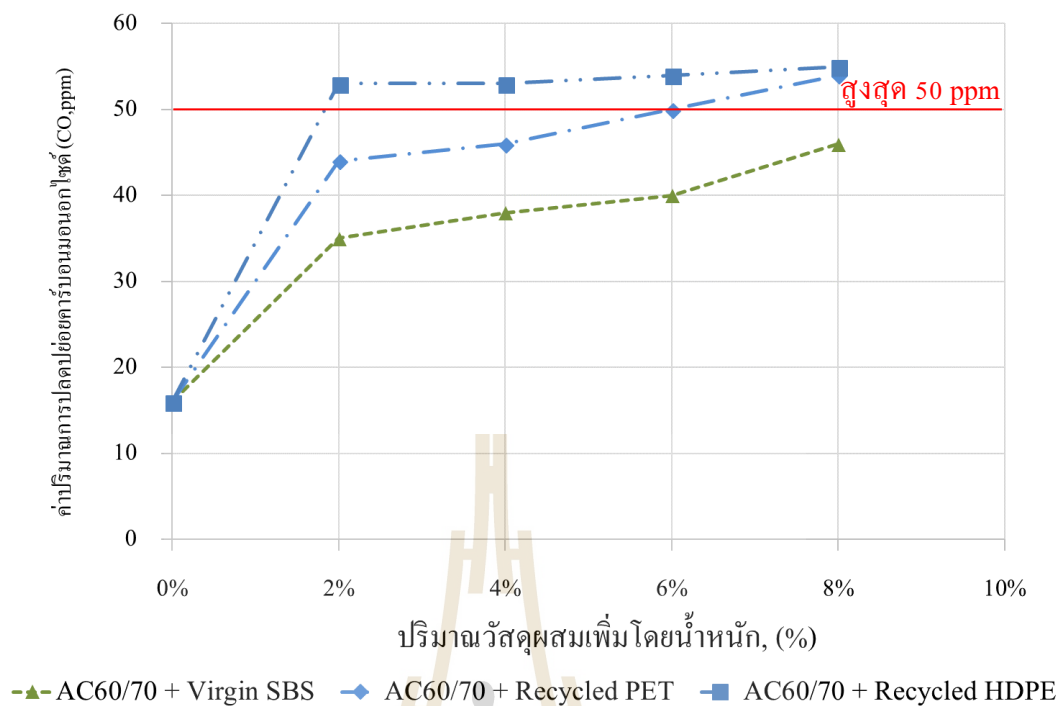
รูปที่ 4.9 จุดตีไฟเฉลี่ย

4.1.7 การทดสอบการปลดปล่อยปริมาณมลพิษในอากาศ

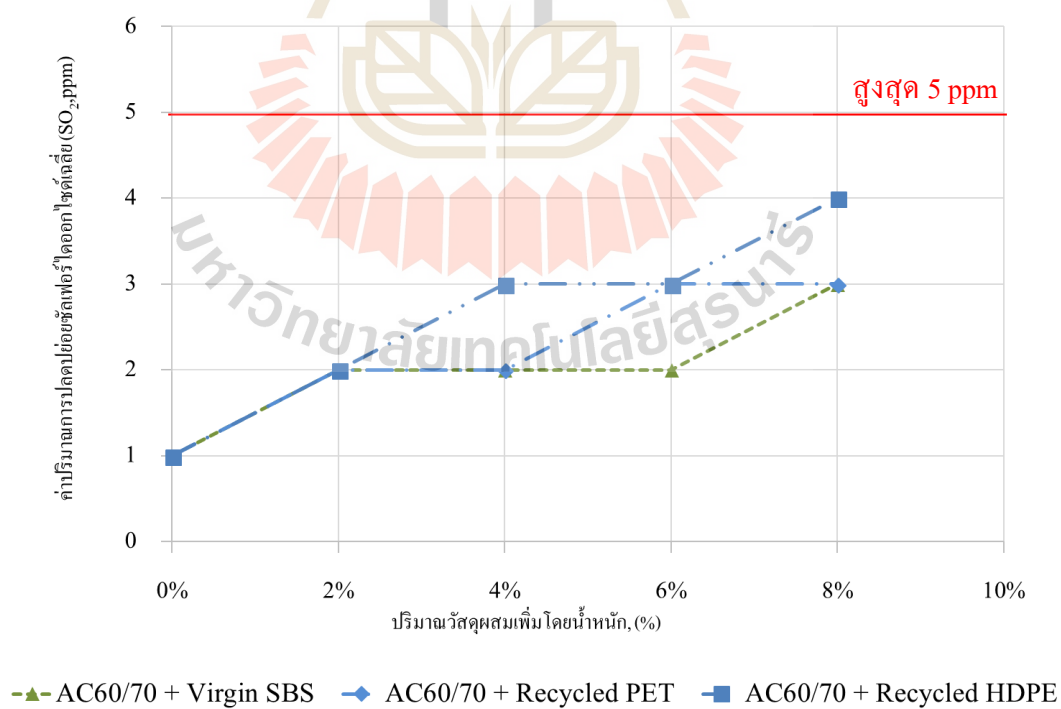
ผลการทดสอบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) แสดงดังตารางที่ 4.7, ภาคผนวก ก.7, รูปที่ 4.100 และ 4.11 จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าการผสมพลาสติกกรีซเคลิซชนิด HDPE จะปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากกว่าการผสมด้วยพลาสติกกรีซเคลิซชนิด PET และพอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS ปริมาณการปล่อยจะเพิ่มตามอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น และการผสมด้วยพลาสติกกรีซเคลิซชนิด HDPE ที่อัตราส่วน 8% จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มากกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งหากสัมผัสความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มากกว่า 50 ppm

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ขณะผสม

ชนิดวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษา	ปริมาณมลพิษอากาศที่ถูกปลดปล่อยในขั้นตอนการผสม (ppm)	
	คาร์บอนมอนอกไซด์	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์
	(CO)	(SO ₂)
AC 60/70	16	1
AC60/70 + 2% Virgin SBS	35	2
AC60/70 + 4% Virgin SBS	38	2
AC60/70 + 6% Virgin SBS	40	2
AC60/70 + 8% Virgin SBS	46	3
AC60/70 + 2% Recycled HDPE	53	2
AC60/70 + 4% Recycled HDPE	53	3
AC60/70 + 6% Recycled HDPE	54	3
AC60/70 + 8% Recycled HDPE	55	4
AC60/70 + 2% Recycled PET	44	2
AC60/70 + 4% Recycled PET	46	2
AC60/70 + 6% Recycled PET	50	3
AC60/70 + 8% Recycled PET	54	3



รูปที่ 4.10 ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)



รูปที่ 4.11 ปริมาณการปลดปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม

4.2.1 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ

ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ทล.-ท. 207/2517 การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ เทียบเท่า AASHTO T 85-70 และ ทล.-ท. 209/2518 การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูซึมน้ำของวัสดุ Aggregate ชนิดเม็ดละเอียด ซึ่งสามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.8 และตารางภาคผนวก ข.1

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของมวลรวม

	ชนิดของมวลรวม		
	หินฝุ่น	3/8"	1/2"
ค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	2.67	2.66	2.64

4.2.2 ผลการทดสอบความสึกหรอ

ผลการทดสอบค่าความสึกหรอของมวลรวมตามมาตรฐาน ทล.-ท. 202/2515 การทดลองหาความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion หรือ เทียบเท่า ASTM C 131 และ C 535 แสดงดังตารางที่ 4.9 และภาคผนวก ข.2

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยความสึกหรอเฉลี่ยของมวลรวม

	ชนิดของมวลรวม		
	หินฝุ่น	3/8"	1/2"
ความสึกหรอเฉลี่ยของมวลรวม (%)	36.88	36.35	35.73

4.2.3 ผลการทดสอบค่าดัชนีความแบน

ผลการทดสอบค่าดัชนีความแบนตามมาตรฐาน ทล.-ท. 210/2518 การทดลองหาค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) เทียบเท่า BS 812:1967 แสดงดังตารางที่ 4.10 และตารางภาคผนวก ข.3

ตารางที่ 4.10 ค่าดัชนีความแบนเฉลี่ย

	ชนิดของมวลรวม		
	หินฝุ่น	3/8"	1/2"
ค่าดัชนีความแบนเฉลี่ย (%)	-	0.42	0.43

4.2.4 ผลการทดสอบค่าครรชนีความยาว

ผลการทดสอบค่าครรชนีความยาวตามมาตรฐาน ทล.-ท. 211/2518 การทดลองหาค่าครรชนีความยาว (Elongation Index) เทียบเท่า BS 812:1967 แสดงดังตารางที่ 4.11 และตารางภาคผนวก ข.4

ตารางที่ 4.11 ค่าครรชนีความยาวเฉลี่ย

	ชนิดของมวลรวม		
	หินฝุ่น	3/8"	1/2"
ค่าครรชนีความยาวเฉลี่ย (%)	-	0.65	0.83

4.2.5 ผลการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อน

ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ทล.-ท. 213/2531 การทดลองหาค่าความคงทนของมวลรวม เทียบเท่า AASHTO T 104 หรือ ASTM C 88 แสดงดังตารางที่ 4.12 และตารางภาคผนวก ข.5

ตารางที่ 4.12 ความคงทนต่อการกัดกร่อนเฉลี่ย

	ชนิดของมวลรวม		
	หินฝุ่น	3/8"	1/2"
ความคงทนต่อการกัดกร่อนเฉลี่ย (%)	1.365	1.999	1.248

4.2.6 ผลการทดสอบค่าเทียบเท่าทราย

ผลการทำสอบค่าเทียบเท่าทรายตามมาตรฐาน ทล.-ท. 203/2515 การทดลองหาค่า Sand Equivalent หรือเทียบเท่า AASHTO T 176 โดยจากการทดสอบมีค่าเทียบเท่าทรายเท่ากับ 57.22 ซึ่งสามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.13 และตารางภาคผนวก ข.6

ตารางที่ 4.13 ค่าเทียบเท่าทรายเฉลี่ย

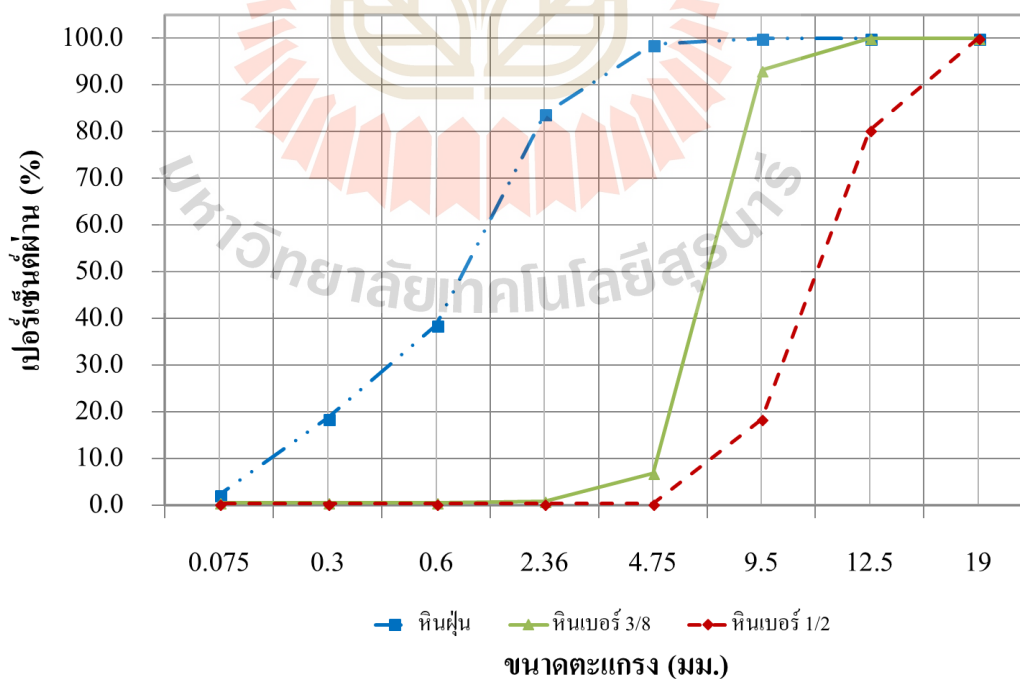
	ชนิดของมวลรวม		
	หินฝุ่น	3/8"	1/2"
ค่าเทียบเท่าทรายเฉลี่ย (%)	57.22	-	-

4.2.7 ผลการหาขนาดคละของมวลรวมแต่ละชนิด

ผลการทดสอบขนาดคละมวลรวมตามมาตรฐาน ทล.-ท. 204/2516 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม้ล้าง หรือเทียบเท่า AASHTO T 27-70 โดยการทดสอบสามารถแสดงเปอร์เซ็นต์ค้ำตะแกรงได้ดังตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.14 ขนาดคละของมวลรวมแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษา

ขนาดตะแกรง		ปูนซีเมนต์	หินฝุ่น	3/8"	1/2"	ขนาดคละที่ใช้	ข้อกำหนด
19 mm	3/4"	10	10	50	30	100	100
12.5 mm	1/2"	10	10	50	24.1	94.1	85-95
9.5 mm	3/8"	10	10	46.5	5.5	72.1	70-75
4.75 mm	เบอร์ 4	10	9.9	3.4	0.1	23.2	20-28
2.36 mm	เบอร์ 8	10	8.4	0.4	0.1	18.9	16-24
0.6 mm	เบอร์ 30	9.9	3.9	0.3	0.1	14.1	12-16
0.3 mm	เบอร์ 50	9.8	1.8	0.2	0.1	12.0	12-15
0.075 mm	เบอร์ 200	9.8	0.2	0.2	0.1	9.4	8-10



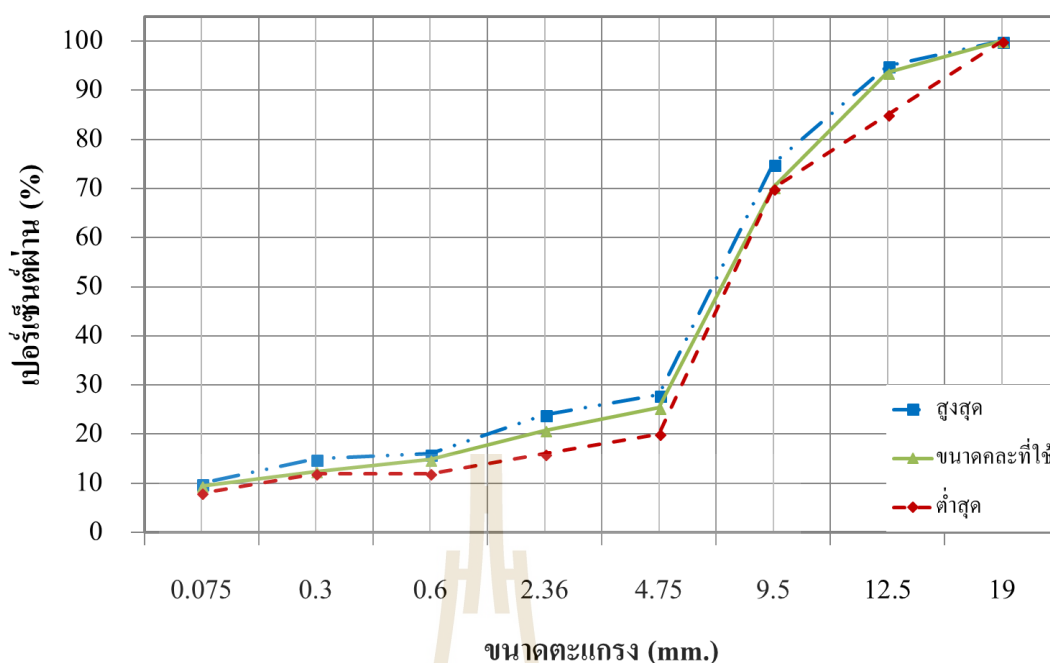
รูปที่ 4.12 ขนาดคละของมวลรวมแต่ละขนาดที่ใช้ในการศึกษา

4.3 ผลการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

จากนั้นนำตัวอย่างมวลรวมซึ่งประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ 10% (120 กรัม) หินฝุ่น 10% (120 กรัม) มวลรวมขนาด 3/8" 50% (600 กรัม) และมวลรวมขนาด 1/2" 30% (360 กรัม) นำไปหาขนาดผลแสดงได้ดังตาราง 4.15 และรูปที่ 4.13 โดยทำการผสมวัสดุเชื่อมประสานในอัตราส่วน 6, 6.5 และ 7 % โดยน้ำหนักของมวลรวม ซึ่งมีน้ำหนัก 1,200 กรัม โดยในการศึกษาได้เลือกขนาดผลของมวลรวมให้เป็นไปตามข้อกำหนดของวัสดุผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ขนาด (Nominal Maximum Aggregate Size, NMAS) 12.5 mm

ตารางที่ 4.15 ขนาดผลที่ใช้ในการศึกษา

ขนาดตะแกรง		% ผ่าน	ข้อกำหนด SMA ขนาด 12.5 mm NMAS
19 mm	3/4"	100.0	100
12.5 mm	1/2"	93.6	85-95
9.5 mm	3/8"	70.3	70-75
4.75 mm	4	25.4	20-28
2.36 mm	8	20.8	16-24
0.6 mm	30	14.8	12-16
0.3 mm	50	12.4	12-15
0.075 mm	200	9.5	8-10
ถาด		0	0



รูปที่ 4.13 ขนาดกะทัดรัดของมวลรวมที่ใช้ในการศึกษา

4.4 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม

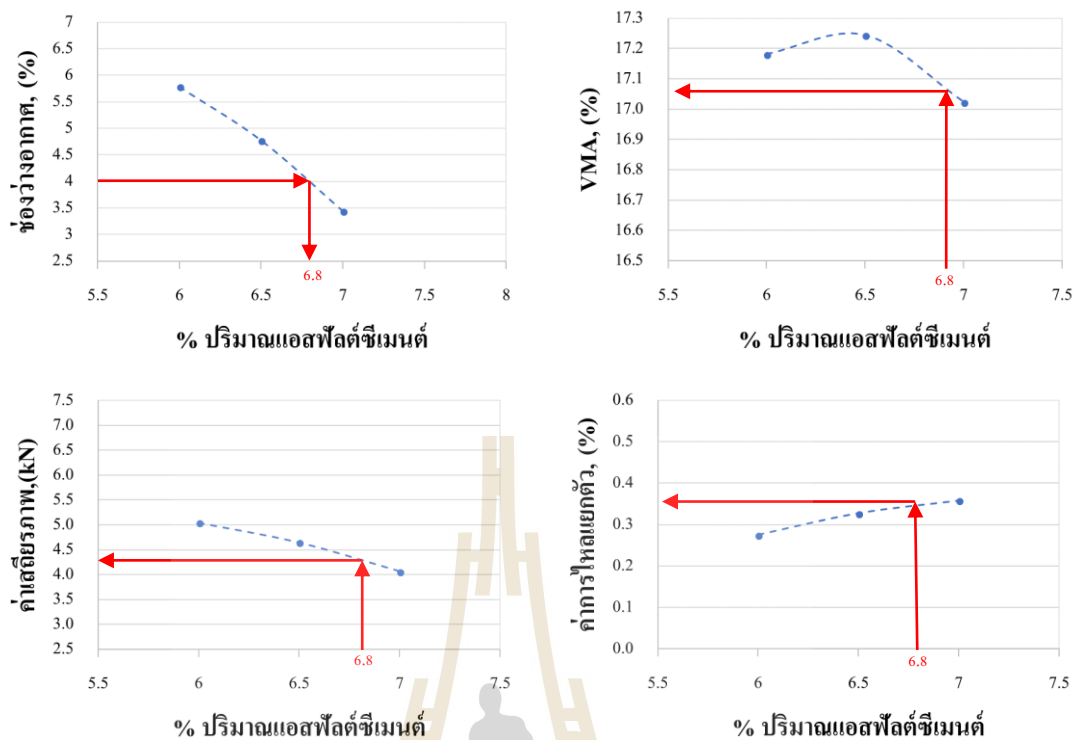
จากการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสม (Optimum Asphalt Content, OAC) ในการใช้วัสดุเชื่อมประสาน 4 ชนิด ได้แก่ AC60/70, AC60/70 ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยพอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS, AC60/70 ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยพลาสติกกรีซเคิลชนิด PET, AC60/70 ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยพลาสติกกรีซเคิล HDPE ตามสัดส่วน 2%, 4%, 6% และ 8% โดยน้ำหนักและใช้ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานในช่วง 6-7% โดยผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70

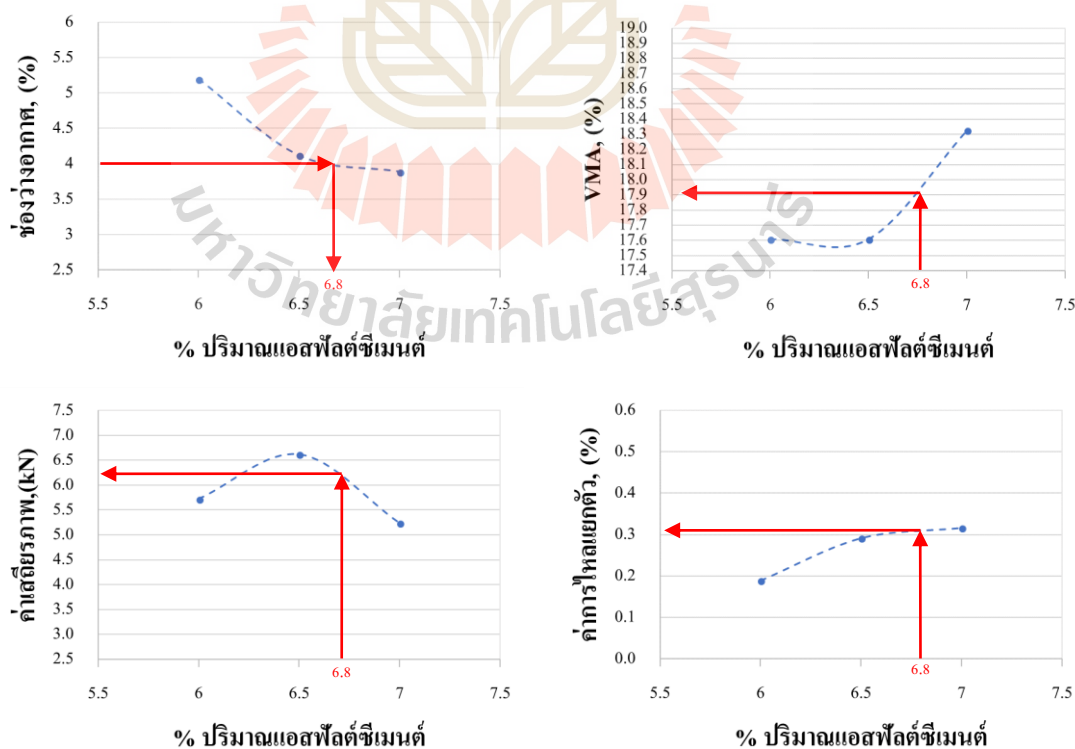
จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 (AC60/70) จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 6.8% โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาคผนวก ก.1 และรูปที่ 4.14

4.4.2 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+2%SBS

จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+2%SBS จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 6.7% โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาคผนวก ก.2 และรูปที่ 4.15



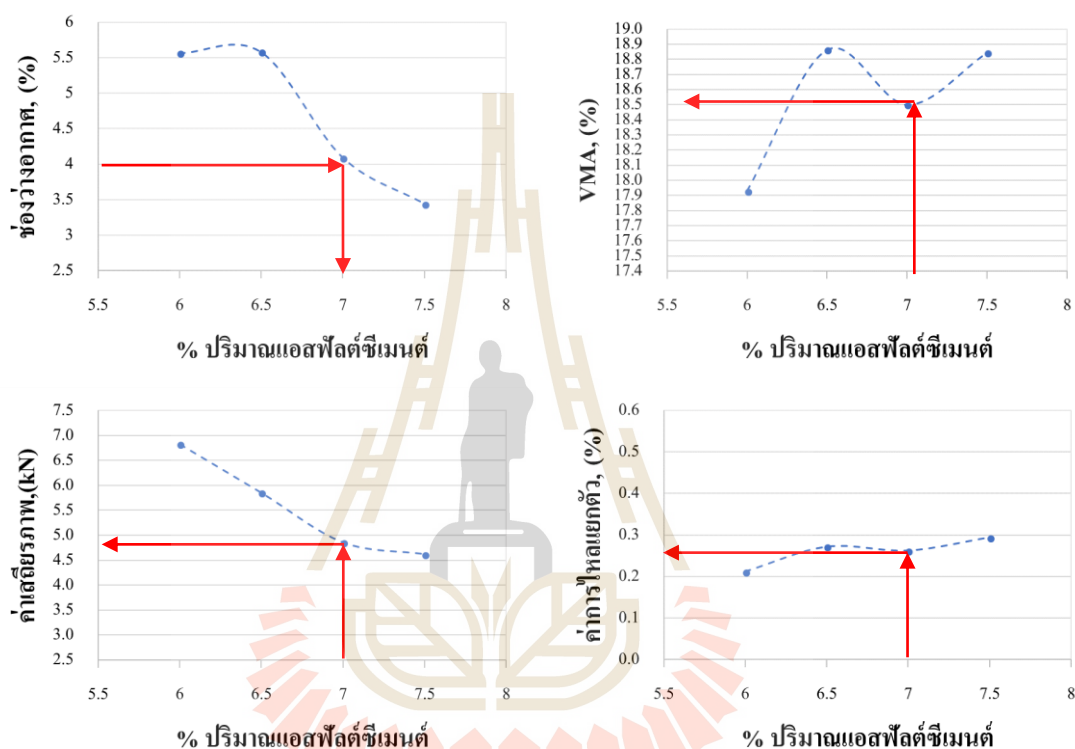
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 2% SBS และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.3 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+4%SBS

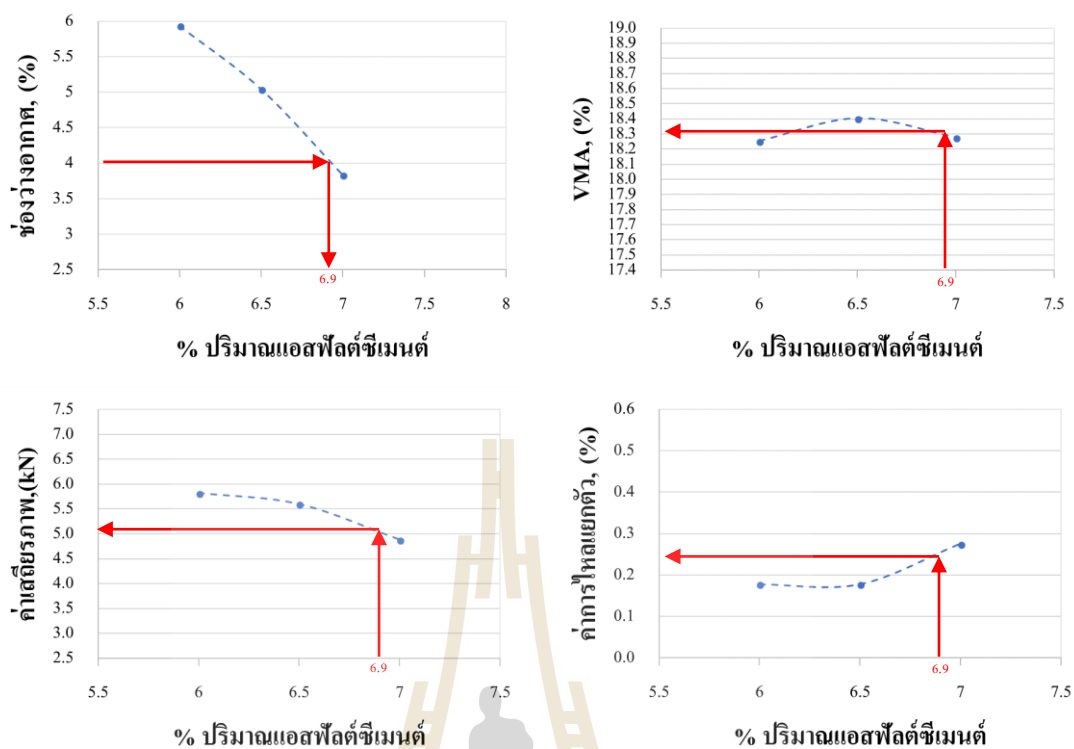
จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7, 7.5 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+4%SBS จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 7.0 % โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาคผนวก ก.3 และรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70+4%SBS และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.4 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+6%SBS

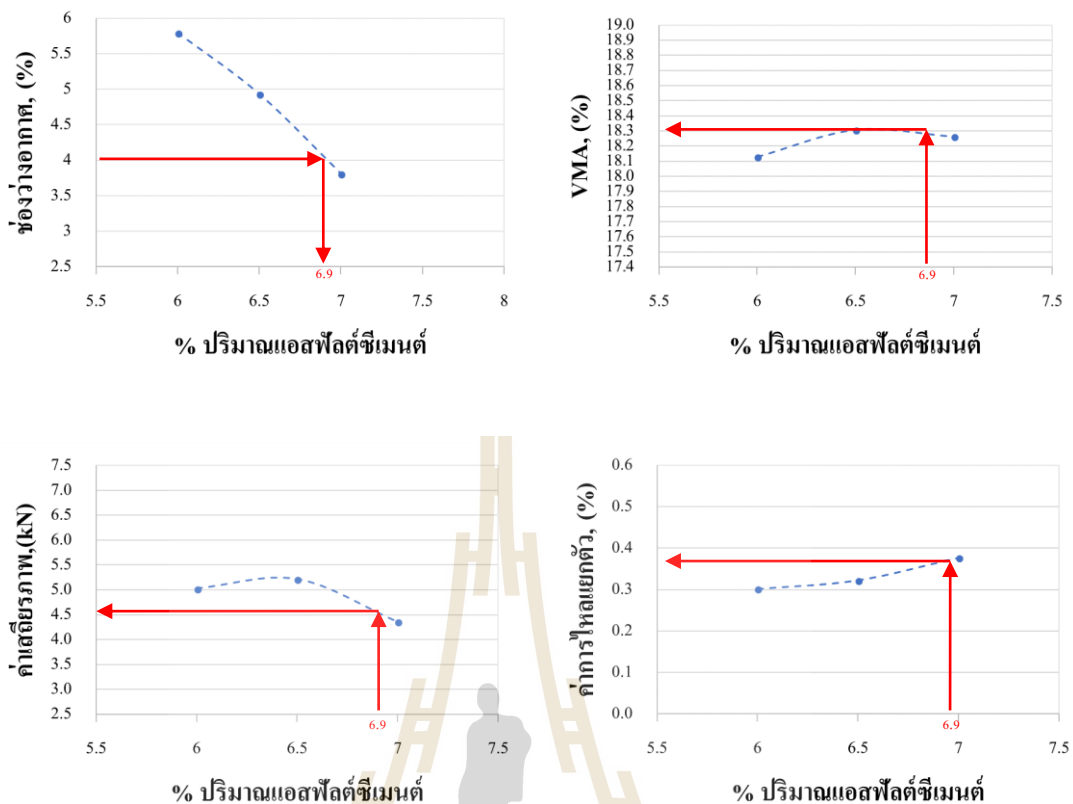
จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+6%SBS จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 6.9% โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาคผนวก ก.4 และรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70+6%SBS และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.5 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+8%SBS

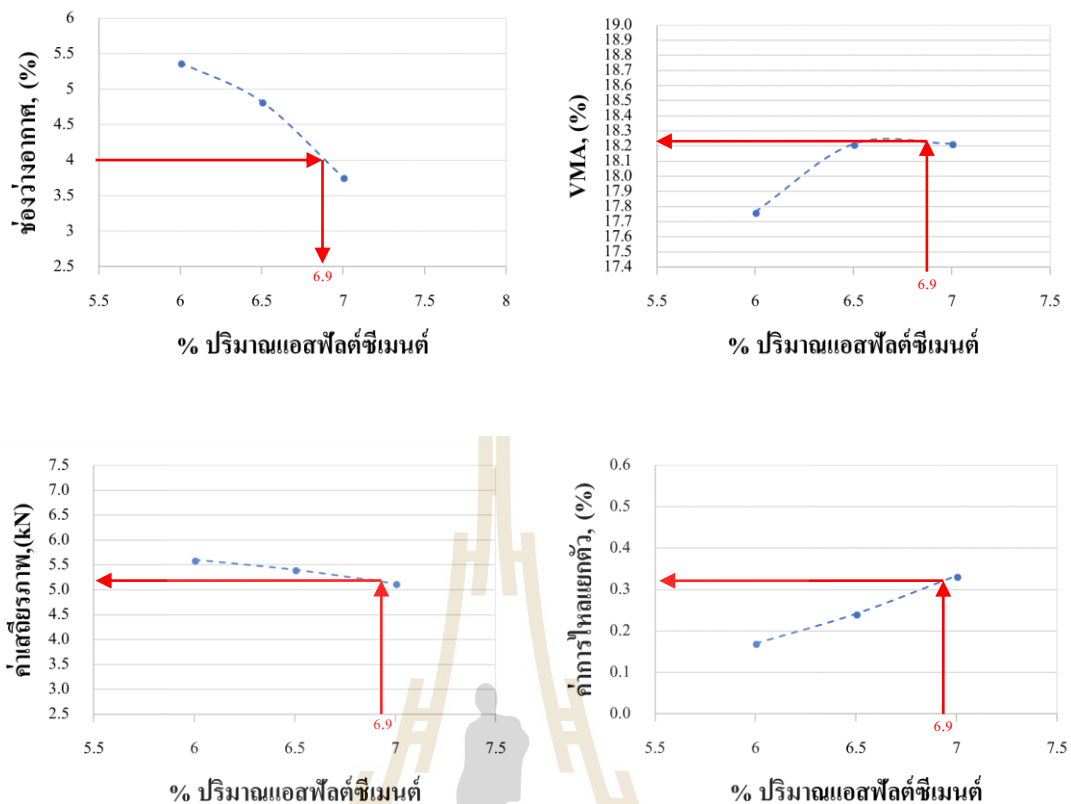
จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4 % โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+8%SBS จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 6.9% โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาคผนวก ก.5 และรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70+8%SBS และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.6 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+2%PET

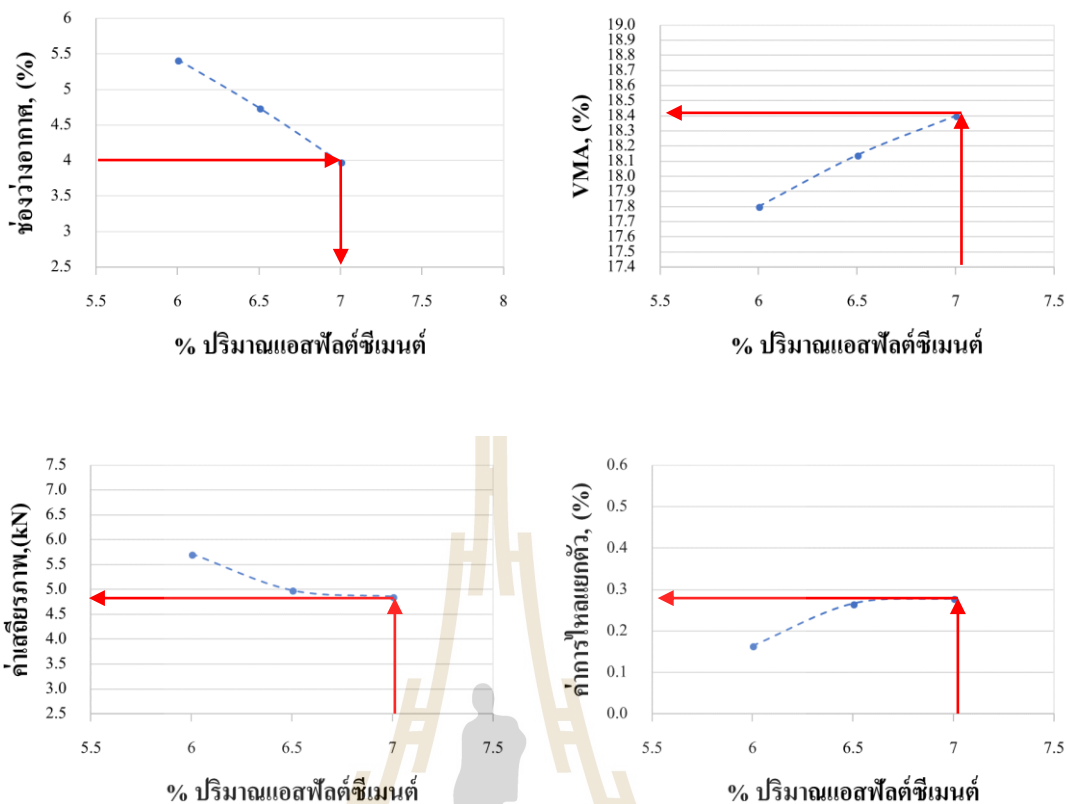
จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+2%PET จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 6.9% โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาพผนวก ก.6 และรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70+2%PET และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.7 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+4%PET

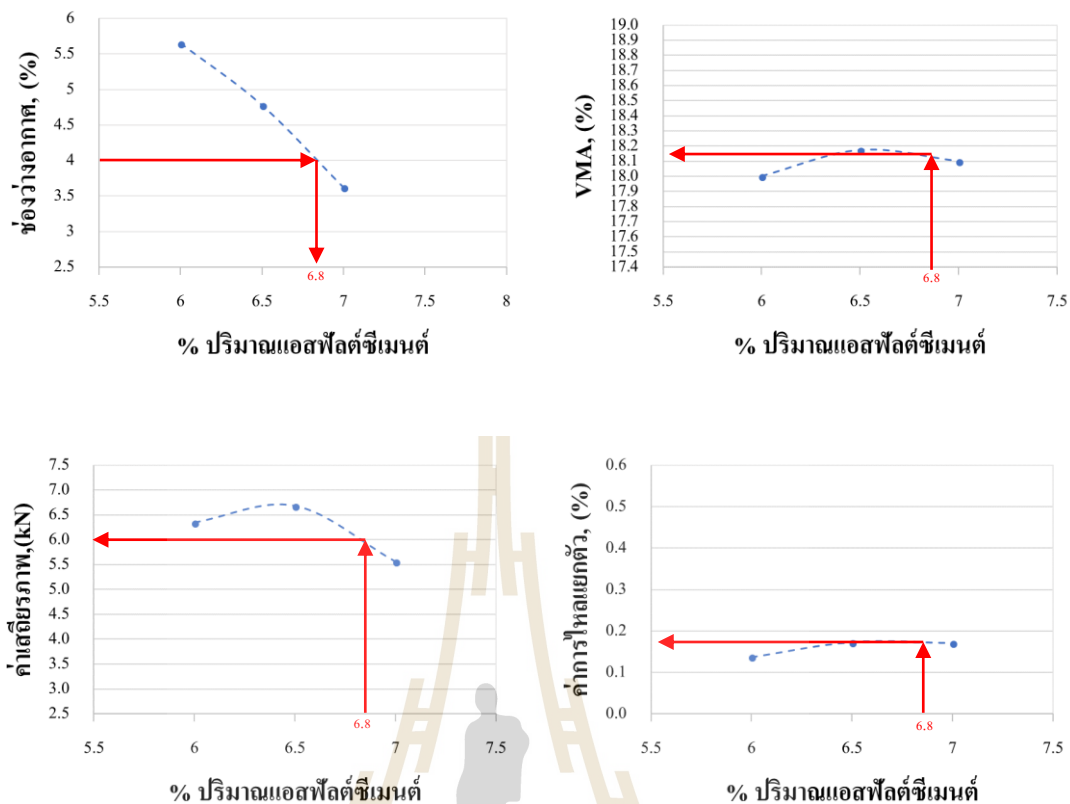
จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+4%PET จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 7.0 % โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาพผนวก ค.7 และรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70+4%PET และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.8 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+6%PET

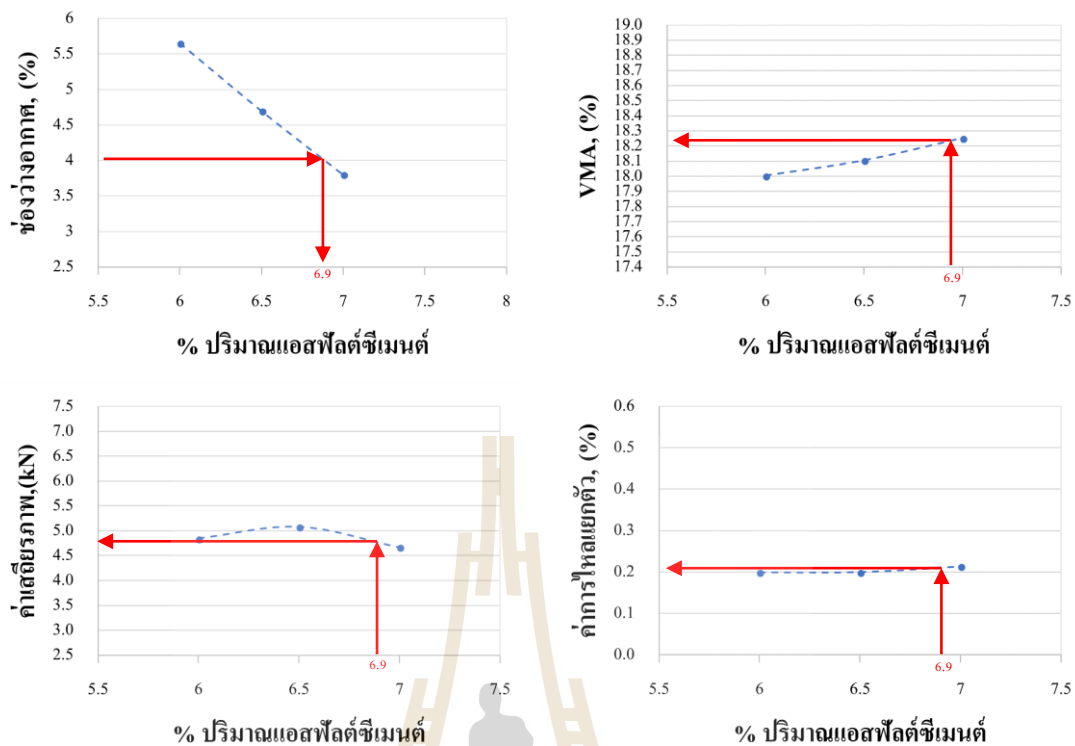
จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+6%PET จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 6.8% โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาคผนวก ก.8 และรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70+6%PET และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.9 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+8%PET

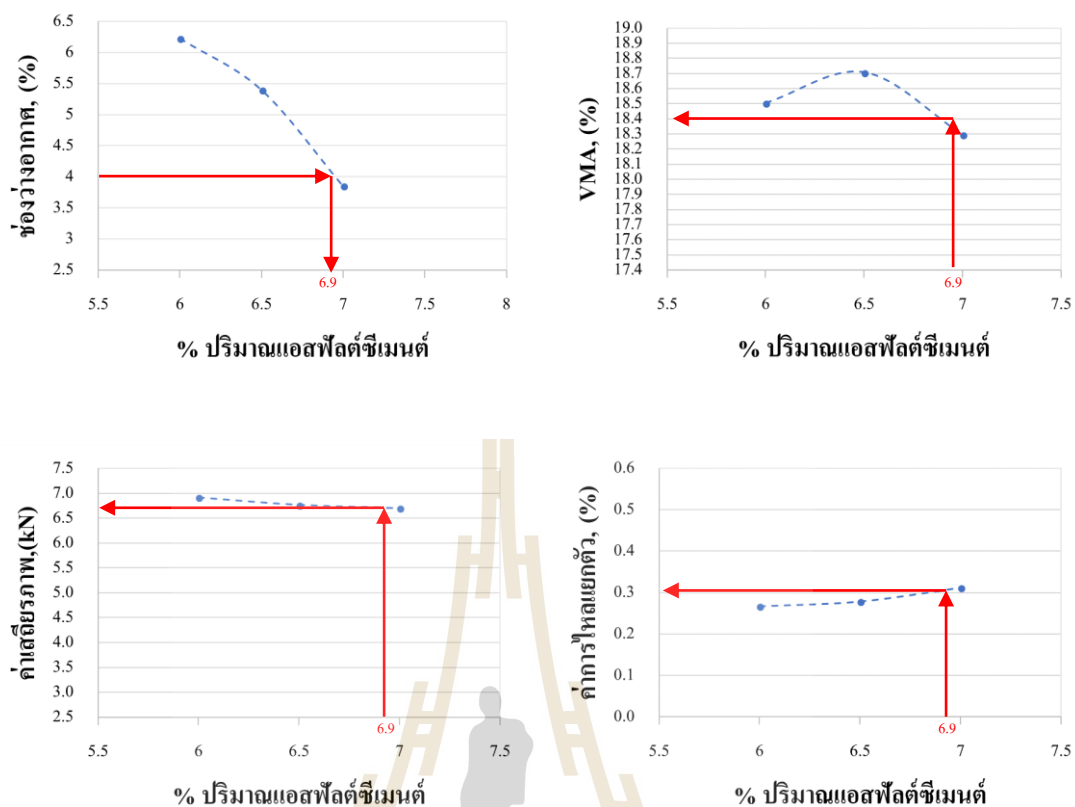
จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+8%PET จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 6.9% โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาพผนวก ค.9 และรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70+8%PET และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.10 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+2%HDPE

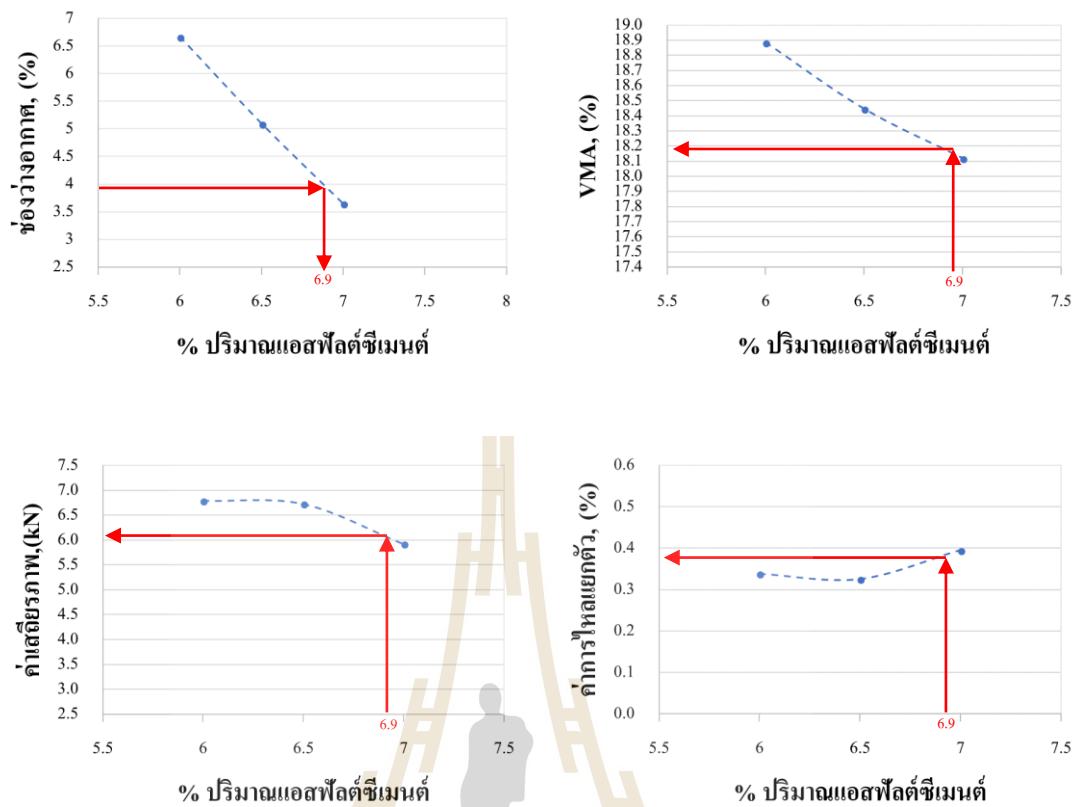
จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+2%HDPE จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 6.9% โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาคผนวก ค.10 และรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70+2%HDPE และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.11 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+4%HDPE

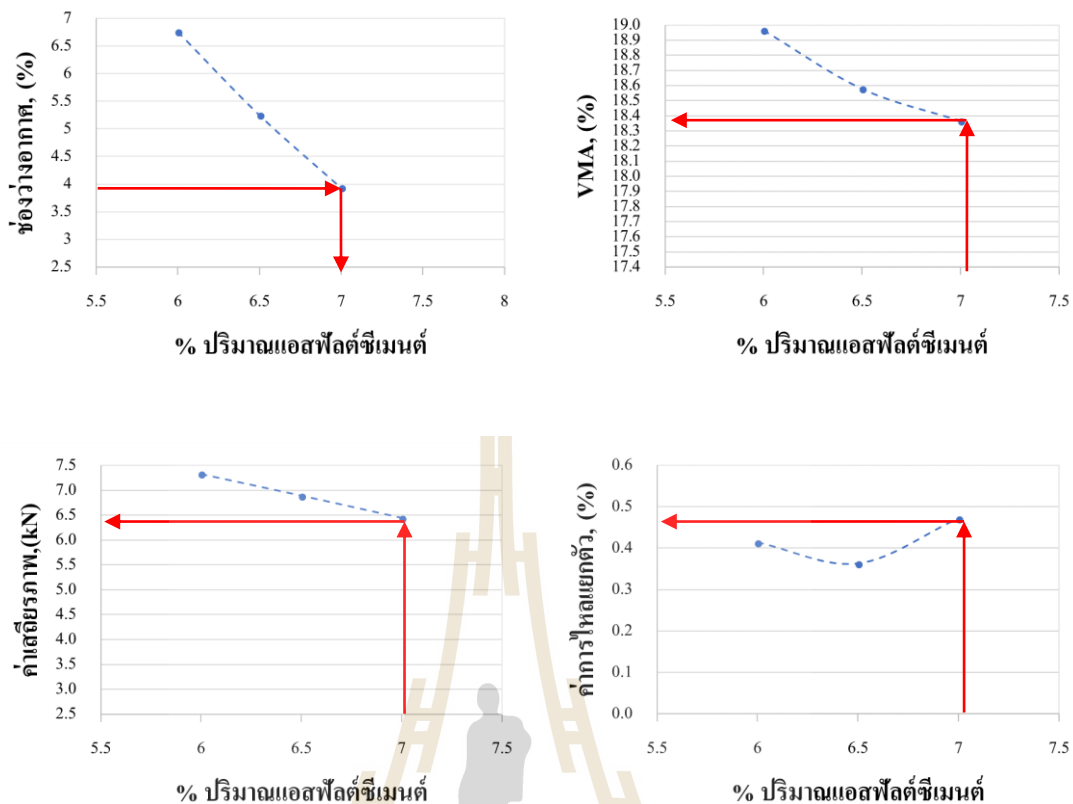
จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+4%HDPE จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 6.9% โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาพผนวก ค.11 และรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70+4%HDPE และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.12 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+6%HDPE

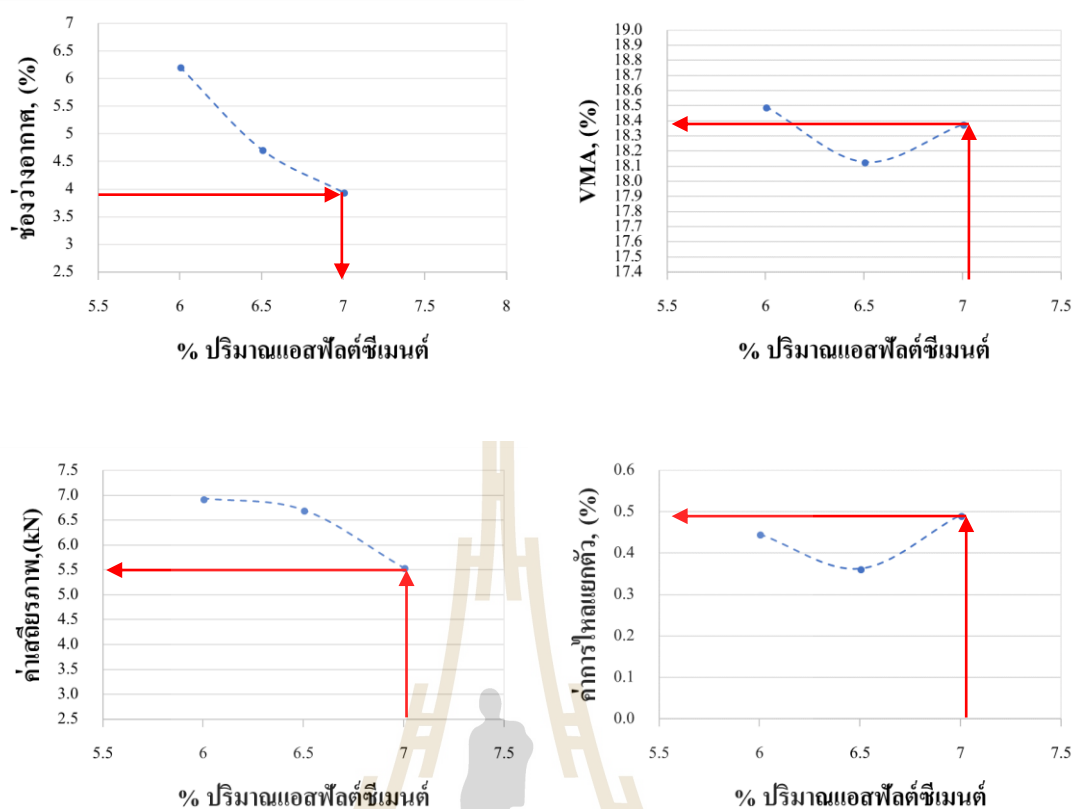
จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+6%HDPE จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 7.0% โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาพผนวก ค.12 และรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 6%HDPE และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.13 ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับ AC60/70+8%HDPE

จากการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6, 6.5, 7 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4% โดยน้ำหนัก พบว่า AC60/70+8%HDPE จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม 7.0% โดยน้ำหนัก สามารถแสดงดังภาคผนวก ค.13 และรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง AC60/70 + 8%HDPE และคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

จากนั้นทำการคำนวณหาค่า VCA_{mix} และ VCA_{drc} และทดสอบค่าการไหลแยกตัวของตัวเชื่อมประสานตามวิธีการทดสอบ Schellenberg Binder Drainage ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.16 ซึ่งจากตารางที่ 4.16 พบว่าการใช้พอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS ที่อัตราส่วน 2% โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุผสมเพิ่มให้ค่าเสถียรภาพมากที่สุดที่ 6.31 kN การใช้พลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE ที่อัตราส่วน 6% โดยน้ำหนักเป็นวัสดุผสมเพิ่มให้ค่าเสถียรภาพมากที่สุดที่ 6.39 kN การใช้พลาสติกกรีไซเคิลชนิด PET ที่อัตราส่วน 6% โดยน้ำหนักเป็นวัสดุผสมเพิ่มให้ค่าเสถียรภาพมากที่สุดที่ 6.25 kN และพบว่าอัตราการไหลแยกตัวของตัวอย่างที่ใช้พอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS เป็นวัสดุผสมเพิ่มที่อัตราส่วน 6% โดยน้ำหนัก ให้ค่าดีที่สุดที่ 0.22% การใช้พลาสติกกรีไซเคิลชนิด HDPE ที่อัตราส่วน 6% โดยน้ำหนักเป็นวัสดุผสมเพิ่มให้ค่าดีที่สุดที่ 0.30% และการใช้พลาสติกกรีไซเคิลชนิด PET ที่อัตราส่วน 6% โดยน้ำหนักเป็นวัสดุผสมเพิ่มให้ค่าดีที่สุดที่ 0.26%

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ VCA_{MIX} และอัตราการไหลแยกตัวของตัวเชื่อมประสาน

ชนิดของวัสดุเชื่อมประสาน	OAC	G_{mm}	Airvoids (%)	VCA_{MIX} (%)	Stability (kN)	Draindown (%)
AC 60/70	6.8	2.43	4.08	39.19	4.38	0.34
AC60/70 + 2% Virgin SBS	6.7	2.43	4.19	39.05	6.31	0.29
AC60/70 + 4% Virgin SBS	7.0	2.42	4.00	39.51	5.43	0.24
AC60/70 + 6% Virgin SBS	6.9	2.43	4.08	39.33	4.95	0.22
AC60/70 + 8% Virgin SBS	6.9	2.43	4.09	39.36	4.39	0.33
AC60/70 + 2% Recycled HDPE	6.9	2.42	4.23	39.40	6.25	0.30
AC60/70 + 4% Recycled HDPE	6.9	2.43	4.12	29.26	6.47	0.35
AC60/70 + 6% Recycled HDPE	7.0	2.43	4.35	39.39	6.39	0.45
AC60/70 + 8% Recycled HDPE	7.0	2.42	4.05	39.44	5.61	0.49
AC60/70 + 2% Recycled PET	6.9	2.43	4.17	39.29	5.24	0.32
AC60/70 + 4% Recycled PET	7.0	2.43	4.11	39.40	4.88	0.31
AC60/70 + 6% Recycled PET	6.8	2.43	4.22	39.18	6.27	0.26
AC60/70 + 8% Recycled PET	6.9	2.43	4.14	39.25	4.85	0.26

จากข้อกำหนดของ Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavement กำหนดค่าช่องว่างระหว่างมวลรวม (VMA) ต้องมากกว่า 17% ค่าเสถียรภาพต้องมากกว่า 6200 N อัตราการไหลของตัวเชื่อมประสานจะต้องน้อยกว่า 0.3 และค่า VCA_{MIX} จะต้องน้อยกว่า VCA_{dr} ดังนั้น การศึกษานี้จึงเลือกใช้พลาสติกรีไซเคิลชนิด HDPE ที่อัตราส่วน 2% โดยน้ำหนัก โดยใช้ OAC เท่ากับ 6.9 เปอร์เซ็นต์และพลาสติกรีไซเคิลชนิด PET ที่อัตราส่วน 6% โดยน้ำหนัก โดยใช้ OAC เท่ากับ 6.8 เปอร์เซ็นต์เทียบกับการใช้พอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS ที่อัตราส่วน 2% โดยน้ำหนัก โดยใช้ OAC เท่ากับ 6.7%

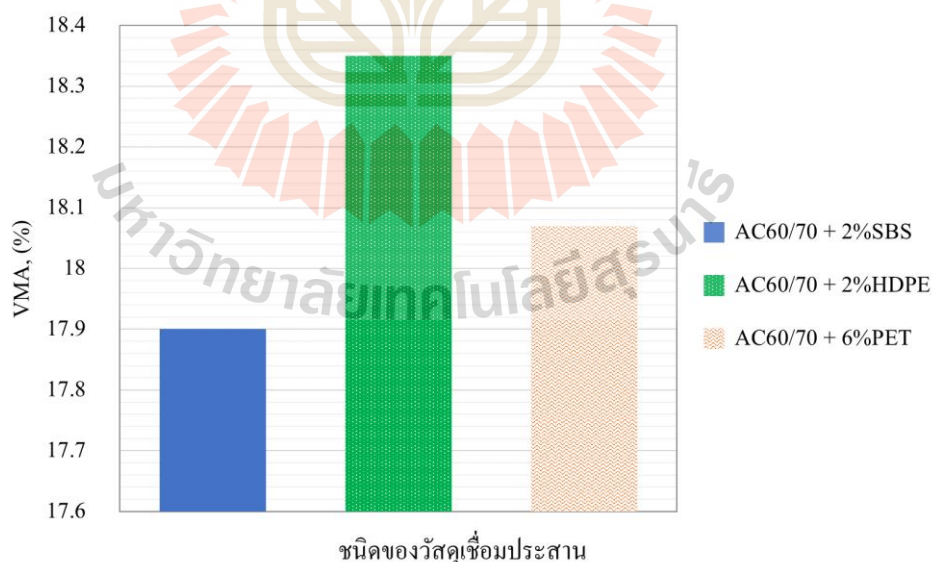
4.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้พลาสติกรีไซเคิลเป็นสารผสม

หลังจากได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับโตนมาสติกแอสฟัลต์จากข้อ 4.4 ทำการเตรียมตัวอย่าง 3 ตัวอย่างสำหรับส่วนผสม 2% Virgin SBS, 2% Recycled HDPE และ 6% Recycled PET แล้วนำมาทำการทดสอบหาค่าเสถียรภาพ อัตราการไหลแยกตัวของตัวเชื่อมประสาน และค่าแรงดึงทางอ้อมแสดงดังตารางที่ 4.17 และพล็อตกราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติดังกล่าวระหว่างวัสดุ

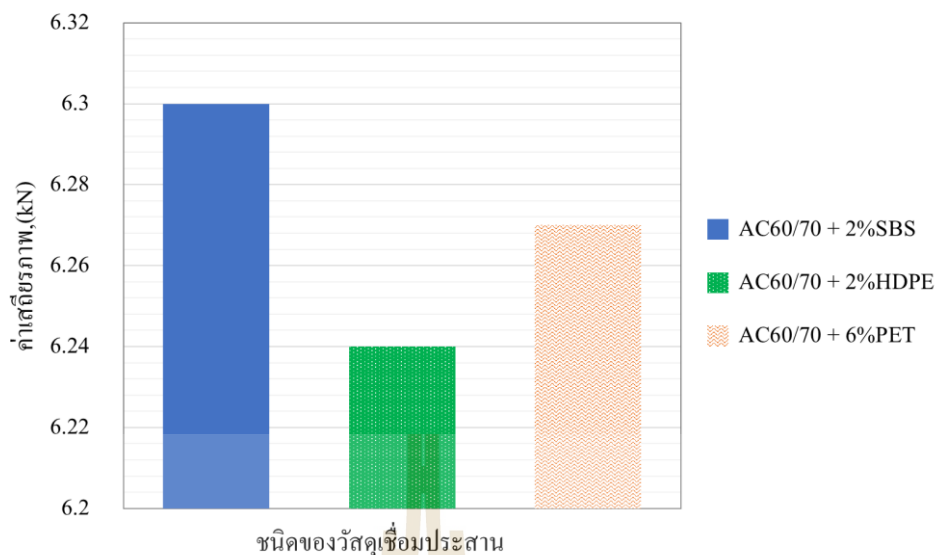
เชื่อมประสานแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 4.27, 4.28, 4.29 และ 4.30 จากรูปสามารถสังเกตได้ว่าการใช้พอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS ในอัตราส่วน 2% โดยน้ำหนักให้ค่าเสถียรภาพสูงสุดที่ 6.32 kN และค่ากำลังรับแรงดึงในสถานะแห้งสูงสุดที่ 130.63 kPa แต่จะมีโอกาสเกิดความเสียหายเนื่องจากความชื้นสูงกว่าตัวอย่างที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยพลาสติกรีไซเคิลชนิด HDPE และพลาสติกรีไซเคิลชนิด PET เนื่องจากมีค่า %TSR ที่ต่ำกว่า ขณะที่การใช้พลาสติกรีไซเคิลชนิด HDPE ที่ 2% โดยน้ำหนักมีค่ารับแรงดึงในสถานะเปียกสูงสุดที่ 104.93 kPa สำหรับการใช้พลาสติกรีไซเคิลชนิด PET ที่ 6% โดยน้ำหนักให้ค่าอัตราการไหลแยกตัวของวัสดุเชื่อมประสานดีที่สุดที่ 0.26

ตารางที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์

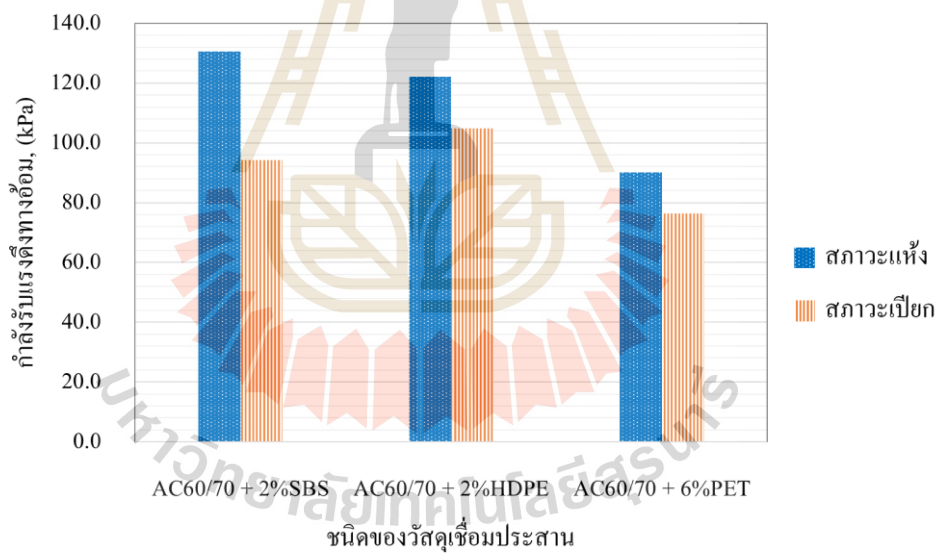
ชนิดของวัสดุเชื่อมประสาน	OAC (%)	G _{mm}	AV (%)	VMA (%)	Stability (kN)	Draindown (%)	IDT _{dry} (kPa)	IDT _{wet} (kPa)	TSR (%)
AC60/70 + 2% Virgin SBS	6.7	2.43	4.19	18.10	6.32	0.29	130.63	94.27	72.17
AC60/70 + 2% Recycled HDPE	6.9	2.42	4.23	18.38	6.23	0.30	122.17	104.93	85.89
AC60/70 + 6% Recycled PET	6.8	2.43	4.22	18.09	6.26	0.26	90.18	76.39	84.70



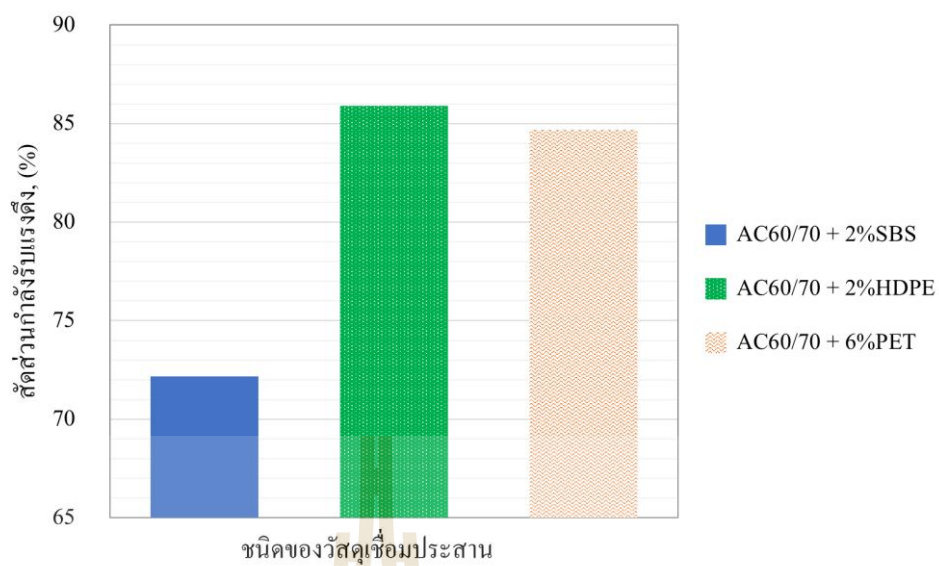
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม (VMA) ระหว่างชนิดวัสดุเชื่อมประสาน



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพระหว่างชนิดวัสดุเชื่อมประสาน



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดิ่งทางอ้อมระหว่างชนิดของวัสดุเชื่อมประสาน



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบสัดส่วนกำลังรับแรงดึงระหว่างชนิดของวัสดุเชื่อมประสาน



บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตของการศึกษาการใช้พลาสติกกรีซเคลชนิด HDPE และชนิด PET มาเป็นส่วนผสมในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบ

1. การใช้พลาสติกกรีซเคลชนิด PET เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงขึ้น มีจุดอ่อนตัวสูงขึ้น มีค่าความต้านทานการเจาะทะลุต่ำลงและมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นและเมื่อเทียบกับการใช้พอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS และพลาสติกกรีซเคลชนิด HDPE จะใช้พลังงานน้อยกว่าในการให้ความร้อนในการหลอมวัสดุเชื่อมประสานเพื่อให้เหลวพอที่จะเคลือบวัสดุรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. การใช้พลาสติกกรีซเคลชนิด HDPE เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความเหนียวสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ แต่มีความยืดหยุ่นน้อยเมื่อเทียบกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยพอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS
3. การใช้พลาสติกกรีซเคลชนิด HDPE เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ต้านทานความล้าที่อุณหภูมิสูง มีความต้านทานการเกิดร่องล้อ (Rutting) สูงแต่จะมีโอกาสสูงที่จะเกิดรอยแตก (Cracking) ที่อุณหภูมิต่ำ
4. การใช้พลาสติกกรีซเคลชนิด HDPE เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพจะปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ขณะผสมในปริมาณสูงกว่าค่ามาตรฐาน ในขณะที่การใช้พลาสติกกรีซเคลชนิด PET ที่อัตราส่วน 2-4% จะปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ในปริมาณที่ยอมรับได้
5. การใช้พอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์มีอัตราส่วนที่ 2% โดยน้ำหนัก ที่ใช้ OAC เท่ากับ 6.7% โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด
6. การใช้พลาสติกกรีซเคลชนิด PET เป็นส่วนผสมในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ด้วยปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ที่ OAC เท่ากับ 6.8% ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนดผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ถึงแม้ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่าการใช้พอลิเมอร์ใหม่

SBS ด้วยปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก ในทั้งสองสภาวะ แต่ก็มีค่าเสถียรภาพไม่ต่างกัน อีกทั้งยังมีการไหลแยกตัวของวัสดุเชื่อมประสานที่น้อยกว่าและมีค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึงที่สูงกว่า ส่งผลให้วัสดุมีโอกาสเสียหายเนื่องจากความชื้นได้น้อยกว่าการใช้พอลิเมอร์ใหม่ชนิด SBS 2% โดยน้ำหนัก

7. การใช้พลาสติกกรีซเคลชนิด HDPE เป็นส่วนผสมด้วยปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก ที่ OAC เท่ากับ 6.9% ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดมาตรฐานสโตนมาสติกแอสฟัลต์ โดยให้ค่าเสถียรภาพ ค่าการไหลแยกตัวและค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมในสภาวะแห้งเฉลี่ยไม่แตกต่างจากการใช้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ SBS 2% โดยน้ำหนัก แต่ให้ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมในสภาวะเปียกเฉลี่ยและค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการผสมพลาสติกกรีซเคล HDPE เข้ากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เกินกว่าค่ามาตรฐาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการใช้พลาสติกกรีซเคลทำให้เกิดความแปรปรวนสูงเนื่องจากระยะเวลาที่นำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่และวิธีการเก็บรักษา การศึกษานี้จึงมีแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นโดยการควบคุมการจัดเก็บวัสดุ และควรใช้วัสดุที่มาจากแหล่งเดียวกันที่มีวิธีการเก็บรักษาเหมือนกัน

2. ในการนำพลาสติกกรีซเคลไปใช้งาน จะต้องใช้ระยะเวลาทำงานเพิ่มขึ้น ค่าใช้จ่ายในการทำงานเพิ่มขึ้น จึงต้องศึกษาความคุ้มค่าหากนำพลาสติกกรีซเคลกลับมาใช้ และในกรณีต้องมีการสัมผัสก๊าซพิษที่มีความเข้มข้นสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานควรพิจารณามาตรการป้องกันควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering control) โดยใช้ระบบระบายอากาศเฉพาะที่ (Exhaust ventilation) หรือใช้ระบบระบายอากาศทั่วไป (General ventilation) แต่อย่างไรก็ตามถ้าไม่สามารถควบคุมทางวิศวกรรมได้ ควรใช้มาตรการทางด้านบริหารจัดการ (Administrative control) เช่นการกำหนดระยะเวลาการทำงานให้สั้นลง หรือใช้วิธีการหมุนเวียนสับเปลี่ยนคนงาน เพื่อให้ค่าเฉลี่ยของการสัมผัสอันตรายลดลงเฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อวัน หรือ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ (Time-Weight Average, TWA) ไม่เกิน 50 ppm รวมทั้งอาจพิจารณากำหนดให้มีการใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment, PPE) ร่วมกับมาตรการป้องกันอื่น เช่น ให้สวมหน้ากากป้องกันก๊าซ CO เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- กรมทางหลวง. 2517. **ทล.-ท.202/2515** วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของ **Coarse Aggregate** โดยใช้เครื่อง **Los Angeles Abrasion**. กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทางหลวง. 2517. **ทล.-ท.203/2515** วิธีการทดสอบหาค่าเทียบเท่าทราย. กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทางหลวง. 2517. **ทล.-ท.206/2517** วิธีการทดสอบหาค่า **Durability** ของวัสดุ. กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทางหลวง. 2517. **ทล.-ท.207/2517** วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ. กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทางหลวง. 2519. **ทล.-ท.209/2518** วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ด. กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทางหลวง. 2519. **ทล.-ท.210/2518** วิธีการทดสอบหาค่าดัชนีความแบน (**Flakiness Index**). กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทางหลวง. 2519. **ทล.-ท.211/2518** วิธีการทดสอบหาค่าดัชนีความยาว (**Elongation Index**). กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทางหลวง. 2519. **ทล.-ท. 403/2518** วิธีการทดสอบหาค่า **Penetration** ของวัสดุแอสฟัลต์. กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทางหลวง. 2531. **ทล.-ท.213/2531** วิธีการทดสอบหาค่าความคงทน (**Soundness**) ของมวลรวม. กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทางหลวง. 2547. **ทล.-ท.208/2547** วิธีการทดสอบหาปริมาณการแตกหักของวัสดุมวลรวมเมื่อถูกแรงตกกระแทก. กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา. 2559. การออกแบบส่วนผสมผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์. มหาวิทยาลัยพะเยา.
- บริษัท เทเลพาร์ทคอร์ปอเรชัน ซัพพลาย จำกัด. 2559. คุณสมบัติของพลาสติก **Plastic**. (9 กันยายน 2551). [ออนไลน์]: <http://www.telepart.net>.
- ปกรณ์ มิลินทะเลข. (2548). โครงการศึกษาการเสริมผิวทางแอสฟัลต์ด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดสโตนมาสติกแอสฟัลต์. สำนักงานสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวงชนบท.
- ปัญญาไทยพลาสติก. 2553. ชนิดของพลาสติก. (7 พฤศจิกายน 2554). [ออนไลน์]: <http://www.panya>

- thaiplastic.com/index.php?option=com_content&view=article&id=22&Itemid=2.
- พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2548. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร.
- พรหมมา เทพศรีหา. 2558. ผิวทางสโตนมาستيكแอสฟัลต์และพอร์สแอสฟัลต์. กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- พาริสา จันนุ้ย. 2546. อิทธิพลของวัสดุเชื่อมประสานในสโตนมาستيكแอสฟัลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต คณะวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภาสรี เล่ากิจเจริญ. 2551. ยางเทอร์โมพลาสติกจากสไตรีน (Styrene Thermoplastics Elastomer). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 2 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน, 2551.
- เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร. 2549. ผลกระทบของน้ำต่อผิวทางสโตนมาستيكแอสฟัลต์ที่ใช้ตะกรันเตาหลอมเป็นวัสดุผสมรวม. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต คณะวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- A. Modarres, H. Hamed, J. Mater. Des. 2014. Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. **Materials and Design**. 61: 8-15.
- Donnchadh Casey, Ciaran McNally, Amanda Gibney, Michael D. Gilchrist. 2008. Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. **Conservation and Recycling**. 52: 1167-1174.
- Elton Ray Brown et al. 1999. Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements. National Center for Asphalt Technology Auburn University Auburn, AL.
- Erol Iskender, Celaledin E. Sengul, Seref Oruc, Atakan Aksoy. 2013. Laboratory evaluation of SMA mixes prepared with SBS modified and neat bitumen. **Social and Behavioral Sciences**. 104: 59-68.
- Esmail Ahmadiania, Majid Zargar, Mohamed Rehan Karim, Mahrez Abdelaziz, Payam Shafigh. 2011. Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. **Materials and Design**. 32: 4844-4849.
- Esmail Ahmadiania, Mohamed Rehan Karim, Mahrez Abdelaziz, Ebrahim Ahmadiania. 2012. Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt. **Construction and Building Materials**. 36: 984-989.
- European Asphalt Pavement Association. 1998. Heavy duty surfaces the arguments for sma. AD Breukelen, The Netherlands.
- Freddy L. Roberts, Prithvi S. Kandhal, E. Ray Brown, Dah-Yinn Lee, Thomas W. Kennedy. 1996. Hot Mix Asphalt Materials Mixture Design and construction., National Asphalt Pavement

Association Research and Education Foundation.

Gh.H. Hamed, F. Moghadas Nejad, M. Arabani, A.R. Azarhoosh, 2013. Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**. 47: 1523-1527.

Taher Baghaee Moghaddam, Mohamed Rehan Karim, Tamalkhani Syammaun. 2012. Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles. **Construction and Building Materials**. 34: 236-242.



ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 การทดสอบค่าการเจาะทะลุ (Penetration)

ตัวเชื่อมประสาน	ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (0.1 mm)			เฉลี่ย
		1	2	3	
AC 60-70	1	64	68	68	66.67
	2	68	68	67	67.67
	3	65.5	68	67	66.83
	เฉลี่ย				67.05
AC 60-70 + 2% Virgin SBS	1	53.6	52.1	53.8	53.17
	2	53.1	53.6	52.4	53.03
	3	54.1	53.6	52.9	53.53
	เฉลี่ย				53.24
AC 60-70 + 4% Virgin SBS	1	54.6	51.1	53.8	54.17
	2	54.1	53.6	52.9	53.53
	3	54.5	53.9	50.2	52.87
	เฉลี่ย				53.52
AC 60-70 + 6% Virgin SBS	1	55.6	55.9	55.2	55.57
	2	54	53.3	55.7	54.33
	3	55.6	53.4	54.9	54.63
	เฉลี่ย				53.57
AC 60-70 + 8% Virgin SBS	1	57.8	54.3	56.9	56.33
	2	53.2	55	57.7	55.30
	3	56.1	55	56.4	56.47
	เฉลี่ย				56.03
AC 60-70 + 2% Recycled plastic HDPE	1	28	28	25	27
	2	25	28	23	25.33
	3	25.4	25.6	24.8	25.27
	เฉลี่ย				24.98

ตารางที่ ก.1 การทดสอบค่าการเจาะทะลุ (Penetration) (ต่อ)

ตัวเชื่อมประสาน	ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้			เฉลี่ย
		1	2	3	
AC 60-70 + 4% Recycled plastic HDPE	1	18	17	18	17.67
	2	16	17	18	17.00
	3	18	17	18	17.67
	เฉลี่ย				17.44
AC 60-70 + 6% Recycled plastic HDPE	1	16	15	16	15.67
	2	14	15	15	14.67
	3	15.7	14.9	15.7	15.33
	เฉลี่ย				14.56
AC 60-70 + 8% Recycled plastic HDPE	1	10	11	11	10.67
	2	11	10	10	10.33
	3	10	10	11	10.33
	เฉลี่ย				10.44
AC 60-70 + 2% Recycled plastic PET	1	60.3	62.4	63.4	62.03
	2	60.1	61.6	62.4	61.37
	3	60.4	62.1	62.3	61.60
	เฉลี่ย				61.67
AC 60-70 + 4% Recycled plastic PET	1	64.6	62.5	64.7	63.93
	2	64.4	62.5	63.7	63.53
	3	62.7	63.6	63.9	63.40
	เฉลี่ย				64.06
AC 60-70 + 6% Recycled plastic PET	1	65.6	67.8	66	66.47
	2	67.5	67.4	64.1	66.33
	3	67.4	67.3	66.7	67.13
	เฉลี่ย				65.72
AC 60-70 + 8% Recycled plastic PET	1	64.8	63.6	69.4	65.93
	2	67.8	64.3	67.8	66.63
	3	67.7	65.6	64.9	66.06
	เฉลี่ย				66.21

ตารางที่ ก.2 การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุเชื่อมประสาน

ตัวเชื่อมประสาน	จุดอ่อนตัว (°C)			เฉลี่ย
	#1	#2	#3	
AC 60-70	62	63	63	62.67
AC 60-70 + 2% Virgin SBS	65	64	66	65.00
AC 60-70 + 4% Virgin SBS	66	68	66	66.67
AC 60-70 + 6% Virgin SBS	73	74	74	73.67
AC 60-70 + 8% Virgin SBS	75	76	76	75.67
AC 60-70 + 2% Recycled plastic HDPE	73	72	70	71.67
AC 60-70 + 4% Recycled plastic HDPE	78	79	78	78.33
AC 60-70 + 6% Recycled plastic HDPE	82	82	84	82.67
AC 60-70 + 8% Recycled plastic HDPE	85	86	85	85.33
AC 60-70 + 2% Recycled plastic PET	64	64	62	63.33
AC 60-70 + 4% Recycled plastic PET	64	64	66	64.67
AC 60-70 + 6% Recycled plastic PET	66	66	68	66.67
AC 60-70 + 8% Recycled plastic PET	70	68	68	68.67



ตารางที่ ก.3 การทดสอบความเหน็ด

ตัวเชื่อมประสาน	ความเหน็ด (CP)							
	ที่อุณหภูมิ 135°C				ที่อุณหภูมิ 165°C			
	#1	#2	#3	เฉลี่ย	#1	#2	#3	เฉลี่ย
AC 60-70	442.5	397.5	402.5	414	115	115	115	115
AC 60-70 + 2% Virgin SBS	1125	1128	1120	1124.3	272.5	227.5	210	236.6
AC 60-70 + 4% Virgin SBS	1720	1695	1730	1715	420	417.5	420	419.2
AC 60-70 + 6% Virgin SBS	1830	1845	1845	1840	447.5	447.5	447.5	447.5
AC 60-70 + 8% Virgin SBS	2410	2400	2378	2396	545	547	550	547.3
AC 60-70 + 2% Recycled plastic HDPE	1773	1730	1752.5	1751.8	372.5	365	365	367.5
AC 60-70 + 4% Recycled plastic HDPE	3540	3566	3560	3555.3	1068	1058	1065	1063.7
AC 60-70 + 6% Recycled plastic HDPE	4145	4100	4130	4125	1110	1153	1138	1133.7
AC 60-70 + 8% Recycled plastic HDPE	6260	6250	6210	6240	1185	1170	1187	1180.7
AC 60-70 + 2% Recycled plastic PET	650	637	660	649	157.5	155.5	160	157.7
AC 60-70 + 4% Recycled plastic PET	715	720	710	715	155	147.5	155	152.5
AC 60-70 + 6% Recycled plastic PET	827.5	820.5	825.5	824.5	172.5	167	172.5	170.7
AC 60-70 + 8% Recycled plastic PET	1065	1070	1065	1066.7	270	270	272.5	270.8

ตารางที่ ก.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility)

ตัวเชื่อมประสาน	ครั้งที่	ความสามารถในการยืดตัว (cm)		
		อุณหภูมิ 5°C	อุณหภูมิ 13°C	อุณหภูมิ 25°C
AC 60-70	1	2	150	150
	2	2	150	150
	3	3	150	150
	เฉลี่ย	2.33	150	150
AC 60-70 + 2% Virgin SBS	1	2	47	150
	2	2	46	150
	3	2	47	150
	เฉลี่ย	2	46.67	150
AC 60-70 + 4% Virgin SBS	1	2	56	150
	2	2	55	150
	3	2	56	150
	เฉลี่ย	2	55.67	150
AC 60-70 + 6% Virgin SBS	1	2	60	150
	2	2	61	150
	3	2	60	150
	เฉลี่ย	2	60.33	150
AC 60-70 + 8% Virgin SBS	1	2	64	150
	2	2	65	150
	3	2	65	150
	เฉลี่ย	2	64.67	150
AC 60-70 + 2% Recycled plastic HDPE	1	2	4.4	150
	2	2	4.3	150
	3	2	4.3	150
	เฉลี่ย	2	4.33	150
AC 60-70 + 4% Recycled plastic HDPE	1	1	6.5	150
	2	1	6.5	150
	3	2	6.4	150
	เฉลี่ย	1.33	6.47	150
AC 60-70 + 6% Recycled plastic HDPE	1	1	6.6	150
	2	1	6.7	150
	3	1	6.7	150
	เฉลี่ย	1	6.67	150

ตารางที่ ก.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility) (ต่อ)

ตัวเชื่อมประสาน	ครั้งที่	ความสามารถในการยืดตัว (cm)		
		อุณหภูมิ 5°C	อุณหภูมิ 13°C	อุณหภูมิ 25°C
AC 60-70 + 8% Recycled plastic HDPE	1	1	6.6	150
	2	1	6.7	150
	3	1	6.7	150
	เฉลี่ย	1	6.672	150
AC 60-70 + 2% Recycled plastic PET	1	2	50	150
	2	2	50	150
	3	2	51	150
	เฉลี่ย	2	50.33	150
AC 60-70 + 4% Recycled plastic PET	1	2	52	150
	2	2	50	150
	3	2	52	150
	เฉลี่ย	2	51.33	150
AC 60-70 + 6% Recycled plastic PET	1	2	58	150
	2	2	58	150
	3	2	60	150
	เฉลี่ย	2	58.67	150

ตารางที่ ก.5 การทดสอบความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึง

ตัวเชื่อมประสาน	ร้อยละความยืดหยุ่นกลับ			เฉลี่ย
	#1	#2	#3	
AC 60-70	8.5	10	8.5	9.0
AC 60-70 + 2% Virgin SBS	49	48.5	49	48.8
AC 60-70 + 4% Virgin SBS	80	80	79	79.9
AC 60-70 + 6% Virgin SBS	83	83	83.5	83.2
AC 60-70 + 8% Virgin SBS	85	86	85	85.3
AC 60-70 + 2% Recycled plastic HDPE	18	17	18	17.7
AC 60-70 + 4% Recycled plastic HDPE	23.5	23	23	23.2
AC 60-70 + 6% Recycled plastic HDPE	28.5	28	28	28.2
AC 60-70 + 8% Recycled plastic HDPE	33	33.5	33.5	33.3
AC 60-70 + 2% Recycled plastic PET	11	10.5	11	10.8
AC 60-70 + 4% Recycled plastic PET	15	16	16	15.7
AC 60-70 + 6% Recycled plastic PET	21	20	21	20.7
AC 60-70 + 8% Recycled plastic PET	25	24	24	24.3

ตารางที่ ก.6 การทดสอบจุดวาบไฟและจุดติดไฟ

ตัวเชื่อมประสาน	จุดวาบไฟ (°C)	จุดติดไฟ (°C)
AC 60/70	311	331
AC60/70 + 2% Virgin SBS	311	335
AC60/70 + 4% Virgin SBS	315	339
AC60/70 + 6% Virgin SBS	319	342
AC60/70 + 8% Virgin SBS	319	341
AC60/70 + 2% Recycled HDPE	311	341
AC60/70 + 4% Recycled HDPE	319	351
AC60/70 + 6% Recycled HDPE	327	373
AC60/70 + 8% Recycled HDPE	349	371
AC60/70 + 2% Recycled PET	319	337
AC60/70 + 4% Recycled PET	319	339
AC60/70 + 6% Recycled PET	320	339
AC60/70 + 8% Recycled PET	319	339

ตารางที่ ก.7 การปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ขณะผสม

ตัวเชื่อมประสาน	ค่าการปลดปล่อยสารพิษ (ppm)	
	คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)
AC 60/70	16	1
AC60/70 + 2% Virgin SBS	35	2
AC60/70 + 4% Virgin SBS	38	2
AC60/70 + 6% Virgin SBS	40	2
AC60/70 + 8% Virgin SBS	46	3
AC60/70 + 2% Recycled HDPE	53	2
AC60/70 + 4% Recycled HDPE	53	3
AC60/70 + 6% Recycled HDPE	54	3
AC60/70 + 8% Recycled HDPE	55	4
AC60/70 + 2% Recycled PET	44	2
AC60/70 + 4% Recycled PET	46	2
AC60/70 + 6% Recycled PET	50	3
AC60/70 + 8% Recycled PET	54	3

ภาคผนวก ข

ผลการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม



ตาราง ข.1 การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม

ขนาดของมวลรวม	ความถ่วงจำเพาะ			เฉลี่ย
	#1	#2	#3	
เบอร์ 4	2.82	2.61	2.61	2.68
เบอร์ 3/8	2.67	2.66	2.65	2.66
เบอร์ 1/2	2.67	2.67	2.58	2.64

ตาราง ข.2 การทดสอบความสึกหรอ

ขนาดของมวลรวม	ความสึกหรอ (%)			เฉลี่ย
	#1	#2	#3	
เบอร์ 4	38.27	36.67	35.70	36.88
เบอร์ 3/8	36.21	36.75	36.09	36.35
เบอร์ 1/2	36.44	34.68	36.07	35.73

ตาราง ข.3 การทดสอบค่าครรชนีความแบน

ขนาดของมวลรวม	ครรชนีความแบน			เฉลี่ย
	#1	#2	#3	
เบอร์ 4	-	-	-	-
เบอร์ 3/8	30.48	37.98	32.13	33.53
เบอร์ 1/2	40.49	40.01	35.09	28.53

ตาราง ข.4 การทดสอบค่าครรชนีความยาว

ขนาดของมวลรวม	ครรชนีความแบน			เฉลี่ย
	#1	#2	#3	
เบอร์ 4	-	-	-	-
เบอร์ 3/8	39.07	39.65	40.01	39.58
เบอร์ 1/2	55.12	57.99	55.26	56.12

ตาราง ข.5 การทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อน

ขนาดของมวลรวม	ความคงทนต่อการกัดกร่อน (%)			เฉลี่ย
	#1	#2	#3	
เบอร์ 4	1.44	1.31	1.34	1.365
เบอร์ 3/8	1.24	1.16	1.19	1.199
เบอร์ 1/2	1.28	1.10	1.36	1.249

ตาราง ข.6 การทดสอบค่าเทียบเท่าทราย

ขนาดของมวลรวม	ค่าเทียบเท่าทราย (%)			เฉลี่ย
	#1	#2	#3	
เบอร์ 4	56.67	58.33	56.67	57.22

ภาคผนวก ก

การทดสอบคุณสมบัติของสโตนมาستيكแอสฟัลต์



ตาราง ก.1 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	%AC	ตย.ที่	นน.ซังในอากาศ	นน.อิมคัวผิวแห้ง	นน.ซังในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70	6	1	1229.62	1240.61	712.21	528.40	2.327	17.13	5.74	4.76	
	6	2	1229.74	1240.72	712.22	528.50	2.327	17.14	5.75	5.18	
	6	3	1229.63	1240.78	712.22	528.56	2.326	17.16	5.77	8.83	
	เฉลี่ย									5.75	5.05
	6.5	1	1240.74	1251.88	720.69	531.19	2.335	17.22	4.75	4.56	
	6.5	2	1240.62	1251.71	720.67	531.04	2.336	17.20	4.73	4.68	
	6.5	3	1240.69	1251.76	720.67	531.09	2.336	17.20	4.73	8.00	
	เฉลี่ย									1	4.62
	7	1	1249.85	1256.84	725.66	531.18	2.353	17.00	3.42	3.80	
	7	2	1249.63	1256.61	725.64	530.97	2.353	16.98	3.40	4.19	
	7	3	1249.58	1256.57	725.61	530.96	2.353	16.98	3.40	7.45	
	เฉลี่ย									3.40	4.06

ตาราง ก.2 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70+2%SBS

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซังในอากาศ	นน.อิมคัวผิวแห้ง	นน.ซังในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+2% Virgin SBS	6	1	1215.87	1222.89	700.15	522.74	2.3259	17.56	5.15	5.47	
	6	2	1216.94	1223.26	700.17	523.09	2.3264	17.55	5.13	5.59	
	6	3	1216.23	1223.14	699.98	523.16	2.3247	17.61	5.20	9.50	
	เฉลี่ย									5.16	5.73
	6.5	1	1233.44	1237.96	710.11	527.85	2.3367	17.57	4.08	6.54	
	6.5	2	123.64	1238.35	710.14	528.21	2.3374	17.55	4.06	6.66	
	6.5	3	1233.65	1238.24	710.14	528.10	2.3360	17.60	4.11	9.83	
	เฉลี่ย									4.08	6.60
	7	1	1243.52	1258.64	725.35	533.29	2.3317	18.13	3.67	5.11	
	7	2	1242.57	1259.64	725.36	534.28	2.3256	18.34	3.92	5.18	
	7	3	1245.69	1262.36	726.39	535.97	2.3241	18.40	3.98	8.69	
	เฉลี่ย									3.85	5.05

ตาราง ก.3 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70+4%SBS

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซังในอากาศ	นน.อิมตัวผิวแห้ง	นน.ซังในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+4% Virgin SBS	6	1	1216.93	1224.85	699.74	525.11	2.3174	17.87	5.50	6.55	
	6	2	1217.49	1225.81	700.86	524.95	2.3192	17.80	5.43	6.91	
	6	3	1217.94	1226.48	699.98	526.50	2.3132	18.01	5.67	9.83	
	เฉลี่ย									5.53	6.84
	6.5	1	1230.38	1235.73	700.94	534.79	2.3006	18.84	5.56	5.79	
	6.5	2	1232.21	1237.78	702.25	535.53	2.3009	18.83	5.55	5.92	
	6.5	3	1230.98	1235.73	700.92	534.81	2.3017	18.81	5.52	9.26	
	เฉลี่ย									5.55	5.86
	7	1	1258.44	1260.72	719.25	541.47	2.3241	18.40	4.09	4.80	
	7	2	1258.48	1261.78	719.64	542.14	2.3213	18.50	4.10	4.93	
	7	3	1260.69	1262.26	719.19	543.07	2.3214	18.49	4.09	8.83	
	เฉลี่ย									4.06	4.87
	7.5	1	1270.44	1272.78	725.96	546.82	2.3233	18.81	3.40	4.56	
	7.5	2	1271.36	1272.96	725.24	547.72	2.3211	18.88	3.49	4.68	
	7.5	3	1269.64	1271.83	725.78	546.05	2.3251	18.74	3.33	8.63	
	เฉลี่ย									3.41	4.62

ตาราง ก.4 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70+6%SBS

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซังในอากาศ	นน.อิมตัวผิวแห้ง	นน.ซังในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+6% Virgin SBS	6	1	1220.96	1229.64	700.63	529.01	2.3080	18.20	5.88	5.79	
	6	2	1220.46	1229.41	700.46	528.95	2.3073	18.22	5.91	5.71	
	6	3	1220.59	1229.53	700.51	529.02	2.3072	18.23	5.91	9.25	
	เฉลี่ย									5.90	5.65
	6.5	1	1239.96	1251.16	715.29	535.87	2.3139	18.38	5.02	5.54	
	6.5	2	1240.51	1251.29	715.36	535.93	2.3146	18.35	4.99	5.67	
	6.5	3	1240.12	1251.25	715.31	535.94	2.3139	18.38	5.02	9.50	
	เฉลี่ย									5.01	5.60
	7	1	1248.62	129.96	723.65	536.31	2.3281	18.26	3.82	4.92	
	7	2	1248.41	1259.74	723.57	536.17	2.3283	18.25	3.81	4.80	
	7	3	1248.33	1259.48	723.55	535.93	2.3292	18.22	3.77	8.20	
	เฉลี่ย									3.80	4.86

ตาราง ก.5 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70+8%SBS

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซั่งในอากาศ	นน.อิมตัวผิวแห้ง	นน.ซั่งในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+8% Virgin SBS	6	1	1225.55	1235.59	705.29	530.30	2.3110	18.09	5.76	4.80	
	6	2	1225.64	1235.72	705.41	530.31	2.3111	18.09	5.76	5.50	
	6	3	1225.72	1235.85	705.43	530.42	2.3108	18.10	5.77	9.35	
	เฉลี่ย								5.76	5.03	
	6.5	1	1233.54	1243.51	711.11	532.40	2.3169	18.27	4.90	4.92	
	6.5	2	1233.46	1243.39	711.11	532.28	2.3173	18.26	4.88	5.77	
	6.5	3	1233.81	1244.01	711.36	532.65	2.3163	18.29	4.92	8.73	
	เฉลี่ย								4.90	5.22	
	7	1	1240.55	1250.11	717.17	532.94	2.3277	18.27	3.83	4.31	
	7	2	1240.63	1250.23	717.19	533.04	2.3274	18.28	3.84	4.43	
	7	3	1240.39	1248.96	717.03	53.93	2.3318	18.13	3.66	7.52	
	เฉลี่ย								3.78	4.37	

ตาราง ก.6 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70+2%PET

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซั่งในอากาศ	นน.อิมตัวผิวแห้ง	นน.ซั่งในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+2% Recycled PET	6	1	1233.52	1240.81	709.38	531.43	2.3211	17.74	5.35	5.47	
	6	2	1233.48	1240.62	709.36	531.26	2.3218	17.71	5.32	5.54	
	6	3	1234.16	1241.15	709.44	531.71	2.3211	7.74	5.35	9.50	
	เฉลี่ย								5.34	5.60	
	6.5	1	1245.67	1251.80	714.76	714.76	2.3195	18.18	4.79	5.29	
	6.5	2	1245.87	1251.91	714.87	714.87	2.3198	18.17	4.78	5.35	
	6.5	3	1245.65	1251.78	714.67	714.67	2.3191	18.19	4.80	9.02	
	เฉลี่ย								4.79	5.42	
	7	1	1248.09	1255.10	719.58	719.58	2.3306	18.17	3.71	4.87	
	7	2	1248.26	1255.35	719.69	719.69	2.3303	18.18	3.73	5.17	
	7	3	1248.11	1255.21	719.58	719.58	2.3301	18.19	3.73	8.60	
	เฉลี่ย								3.72	5.11	

ตาราง ก.7 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70+4%PET

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซังในอากาศ	นน.อิมตัวผิวแห้ง	นน.ซังในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+4% Recycled PET	6	1	1231.54	1255.36	724.96	530.40	2.3219	17.71	5.32	5.67	
	6	2	1232.12	1255.79	724.14	531.65	2.3175	17.86	5.49	5.79	
	6	3	1231.66	1255.45	724.87	530.58	2.3213	17.73	5.34	9.19	
	เฉลี่ย									5.38	5.73
	6.5	1	1247.56	1251.12	713.91	537.21	2.3223	18.08	4.68	5.05	
	6.5	2	1246.48	1250.98	713.86	537.12	2.3207	18.14	4.74	4.92	
	6.5	3	1246.97	1251.11	714.01	537.10	2.3217	18.10	4.70	9.43	
	เฉลี่ย									4.71	4.99
	7	1	1252.57	1264.93	726.64	538.29	2.3269	18.30	3.87	4.80	
	7	2	1252.64	1265.21	726.68	538.53	2.3260	18.33	3.90	4.75	
	7	3	1254.39	1266.61	726.43	540.18	2.3222	18.47	4.06	8.71	
	เฉลี่ย									3.94	4.86

ตาราง ก.8 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70+6%PET

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซังในอากาศ	นน.อิมตัวผิวแห้ง	นน.ซังในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+6% Recycled PET	6	1	1235.59	1246.86	712.96	533.90	2.3143	17.98	5.63	6.63	
	6	2	1235.96	1246.92	713.11	533.81	2.3154	17.94	5.58	6.16	
	6	3	1235.64	1246.89	712.99	533.90	2.3144	17.98	5.62	9.35	
	เฉลี่ย									5.61	6.28
	6.5	1	1241.61	1252.62	717.62	535.00	2.3208	18.13	4.74	6.53	
	6.5	2	1241.76	1252.74	717.65	535.09	2.3207	18.14	4.74	6.65	
	6.5	3	1241.95	1252.91	717.73	535.18	2.3206	18.14	4.75	9.72	
	เฉลี่ย									4.74	6.59
	7	1	1245.39	1254.96	721.36	533.60	2.3339	18.05	3.58	5.23	
	7	2	1245.87	1255.45	721.54	533.91	2.3335	18.07	3.60	5.67	
	7	3	1245.62	1255.24	721.48	533.76	2.3337	18.06	3.59	8.28	
	เฉลี่ย									3.59	5.54

ตาราง ก.9 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70+8%PET

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซังในอากาศ	นน.อิมตัวผิวแห้ง	นน.ซังในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+8% Recycled PET	6	1	1233.23	1243.99	711.39	532.60	2.3156	17.93	5.58	4.75	
	6	2	1233.36	1244.24	711.48	532.76	2.3150	17.94	5.60	4.80	
	6	3	1234.14	1245.11	711.52	533.59	2.3129	18.03	5.69	8.89	
	เฉลี่ย									5.62	4.86
	6.5	1	1240.22	1251.57	717.56	534.01	2.3225	18.08	4.67	4.99	
	6.5	2	1240.25	1251.63	717.60	534.03	2.3224	18.08	4.68	4.75	
	6.5	3	1240.68	1251.95	717.84	534.11	2.3229	18.06	4.66	9.30	
	เฉลี่ย									4.67	5.05
	7	1	1243.69	1254.11	720.19	533.2	2.3294	18.22	3.77	4.68	
	7	2	1243.84	1254.26	720.25	534.01	2.3292	18.22	3.78	4.55	
	7	3	1243.98	1254.32	720.27	534.05	2.3293	18.22	3.77	7.84	
	เฉลี่ย									3.77	4.61

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70+2%HDPE

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซังในอากาศ	นน.อิมตัวผิวแห้ง	นน.ซังในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+2% Recycled HDPE	6	1	1222.20	1235.79	705.11	530.68	2.3031	18.38	6.09	6.65	
	6	2	1222.59	1236.96	705.16	531.80	2.2990	18.53	6.26	6.90	
	6	3	1223.15	1237.24	705.25	531.99	2.2992	18.52	6.25	10.56	
	เฉลี่ย									6.20	6.78
	6.5	1	1237.51	1246.59	709.72	536.87	2.3050	18.69	5.39	6.89	
	6.5	2	1237.64	1247.12	709.84	537.28	2.3035	18.75	5.45	6.30	
	6.5	3	1236.96	1246.11	710.16	535.95	2.3080	18.59	5.27	9.53	
	เฉลี่ย									5.37	6.59
	7	1	1242.61	1252.67	718.96	533.71	2.3282	18.26	3.82	6.74	
	7	2	1241.35	1251.98	718.75	533.23	2.3280	18.27	3.83	6.88	
	7	3	1241.78	1252.26	718.88	533.38	2.3281	18.26	3.82	9.70	
	เฉลี่ย									3.82	6.81

ตาราง ก.11 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70+ 4%HDPE

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซั่งในอากาศ	นน.อิมตัวผิวแห้ง	นน.ซั่งในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+4% Recycled HDPE	6	1	1232.14	1244.56	706.66	537.90	2.2906	18.82	6.59	6.54	
	6	2	1232.45	1245.63	706.78	538.85	2.2872	18.94	6.74	6.66	
	6	3	1231.97	1244.14	706.45	537.69	2.2912	18.80	6.57	10.08	
	เฉลี่ย									6.63	6.60
	6.5	1	1247.96	1257.84	717.65	540.19	2.3102	18.51	5.18	6.18	
	6.5	2	1247.84	1256.96	717.56	539.40	2.3134	18.40	5.05	7.6	
	6.5	3	1247.92	1256.62	717.61	539.01	2.3152	18.33	4.97	10.20	
	เฉลี่ย									5.06	6.47
	7	1	1252.49	1263.36	727.81	535.55	2.3387	17.89	3.38	5.91	
	7	2	1253.51	1265.34	727.95	537.39	2.3326	18.11	3.64	6.04	
	7	3	1252.66	1265.11	727.02	538.09	2.3280	18.27	3.83	8.58	
	เฉลี่ย									3.62	5.97

ตาราง ก.12 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 +6%HDPE

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซั่งในอากาศ	นน.อิมตัวผิวแห้ง	นน.ซั่งในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+6% Recycled HDPE	6	1	1240.76	1252.63	710.26	542.37	2.2876	18.92	6.71	7.15	
	6	2	1240.45	1252.53	710.17	542.36	2.2871	18.94	6.73	7.02	
	6	3	1240.58	1252.58	710.23	542.35	2.874	18.93	6.72	10.65	
	เฉลี่ย									6.72	6.79
	6.5	1	1247.67	1258.84	718.54	540.30	2.3092	18.54	5.21	6.78	
	6.5	2	1247.69	1258.87	718.55	540.32	2.3091	18.54	5.22	6.90	
	6.5	3	1247.76	1258.94	718.59	540.35	2.3091	18.54	5.22	10.64	
	เฉลี่ย									5.21	6.84
	7	1	1250.35	1261.87	724.22	537.65	2.3256	18.35	3.92	6.41	
	7	2	1250.71	1261.95	724.45	537.50	2.3269	18.30	3.87	6.53	
	7	3	1250.43	1261.89	724.25	537.64	2.3257	18.34	3.91	9.02	
	เฉลี่ย									3.90	6.47

ตาราง ก.13 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70+8%HDPE

ชนิดวัสดุเชื่อมประสาน	ลำดับ	ตย.ที่	นน.ซั่งในอากาศ	นน.อิมตัวผิวแห้ง	นน.ซั่งในน้ำ	ปริมาตรรวม	ความหนาแน่นรวม	VMA	AV	เสถียรภาพ (กิโลนิวตัน)	
AC60/70+8% Recycled HDPE	6	1	1247.69	1257.67	715.59	542.08	2.3016	18.43	6.14	6.78	
	6	2	1247.86	1257.84	715.61	542.23	2.3013	18.44	6.16	6.90	
	6	3	1248.97	1258.98	715.74	543.24	2.2991	18.52	6.25	9.44	
	เฉลี่ย									6.18	6.84
	6.5	1	1250.57	1262.22	723.12	539.10	2.3197	18.17	4.78	6.65	
	6.5	2	1250.34	1262.14	723.89	538.25	2.3229	18.06	4.65	6.78	
	6.5	3	1250.46	1262.18	723.91	538.27	2.3231	18.05	4.64	9.98	
	เฉลี่ย									4.69	6.72
	7	1	1253.63	1263.96	725.11	538.85	2.3264	18.32	3.88	5.54	
	7	2	1254.71	1264.91	725.13	539.78	2.3244	18.39	3.97	5.54	
	7	3	1253.94	1264.14	725.11	539.03	2.3262	18.32	3.89	8.47	
	เฉลี่ย									3.92	5.54

ตาราง ก.14 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหล

ชนิดของวัสดุเชื่อม ประสาน	% AC	Blow	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ปริมาตร	ค่าที่อ่าน ได้	เสถียรภาพ (kN)	การไหล (มม.)	
AC60/70	6	50	10.25	7.00	577.32	40	4.76	5.20	
	6	50	10.21	6.98	571.18	42	5.18	5.24	
	6	50	10.20	7.00	570.73	400	8.83	5.24	
	เฉลี่ย							5.05	5.22
	6.5	50	10.17	6.95	563.73	37	4.56	5.64	
	6.5	50	10.18	6.96	565.24	38	4.68	5.66	
	6.5	50	10.20	6.98	569.51	362	8.00	5.63	
	เฉลี่ย							4.62	5.65
	7	50	10.23	6.99	573.27	32	3.80	6.00	
	7	50	10.22	6.97	571.48	34	4.19	6.02	
	7	50	10.21	7.00	572.82	337	7.45	5.98	
	เฉลี่ย							4.06	6.01
	AC60/70+2%Virgin SBS	6	50	10.23	6.99	573.68	46	5.47	5.36
6		50	10.23	7.01	575.89	47	5.59	5.40	
6		50	10.22	6.98	572.30	431	9.50	5.35	
เฉลี่ย							5.73	5.38	
6.5		50	10.20	6.89	562.16	53	6.54	5.60	
6.6		50	10.20	7.00	571.14	54	6.66	5.58	
6.5		50	10.19	7.02	571.65	446	9.83	5.54	
เฉลี่ย							6.60	5.59	
7		50	10.30	6.98	580.73	43	5.11	6.42	
7		50	10.19	6.99	596.21	42	5.18	6.45	
7		50	10.25	7.00	577.32	408	8.69	6.38	
เฉลี่ย							5.05	6.43	
AC60/70+2%Virgin SBS		6	50	10.22	7.00	573.53	55	6.55	5.54
	6	50	10.18	7.00	568.90	56	6.91	5.56	
	6	50	10.17	7.00	567.78	446	9.83	5.53	
	เฉลี่ย							6.84	5.55
	6.5	50	10.20	6.98	570.07	47	5.79	5.40	
	6.5	50	10.16	7.00	567.22	48	5.92	5.42	
	6.5	50	10.19	7.00	570.17	420	9.26	5.35	
	เฉลี่ย							5.86	5.41
	7	50	10.16	7.00	566.67	39	4.80	6.65	
	7	50	10.17	7.00	567.78	40	4.93	6.64	
	7	50	10.18	7.00	568.49	400	8.83	6.62	
	เฉลี่ย							4.87	6.64
	7.5	50	10.20	6.99	569.92	37	4.56	8.01	
	7.5	50	10.19	6.98	568.39	38	4.68	8.04	
	7.5	50	10.20	7.00	571.14	391	8.63	7.94	
	เฉลี่ย							4.62	8.02

ตาราง ก.14 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหล (ต่อ)

ชนิดของวัสดุเชื่อม ประสาน	% AC	Blow	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ปริมาตร	ค่าที่อ่าน ได้	เสถียรภาพ (kN)	การไหล (มม.)	
AC60/70+6%Virgin SBS	6	50	10.20	7.00	566.41	47	5.79	5.62	
	6	50	10.20	7.04	572.82	48	5.71	5.64	
	6	50	10.23	7.00	568.34	435	9.25	5.59	
	เฉลี่ย							5.65	5.63
	6.5	50	10.16	6.99	566.50	45	5.54	5.45	
	6.5	50	10.21	7.00	565.45	46	5.67	5.46	
	6.5	50	10.17	7.00	573.12	431	9.50	5.42	
	เฉลี่ย							5.60	5.45
AC60/70+6%Virgin SBS	7	50	10.19	6.95	566.50	40	4.92	6.72	
	7	50	10.16	6.99	565.45	39	4.80	6.74	
	7	50	10.22	6.99	573.12	385	8.20	6.68	
	เฉลี่ย							4.86	6.73
AC60/70+8%Virgin SBS	6	50	10.19	7.00	570.58	39	4.80	6.69	
	6	50	10.18	6.55	532.85	40	5.50	6.97	
	6	50	10.22	6.98	572.30	424	9.35	6.64	
	เฉลี่ย							5.03	6.83
	6.5	50	10.20	7.00	571.14	40	4.92	6.60	
	6.5	50	10.14	6.55	528.67	42	5.77	6.58	
	6.5	50	10.23	6.99	574.25	410	8.73	6.57	
	เฉลี่ย							5.22	6.59
	7	50	10.19	7.02	572.21	35	4.31	7.60	
	7	50	10.17	7.00	568.34	36	4.43	7.62	
	7	50	10.23	6.99	574.25	353	7.52	7.65	
	เฉลี่ย							4.37	7.61
AC60/70+2%Recycled PET	6	50	10.23	7.00	575.07	46	5.47	5.54	
	6	50	10.22	6.98	572.30	45	5.54	5.59	
	6	50	10.18	7.00	569.46	431	9.50	5.31	
	เฉลี่ย							5.60	5.56
	6.5	50	10.16	7.00	567.22	43	5.29	6.34	
	6.5	50	10.24	6.99	575.37	45	5.35	5.36	
	6.5	50	10.20	7.02	572.77	409	9.02	5.79	
	เฉลี่ย							5.42	5.35
	7	50	10.28	6.98	579.04	41	4.87	5.97	
	7	50	10.18	6.99	567.68	42	5.17	5.96	
	7	50	10.21	6.96	568.58	390	8.60	5.96	
	เฉลี่ย							5.11	5.96

ตาราง ก.14 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหล (ต่อ)

ชนิดของวัสดุเชื่อม ประสาน	% AC	Blow	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ปริมาตร	ค่าที่อ่าน ได้	เสถียรภาพ (kN)	การไหล (มม.)	
AC60/70+4%Recycled PET	6	50	10.16	7.00	567.22	46	5.67	4.96	
	6	50	10.19	7.00	570.58	47	5.79	4.99	
	6	50	10.26	7.00	577.88	432	9.19	4.97	
	เฉลี่ย							5.73	4.97
	6.5	50	10.20	7.00	571.14	41	5.05	4.97	
	6.5	50	10.19	7.00	569.61	40	4.92	5.02	
	6.5	50	10.17	6.98	566.16	428	9.43	5.28	
	เฉลี่ย							4.99	4.99
	7	50	10.17	6.99	566.97	39	4.80	5.49	
	7	50	10.22	7.00	573.38	40	4.75	5.52	
	7	50	10.18	6.99	567.68	395	8.71	5.45	
	เฉลี่ย							4.86	5.50
AC60/70+6%Recycled PET	6	50	10.17	6.90	559.27	52	6.63	4.65	
	6	50	10.20	6.95	567.06	50	6.16	4.68	
	6	50	10.19	7.00	570.02	424	9.35	5.01	
	เฉลี่ย							6.28	4.65
	6.5	50	10.18	6.95	565.24	51	6.53	5.20	
	6.5	50	10.23	6.96	562.61	53	6.65	5.24	
	6.5	50	10.20	6.86	570.32	441	9.72	5.32	
	เฉลี่ย							6.59	5.22
AC60/70+6%Recycled PET	7	50	10.23	7.00	574.51	44	5.23	5.51	
	7	50	10.18	6.95	564.84	46	5.67	5.49	
	7	50	10.17	6.98	566.16	375	8.28	5.56	
	เฉลี่ย							5.54	5.50
AC60/70+8%Recycled PET	6	50	10.26	7.05	582.01	40	4.75	5.84	
	6	50	10.16	6.99	566.41	39	4.80	5.86	
	6	50	10.16	6.98	564.64	403	8.89	6.23	
	เฉลี่ย							4.86	5.85
	6.5	50	10.24	7.01	576.04	42	4.99	6.54	
	6.5	50	10.23	7.00	574.10	40	4.75	6.52	
	6.5	50	10.21	6.90	563.68	422	9.30	6.38	
	เฉลี่ย							5.05	6.53
	7	50	10.20	6.95	567.06	38	4.68	6.59	
	7	50	10.23	6.87	563.84	37	4.55	6.57	
	7	50	10.15	7.01	565.95	355	7.84	6.54	
	เฉลี่ย							4.61	6.58

ตาราง ก.14 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหล (ต่อ)

ชนิดของวัสดุเชื่อม ประสาน	% AC	Blow	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ปริมาตร	ค่าที่อ่าน ได้	เสถียรภาพ (kN)	การไหล (มม.)	
AC60/70+2%Recycled HDPE	6	50	10.16	6.96	563.58	54	6.65	4.75	
	6	50	10.19	6.99	569.36	56	6.90	4.76	
	6	50	10.18	6.76	549.94	463	10.56	4.73	
	เฉลี่ย							6.78	4.75
	6.5	50	10.15	6.85	553.98	54	6.89	5.10	
	6.5	50	10.19	6.79	553.46	53	6.30	5.20	
	6.5	50	10.25	6.98	575.67	448	9.53	4.98	
	เฉลี่ย							6.59	5.15
	7	50	10.18	6.54	531.52	49	6.74	5.20	
	7	50	10.19	6.55	533.38	50	6.88	5.18	
	7	50	10.15	6.59	532.43	394	9.70	5.14	
	เฉลี่ย							6.81	5.19
AC60/70+4%Recycled HDPE	6	50	10.26	7.04	581.18	55	6.54	4.42	
	6	50	10.26	7.01	579.27	56	6.66	4.41	
	6	50	10.24	7.01	577.02	474	10.08	4.38	
	เฉลี่ย							6.60	4.42
	6.5	50	10.25	6.99	576.49	52	6.18	4.56	
	6.5	50	10.19	6.59	537.16	53	7.6	4.58	
	6.5	50	10.26	6.87	567.70	463	10.20	4.56	
	เฉลี่ย							6.47	4.57
	7	50	10.18	7.01	570.27	48	5.91	5.68	
	7	50	10.19	7.03	573.02	49	6.04	5.67	
	7	50	10.22	7.05	578.04	403	8.58	5.67	
	เฉลี่ย							5.97	5.67
AC60/70+6%Recycled HDPE	6	50	10.22	6.98	572.30	58	7.15	4.46	
	6	50	10.24	6.98	574.13	59	7.02	4.47	
	6	50	10.19	6.80	554.28	467	10.65	4.45	
	เฉลี่ย							6.79	4.46
	6.5	50	10.19	7.01	571.39	55	6.78	4.65	
	6.5	50	10.25	6.97	574.28	56	6.90	4.68	
	6.5	50	10.21	6.89	563.82	483	10.64	4.63	
	เฉลี่ย							6.84	4.66

ตาราง ก.14 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหล (ต่อ)

ชนิดของวัสดุเชื่อม ประสาน	% AC	Blow	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ปริมาตร	ค่าที่อ่าน ได้	เสถียรภาพ (kN)	การไหล (มม.)	
AC60/70+6%Recycled HDPE	7	50	10.19	7.02	572.21	52	6.41	5.79	
	7	50	10.18	7.00	569.46	53	6.53	5.76	
	7	50	10.20	7.01	571.55	409	9.02	5.72	
	เฉลี่ย							6.47	5.77
AC60/70+8%Recycled HDPE	6	50	10.20	6.99	570.47	55	6.78	4.98	
	6	50	10.21	6.89	563.27	56	6.90	4.97	
	6	50	10.25	6.91	569.90	428	9.44	4.97	
	เฉลี่ย							6.84	4.97
	6.5	50	10.19	7.00	570.58	54	6.65	5.35	
	6.5	50	10.18	7.00	569.46	55	6.78	5.31	
	6.5	50	10.19	6.99	569.21	453	9.98	5.24	
	เฉลี่ย							6.72	5.33
	7	50	10.20	6.99	569.92	45	5.54	6.41	
	7	50	10.22	6.98	572.30	45	5.54	6.45	
	7	50	10.21	6.99	572.00	384	8.47	6.38	
	เฉลี่ย							5.54	6.43

ตาราง ก.15 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม

ชนิดของวัสดุเชื่อม ประสาน	% AC	Blow	G _{mm}	G _{mb}	VMA	VCA _{MIX}	VCA _{dc}	เสถียรภาพ (kN)	การไหล (มม.)
AC60/70	6.8	50	2.428	2.329	18.111	39.19	41.37	4.33	5.87
	6.8	50	2.428	2.329	18.089	39.18	41.37	4.42	5.90
	เฉลี่ย							4.38	5.89
AC60/70+2%Virgin SBS	6.7	50	2.434	2.332	17.935	39.05	41.37	6.44	5.93
	6.7	50	2.434	2.332	17.934	39.05	41.37	6.18	5.95
	เฉลี่ย							6.31	5.94
AC60/70+4%Virgin SBS	7.0	50	2.418	2.321	18.533	39.52	41.37	5.30	6.65
	7.0	50	2.418	2.322	18.509	39.51	41.37	5.57	6.67
	เฉลี่ย							5.43	6.66
AC60/70+6%Virgin SBS	6.9	50	2.425	2.326	18.306	39.35	41.37	4.95	6.48
	6.9	50	2.425	2.327	18.273	39.32	41.37	4.95	6.52
	เฉลี่ย							4.95	6.50
AC60/70+8%Virgin SBS	6.9	50	2.425	2.325	18.313	39.35	41.37	4.45	7.41
	6.9	50	2.425	2.326	18.336	39.37	41.37	4.33	7.42
	เฉลี่ย							4.39	7.42
AC60/70+2%Recycled PET	6.9	50	2.429	2.328	18.221	39.28	41.37	5.20	5.84
	6.9	50	2.429	2.328	18.232	39.29	41.37	5.29	5.85
	เฉลี่ย							5.24	5.85
AC60/70+4%Recycled PET	7.0	50	2.426	2.326	18.368	39.40	41.37	4.80	5.51
	7.0	50	2.426	2.326	18.355	39.39	41.37	4.95	5.53
	เฉลี่ย							4.88	5.52
AC60/70+6%Recycled PET	6.8	50	2.431	2.329	18.129	39.21	41.37	6.22	5.39
	6.8	50	2.431	2.330	18.067	39.16	41.37	6.31	5.37
	เฉลี่ย							6.27	5.38
AC60/70+8%Recycled PET	6.9	50	2.428	2.328	18.223	19.28	41.37	4.73	6.57
	6.9	50	2.428	2.330	18.141	19.22	41.37	4.97	6.52
	เฉลี่ย							4.85	6.55
AC60/70+2%Recycled HDPE	6.9	50	2.426	2.323	18.390	39.41	41.37	6.30	5.18
	6.9	50	2.426	2.324	18.369	39.39	41.37	6.19	5.14
	เฉลี่ย							6.25	5.16
AC60/70+4%Recycled HDPE	6.9	50	2.429	2.329	18.197	39.27	41.37	6.55	5.45
	6.9	50	2.429	2.329	18.192	39.26	41.37	6.39	5.45
	เฉลี่ย							6.47	5.45
AC60/70+6%Recycled HDPE	6.9	50	2.431	2.326	18.377	39.41	41.37	6.39	5.78
	6.9	50	2.431	2.327	18.334	39.38	41.37	6.39	5.79
	เฉลี่ย							6.39	5.79
AC60/70+8%Recycled HDPE	7.0	50	2.423	2.325	18.422	39.44	41.37	5.56	6.46
	7.0	50	2.423	2.325	18.423	39.44	41.37	5.65	6.39
	เฉลี่ย							5.61	6.43

ตาราง ก.15 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม (ต่อ)

ชนิดของวัสดุเชื่อม ประสาน	% AC	Blow	G _{mm}	G _{mb}	VMA	VCA _{MIX}	VCA _{dc}	เสถียรภาพ (kN)	การไหล (มม.)
AC60/70+2%Virgin SBS	6.8	50	2.434	2.332	17.94	39.05	41.37	6.29	5.93
	6.8	50	2.434	2.332	17.94	39.06	41.37	6.38	5.91
	6.8	50	2.434	2.332	17.93	39.05	41.37	6.29	5.91
	เฉลี่ย								6.30
AC60/70+6%Recycled PET	6.7	50	2.429	2.329	18.13	39.21	41.37	6.20	5.37
	6.7	50	2.429	2.329	18.13	39.20	41.37	6.29	5.39
	6.7	50	2.429	2.330	18.07	39.16	41.37	6.29	5.39
	เฉลี่ย								6.27
AC60/70+2%Recycled HDPE	7.0	50	2.426	2.323	18.39	39.41	41.37	6.20	5.16
	7.0	50	2.426	2.323	18.39	39.41	41.37	6.20	5.14
	7.0	50	2.426	2.323	18.37	39.39	41.37	6.29	5.15
	เฉลี่ย								6.24



ตาราง ก.16 การทดสอบอัตราการไหลแยกตัวของตัวเชื่อมประสาน

วัสดุเชื่อมประสาน	%AC	นน.ภาชนะ	นน.ภาชนะ+นน.วัสดุ เชื่อมประสาน	นน.ภาชนะหลังเทวัสดุ เชื่อมประสานออก	อัตราการไหล แยกตัว	
AC60/70	6	395.09	1460.19	398.28	0.30	
	6	395.16	1458.07	397.78	0.25	
	6	395.27	1456.16	398.24	0.28	
	เฉลี่ย					0.28
	6.5	395.05	1465.17	398.95	0.36	
	6.5	394.87	1463.37	398.21	0.31	
	6.5	395.21	1464.44	398.87	0.34	
	เฉลี่ย					0.33
	7	395.75	1468.95	399.72	0.37	
	7	395.17	1469.72	399.64	0.42	
	7	395.08	1465.25	398.78	0.35	
	เฉลี่ย					0.36
	AC60/70+2%Virgin SBS	6	395.24	1458.89	397.86	0.25
		6	394.96	1457.82	396.97	0.19
6		396.12	1460.21	398.13	0.19	
เฉลี่ย					0.19	
6.5		395.57	1465.23	398.73	0.30	
6.5		395.13	1468.35	398.72	0.33	
6.5		395.24	1464.49	397.86	0.25	
เฉลี่ย					0.29	
7		394.31	1466.68	397.87	0.33	
7		395.65	1467.72	398.88	0.30	
7		394.97	1468.21	399.64	0.44	
เฉลี่ย					0.32	
AC60/70+4%Virgin SBS	6	395.67	1455.35	397.62	0.18	
	6	396.87	1457.74	397.74	0.08	
	6	397.72	1458.39	400.26	0.24	
	เฉลี่ย					0.21
	6.5	395.12	1465.85	398.15	0.28	
	6.5	395.26	1465.96	397.16	0.18	
	6.5	395.09	1470.7	397.89	0.26	
	เฉลี่ย					0.27
	7	394.94	1467.67	397.78	0.26	
	7	394.68	1466.56	398.32	0.34	
	7	395.12	1472.13	397.92	0.26	
	เฉลี่ย					0.26
	7.5	395.05	1470.14	398.17	0.29	
	7.5	395.16	1470.21	398.36	0.30	
	7.5	395.07	1472.02	398.24	0.29	
	เฉลี่ย					0.29

ตาราง ก.16 การทดสอบอัตราการไหลแยกตัวของตัวเชื่อมประสาน (ต่อ)

วัสดุเชื่อมประสาน	%AC	นน. ภาษาะ	นน.ภาษาะ+นน.วัสดุ เชื่อมประสาน	นน.ภาษาะหลังเทวัสดุ เชื่อมประสานออก	อัตราการไหล แยกตัว
AC60/70+6%Virgin SBS	6	395.24	1456.63	397.89	0.25
	6	395.12	1458.82	396.87	0.16
	6	395.09	1456.64	397.11	0.19
	เฉลี่ย				0.18
	6.5	396.12	1468.92	397.81	0.16
	6.5	395.32	1467.74	399.82	0.42
	6.5	395.11	1466.95	397.23	0.20
	เฉลี่ย				0.18
AC60/70+6%Virgin SBS	7	395.05	1468.83	398.96	0.36
	7	395.17	1467.65	397.24	0.19
	7	394.98	1466.72	397.86	0.27
	เฉลี่ย				0.28
AC60/70+8%Virgin SBS	6	395.65	1456.69	398.88	0.30
	6	396.62	1457.73	399.62	0.28
	6	395.18	1458.82	398.57	0.32
	เฉลี่ย				0.30
	6.5	395.15	1461.68	397.67	0.24
	6.5	395.24	1463.39	398.75	0.33
	6.5	395.16	1461.71	398.54	0.32
	เฉลี่ย				0.32
	7	394.89	1466.69	398.79	0.36
	7	395.56	1465.92	398.47	0.27
	7	395.09	1466.76	399.27	0.39
เฉลี่ย				0.38	
AC60/70+2%Recycled PET	6	395.07	1457.41	396.86	0.17
	6	395.14	1457.64	396.97	0.17
	6	395.26	1459.93	398.13	0.27
	เฉลี่ย				0.17
	6.5	395.25	1464.74	398.73	0.33
	6.5	396.17	1461.21	398.72	0.24
	6.5	395.26	1463.37	397.86	0.24
	เฉลี่ย				0.24
	7	395.65	1466.76	397.87	0.21
	7	395.09	1467.87	398.88	0.35
	7	394.94	1469.96	399.64	0.44
	เฉลี่ย				0.33

ตาราง ก.16 การทดสอบอัตราการไหลแยกตัวของตัวเชื่อมประสาน (ต่อ)

วัสดุเชื่อมประสาน	%AC	นน. ภาชนะ	นน.ภาชนะ+นน.วัสดุ เชื่อมประสาน	นน.ภาชนะหลังเทวัสดุ เชื่อมประสานออก	อัตราการไหล แยกตัว
AC60/70+4%Recycled PET	6	395.09	1456.87	396.79	0.16
	6	395.16	1457.63	396.87	0.16
	6	395.27	1456.37	397.11	0.17
	เฉลี่ย				0.16
	6.5	395.05	1466.35	397.81	0.26
	6.5	394.87	1467.59	397.82	0.28
	6.5	395.21	1469.95	397.23	0.19
	เฉลี่ย				0.27
	7	395.75	1470.7	398.96	0.30
	7	395.17	1468.95	397.24	0.19
	7	395.08	1469.82	397.86	0.26
	เฉลี่ย				0.28
AC60/70+6%Recycled PET	6	395.24	1456.93	396.62	0.13
	6	395.12	1460.28	396.84	0.16
	6	395.09	1459.91	396.37	0.12
	เฉลี่ย				0.14
	6.5	396.12	1464.62	397.72	0.15
	6.5	395.32	1463.25	397.21	0.18
	6.5	395.11	1459.94	397.14	0.19
	เฉลี่ย				0.17
AC60/70+6%Recycled PET	7	395.05	1466.69	396.76	0.16
	7	395.17	1467.37	397.84	0.25
	7	394.98	1469.7	396.93	0.18
	เฉลี่ย				0.17
AC60/70+8%Recycled PET	6	395.09	1459.94	397.28	0.21
	6	395.16	1456.61	397.37	0.21
	6	395.27	1457.23	397.23	0.18
	เฉลี่ย				0.20
	6.5	395.05	1462.29	397.29	0.21
	6.5	394.87	1461.16	397.01	0.20
	6.5	395.21	1465.54	397.24	0.19
	เฉลี่ย				0.20
	7	395.75	1470.79	398.02	0.21
	7	395.17	1468.83	398.14	0.28
	7	395.08	1468.98	397.41	0.22
	เฉลี่ย				0.21

ตาราง ก.16 การทดสอบอัตราการไหลแยกตัวของตัวเชื่อมประสาน (ต่อ)

วัสดุเชื่อมประสาน	%AC	นน.ภาชนะ	นน.ภาชนะ+นน.วัสดุเชื่อมประสาน	นน.ภาชนะหลังเทวัสดุเชื่อมประสานออก	อัตราการไหลแยกตัว
AC60/70+2%Recycled HDPE	6	395.24	1459.96	397.87	0.25
	6	394.96	1456.64	398.01	0.29
	6	396.12	1457.72	398.12	0.19
	เฉลี่ย				0.27
	6.5	395.57	1462.36	398.26	0.25
	6.5	395.13	1461.91	398.37	0.30
	6.5	395.24	1465.56	398.24	0.28
	เฉลี่ย				0.28
	7	394.31	1469.79	397.95	0.34
	7	395.65	1470.28	397.87	0.21
	7	394.97	1468.87	398.04	0.29
	เฉลี่ย				0.31
AC60/70+4%Recycled HDPE	6	395.09	1456.64	398.84	0.35
	6	395.16	1455.59	398.45	0.31
	6	395.27	1457.21	399.01	0.35
	เฉลี่ย				0.34
	6.5	395.05	1464.87	398.98	0.37
	6.5	394.87	1465.69	398.47	0.34
	6.5	395.21	1463.37	398.14	0.27
	เฉลี่ย				0.33
	7	395.75	1468.89	399.24	0.33
	7	395.17	1470.12	400.02	0.45
	7	395.08	1472.69	399.49	0.41
	เฉลี่ย				0.40
AC60/70+6%Recycled HDPE	6	395.24	1456.87	399.49	0.40
	6	395.12	1459.96	399.45	0.41
	6	395.09	1458.81	399.71	0.43
	เฉลี่ย				0.41
	6.5	396.12	1465.59	399.33	0.30
	6.5	395.32	1463.39	399.39	0.38
	6.5	395.11	1462.73	399.47	0.41
	เฉลี่ย				0.36

ตาราง ก.16 การทดสอบอัตราการไหลแยกตัวของตัวเชื่อมประสาน (ต่อ)

วัสดุเชื่อมประสาน	%AC	นน.ภาชนะ	นน.ภาชนะ+นน.วัสดุ เชื่อมประสาน	นน.ภาชนะหลังเทวัสดุ เชื่อมประสานออก	อัตราการไหล แยกตัว
AC60/70+6%Recycled HDPE	7	395.05	1470.59	400.01	0.46
	7	395.17	1468.96	400.14	0.46
	7	394.98	1468.82	400.24	0.49
	เฉลี่ย				0.47
AC60/70+8%Recycled HDPE	6	395.69	1456.67	400.39	0.44
	6	395.09	1458.83	399.14	0.38
	6	394.89	1457.74	400.36	0.51
	เฉลี่ย				0.45
	6.5	395.26	1463.93	399.15	0.36
	6.5	395.14	1467.46	399.02	0.36
	6.5	395.09	1465.34	398.98	0.36
	เฉลี่ย				0.36
	7	395.17	1470.72	400.64	0.51
	7	394.89	1468.83	399.82	0.46
	7	395.26	1472.53	400.74	0.51
	เฉลี่ย				0.49

ตาราง ก.17 การทดสอบอัตราการไหลแยกตัวของตัวเชื่อมประสานของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่
เหมาะสม

วัสดุเชื่อมประสาน	%AC	นน.ภาชนะ	นน.ภาชนะ+นน.วัสดุ เชื่อมประสาน	นน.ภาชนะหลังเทวัสดุ เชื่อมประสานออก	อัตราการไหล แยกตัว
AC60/70	6.8	395.09	1465.39	398.76	0.34
	6.8	395.16	1464.16	398.65	0.33
	6.8	395.09	1464.35	398.74	0.34
	เฉลี่ย				0.34
AC60/70+2%Virgin SBS	6.7	395.09	1463.31	398.13	0.28
	6.7	395.17	1463.39	398.25	0.29
	6.7	395.09	1463.27	398.37	0.31
	เฉลี่ย				0.29
AC60/70+4%Virgin SBS	7	395.16	1465.87	397.64	0.23
	7	395.21	1466.21	398.12	0.27
	7	395.09	1466.39	397.35	0.21
	เฉลี่ย				0.24
AC60/70+6%Virgin SBS	6.9	395.16	1465.79	397.61	0.23
	6.9	395.12	1465.61	397.15	0.19
	6.9	395.17	1465.82	397.73	0.24
	เฉลี่ย				0.22
AC60/70+8%Virgin SBS	6.9	395.09	1465.68	398.47	0.32
	6.9	395.07	1465.87	398.72	0.34
	6.9	395.12	1465.73	398.62	0.33
	เฉลี่ย				0.33
AC60/70+2%Recycled PET	6.9	395.19	1465.32	398.49	0.31
	6.9	395.21	1464.93	398.78	0.33
	6.9	395.09	1464.78	398.37	0.31
	เฉลี่ย				0.32
AC60/70+4%Recycled PET	7	395.19	1466.21	398.72	0.33
	7	395.12	1466.34	398.47	0.31
	7	395.09	1466.11	398.12	0.28
	เฉลี่ย				0.31
AC60/70+6%Recycled PET	6.8	395.09	1464.35	397.82	0.26
	6.8	395.09	1464.21	397.74	0.25
	6.8	395.16	1464.87	398.26	0.29
	เฉลี่ย				0.26
AC60/70+8%Recycled PET	6.9	395.16	1464.93	397.63	0.23
	6.9	395.16	1465.13	397.84	0.25
	6.9	395.21	1464.72	398.37	0.30
	เฉลี่ย				0.26

ตาราง ก.17 การทดสอบอัตราการไหลแยกตัวของตัวเชื่อมประสานของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม

วัสดุเชื่อมประสาน	%AC	นน.ภาชนะ	นน.ภาชนะ+นน.วัสดุเชื่อมประสาน	นน.ภาชนะหลังเทวัสดุเชื่อมประสานออก	อัตราการไหลแยกตัว
AC60/70+2%Recycled HDPE	6.9	395.09	1465.14	398.23	0.29
	6.9	395.09	1465.21	398.27	0.30
	6.9	395.14	1465.27	398.31	0.30
	เฉลี่ย				0.30
AC60/70+4%Recycled HDPE	6.9	395.09	1465.87	398.72	0.34
	6.9	395.09	1465.65	398.77	0.34
	6.9	395.16	1465.82	399.13	0.37
	เฉลี่ย				0.35
AC60/70+6%Recycled HDPE	7	395.21	1465.21	399.72	0.42
	7	395.16	1465.35	400.34	0.48
	7	395.13	1465.27	399.87	0.44
	เฉลี่ย				0.45
AC60/70+8%Recycled HDPE	7	395.09	1465.15	400.34	0.49
	7	395.1	1465.17	400.37	0.49
	7	395.17	1465.29	400.52	0.50
	เฉลี่ย				0.49



ตาราง ก.18 การทดสอบการรับแรงดึงทางอ้อม

ชนิดของวัสดุเชื่อม ประสาน	สภาวะ	%AC	Blows	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง	ความ สูง	ค่าที่อ่าน ได้	Tensile stress (kPa)	%TSR	
AC60/70+2%Virgin SBS	เปียก	6.7	50	101.6	67.9	96	92	72.17	
	เปียก	6.7	50	101.8	70.6	100	92		
	เปียก	6.7	50	101.7	71.6	100	91		
	เปียก	6.7	50	101.6	70.0	105	98		
	เปียก	6.7	50	101.8	71.4	106	96		
	เปียก	6.7	50	102.0	69.9	105	97		
	เฉลี่ย								94
	แห้ง	6.7	50	101.8	68.2	135	130		
	แห้ง	6.7	50	101.8	70.1	140	131		
	แห้ง	6.7	50	102.0	70.1	137	128		
	แห้ง	6.7	50	102.0	70.1	140	131		
	แห้ง	6.7	50	101.8	70.1	140	131		
	แห้ง	6.7	50	101.8	69.7	142	134		
	เฉลี่ย								131
AC60/70+6%Recycled PET	เปียก	6.8	50	102.0	68.7	77	72	84.70	
	เปียก	6.8	50	102.0	70.3	74	67		
	เปียก	6.8	50	102.2	70.1	83	76		
	เปียก	6.8	50	102.0	70.3	87	80		
	เปียก	6.8	50	101.6	70.1	88	81		
	เปียก	6.8	50	101.6	70.1	90	83		
	เฉลี่ย								77
	แห้ง	6.8	50	102.7	70.7	101	92		
	แห้ง	6.8	50	102.2	76.5	93	78		
	แห้ง	6.8	50	102.1	74.3	97	84		
	แห้ง	6.8	50	102.7	69.8	101	93		
	แห้ง	6.8	50	102.2	70.1	103	95		
	แห้ง	6.8	50	101.8	66.4	101	99		
	เฉลี่ย								90
AC60/70+8%Recycled HDPE	เปียก	6.9	50	102.9	71.6	115	104	85.89	
	เปียก	6.9	50	103.1	66.6	113	109		
	เปียก	6.9	50	102.0	68.4	117	111		
	เปียก	6.9	50	102.0	71.6	112	102		
	เปียก	6.9	50	102.4	70.8	110	101		
	เปียก	6.9	50	102.0	70.4	112	103		
	เฉลี่ย								105
	แห้ง	6.9	50	103.6	64.5	128	127		
	แห้ง	6.9	50	102.4	68.2	131	125		
	แห้ง	6.9	50	102.8	71.4	135	123		
	แห้ง	6.9	50	101.8	68.7	128	122		
	แห้ง	6.9	50	101.8	68.2	125	120		
	แห้ง	6.9	50	101.6	70.4	125	116		
	เฉลี่ย								122

ตาราง ก.19 การทดสอบค่า theoretical maximum density ของส่วนผสม

ชนิดของวัสดุเชื่อม ประสาน	ตย.	ตย.แห้ง	ขวด+น้ำ	ขวด+น้ำ+ตย.	Gmm	Gmb	Va	
AC60/70	1	535.84	1013.87	1328.72	2.329	2.425	3.949	
	2	535.26	979.98	1295.1	2.329	2.431	4.215	
	เฉลี่ย						2.428	4.082
AC60/70+2%SBS	1	533.71	1012.42	1326.83	2.332	2.434	4.187	
	2	534.59	977.79	1292.75	2.332	2.434	4.200	
	เฉลี่ย						2.434	4.194
AC60/70+4%SBS	1	536.42	1013.87	1328.54	2.321	2.419	4.039	
	2	536.27	978.23	1292.65	2.321	2.417	3.969	
	เฉลี่ย						2.418	4.004
AC60/70+6%SBS	1	535.46	1012.42	1326.96	2.326	2.424	4.050	
	2	535.62	978.86	1293.64	2.326	2.425	4.113	
	เฉลี่ย						2.425	4.082
AC60/70+8%SBS	1	535.62	1013.87	1328.62	2.325	2.425	4.108	
	2	535.49	979.67	1294.27	2.325	2.424	4.076	
	เฉลี่ย						2.425	4.092
AC60/70+2%PET	1	534.73	1012.42	1327.12	2.328	2.430	4.206	
	2	533.98	979.76	1293.87	2.328	2.429	4.141	
	เฉลี่ย						2.429	4.174
AC60/70+4%PET	1	535.67	1013.87	1328.76	2.326	2.426	4.131	
	2	534.86	978.59	1292.91	2.326	2.425	4.090	
	เฉลี่ย						2.426	4.110
AC60/70+6%PET	1	534.64	1012.42	1327.04	2.328	2.430	4.176	
	2	535.62	979.78	1295.16	2.328	2.432	4.255	
	เฉลี่ย						2.431	4.216
AC60/70+8%PET	1	534.57	1013.87	1328.24	2.328	2.428	4.106	
	2	535.46	978.35	1293.38	2.328	2.429	4.165	
	เฉลี่ย						2.428	4.136
AC60/70+2%HDPE	1	535.61	1012.42	1327.12	2.323	2.425	4.179	
	2	534.89	979.97	1294.47	2.323	2.427	4.276	
	เฉลี่ย						2.426	4.227
AC60/70+4%HDPE	1	535.41	1013.87	1328.89	2.329	2.429	4.143	
	2	535.71	979.86	1294.96	2.329	2.428	4.101	
	เฉลี่ย						2.429	4.122
AC60/70+6%HDPE	1	536.52	1012.42	1328.21	2.326	2.431	4.315	
	2	536.48	978.73	1294.64	2.326	2.432	4.377	
	เฉลี่ย						2.431	4.346
AC60/70+8%HDPE	1	536.67	1013.87	1328.94	2.324	2.422	4.018	
	2	534.51	978.67	1292.62	2.324	2.423	4.083	
	เฉลี่ย						2.423	4.050

ตัวอย่างการคำนวณ

ในตัวอย่างการคำนวณนี้ จะแสดงการคำนวณคุณสมบัติของ AC60/70

1. การคำนวณค่า Air voids

$$V_a = 100 \times \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right)$$

$$V_a = 100 \times \left(1 - \frac{2.326}{2.428} \right)$$

$$V_a = 4.198 \%$$

2. การคำนวณค่าช่องว่างของมวลรวมหยาบ (VCA)

$$VCA_{mix} = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{ca}} \times P_{ca} \right)$$

$$VCA_{mix} = 100 - \left(\frac{2.327}{2.663} \times 70.124 \right)$$

$$VCA_{mix} = 38.72$$

$$VCA_{drc} = \frac{G_{ca} \gamma_w - \gamma_s}{G_{ca} \gamma_w} ; \quad \gamma_s = \frac{5637}{3617.28}$$

$$VCA_{drc} = \frac{G_{ca} \gamma_w - \gamma_s}{G_{ca} \gamma_w} \quad \gamma_s = 1558.3 \text{ kg/m}^3$$

$$VCA_{drc} = \frac{(2.663 \times 988) - 1558.3}{2.663 \times 988}$$

$$VCA_{drc} = 41.37$$



ภาคผนวก ง

ปณิธานศัพท์

ปณิธานศัพท์ในวิทยานิพนธ์

Abrasion	ความสึกหรอ	หน้า	34
absorption	การดูดซึมน้ำ	หน้า	33
Air void	ค่าช่องว่างอากาศ	หน้า	6
Cracking	รอยแตก	หน้า	1
Density	ความหนาแน่น	หน้า	4
Draindown	การไหลแยกตัว	หน้า	1
Ductility	ความสามารถในการยืดตัว	หน้า	32
Durability	ความคงทน	หน้า	5
Elastic Recovery	ความยืดหยุ่นกลับ	หน้า	51
Elongation Index	ค่าดัชนีความยาว	หน้า	34
Fatigue Resistance	ความต้านทานความล้า	หน้า	5
Filler	สารผสมแทรก	หน้า	1
Flakiness Index	ดัชนีความแบน	หน้า	34
Flexibility	ความยืดหยุ่น	หน้า	5
Flow	ค่าการไหล	หน้า	7
Gradation	ขนาดกละของมวลรวม	หน้า	36
Indirect Tensile Test	ค่าแรงดึงทางอ้อม	หน้า	37
Limestone	หินปูน	หน้า	3
Mold	แบบหล่อ	หน้า	6
Optimum asphalt content	ปริมาณแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสม	หน้า	6
Rutting	ร่องล้อ	หน้า	1
Skidding Resistance	ความต้านทานการลื่นไถล	หน้า	1
Specific Gravity	ความถ่วงจำเพาะ	หน้า	10
Stability	ค่าความเสถียรภาพ	หน้า	2
Stabilizing Agent	วัสดุปรับปรุงคุณภาพ	หน้า	1
Stiffness	แรงกระทำ	หน้า	2
stress	ความเครียด	หน้า	9
Thermal cracking	รอยแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ	หน้า	2
viscosity	ความหนืด	หน้า	32
Void in mineral	ค่าช่องว่างของวัสดุมวลรวม	หน้า	7

ประวัติผู้เขียน

นายภานุวัฒน์ งามดี เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2533 ณ จังหวัดชลบุรี เริ่มการศึกษา
ระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนพิทยังสี จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมจากโรงเรียน
จุฬาราชวิทยาลัย ชลบุรี จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นปริญญาตรี จากสำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง ปี พ.ศ. 2556 ในระหว่างที่ทำการศึกษาระดับปริญญาตรี
สาขาวิศวกรรมขนส่ง มีความสนใจเกี่ยวกับแอสฟัลต์และเรื่องที่เกี่ยวข้อง จึงทำให้เกิดแรงจูงใจใน
การศึกษาต่อระดับปริญญาโท เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้กับตนเอง หลังจบ
การศึกษาระดับปริญญาตรีจึงเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมขนส่ง



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี